

## 神岡における長基線レーザーひずみ計の開発 Long-baseline laser strainmeter in Kamioka

高森 昭光<sup>1\*</sup>; 新谷 昌人<sup>1</sup>; 森井 亙<sup>2</sup>; 内山 隆<sup>3</sup>; 大橋 正健<sup>3</sup>; 寺田 聡一<sup>4</sup>

TAKAMORI, Akiteru<sup>1\*</sup>; ARAYA, Akito<sup>1</sup>; MORII, Wataru<sup>2</sup>; UCHIYAMA, Takashi<sup>3</sup>; OHASHI, Masatake<sup>3</sup>; TELADA, Souichi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 京都大学防災技術研究所, <sup>3</sup> 東京大学宇宙線研究所, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

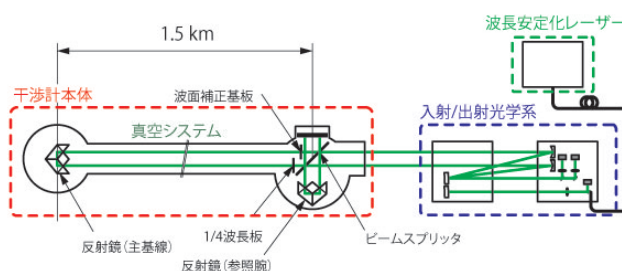
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>3</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, <sup>4</sup>National Institute for Advanced Industrial Science and Technology

現在、東京大学宇宙線研究所を中心として、レーザー干渉計による重力波天文学の創設を目指す「KAGRA 計画」が進められている。著者らはその一環として、岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下トンネルに 1.5 km の基線長を持つレーザーひずみ計の建設に取り組んでいる（左図）。この規模の長基線レーザーひずみ計は国内初の取り組みであり、完成すれば世界最長クラスの観測装置となる。基線長を長くすることによって、従来の 100 m クラスの装置よりもひずみ感度を 10 倍以上引き上げることが可能である。これによって、断層活動によるひずみの蓄積や地球内部振動のより詳細な観測が可能になるものと期待される。

ひずみ計の基本設計は従来の 100 m クラスの装置と同様、ヨウ素の吸収線を利用した波長安定化レーザーを長さの基準とした非対称マイケルソン干渉計である（右図）。しかしながら、装置の規模が拡大したことによって、光学素子のサイズや精度に対して技術的要求はより困難なものとなる。本発表では、開発中の装置の概要と開発状況について報告する。

キーワード: レーザー干渉計, ひずみ計, 神岡

Keywords: laser interferometer, strainmeter, Kamioka



## 月レーザー測距データ精密解析のためのソフトウェアの開発 その2 Development of software for precise LLR data analysis, Part 2

長澤 亮佑<sup>1\*</sup>; 大坪 俊通<sup>2</sup>; 関戸 衛<sup>3</sup>; 花田 英夫<sup>4</sup>  
NAGASAWA, Ryosuke<sup>1\*</sup>; OTSUBO, Toshimichi<sup>2</sup>; SEKIDO, Mamoru<sup>3</sup>; HANADA, Hideo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学, <sup>2</sup> 一橋大学, <sup>3</sup> 情報通信研究機構, <sup>4</sup> 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室  
<sup>1</sup> Graduate University for Advanced Studies, <sup>2</sup> Hitotsubashi University, <sup>3</sup> National Institute of Information and Communications Technology, <sup>4</sup> RISE Project Office, National Astronomical Observatory

月の軌道運動および回転運動, ならびに潮汐変形の決定を目的として, 月レーザー測距データ精密解析のためのソフトウェアの開発を行なっている。

研究の初期段階として, 最新の物理モデルを組み合わせた月レーザー測距観測モデルを構築した。モデルの構成要素には月の軌道運動および秤動をはじめ, 地球回転, 地球と月の固体潮汐, またレーザー光の伝播遅延として光行差, 大気遅延, 相対論効果などを考慮した。月の軌道暦は NASA ジェット推進研究所による月惑星暦 DE430, その他の各種物理モデルは IERS Conventions (2010) に準拠したものを使用している。軌道暦の読み出しを始め, 各要素の計算には宇宙測地解析ソフトウェア c5++ (大坪ほか, 本講演会, 2011) のモジュールを用いた。

観測値には Apache Point, Grasse, Matera, McDonald の4つの観測局で取得された normal point データのうち, 1996年6月から2013年7月までの3577ポイントを使用した。この観測値をモデルによる計算値と比較したところ, 残差の平均値は約5.7 cm, 標準偏差は約4.8 cmであった。

本発表では, 初期に行ったモデルと実データとの比較についての詳細, ならびに現在のソフトウェア開発状況について報告する。

キーワード: 月レーザー測距, 解析ソフトウェア, 軌道暦

Keywords: lunar laser ranging, analysis software, ephemeris

## SLR 衛星の光学応答に敏感な地球のスケールパラメータ Scale parameters of the Earth sensitive to the optical response of spherical SLR targets

大坪 俊通<sup>1\*</sup>; 松尾 功二<sup>2</sup>; Sherwood Robert A<sup>3</sup>; Appleby Graham M<sup>3</sup>; Neubert Reinhart<sup>4</sup>  
OTSUBO, Toshimichi<sup>1\*</sup>; MATSUO, Koji<sup>2</sup>; SHERWOOD, Robert a<sup>3</sup>; APPLEBY, Graham m<sup>3</sup>; NEUBERT, Reinhart<sup>4</sup>

<sup>1</sup>一橋大学, <sup>2</sup>京都大学, <sup>3</sup>NERC SGF Herstmonceux, UK, <sup>4</sup>GFZ Potsdam, Germany

<sup>1</sup>Hitotsubashi University, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>NERC SGF Herstmonceux, UK, <sup>4</sup>GFZ Potsdam, Germany

kHz レーザ測距技術などの進展により、今では SLR (衛星レーザ測距) による地上局・衛星間の測距精度はミリメートルの域に達している。このなかで、球形の SLR 衛星の大きさに起因する誤差が、高精度化を妨げる最大の要因になっている。あじさい・LAGEOS・ETALON についてはすでに Otsubo and Appleby (JGR, 2003) での研究があるが、本研究ではより小さな STARLETTE・STELLA・LARES に適用した。衛星の光学応答を Herstmonceux 局・Potsdam 局の実データであてはめるなどの解析を行った結果、STARLETTE・STELLA 衛星の重心補正值標準値は 3 mm 小さすぎたことが判明した。最大で、地球基準座標系に対しては、0.5 ppb、重力パラメータ GM に対しては 1.7 ppb の影響を与える量である。

長期にわたる SLR 観測方法の変化は、それらのスケールパラメータに系統誤差を与える可能性がある。検出器に入る光子の数が減ると、検出のタイミングが後ろにずれ、そして重心補正值は小さくなるはずである。これを考慮せずに解析を行うと、特に GM に対して無視できないレベルのインパクトがある。

キーワード: 宇宙測地, 衛星レーザ測距, 地球基準座標系

Keywords: space geodesy, satellite laser ranging, terrestrial reference frame

## VLBI 周波数比較への応用と GALA-V システムの開発 (III) VLBI application for Frequency Transfer and Development of GALA-V System (III)

関戸 衛<sup>1\*</sup>; 岳藤 一宏<sup>1</sup>; 氏原 秀樹<sup>1</sup>; 宮内 結花<sup>1</sup>; 堤 正則<sup>1</sup>; 長谷川 新吾<sup>1</sup>; ホビガー トーマス<sup>1</sup>; 市川 隆一<sup>1</sup>; 小山 泰弘<sup>2</sup>  
SEKIDO, Mamoru<sup>1\*</sup>; TAKEFUJI, Kazuhiro<sup>1</sup>; UJIHARA, Hideki<sup>1</sup>; MIYAUCHI, Yuka<sup>1</sup>; TSUTSUMI, Masanori<sup>1</sup>; HASEGAWA, Shingo<sup>1</sup>; HOBIGER, Thomas<sup>1</sup>; ICHIKAWA, Ryuichi<sup>1</sup>; KOYAMA, Yasuhiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター 時空標準研究室, <sup>2</sup> 情報通信研究機構 国際連携推進室  
<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, Space-Time Standards Laboratory, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, International Relations Office

NICT は、遠隔周波数比較技術の一つとして VLBI を使った周波数比較技術の開発を進めている。その重要な要素である移設可能な小型広帯域の VLBI 局は、次世代の測地 VLBI 技術の国際標準仕様として各国で開発がすすめられている VGOS (VLBI2010 Global Observing System) 仕様に部分準拠した広帯域の VLBI システム (Gala-V) として開発を進めている。このシステムは周波数標準の比較を目的としているが、もちろん測地観測も同様に可能である。

[大型アンテナの広帯域フィード開発]

各国で建設がすすめられている VGOS システムでは、2-14GHz の広帯域観測のためにビーム角の広いフィードを使用しており、これに対応したリングフォーカスと呼ばれる特別な光学系を採用している。これは 3 オクターブに迫る広い周波数帯域に感度を持つフィードは一般にビーム角が広いためであり、このため従来の広帯域フィードは、既存のカセグレンアンテナへの搭載が困難であった。我々は修正カセグレン方式の 34m アンテナに搭載可能な新しい広帯域フィードを独自開発しており、6.4-15GHz が観測可能なフィード試作器を 2013 年末に 34m アンテナに搭載し、6.7GHz, 12.2GHz のメタノールメーザの同時観測に成功した。

[ゼロ冗長周波数配列—ダイレクトサンプリング]

NICT の開発する Gala-V システムでは、2-14GHz の帯域から、1 GHz 帯域幅の 4 つのバンドをゼロ冗長配列となる周波数間隔で取得する。これにより不定性 (Ambiguity) のない遅延分解関数がえられ、従来より 1 桁高い精度の遅延計測が可能となる。Gala-V システムでは従来のアナログ周波数変換方式に加えて、高速サンプリングを使って周波数変換なしにデータを取得するダイレクトサンプリングを使い、デジタルフィルタで特定の周波数帯域を取得する方式を試験的に採用している。ダイレクトサンプリング方式が確立すれば、システムに必要な機材・コストが簡略化・削減できる。

[広帯域信号合成技術の開発]

VGOS システムでは、2-14GHz の広帯域の信号を位相合成して高精度の遅延を計測する。従来にない超広帯域の信号を合成するため、広帯域の安定した位相校正信号と、電離層による非直線性の位相変動を推定しながら、群遅延を高精度に求める新しい処理ソフトウェアが必要となる。

キーワード: 超長基線電波干渉計, VGOS, 周波数比較

Keywords: VLBI, VGOS, Frequency Comparison



## 石岡 VLBI 観測施設の整備 ～アンテナの完成と試験・調整～ Ishioka VLBI Observing Facility - Telescope Completion and Setting up the System -

栗原 忍<sup>1\*</sup>; 福崎 順洋<sup>1</sup>; 黒田 次郎<sup>1</sup>; 川畑 亮二<sup>1</sup>; 若杉 貴浩<sup>1</sup>  
KURIHARA, Shinobu<sup>1\*</sup>; FUKUZAKI, Yoshihiro<sup>1</sup>; KURODA, Jiro<sup>1</sup>; KAWABATA, Ryoji<sup>1</sup>; WAKASUGI, Takahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup>GSI of Japan

国土地理院は、国際 VLBI 事業 (IVS) が推進する次世代 VLBI 観測システム (VGOS) に対応した新しい VLBI 観測局の整備を進めてきた。2014 年 3 月までに茨城県石岡市に 13.2m の主鏡を持つ VLBI アンテナが完成し、観測の運用に向けてアンテナからデータ取得装置まですべてのシステムの試験・調整作業が進められている。発表では、完成した VLBI 観測施設と作業の進捗状況について報告する。

キーワード: 国際 VLBI 事業, 次世代 VLBI 観測システム

Keywords: IVS, VGOS

## マルチ GNSS による高精度測位技術の開発—統合解析の実現に向けて— Development of a new precise positioning technique using multi-GNSS signals

古屋 智秋<sup>1\*</sup>; 酒井 和紀<sup>1</sup>; 万所 求<sup>1</sup>; 辻 宏道<sup>1</sup>; 山口 和典<sup>1</sup>; 宮川 康平<sup>1</sup>; 矢萩 智裕<sup>1</sup>; 畑中 雄樹<sup>1</sup>; 宗包 浩志<sup>1</sup>; 川元 智司<sup>1</sup>

FURUYA, Tomoaki<sup>1\*</sup>; SAKAI, Kazuki<sup>1</sup>; MANDOKORO, Motomu<sup>1</sup>; TSUJI, Hiromichi<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Kazunori<sup>1</sup>; MIYAGAWA, Kohei<sup>1</sup>; YAHAGI, Toshihiro<sup>1</sup>; HATANAKA, Yuki<sup>1</sup>; MUNEKANE, Hiroshi<sup>1</sup>; KAWAMOTO, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup>GSI of Japan

国土地理院では、平成 23 年度より、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）による高精度測位技術の開発」（平成 23～26 年度）として、これまで GPS 測量が困難であったビル街等を含め、国土管理に必要な高精度測位の効率的な実施のため、米国の GPS をはじめ、日本の準天頂衛星、ロシアの GLONASS、EU の Galileo といった各国の衛星測位システムのデータを統合的に利用するマルチ GNSS 高精度測位技術の開発及び標準化に向けた検討を進めている。

平成 25 年度は、受信機の各衛星系回路間の遅延差に起因して発生する受信機ハードウェアバイアス（ISB）について複数の受信機・観測条件で検証を実施し、異なる衛星系間でも位相差を取る解析（統合解析）の実現に向けて ISB の補正方法を検討した。検討の結果、GPS-GLONASS 間では温度やアンテナ等の観測条件の違いで ISB が大きく変動し、GPS-準天頂衛星間、GPS-Galileo 間では安定していることが判明した。また、東京海洋大学で開発されたオープンソースの測位ソフトウェアである RTKLIB v2.4.2(Takasu, 2013) をベースに、Galileo や 3 周波解析が可能な測量用解析ソフトウェア（GSILIB）を開発した。

また、準天頂衛星を含むマルチ GNSS の観測が可能な受信機を利用して、日本全国 8 地区（苫小牧、つくば、長崎、糸満、東京、大阪、甲府、徳島）において GNSS 衛星の試験観測を行い、それら観測点を組み合わせることができる様々な基線について、GPS 信号のみで測量をする場合、準天頂衛星・GLONASS を加えて測量をする場合、複数の種類の受信機を用いて測量をする場合の各場合において解析を実施し、マルチ GNSS の効果や課題を評価した。特に東京地区においては、観測条件の厳しい複数の箇所での観測を実施し、都市部におけるマルチ GNSS の可能性を評価した。

なお、プロジェクトの実施にあたっては、外部有識者委員会を開催し、大学や関係機関のアドバイスを得ている。また、平成 25 年度は、ISB の補正方法の開発・検討にあたっては日立造船株式会社・東京海洋大学、GSILIB の開発にあたっては三菱スペース・ソフトウェア株式会社、試験観測にあたっては株式会社パスコが国土地理院の外注作業により実施した。

（プロジェクトホームページ：[http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss\\_main.html](http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html)）

キーワード: GNSS, 測量, ISB

Keywords: GNSS, Geodetic survey, ISB

## GEONET 測位解の品質と利用上の留意点について Notes on the quality of GEONET coordinate solutions

今給黎 哲郎<sup>1\*</sup>; 加川 亮<sup>1</sup>; 畑中 雄樹<sup>1</sup>; 宗包 浩志<sup>1</sup>  
IMAKIIRE, Tetsuro<sup>1\*</sup>; KAGAWA, Akira<sup>1</sup>; HATANAKA, Yuki<sup>1</sup>; MUNEKANE, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>GSI of Japan

国土地理院が運用し公開している GEONET の測位解は、地殻変動やテクトニクスの研究にとって基本的なデータとして広く活用されており、利用者は GNSS 観測や基線解析を行うことなく、測位解を利用して地殻変動・テクトニクス等の議論を行うことも可能となっている。しかしながら、GEONET の測位解には、アンテナ等の機器交換や観測点環境の変化、気象擾乱の影響など、GPS (GNSS) 測位に特有なノイズ・バイアス等、観測・解析の過程で品質に影響する誤差が混入する可能性があるため、その利用にあたっては、これらに留意する必要がある。講演では、これらのノイズ・バイアスの統計的な評価結果について概要を報告するとともに、国土地理院による地殻変動監視における測位解の品質の吟味方法について紹介する。

キーワード: GEONET, GNSS 測位, データ品質

Keywords: GEONET, GNSS positioning, Data quality

## 冬季実験データを用いたGNSSアンテナへの着雪による測位誤差評価 Positioning error estimation due to snow accumulation on GNSS antenna using winter experimental data

吉原 貴之<sup>1\*</sup>; 本吉 弘岐<sup>2</sup>; 佐藤 威<sup>2</sup>; 山口 悟<sup>2</sup>; 斎藤 享<sup>1</sup>

YOSHIHARA, Takayuki<sup>1\*</sup>; MOTOYOSHI, Hiroki<sup>2</sup>; SATO, Takeshi<sup>2</sup>; YAMAGUCHI, Satoru<sup>2</sup>; SAITO, Susumu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人電子航法研究所, <sup>2</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Electronic Navigation Research Institute, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

GPS など衛星航法システム (GNSS) を用いた精密測位において、GNSS アンテナに付着した雪 (着雪) によって測位解に誤差が生じることは早くから指摘され、知られている [1]。この影響はアンテナへの着雪の状態と衛星配置で時々刻々と変化するものと考えられるが、定量的な評価は重要である。本研究では、このような GNSS アンテナへの着雪の影響について、GNSS 受信データにおける受信強度低下、伝搬遅延を定量的に把握し、もたらされる位置決定誤差の評価が可能な観測データを取得する冬季実験を実施した。冬季実験は独立行政法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター露場内で、気象観測機器 (気圧、気温、湿度、風向風速、降水量、積雪深等) から約 50m 離れた地点に GPS アンテナを設置し、アンテナへの着雪の様子を定点巡回カメラで 10 分毎に撮影して 2011 年 / 2012 年冬季及び 2012 年 / 2013 年冬季の 2 回実施した。着雪の GNSS 受信データへの影響の評価方法として、GNSS アンテナに付着した雪の落下に伴う受信データの変動を定量的に調査した [2]。その結果、2011 年 / 2012 年冬季実験データからアンテナ上に 40cm 程度の高さまで成長した着雪が落下した際に、受信強度 (C/N0) が数 dB 変動するとともに、搬送波位相観測値のステップ状の変動から着雪により GPS 衛星視線方向に 4cm 程度の伝搬遅延が生じていたことが明らかとなった。発表では、これら実験データを基にした着雪の成長と測位誤差の関係を示すとともに、GPS 衛星毎の伝搬遅延と衛星配置の関係から導かれるシミュレーションによる検証結果を示す予定である。また、2012 年 / 2013 年冬季には着雪の影響を軽減する対策としてアンテナレドームに撥水塗料を塗布したが、この検証結果についても紹介する。

### References

[1] R. Jaldehag, J. Johansson, J. Davis and P. Elosegui, "Geodesy using the Swedish permanent GPS network: Effects of snow accumulation on estimates of site positions", *Geophys. Res. Lett.*, vol.23, No.13, pp.1601-1604, June 1996.

[2] T. Yoshihara, H. Motoyoshi, T. Sato, S. Yamaguchi and S. Saito, "GAST-D integrity risks of snow accumulation on GBAS reference antennas and multipath effects due to snow-surface reflection", *Proc. ION ITM 2013*, no.A1-5, pp.112-120, San Diego, CA, January 2013.

キーワード: GNSS, 着雪, 位置誤差, 精密測位, 伝搬遅延, GPS

Keywords: GNSS, snow accumulation, positioning error, precise positioning, propagation delay, GPS



## 沿岸部における GPS 連続観測への海面高の長周期変動成分の影響 Periodic displacement on continuous GPS observation in coastal area due to long term sea level elevation

大市 一芳<sup>1\*</sup>  
OICHI, Kazuyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部

<sup>1</sup> Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

海洋情報部では 1999 年から南関東の当庁所管験潮所等に設置している GPS 固定点で地殻変動監視観測を継続的に実施しており、下里本土基準点に設置した GPS 固定点との長基線解析により地球重心を基準とした精密位置決定を実施しているが、いくつかの観測局においては解析結果に顕著な年周変動が見られる。一方、この地域においては海上保安庁や気象庁の設置した験潮所が海面変動の連続観測を実施しており、毎時データが日本海洋データセンターにおいて公開されている。この GPS 解析結果の変動成分に対し、験潮所の海面観測によって得られた海面高の上下動から長周期成分を抽出して相関関数を求め、沿岸部における荷重変化の GPS 観測局に対する影響の評価を試みたのでこれを報告する。

2002 年以降、海洋情報部では伊豆諸島海域の GPS 固定局について 30 秒間隔の観測値と IGS 最終暦を使用して Bernese による下里水路観測所の GPS 局との基線解析を行い、地心座標系における 24 時間平均の精密位置を継続的に求め、同海域における地殻変動を監視し防災のための基礎情報として蓄積している。しかしながら、GPS の解析結果には定常的な地殻変動以外の成分が含まれており、特に伊豆大島局については南北方向の年周変動が顕著である。この変動は同島に設置された国土地理院の 4 箇所の電子基準点の位置変動と同期的であり、およそ一年の周期で見掛け上伊豆大島全体が膨張と収縮を繰り返している様子が分かる。

この歪みの主要因として局地的な荷重の変化が考えられるが、沿岸部であるため潮汐等の海水の移動による成分が大きいと予想できる。当該観測局の GPS による解析位置は日平均値であるため、潮汐の主要成分である日周期および半日周期の成分の影響は無視できるが、年周期などの長周期の成分については十分に考慮されていない。また、近傍の験潮所における海面高観測によると、年周期の変動も数十 cm 程度の振幅を持っており、沿岸部における長周期の海水荷重の変動は大きいと期待される。

GPS による地殻変動監視から年周変動成分を取り除くため、海面高の変動に伴う荷重変動に着目して解析を試みた。解析は、伊豆大島局、三宅島局、神津島局、八丈島局の 4 箇所の GPS 局における 2002 年以降の日平均精密位置の系列を対象とした。このうち、三宅島局、神津島局、八丈島局は験潮所に併設されているため、局位置における海面高変動との相関関数を求めた。伊豆大島局については灯台に併設であるため、同島内に設置された気象庁の岡田験潮所における海面高変動との相関関数を求めた。

キーワード: GPS, 潮汐観測, 地殻変動, 海面変動, 年周変動

Keywords: GPS, tidal observation, crustal deformation, sea level change, annual oscillation

## 50Hz サンプリングのGNSS観測によって取得された地震波動について Seismic waves detected by 50Hz sampled GNSS observations

加藤 照之<sup>1\*</sup>; 三浦 哲<sup>2</sup>; 生田 領野<sup>3</sup>  
KATO, Teruyuki<sup>1\*</sup>; MIURA, Satoshi<sup>2</sup>; IKUTA, Ryoya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 静岡大学理学研究科

<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., the University of Tokyo, <sup>2</sup>Grad. Sch. Sci., Tohoku University, <sup>3</sup>Faculty of Science, Shizuoka University

高頻度のGNSS観測を行うことで地震波動を取得したりそこから地震の破壊過程などを明らかにする研究が行われるようになった (e.g., Larson et al., 2003; Miyazaki et al., 2004; Yokota et al., 2009; Ohta et al., 2012). GEONETでも大部分の観測点で1Hzサンプリングのデータが取得されるようになり、今後このような高頻度サンプリングの観測研究が活発化することが期待される。1Hz程度ではそれほど問題にはならないが、さらに5Hz, 10Hzと、より高頻度のサンプリングを行った場合、GNSS受信機の特長による変位の振幅や位相にずれが生じることが知られている (e.g. Ebinuma and Kato, 2012)。これらのことに注意しつつ観測を行う必要がある。

我々は、高頻度サンプリングが可能な商用のGNSS受信機を用いて50Hzでの観測を実施してきた。これまでに、観測点近傍で発生した大きな地震に伴うデータを数回取得してきたが、その中で地震動と考えられる波動を捉えることができたので紹介する。GNSS受信機はTrimble社製Net R8型受信機を3台用いた。これら3台のうち1台を2011年10月に静岡大学構内に設置し、残りの2台は2012年3月から、2011年東北地方太平洋沖地震の余震活動の活発な茨城・福島県地域の上遠野及び大同東に設置した。観測は50Hzのデータを2週間程度のチェーンメモリ方式によって取得しつつある他、30秒毎の観測も実施している。3点での観測開始以来茨城県北部や福島県浜通り地方等で震度5弱以上の地震が発生した際にいわき市上遠野及び鹿島市大同東の両観測点については研究室から受信機に付設したルータを介して受信機メモリに直接ログインして50Hzサンプリングデータを回収した。静岡大学の観測点では手動によりデータを受信機からダウンロードする方式をとった。これまでに数回の震度5弱以上の地震によるデータを取得することができた。これらの地震前後の記録をRTNetソフトウェアによって解析している。

これらの地震データのうち、2013年9月20日2時25分(JST)頃に福島県浜通りで発生した地震(震源:北緯37.1度, 東経140.7度; M5.9; 深さ約20km; いずれも気象庁による)時の変動を捉えることに成功した。この時の最大震度はいわき市で震度5強であった。軌道暦はIGS最終暦を用いた。震源から約106kmのほぼ南に位置していた大同東、及び約308km南西に位置していた静岡大学をそれぞれ基準点として、震源のほぼ直上に位置していた上遠野観測点の座標変化を算出した。大同東-上遠野の基線においては3成分共明瞭な地震時の振動と考えられる波形が抽出された。基線が長い分静岡大学基準の記録の方がやや明瞭さを欠き、上下成分は不鮮明ではあるが、水平の2成分では明瞭な振動が捉えられている。

これら3観測点のうち、上遠野及び大同東は小学校の屋上にアンテナが設置されており、静岡大学ではかつて光波測量等に使われた観測棟にアンテナが設置されている。近傍に設置された強震動記録との比較などをおこないつつ、建物の振動の影響などを詳細に検討したいと考えている。さらにはGNSS受信機特性を考慮した振幅・位相特性の補正方法についても検討を進めていく必要がある。

キーワード: GNSS, 高頻度サンプリング, GPS, GPS地震学, 50Hz

Keywords: GNSS, high-frequency sampling, GPS, GPS seismology, 50Hz

## キネマティック PPP データによる噴煙柱検出の試み Detection of eruption column by using the kinematic precise point positioning

太田 雄策<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 植木 貞人<sup>1</sup>; 出町 知嗣<sup>1</sup>  
OHTA, Yusaku<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; UEKI, Sadato<sup>1</sup>; DEMACHI, Tomotsugu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku University, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University

We investigate the ability of kinematic precise point positioning to detect volcanic plumes at Minami-dake of Sakurajima Volcano. In Houlié et al. [1], the authors processed the GPS data obtained during the eruption of Miyakejima volcano, occurred in 2000, and found anomalous values in the ionosphere-free linear combination of the L1 and L2 phase measurements (LC). They related these anomalous values to the path delay effects caused by the presence of a hot volcanic plume; by applying techniques of seismic tomography. Another test was carried out during the eruption of Mt. St. Helens on March 9, 2005, and again the GPS signal showed a clear signature of the volcanic plume presence [2].

In this study, we describe the July 24, 2012 activity at Minami-dake of Sakurajima Volcano. We analyzed the data from 18 continuous GPS stations (3 GEONET sites and 15 Kyoto University sites), which located on the volcano flanks. For the GPS analysis, we used GIPSY-OASIS II version 6.1.4 software [3]. We estimated the post-fit phase residual in the ionosphere-free linear combination for each pair of GPS satellites and ground stations for the detection of eruption column. We applied absolute IGS phase center corrections for satellite and receiver antennas. The wet zenith tropospheric delays and its gradient at all the GPS sites were estimated at all processing epochs (every 30 seconds) under the assumption of a random walk stochastic model. Firstly, we analyze the all of the GPS data in July 21, 22 and 23, 2012 for the reference. Obtained post-fit phase residual of the reference days showed the noise-level for the path delay effects caused by the volcanic plume. This reference post-fit phase residual contained many noise sources such as multipath effects, local atmospheric disturbance, and so on. The noise level of the post-fit phase residual strongly depends on the each GPS satellite and ground station pair. Finally, we analyzed the data of the July 24, 2012. The post-fit phase residual clearly shows large disturbance just after the eruption. For example, the phase residual between SVN34 satellite and GEONET 0720, which located in the east coast of Sakurajima, suddenly increased just after the eruption. The obtained residual amount reached 80mm. It is clearly larger than the noise level measured on the reference days. Furthermore, other GPS satellite and ground station pairs also clearly showed significant amounts of disturbance. These results suggest that the eruption column moved to the westward by the wind after the eruptive event.

[1] Houlié et al. GRL, 2005. [2] Houlié et al. Eos Trans, 2005. [3] Lichten and Border, JGR, 1987.

## 東メコン地域に於ける次世代航空保安システムへの移行に係る空港座標測量手法 Airport survey method for transition to the new CNS/ATM systems in east Mekong area

中川 雄二<sup>1\*</sup>; 岡田 薫<sup>2</sup>; 島田 誠一<sup>3</sup>; 里村 幹夫<sup>3</sup>; 新出 陽平<sup>1</sup>; 伊藤 広和<sup>1</sup>; 請井 和之<sup>1</sup>  
NAKAGAWA, Yuji<sup>1\*</sup>; OKADA, Kaoru<sup>2</sup>; SHIMADA, Seiichi<sup>3</sup>; SATOMURA, Mikio<sup>3</sup>; SHINDE, Yohei<sup>1</sup>; ITOH, Hirokazu<sup>1</sup>  
; UKEI, Kazuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 株式会社 日豊, <sup>2</sup> 独立行政法人国際協力機構, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所, <sup>4</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup> Nippo Co., Ltd., <sup>2</sup> Japan International Cooperation Agency, <sup>3</sup> NIED, <sup>4</sup> Hot Springs Res. Inst, Kanagawa Pref.

独立行政法人国際協力機構 (JICA) の案件である「東メコン地域次世代航空保安システムへの移行に係る能力開発プロジェクト」(2011年1月~2015年12月)の企画競争に於いて、株式会社日豊が2011年5月から足掛け2年、6度に渡って採用された空港座標測量関係の業務を紹介する。

人工衛星技術を活用した航空機の航法及び航空管制に係る新技術である次世代航空保安システムの導入が1991年より国際民間航空機関 (ICAO) によって推進され各加盟国は新システムへの移行が求められている。この要求に答えるにはWGS84座標系の空港座標が必要である。今回のプロジェクトでは、ラオス、カンボジア、ベトナムに於いて測量を実施し、その手法を技術移転した。

空港座標測量の内容は空港内の滑走路両端、航空無線施設、管制塔や仏塔等の飛行障害物を測量することである。しかし、上記3ヶ国には公表されている正確なWGS84座標系の基準点がない為、一次及び二次基準点を空港内に設置し、一次基準点はGPS観測を3日間行い、周辺国のIGS基準点からバランスを考慮して5、6点を選択し長基線解析 (Bernese) した。二次基準点は一次基準点を与点としたGPS測量により座標を確定した。次にこれらの基準点から座標が必要な箇所をトータルステーションにより測量した。測量成果は現地滞在中のプロジェクト期間内に提出する必要があり衛星の迅速歴を用い、帰国後Gamitによる最終精密歴による解析で現地の結果を照査した。測量手法や測量成果の計算方法、精度の検証方法、データベース管理方法などの手法と技術移転の内容について述べる。

キーワード: WGS84, GPS, 次世代航空保安システム, 空港座標, 東メコン  
Keywords: WGS84, GPS, CNS/ATM, Airport coordinates, East Mekong area



## レーザースキャナーによる室野泥火山の上下変動の測定 Vertical deformations revealed by laser scanning surveys in the Muro no mud volcano

高橋 温志<sup>1\*</sup>; 福田 洋一<sup>1</sup>; 楠本 成寿<sup>2</sup>  
TAKAHASHI, Atsushi<sup>1\*</sup>; FUKUDA, Yoichi<sup>1</sup>; KUSUMOTO, Shigekazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 富山大学理学部  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Department of Earth Science

新潟県十日町市にある室野泥火山において、泥火山の活動に伴う地表面の変動を面的にとらえることを目的とし、TOPCON社製 Imaging Station IS-301 を用いた調査を行った。IS-301 は標的プリズムを精度よく測定するトータルステーションの機能に加え、地表面の3次元位置情報を自動的に取得するスキャナーモードを搭載している。室野泥火山では、富山大学により61点の水準点が設置されており、これまでも定期的な水準観測が実施されている。今回は、2013年6月と10月の二度の測定を行い、スキャナーモードによる測定に加えて、水準点でのトータルステーション機能による測定も行い、精度評価もあわせて行った。

スキャナーモードの測定で得られた2回の点群データから、まず、格子内のデータを平均する方法と、誤差関数を重みとして内挿する2通りの方法を用いて、それぞれ格子状の値を計算し、2回の測定値の差から変動量を算出した。その結果、内挿によるデータの差分として領域の一部で同心円状の隆起を示すシグナルがとらえられた。次にこの隆起を説明するために茂木モデルを用いてフォワード計算を行ったところ、最大で約1.5cm程度の隆起が予測され、これは、最近傍の水準点での測定値と良く一致した。点群データは個々の測定精度は劣るが空間解像度は優れており、隆起の様子を面的にとらえることができるため、隆起の変動源の推定といった目的に有用であることが示された。

キーワード: トータルステーション, レーザースキャナー, 泥火山, 上下変動, 茂木モデル  
Keywords: LaserRangeFinder, LaserScanningSurvey, Mud Volcano, Vertical Deformation, Mogi Model

## 丸い地球の準静的内部変形—きわめて高い次数での漸近展開 Asymptotic solutions to the quasi-static spheroidal and toroidal deformation of the SNREI earth

大久保 修平<sup>1\*</sup>; 高木 悠<sup>1</sup>  
OKUBO, Shuhei<sup>1\*</sup>; TAKAGI, Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

### [1] はじめに

点荷重や点震源によって生じる変形（グリーン関数）は、測地学的にも地震学的にも重要な役割を果たしてきた。例えば、球対称地球の表面に置かれた点荷重で生じる「地表」変形（Farrell, 1972）は、地殻変動連続観測や重力観測において、海洋潮汐荷重の補正などに活用されている。また点震源によって生じる、球対称地球の「表面」変形グリーン関数（Sun and Okubo 1992）は、巨大地震にともなう地殻変動や重力場変動の解析に活躍している。これらの表面変形に対するグリーン関数を計算するには、球面調和関数展開の次数  $n$  が  $\infty$  に近づくときの、「表面」でのスフェロイダル及びトロイダル変形（ラブ数）が必要となり、それについては Okubo (1988) によって与えられている。

一方、表面での変形だけではなく、地球内部に生じる応力や歪を計算するには、地球内部の変位、応力、ポテンシャルの球面調和展開係数（いわゆる  $y$  関数）をきわめて高い次数（次数  $n >$  数千～数万）で求める必要がある。

### [2] 手法

自己重力を考えた均質球の変形に対しては、変形場を球面調和関数展開を用いて、スフェロイダル場とトロイダル場に分けて議論することができる。それらの解は、Love (1911) が一般解を与えており、それは Takeuchi and Saito (1972) によってまとめられている。要点をいえば、動径距離  $r$  における  $y$  関数の一般解は、球ベッセル関数  $[j_n(k_n r), n_n(k_n r)]$  とべき級数  $[r^n, r^{-(n+1)}]$  とを用いた形で表示できる。第1種及び第2種ベッセル関数の引数  $k_n r$  は、次数  $n$  に概ね比例して大きくなる量であり、ここに漸近展開を施して、適当な境界条件を課せば解くことができる。

地表で収束する解としては（潮汐変形解、荷重変形解、シア変形解）があり（Saito 1974）、それぞれに対して応力、ポテンシャルの条件が定まっている。一方、これと同じ境界条件を満たしつつも、地球中心に向かって発散するような第2種解もある。第2種解は、点震源で生じる地球内部変形を求めるときに必要なもので、無視することはできない。

### [3] 結果

以上の手順にもとづいて、Okubo (1988) の理論を一部手直しして、スフェロイダル変形の一般解6種、トロイダル変形の一般解2種を導くことができた。講演では、さらにこれらの解の応用範囲について議論する予定である。

キーワード: 内部弾性変形, グリーン関数, SNREI モデル, 漸近展開

Keywords: Internal elastic deformation, Green's function, SNREI earth, Asymptotic expansion

## 同一基線における GNSS 測量機及び測距儀による観測距離の比較 Evaluation of uncertainty in distance measurement by GNSS surveying instrument and EDM

吉田 茂<sup>1\*</sup>; 佐藤 雄大<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Shigeru<sup>1\*</sup>; SATO, Yudai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院  
<sup>1</sup> GSI of Japan

国土地理院では、GNSS 測量機を用いた距離観測において、国際標準とのトレーサビリティを確立するための研究を実施している。距離（長さ）の基準は光の速さを元に定義されており、国際標準も光の速さで決められている。トレーサブルな測距をおこなうには、国際標準と関連づけられた光波測距儀（EDM）を使用すればよい。しかしながら、近年、あらゆる測量に使用されている GNSS 測量機は、観測距離に国際標準とのトレーサビリティが確保されていない。このため、今回の研究は、同一基線において GNSS 測量機と測距儀による観測を実施し、測定された距離を比較することで、GNSS 測量機における観測距離にトレーサビリティを持たせることを目標としている。

観測方法は、まず、長さの国際標準にトレーサブルな EDM を使用してトレーサビリティを持つ基線を作り、次に、その場所で GNSS 測量機を使用した観測を行い、EDM で得られた値と比較して拡張不確かさを求めることで、GNSS 測量機における観測距離にトレーサビリティを持たせることとした。研究のために、2km の基線を坂東市と常総市の境界を流れる利根川支流飯沼川の河川管理用道路に設置した。

EDM のトレーサビリティは「気象条件が変化しない屋内において 200m まで」保証されているので、できるだけその条件に近づけようと、2km の基線を分割し、それぞれの部分で気象補正を考慮した測距をおこなった。その結果から、部分ごとの最良推定値及び合成不確かさを求めたうえで、最終的に 2km 基線全体の拡張不確かさを求めた。

GNSS 測量機による観測は、各観測点で 6 時間の観測を行った。このうち、2km 基線全体に相当する基線で 3 回得られた観測距離と、EDM 観測で得られた最良推定値を元に、比較と拡張不確かさの推定をおこなった。

その結果、今回の基線の全長は、1,999.9828m、EDM による拡張不確かさは、 $1,999.9828 \pm 0.0014\text{m}$ 、GNSS 測量機による拡張不確かさは、 $1,999.9828 \pm 0.006\text{m}$  と算出、2km 基線におけるトレーサビリティの付与は問題ないと判断した。

キーワード: GNSS 測量機, 光波測距儀 (EDM), 不確かさ, トレーサビリティ  
Keywords: GNSS surveying instrument, EDM, Uncertainty, Traceability

## 松代の石英管伸縮計で観測されている東北地方太平洋沖地震後の東西方向の伸び続ける変化について Changes of E-W observed by the Quartz-tube Extensometer in the Matsushiro extending after the 2011 Tohoku Earthquake

橋本 徹夫<sup>1\*</sup>; 舟越 実<sup>1</sup>  
HASHIMOTO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; FUNAKOSHI, Minoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁精密地震観測室

<sup>1</sup> Matsushiro Seismic Observatory JMA

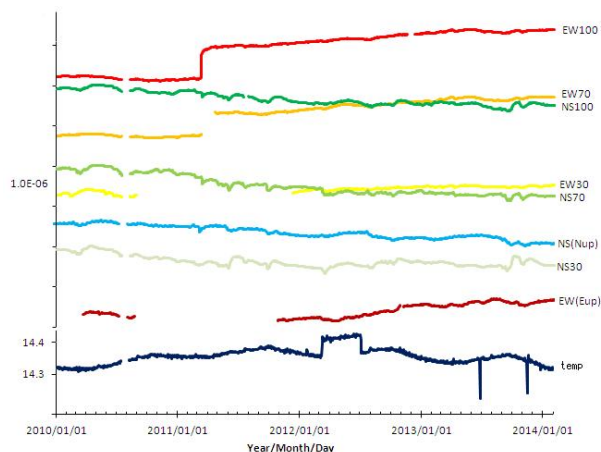
松代の伸縮計に、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の際には、コサイスミックステップとして  $5.8 \times 10^{-7}$  の東西方向の伸びが観測された。その後、1 ヶ月間ほど、余効変動と見られるうえに凸の伸びの  $0.4 \times 10^{-7}$  の変動が観測されており、さらにその後の 2011 年 10 月ごろから、揺らぎがあるものの伸び続ける変動が観測されており、 $0.5 \times 10^{-7}$  の変動となっている。同様の傾向が、松代や神岡の超伝導重力計に観測されている (今西, 私信) ことを考慮すると、この伸び変動は局所的なものではなく、実際の地殻変動を観測しているものと思われる。

図に 2010 年からの伸縮計、傾斜計、坑道内の気温、および、伸縮計の補助観測点の変化を示す。気温は、この期間で、およそ  $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$  の上昇があるが、石英管の温度感度が  $5.4 \times 10^{-7}$  であることを考慮すると、伸び変化に気温の影響はほとんど現れていないと思われる。また、複数観測点で伸び続ける現象が見られていることも、実際の変化を見ていることを示している。さらに、傾斜計においては、日が仕上がりの変化が続いている。伸縮計において、地震の波動 (図には表示されていない) からその後の余効変動に続く、地殻変動を一貫して統一的な計測器として捉えることができた。この伸び現象は、地質学的な隆起現象の一環を示しているのかもしれない。

謝辞: 東京大学地震研究所の今西祐一准教授から、松代と神岡の超伝導重力計の重力値が東北太平洋沖地震以後、減り続けていることをご教示いただきました。

キーワード: 伸縮計, 傾斜計, 余効変動, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋地震

Keywords: extensometer, tiltmeter, aftereffect, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake





## 円環外核赤道の扁平率 Equatorial flattening of the cylindrical outer core

角田 忠一<sup>1\*</sup>  
KAKUTA, Chuichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし

<sup>1</sup> none

Zhong et al.(2007) は Pangea 超大陸形成 (330 Ma) 間もなくアフリカ大陸の半球が出現し、低温の下降流を生じ、他方太平洋半球は高温上昇流を生じ、赤道帯に次数 1 の構造を形成したことを示した。最近の研究から CMB(core mantle boundary) 付近で OC(outer core) は mantle から軽元素が流入し、安定成層を形成し、超断熱温度勾配は  $1 \times 10^{-3} \text{Km}^{-1}$  となり、また熱伝導率は  $1 \times 10^{-3} \text{Wm}^{-1}$  となり、熱流束は  $100 \text{mWm}^{-2}$  以上となる。一方 mantle の CMB 付近では高温部 (perovskite:pv) および低温部 (post-perovskite:ppv) で熱流束は  $100 \text{mWm}^{-2}$  (pv),  $50 \text{mWm}^{-2}$  (ppv) となり、低温部では OC からの熱放出が考えられる。OC うすい円環として、自転軸のまわりに回転する流体とする。流体は低周波の運動を示すとし、その水平方向の圧力変化は密度変化に影響を及ぼさないとする近似 (Subseismic Approximation; Smylie and Rochester, 1981) を適用する。OC の熱流束は CMB 付近で中心距離増加方向に指数関数として減少するモデルを考える。これからポテンシャルの 1 次変化を求める。ポテンシャルの方位方向の変化は赤道扁平率の変化を表す。その最大値は CMB における平均重力ポテンシャルに対し、CMB において  $1.1 \times 10^{-5}$  の変化 (扁平率) を示す。この値は Szeto and XU(1997) の求めた OC の赤道扁平率変化  $6 \times 10^{-6}$  と比較できる。

キーワード: うすい円環外核, 熱流束, マントル内の熱流束, ポテンシャル, ポテンシャル変化, 外核の赤道扁平率

Keywords: thin cylindrical outer core, heat flux, heat flux in the mantle, potential, variation of potential, equatorial flattening of core

**A bias correction method for improving regularized solution in linear inverse ill conditioned models**  
**A bias correction method for improving regularized solution in linear inverse ill conditioned models**

SHEN, Yunzhong<sup>1\*</sup> ; XU, Peiliang<sup>2</sup> ; LI, Bofeng<sup>1</sup>  
SHEN, Yunzhong<sup>1\*</sup> ; XU, Peiliang<sup>2</sup> ; LI, Bofeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>1. College of Surveying and Geo-infomatics, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

<sup>1</sup>1. College of Surveying and Geo-infomatics, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Geodetic downward continuation and inverse problems are often ill conditioned, and regularization is used for deriving stable and better solutions. However, the regularized estimates of parameters and residuals are well known to be biased. Theoretically the biases of the estimated parameters and residuals can only be computed with the true values of parameters. Since we do not know the true values of parameters in practice, we attempt to improve the regularized estimates by using the regularized estimates themselves to replace the true parameters for estimating the biases and then removing the computed biases from the regularized estimates. Furthermore the biases are also removed from the residuals, and then the variance of unit weight of the observation noises is estimated with the bias-reduced residuals. We derive the analytical conditions for bias correction and show that the bias-corrected regularization performs better than the ordinary regularization in terms of mean squared errors. However, for estimating the variance of unit weight, the biases still need to be full removed from the residuals. We then present the numerical examples of gravity downward continuation to demonstrate the performance of our bias correction method for improving regularized solution. The results show that our bias correction method can successfully reduce the absolute biases of the regularized estimates, and improve the accuracies with more than 5 per cent. Moreover, by removing the biases from the residuals, the derived variance of unit weight is almost unbiased.

キーワード: Linear ill-conditioned model, Regularization solution, Bias correction, Gravity downward continuation, Variance of unit weight

Keywords: Linear ill-conditioned model, Regularization solution, Bias correction, Gravity downward continuation, Variance of unit weight

## 石垣島における超伝導重力計観測 (その3) Gravity observation using a superconducting gravimeter at Ishigakijima, Japan (part 3)

今西 祐一<sup>1\*</sup>; 名和 一成<sup>2</sup>; 田村 良明<sup>3</sup>; 池田 博<sup>4</sup>; 宮地 竹史<sup>3</sup>; 田中 愛幸<sup>1</sup>  
IMANISHI, Yuichi<sup>1\*</sup>; NAWA, Kazunari<sup>2</sup>; TAMURA, Yoshiaki<sup>3</sup>; IKEDA, Hiroshi<sup>4</sup>; MIYAJI, Takeshi<sup>3</sup>; TANAKA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 国立天文台, <sup>4</sup> 筑波大学

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>AIST, <sup>3</sup>NAOJ, <sup>4</sup>University of Tsukuba

国立天文台 VERA 石垣島観測局 (沖縄県石垣市) における超伝導重力計観測は、開始から約2年が経過した。この観測の主な目的は、八重山諸島の地下で発生する長期的スロースリップの信号を検出することである。この間、2012年5月、同12月、2013年7月と、3回のスロースリップイベントを経験した。このうち2012年の2回のイベントについては、イベント発生時の重力変化に加えて、その前後に長期的な重力の増加と減少のトレンドが見られることはすでに報告した。2013年7月のイベントは、ちょうど台風のシーズンに重なっており、停電も発生したために十分な品質で記録することができなかった。このほか、2013年4月に八重山諸島付近で発生した群発地震も重力に影響している。次のスロースリップイベントは2014年2月前後に発生すると予想されるので、発表の際はその記録も含めて最新のデータの解釈について報告する。

キーワード: 超伝導重力計, スロースリップ, 石垣島

Keywords: superconducting gravimeter, slow slip, Ishigakijima

## 地熱地域における臨時観測で得た gPhone 重力計のドリフトについて Various drift rates of gPhone gravimeters obtained from short-term observations at geothermal fields

名和 一成<sup>1\*</sup>; 宮川 歩夢<sup>1</sup>; 杉原 光彦<sup>1</sup>  
NAWA, Kazunari<sup>1\*</sup>; MIYAKAWA, Ayumu<sup>1</sup>; SUGIHARA, Mituhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

八丈島の温泉モニタリングを目的として、連続観測用スプリング相対重力計である gPhone 重力計 (Micro-g LaCoste 社製) が複数台導入された。2011 年 2 月から 2012 年 12 月にかけて、1~4 ヶ月間の連続観測を、異なる重力計・観測状況において断続的に実施した。取得したデータを使って重力計の安定性の指標となるドリフトを計算して比較した。その結果、得られたドリフト変化は、重力計や場所ごとに固有の特徴をもっていた。全体としてみると、gPhone 重力計の初期ドリフトが安定するまで、多くの場合 1 ヶ月程度かかっていた。それ以降、ドリフトレートの直線性はよくなるが、絶対値は小さいもので数マイクロガル/日であった。gPhone のドリフトレートの大きさは、シントレックス CG-3M 重力計の数百マイクロガル/日よりかなり小さいが、ほぼゼロに近い超伝導重力計 (iGrav SG の公称値: 0.5 マイクロガル/月) には及ばない。発表の際には八丈島から九州の地熱発電所に移設した gPhone-133 の結果も合わせて示したい。

キーワード: 相対重力計, 重力時間変化, 八丈島, 地上観測

Keywords: relative gravimeter, temporal gravity change, Hachijojima, on-land observation



## 重力計鉛直アレイ観測 -平成25年度- Gravimetric vertical array observation -the 2013 fiscal year-

田中 俊行<sup>1\*</sup>; 本多 亮<sup>1</sup>  
TANAKA, Toshiyuki<sup>1\*</sup>; HONDA, Ryo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(公財)地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所  
<sup>1</sup>TRIES, ADEP

重力計鉛直アレイ (or 瑞浪超深地層研究所:以下, MIU) は世界的にも稀であり、降水の影響を抑制し地下深部からのシグナルを stack する手法として、重力観測のポテンシャル向上に寄与する (Tanaka et al., EPS, 2013)。今回 (2013年11月~2014年1月)、田中ほか (連合大会予稿, 2013) と同様のアレイ観測、即ち、2台の gPhone 重力計 (地上に SN.130、地表下 300m に SN.90) を用いて、前回よりも高品質のデータを取得出来た。

前回は MIU 建設工事に伴う発破が多い時期に重なったためにアレイ観測として満足できるデータは得られなかったが、今回は時・日オーダーの重力変化についてはサブマイクロガルの議論可能なデータが得られた。ただし、それ以上の帯域については、2013年10月導入の SN.130 のセンサー内部温度の単調減少が収束しておらず、センサードリフトに影響している可能性はある。

ここでは、以下の4時系列データ: (1) 地下の gPhone データ、(2) 地上の gPhone データ、(3) 両者の和データ、(4) 両者の差データの解析結果について述べる。これら全て、BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) を利用して潮汐成分・気圧応答を評価し、線形ドリフトを仮定して、重力残差まで得ている。降水があると、(1) は重力減少、(2) は重力増加、(3) は相殺、(4) は重ね合わせ、と単純には考えられる。なぜなら、MIU サイトでは降水は地表下約 80m 以浅の明世累層までしか浸透しない事が判明しているからである (例えば、Tanaka et al., G3, 2006)。そして、実際、このような降雨応答は観測された。しかし、雨の降り方にも因るが、(1) の方が (2) よりも降雨応答の振幅が大きい傾向が見られる。即ち、この重力計配置では降雨応答を無限平板 (ソースまでの距離に依存しない) と見なす事は難しいかもしれない。また、大気補正については、(1) と (2) はほぼ同じ、(3) は重ね合わせ、(4) は相殺と考えられ、実際、(4) の気圧応答成分は (1) および (2) の 1/10 の振幅で  $\pm 0.5 \mu\text{Gal}$  以下と観測された。

今後、MIU 掘削工事に伴う発破の影響が少ないデータの蓄積や、各 gPhone 固有のクセ (センサードリフト、センサー温度や傾斜の応答) を隣接設置して調査し、絶対重力計を加えた鉛直アレイ観測を構築したい。

謝辞: 本研究は資源エネルギー庁の深地層研究施設整備促進補助金によって行われている。(独) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターの堀内泰治氏には MIU 坑内での観測および降雨データに便宜を頂いている。TRIES 職員には計器の保守に協力頂いている。

キーワード: 重力連続観測, 重力計, 陸水, 降雨, 大気補正, 計測手法

Keywords: continuous gravity measurement, gravimeter, inland water, rainfall, atmospheric correction, measuring method

## 小笠原硫黄島の大規模隆起：札幌一那覇重力計検定結果に基づく重力変化 Huge uplift event of Iwoto: Estimation of gravity change based on the result of gravimeter calibration in Sapporo-Naha

小澤 拓<sup>1\*</sup>; 宮城 洋介<sup>1</sup>; 上田 英樹<sup>1</sup>; 長井 雅史<sup>1</sup>; 藤田 英輔<sup>1</sup>  
OZAWA, Taku<sup>1\*</sup>; MIYAGI, Yosuke<sup>1</sup>; UEDA, Hideki<sup>1</sup>; NAGAI, Masashi<sup>1</sup>; FUJITA, Eisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

小笠原硫黄島は、東京の約1200km南に位置する火山島である。その山頂には直径が約10kmのカルデラを有し、その中央部から南西端付近までの領域が海上に現われている。小笠原硫黄島の火山活動は極めて活発な隆起活動を伴うことが特徴の一つであり、防災科学技術研究所は間欠的な大規模隆起イベントの発生およびその地殻変動分布を明らかにしてきた(Ukawa et al., 2006)。1996年からは地殻変動測量に加えて重力測定も開始し、鶴川ほか(2006)は隆起時におけるマグマの関与を示した。小笠原硫黄島では、2003年初頭から2006年中頃まで、定常的な沈降が進行していたが、2006年中頃に急激な隆起の加速が観測された。2007年以降、隆起は徐々に鈍化する傾向にあったが、2011年2月頃に隆起の再加速が観測され、防災科学技術研究所および国土地理院のGNSS連続観測によれば、再加速開始から2012年4月頃までに、2m近い隆起が観測されている。2012年4月後半には、北東沖において変色水が観測され、それ以降の隆起活動は鈍化傾向にある。この大規模隆起イベントの地殻変動および重力変化を測定するため、我々は、これまで防災科学技術研究所が測量を行ってきた観測点において、GNSSキャンペーン観測および重力測定を行った。GNSSキャンペーン観測の結果については、第120回測地学会講演会および日本火山学会2013年度秋季大会において報告した。重力測定についても速報結果を報告し、使用した重力計(Scintrex社製CG-3M#284, #371)のスケールファクターの時間変化に関する不確定性が大きいことを述べた。そこで、スケールファクターを決定するため、札幌一那覇間の重力測定を実施した。本講演においては、その測定結果から明らかとなったスケールファクターの時間変化と、その結果に基づいて推定された小笠原硫黄島の重力変化について報告する。

札幌一那覇間重力測定は、防災科研(Bosai-BS)、国土地理院(Tsukuba-GS, Tsukuba-FGS)、羽田空港(Haneda-GS)、千歳空港(Chitose-GS)、北海道大学(Sapporo-GS)、沖縄気象台(Naha-GS, Naha-FGS)との往復測定を行った。測定値の解析においては、重力計のドリフト率を一定と仮定して、各観測点での相対重力値と同時にドリフト率も推定した。そして、推定された相対重力値が日本全国重力基準網(JGSN96)で示されている重力値(国土地理院測地部, 1997)に整合するように、スケールファクターを求めた。なお、Sapporo-GSは移設されたため、国土地理院が測定した重力値を用いた。その結果、#284のスケールファクターは2006年と比べて $+2 \times 10^{-5}$ 程度の変化であったのに対して、#371については $-1 \times 10^{-4}$ 程度の変化が見られた。スケールファクターの時間変化は一定ではなく、線形近似によって推定された値と有意に異なることが明らかとなった。つまり、大きい重力差を測定する場合において、100マイクロガル以下の値を議論する場合には、スケールファクターの時間変化の考慮が極めて重要であると言える。

推定されたスケールファクターを用いて、小笠原硫黄島の基準点(IWO101)の重力値を求めたところ、#284と#371の測定値は27マイクロガルで一致し、2006年における測定値との差は $-0.734\text{mGal}$ と求まった。この期間における隆起量は3.05mであり、これらの値から計算される重力変化率は $-0.241\text{mGal/m}$ となる。この値は、2001年から2002年に発生した大規模隆起に関して、鶴川ほか(2006)が求めた変化率と全く同じである。この結果は、2006年からの大規模隆起イベントにおいても、同様の密度を持つマグマが貫入したことを示唆している。

謝辞。小笠原硫黄島の測量においては、海上自衛隊硫黄島航空基地気象班の方々には協力していただいた。また、株式会社オオバの方々には、GPS観測と解析および重力測定の一部を実施していただいた。さらに、国土地理院の物理測地課重力係には、重力基準点の使用許可をいただくとともに、各重力点の重力値を教えていただいた。さらに、北海道大学の古屋正人教授、北海道大学総合博物館の松枝大治名譽教授、沖縄気象台の方々には、重力基準点の使用を許可していただくとともに、観測に協力していただいた。関係各位に感謝の意を申し上げます。

キーワード: 小笠原硫黄島, 重力, スケールファクター, マグマ

Keywords: Iwoto, gravity, scale factor, magma

## 南極・セールロンダーネ山地周辺地域における絶対重力測定 Absolute gravity measurements near the Sor-Rondane Mountains, Antarctica

福田 洋一<sup>1\*</sup>; 青山 雄一<sup>2</sup>; 菅沼 悠介<sup>2</sup>; 岡田 雅樹<sup>2</sup>; 土井 浩一郎<sup>2</sup>  
FUKUDA, Yoichi<sup>1\*</sup>; AOYAMA, Yuichi<sup>2</sup>; SUGANUMA, Yusuke<sup>2</sup>; OKADA, Masaki<sup>2</sup>; DOI, Koichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup> National Institute of Polar Research

第55次南極地域観測隊(JARE-55)では、スポット観測の一環として、氷床変動や Glacial Isostatic Adjustment (GIA) などに伴う重力変化の研究を目的とし、セールロンダーネ山地地域に位置するベルギーの Princess Elisabeth Station (PES) で絶対重力測定を実施した。また、同地域のあすか基地近郊のシール岩には JARE-26 で設置された重力基準点 (No.26-01) があるが、これまで絶対重力測定が実施されたことがなく、今回、初めて野外用の絶対重力計を用いた測定を実施した。以下では、これらの測定ならびに結果の概要について報告する。

今回用いた絶対重力計は FG5#210 および A10#017 の2台で、その他、 $dg/dz$  や重力点間の相対測定のためにラコスト重力計#805を使用した。南極への輸送は、機材、人員とも航空機 (DROMLAN: Dronning Maud Land Air Network) を利用し、南アフリカのケープタウンからノボラザレフスカヤ基地経由で PES に移動した。PES での滞在期間は、2013年11月29日から12月16日までの18日間である。PES では、これまでもベルギーの研究者が、居住区から数100m離れた露岩上の North Shelter (NS) と呼ばれる観測室内の重力点で、FG-5 絶対重力計を用いた測定を実施している。今回の研究の一つの目的は、NS の同じ重力点で繰り返し測定を実施することで、長期的な重力変化の監視を行うことである。しかし、NS は大変狭く、落下槽の真空引き等は困難で、これらの調整作業やテスト測定は PES 居住区内の一室で行った。また、同室内に仮の重力点を設置し、FG5 と A10 の測定値の直接比較を行った。その結果、高さの補正についてラコスト重力計による  $dg/dz$  の実測値を用いた補正後、 $2 \mu\text{gal}$  以内で一致する結果を得た。このことは、A10 の測定値が良く校正されていることを示している。その後、テスト測定を継続中に FG-5 の落下槽に不具合が生じ、そのまま回復せず、FG5 での有効な測定は、仮の重力点での1400ドロップに留まった。このため、NS の測定は A10 を用いて実施し、実測した  $dg/dz$  値  $4.4529 \mu\text{gal/cm}$  を用いた基準点上での重力値として  $982302155.21 \mu\text{gal}$  を得た。これまでの NS での測定値については、ベルギー側での詳細な補正パラメーター等を問い合わせ中で、現時点で正確な比較ができないが、 $\mu\text{gal}$  以内では一致している模様である。従って、PES での重力の時間変化はあったとしても小さいものと考えられる。

シール岩での測定は12月5~6日に実施した。シール岩の重力基準点 (No.26-01) は、常に風の強い頂上付近にあり、A10 を用いてもその場での測定は大変困難である。そこで、今回はシール岩の取り付き付近に仮の重力点を設置し A10 による絶対重力測定を行い、その後、No.26-01 との間はラコスト重力計での結合を行った。このようにして得られた No.26-01 の重力値は  $982406.109\text{mgal}$  で、結合誤差を含めた精度は  $15 \mu\text{gal}$  程度と推定される。

これまでの No.26-01 での重力値は、JARE-26 による  $982405.33\text{mgal}$  (国土地理院, 2002) と JARE-27 による  $982402.817\text{mgal}$  (福田, 1986; 昭和基地の絶対重力点改訂値を補正) があるが、今回の結果は、JARE-26 の値に対して  $0.779\text{mgal}$ 、JARE-27 の値に対して  $3.292\text{mgal}$ 、それぞれ大きい値となった。JARE-27 の値との差が大きい理由として、JARE-27 では2台のラコスト重力計を用いた測定を行っているが、その際、シール~昭和基地間の測定で2台の測定値に不一致があり、福田 (1986) では、前後のドリフトの状況等から判断して一方の重力計だけに  $3.765\text{mgal}$  のトビの補正を行っていることによると考えられる。今回の結果からは、トビの補正を行った重力計が間違っていたものと推定されるが、仮にトビがもう一方の重力計に生じていたとすると、今回の測定値との差は  $0.5\text{mgal}$  程度となり、ラコスト重力計による重力結合の精度として妥当なものと思われる。No.26-01 の重力値は、これまでに実施されたセールロンダーネ地域の重力測定の基準値として使用されており、今後、これらの値の改訂が必要である。

### 文献:

福田洋一 (1986): 南極資料, 30, 164-174.  
国土地理院 (2002): 国土地理院技術資料 B1-No.32.

キーワード: 絶対重力測定, セールロンダーネ, 南極, 氷床変動, 重力変化, 重力基準点

Keywords: absolute gravity measurement, Sor-Rondane, Antarctica, ice sheet movement, gravity changes, gravity reference point



## 絶対重力計用投げ上げ装置の反作用補償機構の性能評価 Performance of the recoil-compensation mechanism used for a throw-up type absolute gravimeter

酒井 浩考<sup>1\*</sup>; 新谷 昌人<sup>1</sup>; 坪川 恒也<sup>2</sup>; Emanuele Biolcati<sup>3</sup>  
SAKAI, Hiroataka<sup>1\*</sup>; ARAYA, Akito<sup>1</sup>; TSUBOKAWA, Tsuneya<sup>2</sup>; EMANUELE, Biolcati<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 真英計測, <sup>3</sup> L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup> Shin-ei keisoku, <sup>3</sup> L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

絶対重力計は重力加速度を8~9桁の精度で測定する装置である。この絶対重力計は高精度実現のために、装置が大型化してしまい設置場所が限定されるという問題がある。そのため火山の地下構造観測に用いる場合は、絶対重力測定をふもとの基準点で行い、相対重力計を携帯して基準点と観測点を往復することで重力値を測定することが多い。しかし、この手法は観測に手間がかかり、時間精度が悪くなるほか、火山活動時では、観測地点での測定に危険が伴う。本研究は、これらの状況を改善するための絶対重力計小型化に関する研究であり、精度向上のために測定誤差の要因となる落体投げ上げの反作用を打ち消す補償機構が組み込まれた装置を開発している点が従来の研究と大きく異なる点である。

重力測定的手法としては落体を投げ上げ、その距離と時間を精密に計測することで重力加速度を測定する、投げ上げ方式を採用した。既存の絶対重力計では、落体を自由落下させ重力加速度を求める自由落下方式を採用するのが一般的であるが、この自由落下方式は落体を持ち上げる必要があるため、短時間で繰り返し測定ができないといった問題点や、落体を持ち上げる機構により、装置が大型化しているという問題点があった。そこで落体を持ち上げる必要がなく、短時間で繰り返し測定可能な、投げ上げ方式を採用することにより、絶対重力計の大型化している主要な部分の一つを小型化することができる。

これまでに開発した投げ上げ装置は、ピエゾ素子(電圧を加えると数 $\mu\text{m}$ 伸縮する部品)の伸縮を拡大する装置を用いることにより落体を約3mm投げ上げることができる。また落体を投げ上げた際、固着の影響により落体が回転し、重力測定の見誤差要因になっていたが、投げ上げる瞬間に落体と落体を投げ上げる装置の接触部分を瞬間的に切り離す機構を導入することで解決した。この投げ上げ装置の性能試験を2012年末に江刺地球潮汐観測施設で既存の絶対重力計の自由落下装置と入れ替えることにより行った。その結果、潮汐の重力変化が検出され、重力変化の分解能 $\delta g$ は $40\mu\text{gal}$ であることがわかった。しかし重力の絶対値は、過去の重力測定から推測される値とずれがあり、重力測定値の確度 $\Delta g$ は $3\text{mgal}$ であった。この $\Delta g$ が大きい原因は、投げ上げた際の反作用による振動が、地面を通して干渉計に伝わり誤差となっているためである。

そこで、重力測定値の確度 $\Delta g$ を向上させるため、投げ上げた際の反作用を打ち消す装置の開発を行った。具体的には、投げ上げ用のピエゾを取り付けている板の反対側に、同じピエゾを取り付け、これら2つのピエゾに同じ信号を加えピエゾを上下対称な動きになるようにする。そして落体を投げ上げると同時に反対方向にもばねの付いたおもりを打ち出すことで反作用を打ち消すことを試みた。すると落体の上昇時は反作用を打ち消す前のピーク値の2.7%に、落体の下降時は21.8%に振動加速度をそれぞれ低減することができた。今後はさらに微調整を行い、2012年と同様の方法で重力測定を行う予定である。本講演では、その結果と開発状況について報告したい。

キーワード: 絶対重力計, 投げ上げ装置, 小型化, 反作用, 打消し装置, 重力測定

Keywords: absolute gravimeter, throw-up equipment, miniaturization, recoil effect, compensation mechanism, gravity measurement

レーザー干渉計型重力勾配計の開発と桜島火山における試運転  
Development of a laser-interferometric gravity-gradiometer and its trial operation on the volcanic island of Sakurajima

潮見 幸江<sup>1\*</sup>; 鍵山 恒臣<sup>1</sup>  
SHIOMI, Sachie<sup>1\*</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山研究センター  
<sup>1</sup> Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University

We have been developing a laser-interferometric gravity-gradiometer for volcanological studies. The gravity gradiometer measures differential accelerations between two test masses that are in free fall at different heights. Because its detection principle is based on the differential measurements, measured values are insensitive to the motions of observation points. That is to say, the gravity gradiometer is expected to have a good resolution even when it were used on an accelerating vehicle, such as an airship, or in an active volcanic area. Therefore, the gravity gradiometer could be useful for, for example, resource explorations and studies on volcanic activities.

The gravity gradiometer, to be used on an airship, had been developed at the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the Tokyo University from 2009 to 2012. A prototype of the gravity gradiometer was built up and tested at the ICRR. Their laboratory test showed that its resolution of measuring vertical gravity gradients was about a few  $\mu\text{Gal}/\text{m}$  in two second measurements. However, large unexplained disturbances were observed in longer term measurements. In order to understand the sources of the disturbances, the prototype was moved to the Aso Volcanological Laboratory (AVL) of the Kyoto University in July 2012. Since then, its further development, to be used at an observatory in a volcanic area, has been carried out at the AVL.

We will report the current status of the development for volcanological studies and results of trial measurements performed at the Sakurajima Volcanological Laboratory of the Kyoto University, on the volcanic island of Sakurajima, Kyusyu, Japan.

キーワード: 重力勾配  
Keywords: gravity gradients



## 重力衛星 GRACE を用いた地震後重力変化の研究:余効変動の二成分の分離とそのメカニズムの考察

### The two components of postseismic gravity changes and their mechanisms

田中 優作<sup>1\*</sup>; 日置 幸介<sup>1</sup>

TANAKA, Yusaku<sup>1\*</sup>; HEKI, Kosuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北大院理

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University

本研究では、重力衛星 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) が捉えた超巨大逆断層型地震 (2004 年スマトラ-アンダマン地震, 2010 年チリ (マウレ) 地震, 2011 年東北沖地震) に伴う重力変化を時系列解析することで、重力が地震後に地球内部で起こっている現象を区別して観測する第一の手段になりうることを示した。地震を観測するセンサーは今のところ三種類ある。地震計と、GPS (Global Positioning System) を始めとする GNSS (Global Navigation Satellite System) 及び SAR (Synthetic Aperture Radar), そして重力観測である。地震計は地震波を捉え、GNSS や SAR は地殻変動を空から観測し、重力は質量移動を追跡する。地震時の現象はどの観測機を用いても捉えることができる。しかし地震後の現象は、地震波が発生しないため地震計では捉えられない。地震後の地表の動きは GNSS や SAR が捉えることができる。しかし、それらも地下で複数のメカニズムが起こっていた場合、その現象を分離して捉えることは難しい。可能なのは、いくつかの仮定を置いた上で、複数の現象に対応したモデル計算を行い、その結果と観測結果の一致を得ることである。しかし、地震後に複数のメカニズムで変動が起こっている場合、もっと望ましいのは、そのメカニズムの各々を別々に観測値として得ることだろう。本研究で発見したのは、地震後に起こる変動が重力としては逆の極性と時間スケールで観測されることである。これは重力が地震後に地球内部で起こっている現象を区別して観測する第一の手段になる可能性を強く示している。

## GRACE GFZ 解を用いたグリーンランドの経年氷床質量変動の高分解能マッピング High resolution mapping of ice mass trend in Greenland using GRACE GFZ solution

松尾 功二<sup>1\*</sup>; 福田 洋一<sup>1</sup>  
MATSUO, Koji<sup>1\*</sup>; FUKUDA, Yoichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Science, Kyoto University

GRACE 衛星は、2002 年の打ち上げ以来、地球重力場の月毎の変動を計測している。データは 2012 年 5 月に RL04 から RL05 へと更新され、米国のテキサス大学宇宙研究センター (CSR) とジェット推進研究所 (JPL) から、60 次までの球面調和係数 (ストークス係数) として公開されている。また独国の地球科学研究センター (GFZ) は、2013 年 12 月に RL05a データとして 90 次までのストークス係数を公開している。本研究は、GFZ RL05a データ (90 次) を用いて、その計測誤差を詳細に調べたうえ、高次項成分を可能な限り活用し、グリーンランドの経年的な氷床質量変動を従来よりも高い空間分解能でマッピングする。

まず、計測誤差について調べる。Wahr et al. (2006) に倣い、GRACE データの誤差分散行列から誤差の時空間変化を求める。RL05a データの誤差の全球平均は、相当水厚変化で表現して約 100cm であった。RL04 データでは約 300cm であったため、約 3 倍の精度向上と言える。その時間変化は、2003 年 1 月から 7 月までは平均 200cm であったが、2003 年 8 月以降は平均 100cm で安定している。2010 年 4 月に GRACE の熱制御機器が故障したようだが (Tapley et al., 2013)、重力計測には特に影響はないようだ。誤差の空間分布は、赤道域で大きく (約 130cm)、極域で小さい (約 40cm)。これは、GRACE が極軌道上を周回しているため、データの取得密度が極域で密に、赤道域で疎になることに起因する (Matsuo & Heki, 2013)。また、赤道域は主に海洋域で占められるため、エイリアシング誤差を多く含むという要因もあるだろう。このように、極域における 2003 年 8 月以降の RL05a データは、特に品質が高いことが分かる。

続いて、グリーンランドの経年氷床質量変動を導く。グリーンランドでは、2002 年頃から氷床が急速に消失しており、現在地球上でも最も大規模な質量変動が起きている (Matsuo et al., 2013)。また、極域に位置しているため、他の地域と比べ GRACE の計測誤差が低い。すなわち、シグナル対ノイズ比が特に高い地域といえる。従来 GRACE データは、高次項ノイズを低減させるために、60 次以降を打ち切り、ガウシアンフィルター (Wahr et al., 1998) や相関フィルター (Svenson & Wahr, 2006) を施したのち、重力および質量変化へと変換されていた。そのため、空間分解能は良くても約 300km ほどであった。一方で、精度が向上した RL05a データは、より高次の項をより弱いフィルターを適用して使用することができ。そこで本研究では、ストークス係数を 90 次まで使用し、相関フィルターのみを適用し解析を行った。相関フィルターを施すことで、グリーンランド上での計測誤差は約 40cm から約 20cm まで減少させることができた。ストークス係数からグリーンランド上のシグナルを効率的に抽出するために、Haris and Simons (2012) による spherical Slepian Basis を適用する。そうすることで、グリーンランドとは関連の低い他の成分の寄与を極力抑え、結果的にノイズを減少させることができる。そのようにして得た 2003 年 9 月から 2009 年 10 月までの質量変化の時系列から最小二乗法により 1 次変化 (経年変化) を求める。グリーンランドの南東部と西部にて、明瞭な質量減少のシグナルが検出された。注目すべきは、グリーンランド西部の質量変動である。従来の 60 次まで用いた解析では中西部の Jakobshavn 氷河と北西部の Qaanaaq における質量減少シグナルは分離できていなかったが、今回の 90 次まで用いた解析では綺麗に分離できている。この結果の妥当性を確認するために同時期に行われた ICESat 衛星による氷厚変動観測の結果と比較する。その結果、ストークス係数の 90 次まで展開した ICESat の経年質量変化の分布図は、今回の GRACE の結果と見事に一致した。このように、GRACE RL05 GFZ 解 (90 次) を用いることで、グリーンランドに対しては、従来と比べ空間分解能を約 1.5 倍 (約 300km から約 200km) 向上させることができた。

CSR 解や JPL 解ではストークス係数が 60 次までしか公開されていないように、元来 60 次以上の成分は利用が難しいと考えられてきた。しかしながら本研究は、計測誤差が低い極域を対象に、効率的にシグナルを抽出することで、GRACE データを 90 次まで活用できることを明らかにした。グリーンランドと同じように極域に位置し強いシグナルを示すアラスカや南極半島に対しても、同様の手法を用いることで、従来よりも高分解能な質量変化の分布を導くことができるだろう。

キーワード: 衛星重力観測, グリーンランド, 氷床質量変動, 宇宙測地学, GRACE, ICESat

Keywords: Satellite gravimetry, Greenland, Ice sheet mass variation, Space geodesy, GRACE, ICESat

## 日本のジオイド 2011 (GSIGEO2011) の構築 Establishment of GSIGEO2011 (Japanese geoid model)

兒玉 篤郎<sup>1\*</sup>; 宮原 伐折羅<sup>1</sup>; 河和 宏<sup>1</sup>; 黒石 裕樹<sup>1</sup>  
KODAMA, Tokuro<sup>1\*</sup>; MIYAHARA, Basara<sup>1</sup>; KAWAWA, Hiroshi<sup>1</sup>; KUROISHI, Yuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup> GSI of Japan

国土地理院では、日本のジオイド・モデル「日本のジオイド 2000」を構築し、我が国における測定の位置基準となる三角点等の設置について、このモデルを用いることで GNSS 測量による楕円体高から標高への変換を実現し、基準点測量の効率的な実行に大きく寄与してきた。今回、衛星測位の標高測量へのさらなる活用拡大として、GNSS 測量から 3 級水準点相当の標高を求めることを可能にするため、日本の新しいジオイド・モデル「日本のジオイド 2011 (GSIGEO2011)」を構築したので、報告する。

「日本のジオイド 2011」の構築には、日本の新しい重力ジオイド・モデル JGEOID2008 (Kuroishi, 2009) を基盤とし、全国 750 点を超える電子基準点において取得した正確なジオイド高データに適合させるよう、最小二乗コロケーション法を用いた補正を加え、混合ジオイド・モデルとして作成する手法を用いた。3 級水準点の標高決定に適用するため、入力に用いたジオイド高データに対するモデルの再現性として標準偏差 2 cm を達成するモデルの構築を目標とした。JGEOID2008 では、従来の重力ジオイド・モデルに含まれていた、一部地区の系統誤差が大幅に低減されており、ジオイドの短波長成分をより細かく補正することで混合ジオイド・モデルの高精度化が実現した。

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の発生に伴い、東日本を中心とする広域に亘り、大規模な地殻変動が生じた。それに対し、国土地理院は、復旧測量を迅速に行い、東日本地域における基準点の測量成果を改定した。また、この地震に伴って大きな地殻変動が発生した地域について電子基準点におけるジオイド測量を新たに行い、それによって得られたジオイド高データを用いたので、「日本のジオイド 2011」は、改定された測量成果に適合している。

国土地理院は、構築された「日本のジオイド 2011」を公表し、一部島嶼部を除く全国について、標高成果を持った電子基準点を与点とする GNSS 測量を行うことで 3 級水準点相当の標高決定を可能とするべく取り組んでいる。これにより、我が国における測量作業のさらなる効率化につながることを期待している。

キーワード: 日本のジオイド 2011, ジオイド・モデル, 測量成果

Keywords: GSIGEO2011, Geoid model, survey results

## 日本重力基準網 2013 (JGSN2013) The Japan Gravity Standardization Net 2013 (JGSN2013)

吉田 賢司<sup>1\*</sup>  
YOSHIDA, Kenji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院  
<sup>1</sup> GSI of Japan

国土地理院は、最新の重力測量のデータを用いて新しい日本重力基準網 2013 (JGSN2013) を構築した。国土地理院は、これまでも国際重力基準網 1971 (IGSN71) の重力値を基準とした日本重力基準網 1975 (JGSN75) を構築し、1976 年に公表しており、JGSN75 は日本の重力の基準として使用されてきた。

JGSN2013 は、国土地理院が 1997 年から開始した基準重力測量 (絶対重力測定) および一等重力測量 (相対重力測定) のデータを用いて構築された。東北地方では 2011 年東北地方太平洋沖地震後に重力測量を実施し、地震に伴う重力の変化を反映した重力値に基づき網を構築している。

国土地理院が日本において構築した 2 回目の重力基準網となる JGSN2013 は、絶対重力計 FG5 の導入により観測の精度が向上することによって JGSN75 と比較して大幅な精度向上を達成するとともに、大幅に基準重力点を拡充し、さらに重力点の観測点座標の位置精度の向上や解析時の潮汐補正の統一などを行うことで、日本全国を網羅した高精度な重力網を構築した。このことにより IAG の IC-WG2.1 と IGFS が共同プロジェクトとして進める絶対重力データベース (AGrav) への参加登録を目指すとともに、GGOS (Global Geodetic Observing System) により国際的に議論が進む地球重力場の把握にも貢献する。

本発表は、JGSN2013 の構築についての報告である。

キーワード: 重力基準網, JGSN75, JGSN2013  
Keywords: The Gravity Standardization Net, JGSN75, JGSN2013



## iGrav10 超伝導重力計と FG5/217 絶対重力計の並行測定 Calibration of the superconducting gravimeter iGrav10 by parallel observation with the absolute gravimeter FG5 #217

杉原 光彦<sup>1\*</sup>; 名和 一成<sup>1</sup>; 宮川 歩夢<sup>1</sup>  
SUGIHARA, Mituhiko<sup>1\*</sup>; NAWA, Kazunari<sup>1</sup>; MIYAKAWA, Ayumu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産総研

<sup>1</sup> AIST

我々はテキサス州ファンズワース CO2-EOR サイトで超伝導重力計 iGrav による連続測定を実施している。2013 年 12 月に測定を再開後、想定よりも大きい線形減少が認められた（レートは 1 日 0.4 マイクロガルの減少）。12 月中旬と 1 月中旬に FG5 による並行測定を実施した。その結果、絶対重力値は+1+2 であることがわかり、iGrav に線形ドリフトが生じていたことが判明した。その後、リセット操作を行い、iGrav の状況を改善させることができた。現場で超伝導重力測定を行う場合は、このようにドリフトか信号かを判断しかねる場合がある。SG と AG の並行測定の意義が確認できたが、iGrav の通常のドリフトレートは一カ月で 0.5 マイクロガルなので、それを絶対重力計との並行測定で確かめるには約半年を要することになる。こうした場合にはもう 1 台、機動的に使用できる超伝導重力計があれば、それによって短期間の並行測定を行って確認する方法があるだろう。ファンズワースではこのような SG-SG 並行測定を年内に実施する予定である。本研究は、経済産業省からの委託研究「平成 25 年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO2 挙動評価技術の開発）」の一部として実施した。

キーワード: 超伝導重力計, iGrav, 絶対重力計, FG5, 並行測定

Keywords: Superconducting gravimeter, iGrav, absolute gravimeter, FG5, parallel observation



## 警固断層帯南東部における高密度重力探査 Densed gravity survey on the southeastern Kego fault system

西島 潤<sup>1\*</sup>; 藤光 康宏<sup>1</sup>  
NISHIJIMA, Jun<sup>1\*</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

福岡市中心部を北西方向に縦断する警固断層帯は全長 55km で、過去の活動時期の違いから北西部と南東部に区分される(地震調査研究推進本部, 2007)。このうち北西部は 2005 年福岡県西方沖地震の震源域となった。一方陸域の南東部はマグニチュード 7.2 程度の地震が発生することが推定されており、30 年以内の地震発生確率は 0.3~6% と高くなっている。警固断層南東部において地震が生じた場合の地震被害を軽減することを目的として、文部科学省による「警固断層帯(南東部)における重点的な調査観測」が平成 23 年度に開始され 3 年間にわたり調査が行われている。本調査の一環で断層帯の詳細な位置・形状を把握することを目的とした高密度重力探査を実施した。本研究では得られた重力異常とボーリング資料に基づき、警固断層帯南東部の密度構造モデルを作成した。

本調査では測定点間隔は 50~150m とし、Scintrex 社製 CG-3+および CG-5 相対重力計を用いて 3 年間で 721 点の測定を行った。その際の測定点の位置測量は 2 周波型 GPS 受信機(TOPCON 社製 HIPER II)によるネットワーク型 RTK 法を用いた。重力基準点は九州大学伊都キャンパス内重力点で Micro-g LaCoste 社製 A-10 絶対重力計を用いて測定した重力値を使用した。このデータに九州大学で過去に測定したデータおよび日本重力データベース DVD 版(地質調査総合センター, 2013)のデータを併せて 3008 測定点のデータを用いて重力異常図を作成した。その際の補正密度は ABIC 最小化法(村田, 1990)により  $2.47\text{g/cm}^3$  とし、地形補正は 50m メッシュ地形データを用いて補正を行った。

得られた重力異常図には、今回ターゲットにしている断層による重力異常のほかに深部構造を反映した長波長の重力異常が含まれるため、この長波長成分を 2 次曲面で近似し分離して、比較的浅部の地下構造を反映した残差図を作成した。2 次傾向面残差図より、これまでの測定で明らかになっていた南区井尻から春日市須玖北にかけての約 2 km の北西-南東方向の重力異常の急傾斜から南東方向に約 1 km 離れた春日市岡本付近及び春日公園の南西に重力異常の急傾斜(北東落ち)が存在することが判明した。また、急傾斜部分の東側には南西落ち重力異常の急傾斜が存在し、春日公園を中心とした地域はこれらの急傾斜部分に囲まれた低重力異常域になっていることが明らかになった。このような凹地状の構造は天神付近、井尻付近にも見られ、それぞれの凹地の間には重力基盤が浅くなっている部分があり、3 つの独立した凹地が存在することが、重力異常から推定される。また、これらの凹地の中心は南東に行くに従い少しずつ東にずれている。現在推定されている警固断層の位置(中田・今泉, 2002)と重力異常の急傾斜部分を比較すると、井尻付近では東側の南西落ちの急傾斜部分にほぼ一致し、春日市岡本付近では西側の北東落ちの急傾斜部分に一致している。

警固断層沿いに北東方向に 2km、南東方向に 9.7km の領域に対し、この 2 次傾向面残差に合うように 3 次元フォワードモデリングを行った。その際に本調査で得られたボーリング資料 137 本のデータを使用した。重力計算は GRAV3D ver. 3.0(Li and Oldenburg, 1998)を用いて、地下の密度分布を推定した。この結果、断層位置は中田・今泉(2002)で推定されている位置とほぼ一致した。また、警固断層の東側に 100m 程度の破碎帯が推定された。

キーワード: 高密度重力探査, 活断層, 重力異常

Keywords: Densed gravity survey, active fault, gravity anomaly

## 地震学的構造調査結果を反映した3次元重力モデリングによる地殻の厚さの推定 Crustal thickness deduced from a three-dimensional gravity modeling with seismic survey results

藤岡 ゆかり<sup>1\*</sup>; 石原 丈実<sup>2</sup>; 及川 光弘<sup>1</sup>; 金田 謙太郎<sup>1</sup>; 西澤 あずさ<sup>1</sup>

FUJIOKA, Yukari<sup>1\*</sup>; ISHIHARA, Takemi<sup>2</sup>; OIKAWA, Mitsuhiro<sup>1</sup>; KANEDA, Kentaro<sup>1</sup>; NISHIZAWA, Azusa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Science and Technology

海上保安庁では、1983年から2008年にかけて行った大陸棚調査の一環として、太平洋プレート北西部からフィリピン海プレートにかけての海域において、あわせて約100本にも及ぶ測線で、反射法および屈折法地震探査を実施してきた。一方で、同海域では海上重力測量も面的に精力的に行なわれており、莫大な量の重力観測値が得られている。これらのデータを利用して、3次元重力インバージョン法 (Ishihara and Koda, 2007) により地殻の密度分布を推定し、地殻構造の面的な把握を試みた。

まず、海水、堆積層、地殻、マントル等の各層で構成された3次元密度構造の初期モデルを作成した。その際に、それぞれの地震学的構造調査測線の結果を、重力異常分布を参照しつつ、内挿した。この初期モデルを用いて重力値を計算した。計算した重力値と観測した重力値との差から定数を除いた値が、マントルブーゲー異常に相当する。次に、この値が十分小さくなるようにインバージョン解析を行った。算出したモホ面の深さから、地殻の厚さ分布を推定することができる。

インバージョン解析のための初期モデルとして、地殻の厚さを一定値としたモデルから、屈折法地震探査より得られた速度構造から推定したモホ面の深さの情報を加えたモデルへと改良したことにより、解析の結果としてより妥当な密度構造モデルが得られることが確かめられた。

また、海域によっては、堆積層やリソスフェアの密度や厚さなどの、地殻以外の構造から及ぼされる影響が大きい場合もあり、海域ごとに異なるそれぞれの構造を考慮することが必要となる。例えば、フィリピン海プレート北西部では、九州・パラオ海嶺の東西で、リソスフェアの年代の違いによる厚さの差によるものと考えられる、モホ面より深部の構造が、インバージョン解析の結果に大きく影響する。そのため、初期モデルから計算した重力値と観測値との差にローパスフィルタ (フィルタ幅 400 km) をかけた値を補正量とし、初期モデルから計算した重力値から除くことで、モホ面より深部の構造による影響を小さくした。

発表では、これらの解析上の工夫や操作、及びその結果得られた地殻の厚さ分布について報告する。広大な海域において地殻の厚さ分布を把握することにより、地球内部の構造や地殻の形成過程を知る一助となることが期待される。

キーワード: 重力

Keywords: gravity

## 三次元重力インバージョンによる関東地方の地下密度構造の推定 Estimation of the density structure beneath the Kanto District, Japan, by 3-D gravity inversion

江戸 巽<sup>1\*</sup>; 山本 明彦<sup>1</sup>

EDO, Tatsumi<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Akihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

本研究では、陸上で観測された重力データを用いて関東地方における地下の相対的な三次元密度構造を推定し、反射法など他の探査方法より得られた既存の地下構造（活断層・堆積層）と比較・検討を行う。解析方法は Bear et al. (1995) による三次元重力インバージョン法である。また解析には、産業技術総合研究所 (2004,2013), Shichi and Yamamoto (2001), Yamamoto et al. (2011) などによる公開された重力データを使用した。陸上の重力観測点が存在する解析対象領域の地下に三次元的な広がりをもつブロックを設定し、このブロックを水平、鉛直方向にそれぞれ任意の数に分割（メッシュによる再分化）して、直方体を構成要素とする三次元構造を仮定した。そして、全ての直方体が各観測点に及ぼす引力効果の総和と、各観測点における実際のブーゲー異常との相違が、全ての観測点で最小二乗法的に最も小さくなるように、全ての直方体の相対密度をインバージョン計算によって求めた。本研究では解析深度は 10~20km であり、これを 5・6 層に分割した。各層の厚さは 2~7km であり、水平方向のメッシュサイズは 3 × 3km~10 × 10km である。活断層と堆積層それぞれを対象としてモデルを作成し、インバージョン計算を行った。得られた結果は以下の通りである。(1) 活断層を対象にしたモデル（深さ 10km・5 層）では、得られた密度分布と既存の活断層分布データ（中田・今泉, 2002）を比較検討した結果、各活断層の詳細な特徴（走行・傾斜など）と得られた密度分布の間に良い相関があることがわかった。一方、(2) 堆積層を対象にしたモデル（深さ 20km・6 層）では、表層部において、約 0.3g/cm<sup>3</sup> の幅をもつ相対密度分布が得られた。本研究地域における第三系・第四系堆積物の密度は、約 2.385~2.417g/cm<sup>3</sup>、基盤を形成する先新第三系基盤岩類の密度は、約 2.6~2.7g/cm<sup>3</sup>（産業技術総合研究所, 2009）と考えられるため、本研究で得られた相対密度は妥当な推定値と考えられる。今後は、地震波速度、ボーリングデータなどの異種データや手法で求められた地下構造との比較検討を含めた研究が必要であると考えられる。

## Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability - Global Activities Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability - Global Activities

SCHORLEMMER, Danijel<sup>1\*</sup> ; GERSTENBERGER, Matt<sup>2</sup> ; HIRATA, Naoshi<sup>3</sup> ; JORDAN, Thomas<sup>4</sup> ; LIUKIS, Maria<sup>4</sup> ; MARZOCCHI, Warner<sup>5</sup> ; RHOADES, David<sup>2</sup> ; TSURUOKA, Hiroshi<sup>3</sup> ; WERNER, Maximilian<sup>6</sup> ; ZECHAR, Jeremy<sup>7</sup> ; CSEP WORKING GROUP, The<sup>4</sup>

SCHORLEMMER, Danijel<sup>1\*</sup> ; GERSTENBERGER, Matt<sup>2</sup> ; HIRATA, Naoshi<sup>3</sup> ; JORDAN, Thomas<sup>4</sup> ; LIUKIS, Maria<sup>4</sup> ; MARZOCCHI, Warner<sup>5</sup> ; RHOADES, David<sup>2</sup> ; TSURUOKA, Hiroshi<sup>3</sup> ; WERNER, Maximilian<sup>6</sup> ; ZECHAR, Jeremy<sup>7</sup> ; CSEP WORKING GROUP, The<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>GNS Science, Avalon, Lower Hutt, New Zealand, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan, <sup>4</sup>Southern California Earthquake Center, University of Southern California, Los Angeles CA 90089, USA, <sup>5</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 00143 Roma, Italy, <sup>6</sup>School of Earth Sciences and Cabot Institute, University of Bristol, Bristol BS8 1RJ, UK, <sup>7</sup>Swiss Seismological Service, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>GNS Science, Avalon, Lower Hutt, New Zealand, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan, <sup>4</sup>Southern California Earthquake Center, University of Southern California, Los Angeles CA 90089, USA, <sup>5</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 00143 Roma, Italy, <sup>6</sup>School of Earth Sciences and Cabot Institute, University of Bristol, Bristol BS8 1RJ, UK, <sup>7</sup>Swiss Seismological Service, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) aims to improve our understanding about the physics and predictability of earthquakes through rigorous and prospective testing of earthquake forecast models. The system-science character of earthquake prediction research demands an open and collaborative structure for experimentation in a variety of fault systems and tectonic regions. CSEP Testing Centers in California, New Zealand, Japan, and Europe are being developed to provide adequate infrastructure for predictability research. CSEP is currently running prospective, automated evaluations of more than 350 models in various testing regions, e.g. California, New Zealand, Japan, Italy, and globally. We present the evolution of CSEP since its inception in 2007 and discuss results from several types of CSEP experiments. Finally, we describe how CSEP is expanding into other areas, including the testing of earthquake early warning systems, geodetic transient detectors, intensity prediction equations, ground-motion prediction models, and other types of hazard models.

キーワード: Earthquake forecasting, Seismic hazard, Statistical seismology, Earthquake statistics, Forecast testing  
Keywords: Earthquake forecasting, Seismic hazard, Statistical seismology, Earthquake statistics, Forecast testing

## 2011年東北地方太平洋沖地震後の日本での1日地震発生予測実験 One-day earthquake forecasting experiment in Japan after the 2011 Tohoku-oki earthquake

平田直<sup>1</sup>; 鶴岡弘<sup>1\*</sup>

HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; TSURUOKA, Hiroshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

An experiment for earthquake predictability in Japan started in 2009 with a framework of CSEP. We have conducted one-day, three-month, one-year, and three-year forecasting experiments with three different regions of Japanese Islands; all Japan including sea area, main lands without sea area, and Kanto area(Nanjo et al., 2011; Tsuruoka et al., 2012). We currently have 160 modes for three regions and four periods. We conducted a retrospect one-day forecast of aftershocks of the 2011 Tohoku-oki earthquake showing that all proposed models failed in consistency tests immediately after the mainshock but in several days some of the models recovered its performance of forecasting (Nanjo et al., 2012). A current method for short-term forecasting has limitation of a period of one-day, which is arbitrarily determined. A shorter time period may be necessary for very intensive seismicity. Seismic activities in Japan have changed very much after the 2011 Tohoku-oki event, which brought us an idea that current forecasting models should be modified. We will present some new results of one-day forecasting experiments in Japan to discuss how to get information about real time earthquake hazard to mitigate earthquake risk. A new method to test performances of a model is also proposed.

キーワード: 地震発生予測, 一日予測, 地震活動, 東北地方太平洋沖地震, 統計地震学

Keywords: Earthquake forecasting, One-day forecasting, seismicity, Tohoku-oki earthquake, Statistical seismology



## Prospective evaluation of 3-month testing class of the CSEP-Japan earthquake forecasts Prospective evaluation of 3-month testing class of the CSEP-Japan earthquake forecasts

鶴岡 弘<sup>1\*</sup>; 平田 直<sup>1</sup>  
TSURUOKA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) is a global project of earthquake predictability research. The primary purposes of the CSEP is to develop a virtual, distributed laboratory. The final goal of this project is to investigate the intrinsic predictability of earthquake rupture mechanisms.

One major focus of the Japanese earthquake prediction research plan 2009-2013 is testable earthquake forecast models. So, the Earthquake Research Institute joined the CSEP and installed in an international collaboration a testing center as CSEP-Japan for rigorous evaluation of earthquake forecast models.

A total of 160 models were submitted from all over the world. And CSEP-Japan started the prospective experiments from 1 November 2009. The models are currently under test in 12 categories, with 3 testing regions and 4 testing classes of different time spans (1day, 3 month, 1 year and 3 years). We evaluate the performance of the models in the official suite of tests defined by the CSEP (L, M, N, S, R, T and W tests) against authorized catalogue compiled by Japan Meteorological Agency.

CSEP-Japan testing center has conducted over 6-12 rounds tests for 3-month testing classes including 2011 Tohoku-oki earthquake. We will discuss these results of evaluation test of the prospective experiments, and checked the performance of the earthquake models.

キーワード: CSEP, 地震予測, 地震活動

Keywords: CSEP, Earthquake Predictability, Seismicity

Does using Coulomb stress change information create quantifiable improvements in earthquake forecast models?

Does using Coulomb stress change information create quantifiable improvements in earthquake forecast models?

GERSTENBERGER, Matt<sup>1\*</sup>; STEACY, Sandy<sup>2</sup>; MARZOCCHI, Warner<sup>2</sup>; RHOADES, David<sup>1</sup>  
GERSTENBERGER, Matt<sup>1\*</sup>; STEACY, Sandy<sup>2</sup>; MARZOCCHI, Warner<sup>2</sup>; RHOADES, David<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GNS Science, 1 Fairway Drive, Avalon, Lower Hutt, New Zealand, <sup>2</sup>Environmental Sciences Research Institute, University of Ulster, Coleraine, N. Ireland, <sup>3</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italy

<sup>1</sup>GNS Science, 1 Fairway Drive, Avalon, Lower Hutt, New Zealand, <sup>2</sup>Environmental Sciences Research Institute, University of Ulster, Coleraine, N. Ireland, <sup>3</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italy

The Darfield, New Zealand earthquake sequence has provided an interesting and active sequence for rigorous testing of earthquake forecast models that include Coulomb stress change information. Coulomb forecast models have long been discussed in the scientific literature as providing useful forecast information during aftershock sequences; however, a challenge that has limited our understanding of their ability is the difficulty in specifying such models so that they are prospective and unbiased. With the Darfield sequence we have the opportunity to use the Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) earthquake forecast testing centre, that is already in operation in New Zealand, to develop Coulomb models in such a way. By taking advantage of archived data sets to provide all of the necessary inputs into the models, we are able to pseudo-prospectively test the models within the CSEP testing centre. An initial study by Steacy et al (2013) tested several models with Coulomb information. These models include a hybrid model with STEP (Gerstenberger, 2005), a rate-and-state based model, and several non-Coulomb models. Results of this study indicate that adding Coulomb information that was available 10-days after each main event, to a more traditional Omori-based model, provides a statistically improved forecast, even when attempting to test in an unbiased fashion. The experiment also highlighted significant differences when testing models retrospectively and pseudo-prospectively; these differences are driven by the reduced quality of data available to models in pseudo-prospective tests. Following this study, we are now implementing a larger experiment in collaboration with the European Union funded Strategies and Tools for Real Time Earthquake Risk Reduction (REAKT) project. In this experiment we are testing more than 20 Coulomb and non-Coulomb models within the NZ-CSEP testing centre. These models include hybrid statistical-Coulomb models and pure statistical and Coulomb models. We will discuss both experiments and their implications.

キーワード: Earthquake forecasting, New Zealand, CSEP, Coulomb, aftershock model, Christchurch  
Keywords: Earthquake forecasting, New Zealand, CSEP, Coulomb, aftershock model, Christchurch

## Test of the argument for remote dynamic triggering by small mainshocks Test of the argument for remote dynamic triggering by small mainshocks

PENG, Wei<sup>1\*</sup>  
PENG, Wei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Wei Peng, <sup>2</sup>Shinji Toda  
<sup>1</sup>Wei Peng, <sup>2</sup>Shinji Toda

To understand earthquake interaction and forecast time-dependent seismic hazard, it is essential to determine whether static or dynamic stress change triggers most aftershocks and subsequent mainshocks. Felzer and Brodsky (2006) argued that the observed linear seismic density of small aftershocks with distance from small mainshocks is a product of the decay of seismic wave amplitude. They conclude that even small shocks can dynamically trigger remote earthquakes at distances more than ten source fault dimensions away. Richards-Dinger et al. (2010) counter-argue that the power law decay is an apparent product from independent aftershocks occurring along a large rupture zone or near-simultaneous occurrence in seismic swarms. To test the argument of Richards-Dinger et al. (2010), we use the Taiwanese earthquake catalog of the Central Weather Bureau Seismic Network, whose quality is as good as that in California and Japan. Further, we take an advantage of the absence of major inland earthquakes and significant swarms in the period, 2001-2011.

We follow the methodology of Felzer and Brodsky (2006) for selecting mainshocks using their declustering algorithm, and then seek all shocks that occurred within 5 minutes to make a diagram of linear aftershock density as a function of distance from mainshock. First we select as a mainshock any event that is not preceded by a larger shock within 3 days ( $t_1$ ) and 100 km, and that is not followed by a large shock within 12 hr ( $t_2$ ) and 100 km. The mainshocks and aftershocks are  $2 \leq M < 3$  and  $M \geq 2$  respectively. This yields 706 declustered mainshocks from the 110,157 candidate shocks, but the number of mainshock-aftershock pairs is just 56. We only find four pairs within 50 km distance range (the maximum considered by Felzer and Brodsky), which precludes any regression, while the others located further than 50 km are regarded as background. We then shorten the time period for both  $t_1$  and  $t_2$  to be 1.5 days and 0.25 days, which allows us to regress a power law slope of  $-1.16 \pm 0.45$  for the 35 pairs within the 50-km distance range. The pairs are located mostly along the northern part of the Longitudinal Valley fault zone where small swarm activity and  $M \sim 6$  shocks often occur. We conclude that the much fewer ratios of mainshock-aftershock pairs in the Taiwanese catalog, in comparison to California and Japan, are due to lack of any large rupture and the absence of significant swarms in Taiwan, which supports the argument of Richards-Dingers et al. and renders the possibility that these small shocks are dynamically triggered untenable.

## 伊豆地域における前震の経験則に基づく地震発生予測 Prediction performance of empirically defined foreshocks in the Izu region

前田 憲二<sup>1\*</sup>; 弘瀬 冬樹<sup>1</sup>  
MAEDA, Kenji<sup>1\*</sup>; HIROSE, Fuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

### 1. Introduction

Foreshocks have been thought one of the most promising phenomena to predict large earthquakes. However, as the physical mechanism of foreshocks is not clarified yet, it is very difficult to distinguish them deterministically from background seismicity before a mainshock occurs. Therefore, empirical approach is one of the realistic ways to use foreshock activity as a precursor of a mainshock. We investigate probabilistic features of empirically defined foreshocks and search for the best parameters to define foreshocks which present relatively high performance to predict large earthquakes. Maeda (1996) and Maeda and Hirose (2012) proposed a foreshock definition which gives relatively high performance to predict large earthquakes along the Japan trench. In this study we basically apply the same method to the seismicity in the Izu region where swarm activities related with magma movements are frequently observed, and estimate the prediction performance based on empirically defined foreshock activities.

### 2. Method

The method to search for parameters for foreshocks that present high prediction performance consists of four steps. 1) To eliminate small aftershocks from the original data. 2) To define foreshock candidates as the activities that have number of  $N_f$  earthquakes with magnitude  $\geq M_f$  during the period of  $T_f$  days in the segment of the size of  $D \times D$  degree (latitude  $\times$  longitude). 3) To set the alarm period of  $T_a$  days after a foreshock candidate during which a mainshock is expected to occur. 4) To search for the values of  $T_f$ ,  $M_f$ ,  $D$ ,  $N_f$ , and  $T_a$  which give high prediction performance by the grid search method. The prediction performance is measured mainly by  $dAIC$ , which is defined as the difference of AIC for a stationary Poisson model and a model based on a foreshock activity, and additionally by alarm rate (AR: the fraction of mainshocks alarmed), truth rate (TR: the fraction of foreshock candidates followed by a mainshock), and probability gain (PG: the ratio of mainshock occurrence rate for predicted space-time to background occurrence rate).

### 3. Data and Results

By applying the above method to the earthquakes cataloged by JMA for the period of 1977 - 2013/06 in the Izu region (33.5N, 138.6E - 35.3N, 139.8E), we obtained the best parameters for foreshocks as  $T_f=3$  days,  $M_f=3.0$ ,  $D=0.2$  degree,  $N_f=3$ , and  $T_a=5$  days for the prediction of mainshocks with  $M \geq 5.0$ . The prediction performance is expressed as  $dAIC=473$ ,  $AR=68\%$  ( $=44/65$ ),  $TR=23\%$  ( $=46/196$ ), and  $PG=225$ . We also confirmed that the distribution of interval time between foreshocks and mainshocks is better approximated by a power law like the modified Omori's aftershock distribution rather than an exponential distribution. The 26% ( $=20/77$ ) of mainshocks that occurred within 5 days after the foreshocks have occurred within 4.8 hours after the foreshock. The distance distribution between foreshocks and mainshocks is also found to be better expressed by a power law. If we focus on the specific region of Off Ito (34.8N, 139.0E - 35.1N, 139.3E) where is one of the most active foreshock region, the prediction performance of the same foreshock definition measured by AR and TR, becomes as better as  $AR=100\%$  ( $=18/18$ ) and  $TR=37\%$  ( $=15/41$ ) with  $dAIC=166$ , and  $PG=105$ . As for the Off Ito region, the JMA have been operating an algorithm for predicting the swarm activity basing on the rate increase of volumetric strain observed near the region. When we compare the timing of issuing the prediction information about the swarm activity by the JMA with that of the occurrence of the foreshock defined above, we find that there is not much difference between them. This means that the foreshock activity in this region is strongly related to the crustal deformation before the mainshock.

キーワード: 前震, 確率予測, 予測効率, 予知率, 適中率, 伊豆地域

Keywords: foreshocks, probabilistic prediction, prediction performance, alarm rate, truth rate, Izu region

**前震と短期予測：実際の地震活動と ETAS 合成カタログとの比較**  
**Foreshocks and short-term forecasting: comparisons between real seismicity and synthetic catalogs**

尾形 良彦<sup>1\*</sup>  
OGATA, Yosihiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所  
<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics

実際のデータから導かれる前震の典型的な統計特性の多くは、実際に ETAS モデルによってもシミュレーションできるものであるという論文が最近散見される。ETAS モデルで前震の確率予測が可能で上記の確率予測の意味はないということになる。しかしながら、比較によって、それらの特性は定量的に大きく異なっており、上記の前震確率予測の情報利得は、ETAS モデルのものに比べて、有意に大きいことを示した。

キーワード: 前震, 短期予測, 気象庁震源カタログ, ETAS 合成カタログ, 前震の統計的特性, 前震の確率予測  
Keywords: Foreshocks, short-term forecasting, JMA earthquake catalog, synthetic catalogs simulated by ETAS model, statistical characteristics of foreshocks, foreshock probability forecasting



## 地震断層形状の誘発地震活動への影響のモデルリング Modelling the effect of fault geometry on earthquake triggering

郭一村<sup>2</sup>; 庄建倉<sup>1\*</sup>; 周仕勇<sup>2</sup>

GUO, Yicun<sup>2</sup>; ZHUANG, Jiancang<sup>1\*</sup>; ZHOU, Shiyong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 北京大学地球空間科学学院

<sup>1</sup>Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University

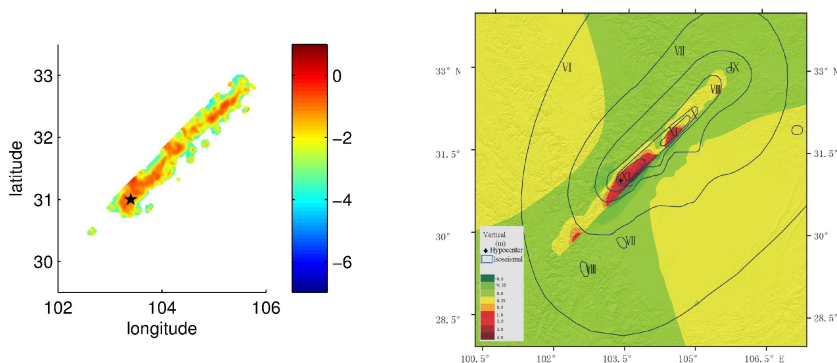
This study incorporates the rupture extensions of big earthquakes in the formulation of the Epidemic Type Aftershock Sequence model (ETAS) model, which is a point process model widely applied in the studies of spatiotemporal seismicity, rather than regarding every earthquake as a point in space and time. We apply the new model to the catalog from Sichuan province, China between 1990 and 2013, during which the Wenchuan Mw7.9 earthquake occurred in May 2008. Our results show that the modified model has better performance in both data fitting and aftershock simulation, confirming that the elliptical aftershock zone is caused by the superposition of isotropic triggering effects from each patch of the rupture extension. Also, using the technique of stochastic reconstruction, we found that the direct productivities of aftershocks from each patch on the mainshock fault are positively correlated to the slip distribution. We also confirm that the elliptical aftershock zone is caused by the superposition of isotropic triggering effects from each patch of the rupture extension.

Figure: (Left panel) Reconstruction results of aftershock productivity from each patch of Wenchuan mainshock fault based on the new ETAS model, which considers the rupture extension of large earthquakes instead of regarding all the earthquakes as point source. The values are in the logarithm scale. The Wenchuan mainshock is marked by the black pentagon.

(Right panel) Contour image of the vertical component of the coseismic displacement distribution and isoseismal lines caused by Wenchuan mainshock.

キーワード: 地震断層, ETAS モデル, 地震予測, 余震

Keywords: earthquake fault, ETAS model, earthquake forecast, aftershock



## History of network detection completeness in Japan History of network detection completeness in Japan

SCHORLEMMER, Danijel<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>2</sup>; ISHIGAKI, Yuzo<sup>3</sup>; NANJO, Kazuyoshi<sup>2</sup>; TSURUOKA, Hiroshi<sup>2</sup>; BEUTIN, Thomas<sup>1</sup>; EUCHNER, Fabian<sup>4</sup>  
SCHORLEMMER, Danijel<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>2</sup>; ISHIGAKI, Yuzo<sup>3</sup>; NANJO, Kazuyoshi<sup>2</sup>; TSURUOKA, Hiroshi<sup>2</sup>; BEUTIN, Thomas<sup>1</sup>; EUCHNER, Fabian<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan, <sup>3</sup>Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, Tokyo 100-8122, Japan, <sup>4</sup>Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan, <sup>3</sup>Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, Tokyo 100-8122, Japan, <sup>4</sup>Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich, Switzerland

An important characteristic of any seismic network is its detection completeness, which should be considered a function of space and time. Many researchers rely on robust estimates of detection completeness, especially when investigating statistical parameters of earthquake occurrence like earthquake rates. Contrary to traditional approaches, we do not estimate completeness using methods in which the completeness magnitude is defined as the deviation of the frequency-magnitude distribution from the linear Gutenberg-Richter relation. Here, we present a method based on empirical data only: phase data, station information, and the network-specific attenuation relation. For each station of the network we estimate a time-dependent distribution function describing the detection capability depending on magnitude and distance to the earthquake. For each point in time, maps of detection probabilities for certain magnitudes or overall completeness levels are compiled based on these distributions. Therefore, this method allows for inspection of station performances and their evolution as well as investigations on local detection probabilities even in regions without seismic activity.

We present a full history of network detection completeness for Japan and discuss details of this evolution. These results are compared with estimated completeness levels of other methods and with completeness levels in other regions of the World. We present scenario computations showing the impact of different possible network failures. All presented results are published on the CompletenessWeb ([www.completenessweb.org](http://www.completenessweb.org)) from which the user can download completeness data from all investigated regions, software codes for reproducing the results, and publication-ready and customizable figures.

キーワード: catalog completeness, earthquake recording, statistical seismology, earthquake statistics, earthquake forecasting, seismic hazard

Keywords: catalog completeness, earthquake recording, statistical seismology, earthquake statistics, earthquake forecasting, seismic hazard

## Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability & Global Earthquake Model - Testing Center Software Development Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability & Global Earthquake Model - Testing Center Software Development

BEUTIN, Thomas<sup>1\*</sup> ; LIUKIS, Maria<sup>2</sup> ; MAECHLING, Philip<sup>2</sup> ; MAK, Sum<sup>1</sup> ; SCHORLEMMER, Danijel<sup>1</sup> ; YU, John<sup>2</sup>  
BEUTIN, Thomas<sup>1\*</sup> ; LIUKIS, Maria<sup>2</sup> ; MAECHLING, Philip<sup>2</sup> ; MAK, Sum<sup>1</sup> ; SCHORLEMMER, Danijel<sup>1</sup> ; YU, John<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>Southern California Earthquake Center, University of Southern California, Los Angeles CA 90089, USA

<sup>1</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany, <sup>2</sup>Southern California Earthquake Center, University of Southern California, Los Angeles CA 90089, USA

The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP) aims to improve our understanding about the physics and predictability of earthquakes through rigorous and prospective testing of earthquake forecast models. CSEP operates four testing centers in California, New Zealand, Japan, and Europe running prospective, automated evaluations of more than 350 models. These testing centers are the technical infrastructure of CSEP and implement all procedures and protocols for rigorous testing and evaluation of earthquake prediction experiments. These experiments run in various testing regions and comprise forecast periods of one day to many years.

The CSEP testing center software system is the general infrastructure of all CSEP testing centers and is now being used for earthquake early warning systems, geodetic transient detectors, intensity prediction equations, and ground-motion prediction equations. We present the recent developments and introduce the structure of the software system.

キーワード: Earthquake forecasting, Seismic hazard, Statistical seismology, Earthquake statistics, Forecast testing, Software  
Keywords: Earthquake forecasting, Seismic hazard, Statistical seismology, Earthquake statistics, Forecast testing, Software

## Lithospheric stress and deformation, and megathrust prediction Lithospheric stress and deformation, and megathrust prediction

HONG, Tae-kyung<sup>1\*</sup> ; LEE, Junhyung<sup>1</sup>  
HONG, Tae-kyung<sup>1\*</sup> ; LEE, Junhyung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yonsei University, Department of Earth System Sciences, Seoul 120-749, South Korea

<sup>1</sup>Yonsei University, Department of Earth System Sciences, Seoul 120-749, South Korea

Lithospheres respond to stress load that is a major cause of earthquakes. Thus, understanding the lithospheric response before and during the megathrusts may allow us to find a way to predict megathrusts. We investigate the lithospheric responses for megathrusts with magnitudes greater than 8.7 since 2000 from precursory and coseismic events. The seismicity presents the cumulation or release of stress before and after megathrust, and discriminative spatial distribution of stress. Normal-faulting earthquakes were increased particularly around large slip regions at shallow depths after the megathrusts, which may be associated with lithospheric rebound and splay-fault development. The earthquake occurrence rate (b value) displays a characteristic slip-dependent feature. The earthquake occurrence rates were decreased with slip amount by forthcoming megathrust due to continuous accumulation of plate-driven stress and tectonic loading around the future rupture planes on slab

surface. The slip dependency of earthquake occurrence rates is enhanced with time until the occurrence of megathrust. The level of seismicity after megathrust is inversely proportional to that before megathrust, yielding the compatible average seismicity before and after megathrust over rupture regions regardless the slip amount of each subregion due to difference of accumulated stress depending the rock properties. It was also observed that the dynamic lithospheric response is highly associated with slip distribution on the rupture plane. Temporal changes of slip-amount-dependent b values are fitted well with an exponential function, suggesting an exponential increase of normal stress with time on locked region until the occurrence of megathrust.

キーワード: lithospheric stress, lithospheric deformation, megathrust, prediction, seismicity  
Keywords: lithospheric stress, lithospheric deformation, megathrust, prediction, seismicity

## Global distribution of the earthquake-induced Schumann resonance anomalies Global distribution of the earthquake-induced Schumann resonance anomalies

ZHOU, Hongjuan<sup>1\*</sup>; CAO, Bingxia<sup>1</sup>; YU, Haiyan<sup>1</sup>; QIAO, Xiaolin<sup>1</sup>  
ZHOU, Hongjuan<sup>1\*</sup>; CAO, Bingxia<sup>1</sup>; YU, Haiyan<sup>1</sup>; QIAO, Xiaolin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Harbin Institute of Technology at Weihai, China

<sup>1</sup>Harbin Institute of Technology at Weihai, China

Schumann resonance (SR) is a global electromagnetic resonance phenomenon. Recently, SR anomalies before some earthquakes (EQs), which are considered to be concerned with the irregular disturbance of the lower ionosphere above the epicenters, are discovered. Although the examples are limited, we can see that the SR anomalies are usually different for different EQs. This paper concerns with the distinctions of SR anomalies observed at different locations for the same EQ, with the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki EQ in Japan, before which significant SR anomalies have been observed in China, as an example.

Zhou et al. (2013) have found an anomalous SR affect observed at YS and AJ stations of China, associated with the Tohoku-Oki EQ. The anomalies were characterized by an increase in the intensity at frequencies from the first mode to the fourth mode in both magnetic field components, and the abnormal behaviors of the north-south magnetic field component primarily appeared at 0000-0900 UT 3 days prior to the main shock, about 2 h ahead of east-west magnetic field component. The above phenomena are shown in Figures 1 and 2. Figure 1 shows the deviations of the magnetic field amplitudes from the monthly averaged values observed at YS and QJ stations from 1 to 11 March 2011. Figure 2 shows the comparison of the amplitude differences of both magnetic fields on 8 March observed at YS station with 2 standard deviations which is calculated by the spectra over  $\pm 15$  days around 8 March, and the areas where the amplitudes are stronger than 2 standard deviations are marked with white. After the comparative analysis of the disturbed phenomena produced by the selected 10 sites shown in Figure 3 by numerical method with a locally EQ-induced disturbance model of the atmospheric conductivity in the day-night asymmetric Earth-ionosphere cavity, it is concluded that the SR anomalous phenomena before the Tohoku-Oki EQ have much to do with the excited sources located at South America and Asia marked with red circles in Figure 3.

Another 2 observing sites, with Sites 1 and 2 located at (N35°, E137°) and (N0°, E110°) respectively, are selected besides YS in order to compare the abnormal variations of SR magnetic fields observed at different locations under the same disturbance situation. The same simulation model and method as those in Zhou et al. (2013) are used, and the abnormal variations of both magnetic field spectra of SR observed at 3 sites are shown in Figures 4 and 5, with the source located at SA2 and AS4 as shown in Figure 3 respectively. It is obvious that the differences of the abnormal variations observed at different sites are distinct.

Further, Figures 6 and 7 show the global distributions of the anomalies for the first 3 modes of both SR magnetic field components under the excitation of the source SA2 and AS4 respectively. The color codes stand for the ratio of disturbed amplitude to the regular one, and the regions with green color represent the disturbed ratio lower than 1 and also include the possible nodal points which are the results of the simple model of point sources, while white to dark red colors represent the appearance of SR anomalies. It can be seen that the distribution of SR anomalies is very complicated, and is related to the relative locations of EQ epicenter, lightning currents and the observatories, and of course the EQ-induced disturbance of atmospheric conductivities.

The present simulations are done under the simple models of lightning and disturbed conductivity, which will be improved in the next studies.

キーワード: Schumann resonance, Tohoku-Oki earthquake, earthquake-induced Schumann resonance anomalies, day-night asymmetric Earth-ionosphere cavity

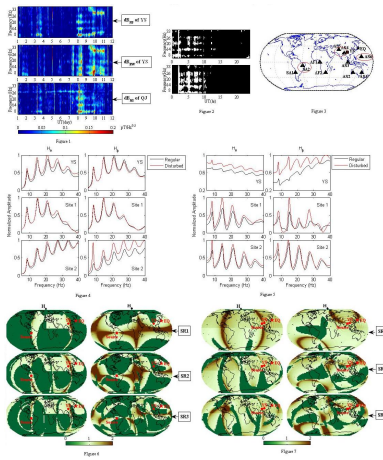
Keywords: Schumann resonance, Tohoku-Oki earthquake, earthquake-induced Schumann resonance anomalies, day-night asymmetric Earth-ionosphere cavity



SSS01-12

会場:419

時間:5月2日 17:15-17:30



## アスペリティの動的応力降下量の不均質性を考慮した長大横ずれ断層の断層モデルに関する検討 Study on long strike-slip fault model with heterogeneous dynamic stress drops on asperities

小穴 温子<sup>1\*</sup>; 石井 透<sup>1</sup>; 壇 一男<sup>1</sup>; 藤原 広行<sup>2</sup>; 森川 信之<sup>2</sup>  
OANA, Atsuko<sup>1\*</sup>; ISHII, Toru<sup>1</sup>; DAN, Kazuo<sup>1</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>2</sup>; MORIKAWA, Nobuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 清水建設技術研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Institute of Technology, Shimizu Corporation, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

小穴・他(2013)では、壇・他(2011)の長大横ずれ断層の断層パラメータ設定手法を用い、中央構造線断層帯沿いに発生する地震を想定して断層モデルを設定し、強震動の試算を行った。ここでは、アスペリティによらず、動的応力降下量を均質としており、断層破壊の不均質性については考慮していなかった。しかしながら、実現象では、すべてのアスペリティの応力降下量が均質であるとは考えにくい。特に長大な断層ほど、そのような不均質性が地震動の空間分布に与える影響は極めて大きいと推察されるため、不均質性をどのように取り入れるかは強震動予測において重要な課題である。また、破壊開始点などの断層パラメータの不確かさも地震動に大きく影響すると考えられるため、これも断層パラメータの設定の過程で考慮していく必要がある。

そこで、本研究では、壇・他(2011)の手法を発展させた強震動予測のためのアスペリティの動的応力降下量の不均質性を考慮した断層モデル設定方法を提案することを目的として、その断層パラメータ設定方法について検討し、強震動の試算を行った。さらに、断層パラメータの不確かさが地震動に与える影響について確認するために、破壊開始点・アスペリティの配置・アスペリティの面積と動的応力降下量の関係を変化させたケースについても検討した。

はじめに、複数のアスペリティを有する断層をモデル化する場合に、それぞれのアスペリティに不均質な動的応力降下量を与えるための断層パラメータ設定方法を検討した。具体的には、既往研究による過去の地震の強震動生成域における応力降下量のデータに基づき、それらの確率密度分布を求め、アスペリティの個数でそれを等分したときのそれぞれの midpoint の頻度に対応する動的応力降下量を与える方法を示した。ここで、複数のアスペリティに不均質な動的応力降下量を与える場合、アスペリティモデルのすべてのパラメータ関係式を満たすことは不可能であったため、地震モーメントの関係式を優先して満足させるようにし、短周期レベルの関係式との間に生じる誤差は許容することにした。ただし、その誤差は、アスペリティ 10 個の場合でも、均質な動的応力降下量を与えた断層モデルの短周期レベルの 6 % 程度に収まった。なお、アスペリティの面積と動的応力降下量の関係は分析・整理されていないため、ここでは一つの考え方として、各アスペリティの面積の比とアスペリティの動的応力降下量の比の関係をランダムと仮定した。

次に、上記の不均質性を考慮した断層パラメータ設定方法に基づく断層モデルによる地震動を確認するために、中央構造線断層帯沿いの地震を対象に、断層モデルを設定し、統計的グリーン関数法により強震動を試算した。断層モデルのアスペリティの配置は、動的応力降下量が大きいものと小さいものが交互になるような 1 ケースを設定した。結果として、司・翠川(1999)の距離減衰式の平均値に対するばらつきは、小穴・他(2013)の各アスペリティの動的応力降下量が均質なモデルでは対数標準偏差が最大加速度で 0.19、最大速度で 0.13 であったのに対して、本検討の各アスペリティの動的応力降下量が不均質なモデルでは最大加速度で 0.20、最大速度で 0.16 となり、やや大きくなった。特に震源近傍の地点に着目すると、本検討の不均質なモデルではその偏差が標準偏差を上回る地点も見られるようになった。司・翠川(1999)の距離減衰式の対数標準偏差である 0.25、0.23 に比べるとばらつきが小さいが、この距離減衰式は、多くの地震と観測点のデータに基づき震源特性・伝播特性・サイト特性のすべてのばらつきを含むのに対し、本検討は特定の地震・特定の伝播経路・特定のサイト(全計算点で工学的基盤相当とし、一律のサイト特性を与えている)を対象としているため、この結果は妥当と考えられる。

最後に、震源に関わるパラメータの不確かさが地震動に与える影響について検討した。不確かさを考慮したパラメータは、破壊開始点・アスペリティの配置・アスペリティの面積と動的応力降下量の関係の 3 つである。それぞれの検討ケース数は限られるものの、司・翠川(1999)の距離減衰式に対する平均的なばらつきは、破壊開始点の違いを含む場合は対数標準偏差が最大加速度で 0.23、最大速度で 0.21、アスペリティの配置の違いを含む場合は最大加速度で 0.22、最大速度で 0.17、アスペリティの面積と動的応力降下量の関係の違いを含む場合は最大加速度で 0.20、最大速度で 0.17 となった。したがって、破壊開始点の違いが地震動に与える影響が相対的に大きいことがわかった。

今後は、不均質性を考慮した断層モデル設定方法を長大逆断層にも拡張する予定である。

キーワード: 長大断層, 不均質, 強震動予測

Keywords: Very long fault, Heterogeneity, Strong motion prediction

## M8クラスのスラブ内地震に適用可能な断層パラメータ設定方法の構築に向けた検討 Establishing procedure of evaluating fault parameters for predicting strong motions from intra-slab earthquakes with M8

新井 健介<sup>1\*</sup>; 壇 一男<sup>1</sup>; 石井 透<sup>1</sup>; 花村 正樹<sup>1</sup>; 藤原 広行<sup>2</sup>; 森川 信之<sup>2</sup>  
ARAI, Kensuke<sup>1\*</sup>; DAN, Kazuo<sup>1</sup>; ISHII, Toru<sup>1</sup>; HANAMURA, Masaki<sup>1</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>2</sup>; MORIKAWA, Nobuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 清水建設, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> Shimizu Corporation, <sup>2</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

スラブ内地震の強震動を高い精度で予測するためには、スラブ内地震の震源特性に基づく断層パラメータ設定方法の構築が必要である。これまで、そのような研究が笹谷・他(2006)や壇・他(2006)により行われているが、提案されている断層パラメータ設定方法が実際の地震記録の再現によって十分検証されているとは言い難い。そこで、新井・他(2013)では、2011年4月7日に宮城県沖で発生したスラブ内地震を対象とした検討を行い、既存の断層パラメータ設定方法の適用可能性と問題点を指摘し、併せて問題点の克服に向けた工夫の提案を行った。2011年4月7日のスラブ内地震は短周期レベルが笹谷・他(2006)の式あるいは壇・他(2006)の式より得られる平均的な値よりも大きいため、笹谷・他(2006)や壇・他(2006)の方法をそのまま適用すると、地震動評価結果が過小となる可能性があった。しかしながら、短周期レベルを大きくすると、背景領域のすべり量(地震モーメント)が負になって断層パラメータを設定出来なくなることがわかった。そこで、短周期レベルを変更しても断層パラメータの設定が可能となるように、断層面積を平均的な値に保つ条件のままアスペリティ面積を小さくする断層パラメータ設定方法を提案した。

本稿では、新井・他(2013)で提案した断層パラメータ設定方法を用いて、M8クラスのスラブ内地震である1993年釧路沖地震および1994年北海道東方沖地震の断層モデルを設定し、新井・他(2013)で提案した断層パラメータ設定方法のM8クラスのスラブ内地震への適用性および問題点を確認した。そして、その問題点を克服するための新たな断層パラメータ設定方法の構築を試みた。

1993年釧路沖地震および1994年北海道東方沖地震の短周期レベルはMorikawa and Sasatani(2004)で求められているが、その値は2011年4月7日のスラブ内地震と同様に、笹谷・他(2006)の式あるいは壇・他(2006)の式によって得られる平均的な値よりも大きいため、笹谷・他(2006)や壇・他(2006)の方法をそのまま適用すると、地震動評価結果が過小となる可能性があった。そこで、新井・他(2013)で提案した方法の適用を試みたが、1994年北海道東方沖地震では短周期レベルが経験式によって得られる平均的な値よりもかなり大きく、それによってアスペリティの面積が極端に小さくなり、不自然な断層モデルとなった。この問題への対処方法として、短周期レベルを大きくしつつ、アスペリティの面積比を笹谷・他(2006)および壇・他(2006)による地震モーメントと短周期レベルの関係式、地震モーメントとアスペリティの面積比の関係式を連立して求められる平均的な値とする方法を示した。この方法では、地震モーメント、短周期レベル、平均的なアスペリティの面積比が与条件となり、結果的に断層面積が笹谷・他(2006)や壇・他(2006)の方法によって設定した平均的な断層モデルよりも小さくなる。また、別の方法として、クラックモデルとする方法も検討した。

そして、笹谷・他(2006)、壇・他(2006)および新井・他(2013)の方法、本稿で提案する方法とクラックモデルとする方法のそれぞれで設定した複数の断層モデルで、1993年釧路沖地震および1994年北海道東方沖地震の地震動評価を経験的グリーン関数法により行い、観測記録との対応を確認した。その結果、1993年釧路沖地震に関しては、笹谷・他(2006)、壇・他(2006)の方法で過小評価となったが、新井・他(2013)の方法、本稿で提案する方法、クラックモデルとする方法では観測記録の説明性が向上した。一方、1994年北海道東方沖地震では、笹谷・他(2006)、壇・他(2006)の方法で過小評価となり、新井・他(2013)の方法、本稿で提案する方法、クラックモデルとする方法では、特に周期0.5秒以下といった短周期で過大評価となった。この原因としては、本検討で用いた、Morikawa and Sasatani(2004)で観測記録より震源スペクトルを推定して求められた短周期レベルは周期0.5秒以下の周期帯を説明するには適切でない可能性が考えられる。実際、Morikawa and Sasatani(2004)の断層モデルより算出される短周期レベルは、観測記録より震源スペクトルを推定して求めた短周期レベルよりも小さい。よって、今後は1994年北海道東方沖地震について、与条件とする短周期レベルを再検討したうえで設定した断層モデルで検討を行う予定である。また、本検討での対象は、太平洋プレートのスラブ内地震に限定しており、フィリピン海プレートについては、今後の課題とする。

キーワード: スラブ内地震, 強震動予測, 断層モデル

Keywords: Intra-slab earthquakes, Strong motion prediction, Fault model



## スペクトルインバージョンに基づく宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の震源特性 Source effects of the intraslab and interplate earthquakes in Miyagi-ken-oki region based on spectral inversion

笠谷 直矢<sup>1</sup>; 筧 楽磨<sup>1\*</sup>  
KASATANI, Naoya<sup>1</sup>; KAKEHI, Yasumaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大・理

<sup>1</sup>Faculty of Science, Kobe University

既往の研究より、スラブ内地震は、プレート境界地震に比べ、高周波成分を強く励起する特徴があるとされている。例えば、佐藤 (2004) では、宮城県沖の7つのスラブ内地震と4つのプレート境界地震の加速度震源スペクトルの高周波レベル (以下、単に「高周波レベル」という) を推定している。それによれば、平均的には宮城県沖のスラブ内地震の高周波レベルはプレート境界地震の高周波レベルの約3~4倍であるとしている。他方、加藤・他 (1999) は、やや深発地震の高周波地震波の励起強さを最大加速度値に基づいて検討し、その結果加速度振幅が強くなる条件として、スラブ内地震とプレート境界地震の区分よりも、むしろ震源深さによる影響が顕著に現れることを指摘している。以上のように、スラブ内地震の高周波成分の励起強さの要因をテクトニック環境によるものとするか、震源深さによるものとするかは、研究ごとに様々であり、再考の余地があると考えられる。

本研究では、宮城県沖のスラブ内地震とプレート境界地震の震源特性を評価するため、防災科学技術研究所 K-NET の強震記録に基づき、スペクトルインバージョン解析を行った。また抽出された震源特性からコーナー周波数と地震モーメントを推定し、加速度震源スペクトルの高周波レベルを求めた。

高周波レベルをスラブ内地震とプレート境界地震のテクトニック環境にのみ着目して、比較するに、スラブ内地震の高周波レベルは、プレート境界地震に比べ、約2~3倍程度大きい事が確認された。一方、震源深さに着目して比較するに、大局的に震源の深い地震の高周波レベルが大きく、震源の浅い地震の高周波レベルが小さいという高周波レベルの震源深さ依存性がある事が分かった。ここで注意すべきことは、スラブ内地震の震源深さはプレート境界地震に比べて系統的に深いという点である。さらに、震源深さが同程度のプレート境界地震とスラブ内地震を比較すると、両者の間に高周波レベルの有意な差は見られなかった。これは、同程度の深さを持つ上面と下面のスラブ内地震の間においても同様であった。

以上の事から、本研究では、プレート境界地震に比べ、スラブ内地震の高周波レベルが高いという傾向は、前者に比べ後者の震源が系統的に深いことによる見かけ上のものであり、高周波レベルの大きさはスラブ内地震とプレート境界地震といったテクトニック環境ではなく、震源深さの違いが効いており、深い地震ほど高周波レベルが高いと結論付けた。高周波レベルの差は、約50kmという深さの違いに対し、約4倍であった。

さらに本研究では、高周波レベルの評価に影響を与え得る、震源起因以外の因子として、震源深さによる波形の違いの影響、深さに依存するQ値構造という因子を考え、それらによる影響を定量的に評価した。その結果、それらの因子は結果を揺るがす程の大きなバイアスをもたらし得るとは考えられず、震源が深い地震ほど高周波レベルが高いという解釈が、極めて信頼性の高いものであることを示した。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net) の強震波形データ、F-netメカニズム解のデータ、気象庁一元化震源データを使用させていただきました。記して感謝致します。

キーワード: スペクトルインバージョン, 高周波レベル, スラブ内地震, プレート境界地震, 震源深さ  
Keywords: spectral inversion, high-frequency level, intraslab earthquake, interplate earthquake, focal depth

## 構造物の耐震検討の立場から見た2011年東北地方太平洋沖地震の複数の震源モデルのパフォーマンスの比較 Comparative study of the performance of source models for the 2011 Tohoku earthquake

野津 厚<sup>1\*</sup>  
NOZU, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 港湾空港技術研究所  
<sup>1</sup> Port and Airport Research Institute

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)は、今日のような密な強震観測網(e.g., Kinoshita, 1998)が構築されて以来、初めて発生したM9クラスの巨大地震である。この地震の発生により我々はM9クラスの巨大地震による強震動の実態を初めて知ることになったと言える。今後、他の地域を対象として、同程度の規模の地震を想定した強震動評価を行う機会が増えるものと考えられるが、その際の震源のモデル化においては、東北地方太平洋沖地震の強震記録から得られる知見を反映させることが極めて重要と考えられる。その際、強震動予測の目的が構造物の耐震検討である場合には、対象とする構造物に影響を及ぼしやすい周波数帯域の地震動を正確に計算できる震源モデルが求められる。本研究では、今後の強震動予測に用いる震源モデルの選択に資することを目的とし、各々の震源モデルから計算される地震動と、実際に観測された地震動との誤差を、構造物への影響が大きい帯域を中心に定量的に評価し、震源モデルのパフォーマンスに関する定量的な比較を行った。

本研究で対象とした震源モデルは、SPGAモデル(=スーパーアスペリティモデル)(野津他, 2012)、疑似点震源モデル(野津, 2012)、およびSMGAモデル(佐藤, 2012; Asano and Iwata, 2012; 川辺・釜江, 2013)である。SPGAモデルとは、東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震において特徴的な強震動パルスのパルス幅と調和的なサイズのサブイベント(SPGA)から構成される震源モデルであり、サブイベントのサイズは対象地震の場合一辺が数km程度である。一方、SMGAモデルは、より広い領域(対象地震の場合、一辺が数十km程度)からまんべんなく強震動が生成されるとする震源モデルである。これらはいずれも特性化震源モデルの範疇に属するもので、グリーン関数の重ね合わせにより地震動が計算される。それに対して、疑似点震源モデルは、特性化震源モデルよりもさらに単純化された震源モデルであり、各サブイベントに起因する地震動のフーリエ振幅だけが規定される。なお、本地震に対して提案されているSMGAモデルのうちKurahashi and Irikura(2013)のものについては本研究では対象としなかった。その理由は、Kurahashi and Irikuraの震源モデルにおいては、2005/8/16宮城県沖の地震(Mw7.2)の記録の後半部分がグリーン関数として用いられているが、一部の観測点では、記録を前半部分と後半部分に分けることが、著者にとっては困難であったためである。地震動の計算には、基本的に、各々の震源モデルの構築に用いられたのと同様の計算手法を用いた。すなわち、佐藤(2012)のSMGAモデルについては壇・佐藤(1998)の経験的グリーン関数法を用い、Asano and Iwata(2012)、川辺・釜江(2013)によるSMGAモデルについては入倉他(1998)の経験的グリーン関数法を用いた。グリーン関数イベントとして用いた中小地震も、個々の文献に示されたものと同様である。SPGAモデルと疑似点震源モデルについてはそれぞれの文献に示された方法で地震動を計算した。対象地点については、①サブイベントが存在する宮城県から茨城県までの範囲をカバーすること、②地盤の非線形挙動の影響が大きいサイトを避けること、③各々の文献で用いられた中小地震記録が漏れなく観測されていることを念頭に置き10地点を選定した。代表的な地点として、MYGH12における地表NS成分(0.2-1Hz)の比較を図に示す。観測波形には強震動パルスが明瞭に表れており、SPGAモデルではこれを再現できるが、SMGAモデルではこれを再現することができない。野津(2012)と同様の評価式を用い、速度波形(0.2-1Hz)、速度envelope(0.2-10Hz)およびフーリエスペクトル(0.2-10Hz)に関する誤差評価を行ったところ、港湾構造物に対して影響の大きい0.2-1Hzの帯域だけでなく、より高周波成分まで含めても、SPGAモデルおよび疑似点震源モデルの誤差がSMGAモデルより小さいという結果であった。次に、建物被害と対応の良い指標として境・他(2002)により提案されている「1-2秒震度」の計算を行った結果、SPGAモデルは観測波の「1-2秒震度」を概ね再現できているのに対し、SMGAモデルではSPGAモデルに対して2.2倍~3.8倍程度の誤差が生じることがわかった。

以上のように、構造物の地震時挙動に大きく影響すると考えられる強震動パルスを再現できること、建物被害と対応の良い指標である「1-2秒震度」の再現性が良いことなどから、一般的な構造物の耐震検討に用いる地震動を評価するための震源モデルとしてはSPGAモデル(または疑似点震源モデル)が適していると考えられる。謝辞:防災科学技術研究所の強震記録を使用しました。

キーワード: 巨大地震, 東北地方太平洋沖地震, 震源モデル, 強震動, SPGAモデル, SMGAモデル

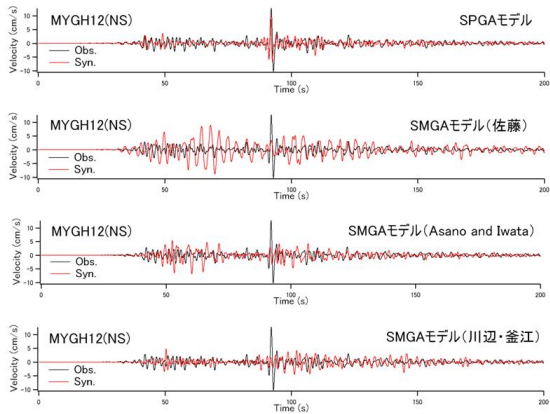
Keywords: mega earthquake, the Tohoku earthquake, source model, strong ground motion, SPGA model, SMGA model



SSS23-04

会場:211

時間:5月1日 09:45-10:00



速度波形の計算結果の例 (MYGH12の地表NS成分) (バンドパスフィルタ0.2-1Hz)

## 疑似点震源モデルによる2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の強震動シミュレーション

### A pseudo point-source model for off Miyagi intraslab earthquake on May 26, 2003

若井 淳<sup>1\*</sup>; 長坂 陽介<sup>1</sup>; 野津 厚<sup>1</sup>

WAKAI, Atsushi<sup>1\*</sup>; NAGASAKA, Yosuke<sup>1</sup>; NOZU, Atsushi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 港湾空港技術研究所

<sup>1</sup>Port and Airport Research Institute

最近の研究で、既往の特性化震源モデルをさらに単純化した疑似点震源モデルが提案され、2011年東北地方太平洋沖地震への適用性が確認されている。単純化の要点は、強震動の生成に関わる各々のサブイベントに対し、その内部におけるすべりの時空間分布を詳細にはモデル化せず、各々のサブイベントが生成する震源スペクトルのみをモデル化するという点である。今後、疑似点震源モデルの活用を目指す場合、他の代表的な地震への適用性を検証することは重要である。本検討では、2003年5月26日に発生した宮城県沖のスラブ内地震を例に、疑似点震源モデルの適用性を検討した。その結果、波形およびフーリエスペクトルともに特性化震源モデルと同等の再現性を有することを確認した。

キーワード: 疑似点震源モデル, スラブ内地震, 強震動, 2003年宮城県沖地震

Keywords: pseudo point-source model, intraslab earthquake, strong ground motion, the 2003 off Miyagi earthquake

## 疑似点震源モデルによる2005年7月23日千葉県北西部地震の強震動シミュレーション Strong ground motion simulation for the July 23, 2005 northwestern Chiba earthquake by pseudo point-source model

長坂 陽介<sup>1\*</sup>; 野津 厚<sup>1</sup>; 若井 淳<sup>1</sup>  
NAGASAKA, Yosuke<sup>1\*</sup>; NOZU, Atsushi<sup>1</sup>; WAKAI, Atsushi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 港湾空港技術研究所

<sup>1</sup>Port and Airport Research Institute

### 1. はじめに

各研究者によって提案されている地震動予測手法を比較するためのベンチマークテストが行われている(久田他, 2013)。2013年度は首都直下地震として2005年7月23日の千葉県北西部地震(Mj6.0)が対象となった。ベンチマークテストは大きく分けて理論的手法、統計的手法によるものに分かれるが、既定の手法の他に、参加者独自の手法による参加も可能である。本検討では疑似点震源モデル(野津, 2012)による震源モデルを作成し、強震動シミュレーションを行った。

### 2. 疑似点震源モデル

疑似点震源モデルは、震源において強震動を発生させる各サブイベントでのすべりの時空間分布を詳細にはモデル化せず、サブイベント全体としての震源スペクトルをオメガスクエアモデルに従う形で与えることが特徴である。この単純化には大きく2つの理由がある。1: 観測地震動のフーリエ位相は伝播経路特性とサイト増幅特性により決まっていることが多いこと。2: サブイベントを分割し、重ね合わせる手法では合成波形のフーリエ振幅に人為的な山谷が生じることが多いが、海溝型巨大地震の際の岩盤サイトでの観測フーリエ振幅は山谷が少ない。つまり、サブイベント全体としての地震動がオメガスクエアモデルに従うとした方が観測をうまく説明できる可能性があること。疑似点震源モデルは海溝型地震だけでなくいくつかの内陸地殻内地震などにも適用されており、良好な結果を得ている。

既往の研究(野津, 2012)では、各サブイベントに与えるパラメータを緯度、経度、深さ、地震モーメント、コーナー周波数、破壊時刻の6つとし、平均的なラディエーションパターン係数を用いていたが、本検討では、ラディエーションパターンの影響についても検討するため、走向、傾斜、すべり角を震源パラメータに加えた。そして、ラディエーションパターンは、震源距離と波長に依存するものとし、遠距離の場合または短波長の場合に平均値に近づくものとした。そして、理論的なラディエーションパターンが距離と共に失われていく遅さを規定するパラメータとして新たに $Q_R$ を設定している。

### 3. 得られたモデル

震源位置とメカニズムは額・三宅(2005)を用いた。地震モーメント、震源付近の地盤密度、S波速度はF-netよりそれぞれ $9.11 \times 10^{17}$ Nm,  $3.2\text{g/cm}^3$ ,  $4.46\text{km/s}$ とした。伝播経路のQ値は $100^{0.7}$ (中央防災会議・東海地震に関する専門調査会, 2001)、コーナー周波数と $Q_R$ は時刻歴速度波形とフーリエスペクトルが合うように試行錯誤的に決定し、それぞれ $0.75\text{Hz}$ ,  $10\pi$ とした。 $Q_R=10\pi$ で震源距離80kmのとき、ラディエーション係数は2Hz以上ではほぼ平均値となり、 $0.4\text{Hz}$ で理論値と平均値の間となる。

サイト増幅特性は野津・長尾(2005)によるものを用いたが、K-NET, KiK-net以外の観測点は設定されていないため、いくつかの地点では今回新たに評価を行った。まず観測記録が利用可能な観測点(建築研究所の観測点)では、近隣K-NET, KiK-net観測点の記録との加速度フーリエスペクトル比をとり、それを近隣K-NET, KiK-net観測点のサイト増幅特性に乗じることにより設定した。UR観測点など観測記録が利用できない場合は、まずSK-netなど近隣の記録が利用可能な観測点に対して上記の方法でサイト増幅特性を設定した。次に両地点で微動観測を実施し、H/Vスペクトルの比較を行い、ピーク周波数がずれていればサイト増幅特性を対数軸上で周波数方向にシフトするなどの補正を行い設定した。

フーリエ位相は地点により以下の3つのうちいずれかを用いている。いずれも本震以前の地震となる。1: 1997年7月9日 18:36, 2: 2002年5月19日 05:00, 3: 2004年8月8日 03:23。

以上により得られた再現結果の加速度フーリエスペクトルの例を図に示す。

謝辞: 防災科学技術研究所, 建築研究所, SK-netの強震記録を利用しました。

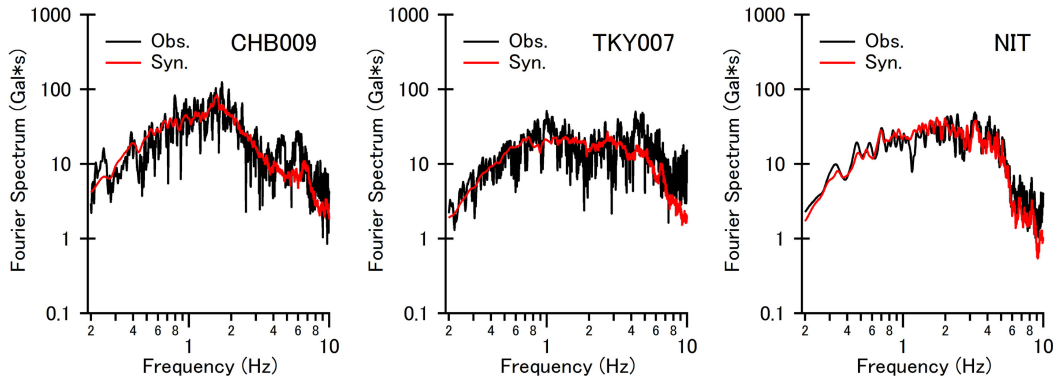
キーワード: 疑似点震源モデル, ベンチマークテスト, 2005年千葉県北西部地震, 放射特性, サイト増幅特性

Keywords: pseudo point-source model, benchmark test, the 2005 northwestern Chiba earthquake, radiation pattern, site amplification factor

SSS23-06

会場:211

時間:5月1日 10:15-10:30



Comparison of acceleration fourier spectrum  
(CHB009 and TKY007: K-NET station, NIT: BRI station)

## ボーリングデータ解析による浅部地下地質構造の統合型三次元グリッドモデリング： 東京低地北部から中川低地南部の例 Three-dimensional grid modeling based on analysis of borehole data

木村 克己<sup>1\*</sup>; 花島 裕樹<sup>2</sup>; 西山 昭一<sup>3</sup>; 石原 与四郎<sup>4</sup>; 関口 春子<sup>5</sup>

KIMURA, Katsumi<sup>1\*</sup>; HANASHIMA, Yuki<sup>2</sup>; NISHIYAMA, Shoichi<sup>3</sup>; ISHIHARA, Yoshiro<sup>4</sup>; SEKIGUCHI, Haruko<sup>5</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所, <sup>2</sup>スマートソリューション株式会社, <sup>3</sup>応用地質株式会社, <sup>4</sup>福岡大学, <sup>5</sup>京都大学防災研究所

<sup>1</sup>AIST, Geological Survey of Japan, <sup>2</sup>Smart Solution Corporation, <sup>3</sup>OYO Corporation, <sup>4</sup>Fukuoka University, <sup>5</sup>Kyoto University

地盤調査のボーリングデータに基づいて、地震応答特性評価の基礎となる浅部の地下地質構造モデルの高精度化を目的に、統合型三次元グリッドモデル構築手法を整理し、実際に東京低地北部から中川低地南部域をモデル地域として適用を行った。本研究の三次元モデリング手法の特徴は、①木村ほか(2013)に基づいて、ボーリングデータ解析で得た沖積層基底層準のポイントデータに加えて、埋没地形平坦面の成り立ちを考慮した制約条件を用いてデータの空白域を補填することで、沖積層基底面モデルを構築すること、②ボーリングデータから岩相とN値の三次元グリッドモデルを求める江藤ほか(2008)の手法を基礎にし、①で求めた沖積層基底面モデルの上位と下位にモデル領域を分割して計算し、その後両者を統合することで、岩相とN値の三次元グリッドモデルを構築する手法を開発したこと、である。グリッドのサイズは水平125m四方、垂直1mである。

この岩相とN値の統合型グリッドモデリング手法は、堆積平野域の浅部地盤で最大の物性境界である沖積層基底面の構造をモデルに反映することができる。その結果、本モデルでは、埋没谷の壁を境に軟弱な沖積層の泥層と堅い更新統の砂層とが隣接する岩相・物性の急激な側方変化が表現されている。そして、沖積層とその基盤となる更新統の区分、岩相・N値・深度を変数として、太田・後藤(1978)などの経験式を用いて、S波速度と密度の物性地盤モデルに変換できることから、地質学的な表現に加えて、地震応答特性評価に用いる地盤モデルとして有用である。

### 文献

江藤稚佳子ほか(2008)地質学雑誌,114,187-199; 木村克己ほか(2013)地質学雑誌,119,537-553; 太田 裕・後藤典俊(1978)物理探鉱,31,8-17.

キーワード: 三次元モデル, 浅部地盤, グリッドモデル, 沖積層基底面, 東京低地, ボーリングデータ

Keywords: 3D model, ground, grid model, basal surface of the Chuseki-so, Tokyo lowland, borehole data



## 南西諸島における強震動シミュレーションのための3次元地下構造モデル Three-dimensional structure model for modeling strong motion around the Ryukyu arc

藤岡 慧<sup>1</sup>; 竹中 博士<sup>2\*</sup>; 山田 伸之<sup>3</sup>; 中村 武史<sup>4</sup>; 岡元 太郎<sup>5</sup>; 藤原 広行<sup>6</sup>

FUJIOKA, Akira<sup>1</sup>; TAKENAKA, Hiroshi<sup>2\*</sup>; YAMADA, Nobuyuki<sup>3</sup>; NAKAMURA, Takeshi<sup>4</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>5</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>6</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>岡山大学, <sup>3</sup>福岡教育大学, <sup>4</sup>海洋研究開発機構, <sup>5</sup>東京工業大学, <sup>6</sup>防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>Okayama Univ., <sup>3</sup>Kyushu Univ. of Education, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>6</sup>NIED

The Ryukyu Islands have frequently been damaged by large earthquakes and tsunamis since ancient times. For instance, in 1771, gigantic tsunamis are occurred from an earthquake and more than 12000 people died in Yaeyama Islands. From the point of view of disaster prevention, it is also important to improve the precision of strong ground motion prediction. Here we build a 3D numerical structure model for modeling of strong ground motion, which includes land and ocean-bottom topographies and a seawater layer as well as subsurface structures of the arc side and the PHS slab, partially based on the J-SHIS model for near-surface structure (NIED) and a slab-top depth model of the PHS (Headquarters for Earthquake Research Promotion, Japan). We then try to improve the near-surface structure model in the islands using our original microtremor surveys. We also conduct numerical simulations of seismic motions for three sub-oceanic earthquakes occurring near the Amami Islands, Okinawa Island and Miyako Island to confirm the applicability of the constructed structure model and to check the improvement of the near-surface model.

キーワード: 南西諸島, 強震動, シミュレーション

Keywords: Ryukyu arc, strong motion, simulation

## 立川断層帯周辺の3次元深部地盤構造モデルの構築と地震動シミュレーション 3-D sedimentary layers model and simulation of seismic motions around the Tachikawa fault zone

佐口 浩一郎<sup>1\*</sup>; 地元 孝輔<sup>1</sup>; 山中 浩明<sup>1</sup>  
SAGUCHI, Koichiro<sup>1\*</sup>; CHIMOTO, Kosuke<sup>1</sup>; YAMANAKA, Hiroaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科

<sup>1</sup> Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

### 1. はじめに

首都圏では立川断層等による活断層による被害地震の発生が危惧されるため、精度の高い強震動予測が必要とされる。高精度な強震動予測を実施する場合、3次元シミュレーションのための地下構造モデルが必要となる。すでに首都圏では地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」(以下、推本モデル)等により3次元地下構造モデルが構築されつつあるが、観測記録に基づくモデル精度の確認が必要とされている。

本研究では、立川断層帯周辺地域で微動アレイ観測および微動単点観測を実施し、立川断層帯周辺のK-NET, KiK-netおよびSK-netによる観測点におけるレシーバー関数とレイリー波位相速度との同時逆解析およびH/Vスペクトルを用いて深部地盤構造を推定することにより、基盤の段差構造を含めたより詳細な3次元深部地盤構造モデルの構築を行った。さらに構築した3次元深部地盤構造モデルと推本モデルを用いて3次元差分法解析により2012年1月28日に発生した山梨県東部の地震の地震動シミュレーションを行った。

### 2. 微動アレイおよび微動単点観測

微動アレイ観測は立川断層帯周辺における12地点により実施した。各観測点ではそれぞれ半径1.5~2km程度と0.4~0.5km程度の大アレイおよび小アレイでの観測を行い、観測時間は大アレイで60分間、小アレイで30分間である。微動単点観測は立川断層帯を横切る9測線において、各測線30~34地点、特に断層近傍の1km以内では100m程度の間隔による高密度な観測を行った。観測時間は断層近傍の1km以内の観測点では10分間、その他の観測点では5分間である。得られた微動アレイ記録によるF-K法解析から、周期0.5秒~5秒の間で概ね0.5~2.5km/sの分散性を有する位相速度が得られた。また、微動単点観測記録のノイズの少ない81.92秒間のデータによる10~15区間のデータから求めたH/Vスペクトルでは、立川断層の西側ではH/Vスペクトルの卓越周期は概ね2~3秒程度であるのに対し、断層の東側では卓越周期は7秒以上と長くなっていた。さらに立川断層のごく近傍1km以内では西から東に向かってH/Vスペクトルの卓越周期が3秒から10秒へと長周期側に急激に推移しており、断層のごく近傍の1kmの範囲内で急激に地下構造が変化していることが推測された。

### 3. 立川断層帯周辺における3次元深部地盤構造モデルの構築

微動アレイ観測点近傍1km以内にK-NET等による地震観測点がある場合にはレイリー波位相速度とレシーバー関数による同時逆解析を行った。同時逆解析には焼きなまし法を用い、探索パラメータを $V_p$ (P波速度)、 $V_s$ (S波速度)および $H$ (層厚)とし、探索範囲は $V_p$ と $V_s$ では推本モデルの±200m/s、 $H$ では推本モデルの1~200%とした。その他の地震観測点では、同時逆解析結果による速度構造を用いてレシーバー関数による単独逆解析を行うことにより、また、立川断層帯のごく近傍の微動単点観測点では微動アレイ観測点の観測H/Vスペクトルの卓越周期に対する各観測点の卓越周期の比を、微動アレイ観測点において推定した深部地盤構造の層厚に乗じることにより深部地盤構造を推定した。推定した各観測点の1次元深部地盤構造より、立川断層帯周辺においてS波速度0.5km/s、0.9km/s、1.5km/sおよび2.4km/sの堆積層と3.2km/sの地震基盤から構成される3次元深部地盤構造モデルを構築した。構築した3次元深部地盤構造モデルでは、立川断層の中央部から南部にかけての地域では、地震基盤は南西から北東に向かい急激に深くなっており、特に立川断層の中央部においては1.7kmの地震基盤の落差を有している。

### 4. 3次元差分法による地震動シミュレーション

2012年1月28日に発生した山梨県東部の地震( $M_j=5.4$ )では、立川断層中央部の北東に位置する観測点(TKY2200:SK-net)では最大加速度および最大速度は $46.8\text{cm/s}^2$ (3成分合成)および $1.4\text{cm/s}$ であり、立川断層の南西に位置する観測点に比べて6~7倍程度振幅が大きい地震動が観測されている。したがって、構築した3次元深部地盤構造モデルの妥当性を検証するために、3次元差分法による地震動シミュレーションを実施した。3次元シミュレーションでは、震源を含む南北70km×東西60km×深さ50km程度を対象として、100m格子によりモデル化した。なお、10km以深における地殻・マントルは推本モデルをそのまま使用している。また、3次元解析の対象範囲は周期1秒以上とした。解析の結果、各観測点における観測記録との整合性は概ね調和的であり、特に推本モデルでは再現できていない断層の北東側で急激に地震動が大きくなる現象を再現することができ、構築した3次元深部地盤構造モデルの妥当性を示すことが出来た。

### 謝辞

本研究は、文部科学省「立川断層帯における重点的調査観測」を受けて実施されました。また、本研究ではKiK-net, K-NETおよびSK-netの地震観測記録を使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

SSS23-09

会場:211

時間:5月1日 11:15-11:30

キーワード: 立川断層帯, 微動アレイ探査, レイリー波位相速度, 3次元深部地盤構造, 3次元差分法

Keywords: Tachikawa fault zone, array microtremor exploration, Rayleigh wave phase velocity, 3-D sedimentary layers model, 3-D finite difference method

**DETERMINATION OF S-WAVE VELOCITY STRUCTURE BY MICROTREMOR ARRAY OBSERVATION IN TEKIRDAG AND ZEYTINBURNU (TURKEY)**  
**DETERMINATION OF S-WAVE VELOCITY STRUCTURE BY MICROTREMOR ARRAY OBSERVATION IN TEKIRDAG AND ZEYTINBURNU (TURKEY)**

KARAGOZ, Ozlem<sup>1\*</sup> ; CITAK, Seckin ozgur<sup>2</sup> ; CHIMOTO, Kosuke<sup>1</sup> ; YAMANAKA, Hiroaki<sup>1</sup> ; OZEL, Oguz<sup>3</sup> ; YALCINKAYA, Esref<sup>3</sup> ; ZANEIH, Hussam<sup>1</sup> ; ASKAN GUNDOGAN, Aysegul<sup>4</sup> ; KAOURU, Kojima<sup>1</sup> ; TOMOHIRO, Tsuchiya<sup>1</sup> ; AKSAHIN, Behiye<sup>3</sup> ; ILKAY, Sena<sup>3</sup> ; SISMAN DERAN, Fatma<sup>4</sup>  
KARAGOZ, Ozlem<sup>1\*</sup> ; CITAK, Seckin ozgur<sup>2</sup> ; CHIMOTO, Kosuke<sup>1</sup> ; YAMANAKA, Hiroaki<sup>1</sup> ; OZEL, Oguz<sup>3</sup> ; YALCINKAYA, Esref<sup>3</sup> ; ZANEIH, Hussam<sup>1</sup> ; ASKAN GUNDOGAN, Aysegul<sup>4</sup> ; KAOURU, Kojima<sup>1</sup> ; TOMOHIRO, Tsuchiya<sup>1</sup> ; AKSAHIN, Behiye<sup>3</sup> ; ILKAY, Sena<sup>3</sup> ; SISMAN DERAN, Fatma<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), <sup>3</sup>Istanbul University, Department of Geophysical Engineering, Turkey, <sup>4</sup>Middle East Technical Uni., Dept. of Civil Engineering and Dept. of Earthquake Studies, Turkey

<sup>1</sup>Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), <sup>3</sup>Istanbul University, Department of Geophysical Engineering, Turkey, <sup>4</sup>Middle East Technical Uni., Dept. of Civil Engineering and Dept. of Earthquake Studies, Turkey

The use of environmental vibration recordings (microtremors) is cost effective and easily collected data for site characterization that is a component of microzonation mapping and has become very popular around the world in the last years.

Local site conditions have a major effect on the level of ground shaking. For this reason we carried out microtremor measurements by using circular small array configuration at twenty one locations in Tekirdag, four locations in Zeytinburnu and one location in Yesilkoy. In addition to eight large array measurements for estimating S-wave velocity structures of shallow deeper soil formations for site effect analysis. These sites were selected by considering the different geological units (i.e. recent landfill, clay stone, silt stone, alluvium, lime stone, sand) in the cities. We also collected data on five buildings in Tekirdag in order to understand dynamics properties of buildings.

We estimated the phase velocities of Rayleigh waves at each site from the vertical components of recorded microtremor data by using Spatial Autocorrelation (SPAC) method. Obtained phase velocity dispersion curves are varied from area to area. The obtained phase velocities range from 100 m/s to 750 m/s along the coastline in Tekirdag while, they range from 200 m/s to 500 m/s for Zeytinburnu area.

Genetic Simulated Annealing Algorithm technique was applied for inversion of phase velocities to estimate 1-D S-wave velocity structures beneath the sites. The inverted Vs profiles are not uniformed. The preliminary results show that similar phase velocity changes have been seen at the low and the high periods on the different geological units along the parallel direction of the coastline. When we check the velocity changes from coastline toward the inland, we can see the different phase velocities on the different geological units.

キーワード: Microtremor, Spac, S-wave velocity, Tekirdag, Zeytinburnu, Turkey

Keywords: Microtremor, Spac, S-wave velocity, Tekirdag, Zeytinburnu, Turkey



## 東北地方太平洋沖地震時の京浜地域の長周期地震動特性 Characteristics of long-period strong ground motion in the Keihin-area during the 2011 Tohoku earthquake

植竹 富一<sup>1\*</sup>  
UETAKE, Tomiichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京電力株式会社  
<sup>1</sup> Tokyo Electric Power Company

東北地方太平洋沖地震により京浜地域で観測された地震動では、首都圏で卓越が指摘される周期7~8秒については顕著なピークは見られなかった。一方、周期2~3秒については顕著な卓越が見られ、特に海岸線に沿った観測点では、減衰5%の速度応答スペクトルで、100cm/sを越す応答が見られた [例えば、津野・他(2012)]。京浜地域で観測された加速度波形の振幅は、S波初動から徐々に大きくなり、最大値は約2分後に生じ、その後小さくなっていく。最大速度応答が発生する時間帯を調べると、周期2~3秒の最大速度応答値は、加速度包絡線が最大となる時間帯で生じており、波形前半の影響が大きいと考えられる。

入射地震波の伝播性状を調べるために、京浜地域で観測された記録を用いて位相速度の評価を試みた。選定した観測点は、植竹(2012)が、周期7~8秒の伝播性状の検討に用いた観測点6点に、K-NET、東大地震研の強震観測点、気象庁、東京都、横浜市の震度観測点を加え16点とした。長径約18km、短径9kmの長径が震央方向を向いた楕円形となる。また、アレイサイズの比較のため横浜市鶴見区周辺の観測点7点で構成したアレイでも解析を行った。こちらは直径約7kmの円に収まる範囲である。

解析は、観測点共通で記録が得られている時間帯とし、KNG001の記録を目安に記録開始から240秒間とした。波動伝播解析は、バンドパスフィルター波形にセンブランス解析 [Neidel&Taner(1971)] を適用し、スローネス平面の最大ピークから位相速度と到来方向を求めた。バンドパスフィルターは、中心周期を1, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20秒とし、中心周期の逆数(中心周波数)に対して±20%の幅を持つフィルターとした。解析の時間長は20秒として、10秒ずつずらして解析を行い時間帯による変化を検討した。なお水平動波形は、平均的な震央方向に対して Radial-Transverse 変換し、解析には Transverse 成分と上下動成分を用いた。

波形の相関性を示すセンブランス値は、短周期になるほど小さくなり、周期2秒、1秒の場合0.5以下の数値となった。また、全体アレイと鶴見区アレイを比較するとアレイが大きいほど小さい傾向がわかる。センブランス値の時間的な変化を見ると、加速度振幅が徐々に大きくなる波形前半部に比べ、加速度が小さくなる後半部に入ると急に小さくなる。センブランス値の時間的な変化と同時に、推定される位相速度や伝播方向にも変化が見られる。波形前半では、水平動・上下動とも震央方向から3km/sを越す速い速度での伝播を示すが、後半部では様々な方向からより遅い速度での伝播を示している。この傾向は短周期側で顕著である。なお、上下動の7~10秒では、震央方向から90度南側にずれた南東方向からの伝播が顕著となり盆地構造を反映している可能性がある。関東平野の地下構造モデルから推定される川崎付近の表面波の位相速度と比較すると、前半部の位相速度との対応は悪いが、後半部の遅い時間帯の解析結果に関しては、Transverse 成分は基本モードの Love 波、上下成分は基本モードの Rayleigh 波の位相速度と対応が見られた。なお、これらの傾向は、植竹(2013)が東京低地部のアレイ解析結果で確認した傾向と同様である。

以上、加速度波形の性状とセンブランス解析の結果から解釈すると、周期2~3秒の最大応答を生じさせた波動成分は、基本モードの表面波ではなく実体波である可能性が高いと考えられる。

解析には、東京電力、防災科研の K-NET、東京大学地震研究所、気象庁、東京都、横浜市の強震観測データを使用いたしました。記して感謝いたします。

キーワード: 長周期地震動, 2011年東北地方太平洋沖地震, センブランス解析, 位相速度, 京浜地域

Keywords: Long-period strong ground motion, the 2011 Tohoku earthquake, Semblance analysis, Phase velocity, Keihin area



## 2011年東北地方太平洋沖地震による大阪堆積盆地での長周期地震動の特徴 Characteristics of Long-period Ground Motion in the Osaka Sedimentary Basin due to the 2011 Great Tohoku Earthquake

佐藤 佳世子<sup>1\*</sup>; 岩田 知孝<sup>1</sup>; 浅野 公之<sup>1</sup>; 久保 久彦<sup>1</sup>; 青井 真<sup>2</sup>  
SATO, Kayoko<sup>1\*</sup>; IWATA, Tomotaka<sup>1</sup>; ASANO, Kimiyuki<sup>1</sup>; KUBO, Hisahiko<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 防災研究所, <sup>2</sup> 独立行政法人 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

2011年3月11日14時46分に2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)が、15時15分にその最大余震である2011年茨城県沖地震(Mw7.7)が発生した。これらの地震の震源から550~800km程離れた大阪堆積盆地内、特に大阪湾岸では大振幅の長周期地震動(2~10秒)が観測された。この地震動の特徴を調べるため、まず大阪盆地内外の地震動記録を可能な限り収集して解析を行った。これまでの研究から、大阪盆地内では厚く柔らかい堆積層の影響で長周期地震動の振幅が増幅し、継続時間が伸長する事が知られている。本研究対象の地震でも、盆地内の堆積層観測点での記録と盆地外の岩盤観測点での記録を比較する事で同様の特徴を確認できた。また、長周期地震動の振幅や卓越周期を地域毎に見ると、最大振幅が観測された大阪湾岸地域では周期7秒程度が卓越、次いで生駒山地と上町台地に挟まれた河内盆地では周期5~6秒の地震動が卓越した。一方、上町台地上での卓越周期は3秒程度で、振幅も湾岸地域に比べると小さかった。また、堆積層の影響がないと考えられる岩盤観測点においても2~10秒の周期帯では周期7秒程度の地震動がほかの周期に比べて大きくなっていった。

さらに、大阪盆地内で最大振幅の長周期地震動が観測された観測点の卓越周期である周期7秒の擬似速度応答スペクトルを大阪盆地外のそれと比較したところ、本震、最大余震ともに、大阪湾岸地域での応答値が関東平野での応答値に匹敵していた事がわかった。この周期7秒の距離減衰の特徴を調べたところ、関東平野、濃尾平野、大阪盆地の堆積層観測点で同程度の距離にも関わらず、観測点によって応答値が異なっており、特に大阪盆地内では最大30倍近い差が見られた。濃尾平野-大阪盆地間の岩盤観測点で、経験式(片岡ほか, 2008)から予測される応答値よりも大きな値が観測された。

以上から、観測された大阪盆地での大振幅の長周期地震動に対して、大阪盆地の堆積層特性だけでなく、震源から大阪盆地までの伝播経路特性も無視できないと考えられる。

観測された大振幅の長周期地震動の成因を調べる為に、差分法(Aoi and Fujiwara, 1999)を用いて震源から大阪盆地までの周期4~10秒の地震波動場の再現を試みた。計算領域は730km(東西)×330km(南北)×100km(深さ)で、堆積層を含む領域の格子間隔は水平200m、鉛直100mとした。地下構造モデルは全国一次地下構造モデル(Koketsu et al., 2008, 2012)を基に構築した。最小S波速度は350m/sで、それゆえ最小計算有効周期は3秒である。最大余震の震源モデルには震源近くのKiK-net CHBH14の地表観測点で波形が合うように推定したモーメント時間関数をもつ点震源を使用した。濃尾平野から大阪盆地に至る地域での地震動の特徴や、関東平野、濃尾平野、大阪盆地の堆積層での地震動の振幅の増幅と継続時間の伸長など観測記録の特徴が定性的に再現できた。ただし、周期別に見ると、大阪盆地内では周期7秒の地震動の振幅がやや過小評価となった。

この結果を踏まえて、本震時の長周期地震動シミュレーションを行った。計算領域は730km(東西)×400km(南北)×100km(深さ)で、格子間隔及び地下構造モデルは最大余震と同様である。震源モデルとしてはAsano and Iwata (2012)で推定された、周期0.1~10秒の地震動を説明する4つの強震動生成領域(SMGA)のうち福島県沖~茨城県沖に位置する2つのSMGAの重心位置と破壊開始時刻に点震源を仮定した。大阪湾岸などで観測波形に見られた大振幅の波群の到来を概ね再現する事ができた。大阪盆地での大振幅の長周期地震動は、主としてそれら2つのSMGAを震源とする地震動が伝播経路特性、盆地特性により増幅されて生成されたと考えられる。

### 謝辞

本研究では、独立行政法人 防災科学技術研究所による強震観測網(K-NET)、基盤強震観測網(KiK-net)、広帯域地震観測網(F-net)、関西地震観測研究協議会、独立行政法人 建築研究所、気象庁、大阪府の強震波形記録を使用いたしました。記して感謝申し上げます。

## 南海トラフの海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価 Long-period ground motion evaluation for the Nankai Trough megathrust earthquakes

前田 宜浩<sup>1\*</sup>; 森川 信之<sup>1</sup>; 青井 真<sup>1</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
MAEDA, Takahiro<sup>1\*</sup>; MORIKAWA, Nobuyuki<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> NIED

南海トラフのプレート境界ではマグニチュード8級の海溝型巨大地震が繰り返し発生しており、強震動や津波によって甚大な被害を引き起こされてきた。一方で、海溝型巨大地震では震源から遠く離れた平野や盆地においても高層ビルや石油タンクなどの長大構造物が長周期地震動による被害を受けることが知られている。南海トラフ沿いの大都市は平野上に発達しており、南海トラフの海溝型地震に対しては強震動と津波の評価のみならず長周期地震動の評価も重要である。「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について」[地震調査委員会(2013);以下、長期評価と略す]では、2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえ、過去に発生したことが確認されていないものの現在の科学的知見に基づいて推定される最大クラスの地震も含めた地震の多様性が考慮されている。将来発生する地震として多様な震源モデル(シナリオ)が想定される中では、少数に限られたシナリオのみを考慮した地震動の評価では不十分であり、ある地点に対して影響を及ぼす全ての地震を考慮して、その地点が大きな地震動に見舞われる危険度を評価する地震ハザード評価が有効だと考えられる。Maeda et al. (2013)では、南海トラフで従来想定されてきた単独型・連動型の地震や、長期評価で示された最大クラスの地震を対象として、震源域、アスペリティ(強震動生成域)配置、破壊開始点などを変えた100ケース程度の震源モデルに基づいた長周期地震動シミュレーションを行い、予測結果が極めて大きなばらつきを持つことを示した。本検討ではこれまでの検討を踏まえ、長周期地震動ハザード評価に向けた検討として、さらに多数のシミュレーション結果に基づいた統計的な評価を試行する。

震源モデルの違いによる長周期地震動のばらつきを把握することを目的として、南海トラフの地震を対象として300ケース超の震源モデルを設定し3次元差分法による長周期地震動シミュレーションを行った。震源域については、長期評価と同様に最大クラスの震源域を走向方向に6区分、深さ方向に3区分した小領域に分割し、それらの組合せとしてマグニチュード8級から最大クラスまでの15パターンの震源域を設定した。また、これまでの検討から、長周期地震動は破壊開始点とアスペリティ配置による破壊の指向性の影響を強く受けることから、これらについての不確定性を考慮した。さらに、トラフ沿いの浅い領域に対しては、震源時間関数や破壊伝播速度を変えることで長周期地震動の励起強さについての不確定性を考慮した。長周期地震動の計算に用いる特性化震源モデルの各パラメータは、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(レシピ)」(地震調査委員会、2008)に従って設定した。計算に用いる地下構造モデルは、全国1次地下構造モデル(暫定版)(地震調査委員会、2012)に「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の成果(東京大学地震研究所・他、2012)をもとにフィリピン海プレート上面構造の修正を施したもとのから、南西部に九州全域、北部に新潟平野までが含まれる範囲(東西1150km、南北950km、深さ100km)を切り出したものとした。長周期地震動の計算はGMS(青井・他、2004)により行い、計算により得られる工学的基盤上での最大地動速度値、速度応答スペクトルに基づいてばらつきの評価を行う。全ケースについての結果からは、地点により数10倍から100倍程度の振幅のばらつきがみられる。また、震源域の東方延長上に位置する関東平野内では、濃尾平野や大阪平野等よりもばらつきが大きい傾向がみられる。結果を震源域毎に分離すると、地震規模の大きな地震ほど振幅が大きい傾向も認められる。さらに、震源域毎に複数の計算結果が得られることから、震源域毎の平均的なシナリオや一回り大きなシナリオを地点ごとに抽出したり、確率的な地震動予測地図(地震調査委員会、2013)で設定されている「重み」を考慮することで、全ケースについての平均的なシナリオなどを地点ごとに抽出することを試みる。

謝辞:本研究は、「長周期地震動ハザードマップ作成等支援事業」による。また、本研究の一部は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点、および、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの支援による。

キーワード: 南海トラフ, 長周期地震動, 海溝型巨大地震, ハザード評価, GMS

Keywords: Nankai Trough, long-period ground motion, megathrust earthquake, hazard assessment, GMS

## 相模トラフの海溝型巨大地震を対象とした長周期地震動ハザード評価に向けた検討 Long-period ground motion evaluation for the Sagami Trough megathrust earthquakes

森川 信之<sup>1\*</sup>; 前田 宜浩<sup>1</sup>; 岩城 麻子<sup>1</sup>; 今井 隆太<sup>2</sup>; 青井 真<sup>1</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
MORIKAWA, Nobuyuki<sup>1\*</sup>; MAEDA, Takahiro<sup>1</sup>; IWAKI, Asako<sup>1</sup>; IMAI, Ryuta<sup>2</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> みずほ情報総研

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Mizuho Information & Research Institute, Inc.

将来発生する地震に対して、少数のシナリオに基づく地震動予測では不十分であり、不確実性および発生頻度を考慮したハザード評価を行うことが重要である。Iwaki et al. (2013) では、主に大正関東地震に相当する震源域を対象として、アスペリティ（強震動生成域）や破壊開始点位置の不確実性、および破壊伝播速度やすべり方向の不均質性の長周期地震動への影響を調べた。ここでは、その結果を踏まえた長周期地震動ハザード評価に向けた検討として、不確実性が大きいと考えられ、かつ長周期地震動への影響が特に大きい、アスペリティおよび破壊開始点の位置を変えた多数の震源モデルによる長周期地震動シミュレーションを行い、その結果を統計的に評価することを試みた。

マグニチュード 8 クラス以上の巨大地震を対象として、震源域、アスペリティおよび破壊開始点の位置を変えた 150 ケース以上の震源モデルについて、差分法による長周期地震動シミュレーションを行った。震源域については、Iwaki et al. (2013) による設定を基本としつつ、首都直下地震モデル検討会 (2013) による大正地震および元禄地震に相当するモデルを含む 10 パターンに変更した。結果として、地震の規模の範囲はモーメントマグニチュード (Mw) で 7.9~8.6 となっている。震源モデルは特性化震源モデルとし、地震調査委員会の震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）に従ってそれぞれの震源パラメータを設定した。地下構造モデルは、全国 1 次地下構造モデル（暫定版）（地震調査委員会、2012）にフィリピン海プレート上面構造を修正したものをを用いた。差分法の計算は GMS（青井・他、2004）により行った。長周期地震動ハザード評価として、工学的基盤上の最大速度および速度応答スペクトル（周期 5 秒、7 秒、10 秒）について、10 パターンの震源域ごとに平均値や大きめ (+1σ; σ は標準偏差) を求めるとともに、各パターンに対して発生頻度に対応するような「重み」を仮定して重ね合わせることを試みた。

今回の検討では多くの震源モデルを設定したものの、相模トラフの巨大地震に対する不確実性すべてを網羅できていないわけではなく、さらに多くの震源モデルによる検討が今後も必要である。一方で、相模トラフの地震に関しては、マグニチュード 8 クラスの震源域が首都圏直下まで広がることや、今回対象としなかったマグニチュード 7 クラスの地震の発生が切迫しているとされていることから、今後は短周期地震動も含めた広帯域地震動ハザード評価を進める必要がある。

キーワード: 長周期地震動, ハザード評価, 相模トラフ, 海溝型巨大地震, GMS

Keywords: long-period ground motion, seismic hazard assessment, Sagami Trough, megathrust earthquake, GMS



長距離を対象とした長周期地震動の距離減衰式の提案—F-net 記録に基づく幾何減衰項の距離依存に着目した検討—  
Empirical ground motion model for long period motions and for long distance -Distance dependent geometrical spreading term

元木 健太郎<sup>1\*</sup>; 加藤 研一<sup>1</sup>  
MOTOKI, Kentaro<sup>1\*</sup>; KATO, Kenichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 小堀鐸二研究所  
<sup>1</sup> Kobori Research Complex Inc.

長周期帯域を対象とした距離減衰式は、佐藤・他 (2012)、片岡・他 (2008)、湯沢・工藤 (2011) 等によって提案されており、それらの式の作成には震央距離が 500km までの観測記録が用いられている。一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、震源距離が 700km を超える大阪市咲洲において市庁舎内に地震被害が発生し、より長距離に適用可能な距離減衰式も望まれている。また適用範囲が 500km 以内に限られると、南海トラフで発生する地震に対する関東平野の予測には、震源の一部が適用範囲を超える。南海トラフの地震に対する関東平野の理論的手法による予測は、5%の応答スペクトルで 100cm/s を大きく上回る結果も得られており (森川・他, 2013)、多種の予測による比較を行うためには、長距離を対象とした経験的評価が必要である。本検討では、1000km までの長距離を対象とした距離減衰式を作成することを目的として、幾何減衰と震源距離の関係について着目する。

震源距離が長い観測記録は振幅が小さく、継続時間が長くなる。トリガー観測では記録が得られる点が少ないことや、後続位相が含まれない記録となることがある。また加速度記録では、振幅が小さい場合に長周期帯域の SN 比が下がる記録もある。本検討では長周期帯域で精度が高く連続観測による F-net の記録を使用した。対象とする地震は M5.0 以上のプレート境界地震、対象周期は 1-20 秒とした。F-net の観測点は基盤と見なせる点が多く、湯沢・工藤 (2011) と同様に回帰式はサイト係数を含まない式とした。

まず、距離減衰項を一般的な幾何減衰項と非弾性減衰項を距離に依存せずに一定として回帰した。非弾性減衰の小さい周期 20 秒の回帰曲線は、距離が約 100km 以内の範囲において観測記録の平均よりも傾きが小さく、逆に距離が 500km を超える範囲においては観測記録の平均よりも傾きが大きくなる傾向が得られた。これは距離範囲に依らず一定の減衰項を用いた距離減衰式による予測では距離範囲が短い範囲と長い範囲において、過小評価になることを示している。友澤・他 (2010) は、短周期帯において距離レンジによって減衰項の係数を変えた距離減衰式を求め、震源近傍の予測の精度を高めることに成功している。

非弾性減衰が小さい長周期では、震源距離が離れるにつれて実体波から表面波へと卓越する地震動成分の変化が現れ、幾何減衰による傾きは距離によって変化すると考えられる。長周期で幾何減衰がどのように変化するかを求め、距離範囲毎に幾何減衰項を評価する。また F-net の観測点密度による震源近傍の観測記録の少なさを補うため、Hi-net のデータも追加する予定である。

キーワード: 長周期地震動, 長距離, 幾何減衰  
Keywords: long period motions, long distance, geometrical spreading

## Long-Period Ground Motion Prediction Equations and Their Application to the Magnitude Estimation of Large Earthquakes

### Long-Period Ground Motion Prediction Equations and Their Application to the Magnitude Estimation of Large Earthquakes

IBRAHIM, Rami<sup>1\*</sup>; SI, Hongjun<sup>1</sup>; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>; MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup>  
IBRAHIM, Rami<sup>1\*</sup>; SI, Hongjun<sup>1</sup>; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>; MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

We developed long-period ground motion prediction equations (GMPEs) for peak ground velocities (PGVs) and peak ground displacements (PGDs) in a period range of 5-30 s. We only used strong motion data of KiK-net downhole stations located in layers of shear-wave velocities equal to or greater than 2000 m/s. We confirmed that the site effects due to surface geology for long-period PGVs and PGDs can be ignored at these observation stations. The dataset consists of 20 earthquakes of  $6 \leq M_w \leq 9.1$  occurred in and around Japan. Two-stage regression analyses were carried out to derive the GMPEs. We fit the data with bilinear regression lines bending at  $M_w$  7.5. Additional factors of focal depth and earthquake type were found to enhance the fitting with the observed data. Our developed long-period GMPEs predict the PGVs and PGDs of crustal earthquakes are larger than those of inter-plate and intra-plate earthquakes. The attenuation coefficients presented in the current study indicate that the long-period PGVs and PGDs increase by increasing depth.

We used the long-period GMPEs developed in this study to estimate the moment magnitude by fitting observed PGVs and PGDs at period range of 5-30 s with GMPEs. We estimated the magnitudes of the same 20 earthquakes and the 2013 Awaji Island earthquake ( $M_w$  5.8) recorded by downhole accelerometers of KiK-net. The results are consistent with the moment magnitudes from the Global CMT project. The method is useful to estimate the magnitude of giant earthquakes such as the 2011 Tohoku earthquake ( $M_w$  9.1). The proposed method can estimate the moment magnitude quickly if information of source area is available.

キーワード: long-period ground motion, ground motion prediction equation, moment magnitude, PGV, PGD

Keywords: long-period ground motion, ground motion prediction equation, moment magnitude, PGV, PGD



## 加速度計から得た速度と変位波形の誤差評価について Evaluation of random errors of displacements and velocities from strong motion records

徐培亮<sup>1\*</sup>  
XU, Peiliang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Strong motion accelerographs have been deployed worldwide to monitor the ground shaking of the Earth and the recorded accelerograms have been used to recover the velocities and displacements by integration. In spite of their fundamental importance in seismology and earthquake engineering, few works address the error estimates of the derived velocities and displacements. Although accelerographs have been used to compute velocity and displacement waveforms for more than 80 years, we show that no publications on error estimates of computed velocity and displacement waveforms are correct from the statistical point of view. We show that the error estimates of the velocities and displacements obtained from accelerograms in the earthquake literature approach to zero as the sampling interval of accelerographs tends to zero; these are erroneous from the statistical point of view. As a result, we present a set of formulae to correctly estimate the errors (or variances) of the integrated velocities and displacements from accelerograms. In addition, we also derive the covariances between the velocities and displacements.

Evaluation of random errors of displacements and velocities from strong motion records

Peiliang Xu  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University  
1-1, Kyoto 611-0001, Japan  
E-mail: [peiliang@dis.kyoto-u.ac.jp](mailto:peiliang@dis.kyoto-u.ac.jp)

**Abstract**  
Strong motion accelerographs have been deployed worldwide to monitor the ground shaking of the Earth and the recorded accelerograms have been used to recover the velocities and displacements by integration. In spite of their fundamental importance in seismology and earthquake engineering, few works address the error estimates of the derived velocities and displacements. Although accelerographs have been used to compute velocity and displacement waveforms for more than 80 years, we show that no publications on error estimates of computed velocity and displacement waveforms are correct from the statistical point of view. We show that the error estimates of the velocities and displacements obtained from accelerograms in the earthquake literature approach to zero as the sampling interval of accelerographs tends to zero; these are erroneous from the statistical point of view. As a result, we present a set of formulae to correctly estimate the errors (or variances) of the integrated velocities and displacements from accelerograms. In addition, we also derive the covariances between the velocities and displacements.

## インドヒマラヤ地域における強震動観測ネットワークによる地震検知 Earthquake detection from strong ground motion observation network in Himalaya, India

増田 徹<sup>1\*</sup>; 瀧 一起<sup>1</sup>; 鷹野 澄<sup>2</sup>; 古村 孝志<sup>2</sup>; 大木 聖子<sup>3</sup>; 伊藤 貴盛<sup>3</sup>; Chadha Rajender Kumar<sup>4</sup>; Srinagesh Davuluri<sup>4</sup>; Srinivas Dakuri<sup>4</sup>  
MASUDA, Tetsu<sup>1\*</sup>; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>; TAKANO, Kiyoshi<sup>2</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>2</sup>; OKI, Satoko<sup>3</sup>; ITO, Takamori<sup>3</sup>; CHADHA, Rajender kumar<sup>4</sup>; SRINAGESH, Davuluri<sup>4</sup>; SRINIVAS, Dakuri<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京大学情報学環, <sup>3</sup> 慶応義塾大学大学院, <sup>4</sup> National Geophysical Research Institute  
<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, <sup>2</sup> University of Tokyo, <sup>3</sup> Keio University, <sup>4</sup> National Geophysical Research Institute

自然災害の要因究明に向けた観測データの収集と解析のための技術的開発及び整備は、地震災害の減災、緊急対策、及び復旧計画の策定にとって重要課題の一つである。「自然災害の減災と復旧のための情報ネットワーク構築に関する研究」はこの課題に対する JST と JICA の国際共同研究「地球規模課題国際科学技術協力プロジェクト」のひとつであり、日本とインドの研究者が参加し、インドヒマラヤ地域のヒンドウスタン平野とヒマラヤの麓において強震動観測、地殻変動観測、及び建物振動に関する研究を進めているところである。

インド北部ヒマラヤ地域の地震活動度の高い領域に 26 観測点を配置し、2012 年 10 月にこの地域での強震動観測が開始された。地震計には広帯域速度型強震計を選択しデジタルレコーダーによる連続記録を得ている。地震計の記録帯域が広いことと記録計の分解能が高いことにより、短周期強震動の記録のみならず、観測ネットワークの近傍で発生する小地震からの微弱な地震動や遠地地震からの長周期地震動も記録されることが期待される。地震記録を有効に利用するためには連続記録のなかから地震記録を取り出すことが必要である。本報告では、連続記録から地震を早く正確に検知するための方法とその結果について報告する。

ネットワークの観測点はヒマラヤ地域の学校敷地内に設置されているため、地動ノイズが常に低いということはなく時間により変化し、また突発的な大きなノイズが発生することもある。このことを踏まえて、ノイズが高い環境でも早く正確に地震を検知するための簡単な方法を開発し、この方法で検知した地震と NEIC カタログに記載されている地震とを比較した。観測開始から現在までの期間で、震央距離に関わりなく、マグニチュード 7.0 以上の全ての地震、マグニチュード 6.5~6.9 の地震の 90 % 以上、マグニチュード 6.0~6.4 の地震の 50 % 以上がネットワークにより検知された。震央距離 100 度以内の範囲ではマグニチュード 6 以上の 80% 以上の地震が検知された。検知された地震のなかには NEIC カタログに記載されていない地震が含まれる。S-P 時間からネットワーク近傍の小地震であると判断されるが、これらは狭い領域内での応力状態を示す指標となるものであり、このような地震の検知はこの地域の地震環境を明らかにする上で重要である。

現在までの結果から、強震動観測ネットワークにより、ヒマラヤ地域の地震活動、震源から観測点までの伝播経路の影響、観測点におけるサイト特性、震源過程、地下構造の研究のために、ネットワーク近傍の地震及び遠地地震からの有効な記録が得られることが期待される。

キーワード: 強震動, 観測, ネットワーク, 地震検知

Keywords: strong ground motion, observation, network, earthquake detection

## 傾斜基盤の基端部から発生する表面波による液状化被害の拡大 Liquefaction damage expansion caused by the generation of surface waves from base end section

中井 健太郎<sup>1\*</sup>; 野田 利弘<sup>1</sup>; 村瀬 恒太郎<sup>1</sup>; 浅岡 顕<sup>2</sup>; 澤田 義博<sup>2</sup>  
NAKAI, Kentaro<sup>1\*</sup>; NODA, Toshihiro<sup>1</sup>; MURASE, Kotaro<sup>1</sup>; ASAOKA, Akira<sup>2</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院工学研究科, <sup>2</sup>地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>School of Engineering, Nagoya University, <sup>2</sup>Association for the development of earthquake prediction

東日本大震災では、浦安市をはじめ、広範囲の東京湾沿岸部の埋立て地盤において液状化現象が発生した。特徴の1つには、液状化地点と非液状化地点が空間的に不均一・非一様に分布していたことが挙げられる。その要因としては、地盤状態の不均一性、つまり、埋立て年代に伴う密度の違いや地盤改良の有無として解釈されることが多い。浦安市の地層構成に着目すると、液状化被害が軽微であった陸側は液状化層直下の軟弱粘土層厚が10m程度と薄いのに対し、液状化被害が甚大であった海側へ向かうほど軟弱粘土層厚が50mと厚く、約2kmにわたって基盤層が傾斜している。本稿では、この地層境界の傾斜に着目して二次元有効応力解析を実施し、傾斜基盤が表層の液状化発生に及ぼす影響を数値解析的に検討した。用いた解析コードは、砂から中間土、粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル)を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIAである。

図1(a)は、地震発生から50秒後の速度ベクトル図である。地層傾斜部周辺を示しており、鉛直方向にメッシュを2倍拡大している。表層部において反時計回りに巻き上げるような表面波の発生が確認できる。この表面波は傾斜基端部で発生し、図中の右側へ進行していく。図中には、基盤傾斜部中央付近における液状化層における平均有効応力低下率を、同地点の地層構成を反映して別途実施した、一次元解析結果(水平成層地盤)と重ねて示している。一次元解析では液状化しなかった(平均有効応力低下率<95%)が、二次元解析では平均有効応力低下率が95%以上となって液状化している(図1(b))。表面波の発生に伴って、地表付近での加速度が大きくなると同時に、主要動終了後も比較的大きな揺れが継続するためであり(図1(c))、二次元解析では平均有効応力低下率が長時間、上昇を続けている様子が見られる。図1(d)には、地震発生から200秒後のせん断ひずみ分布図を示す。表面波の発生に加え、地層傾斜の影響による地震波の屈折・反射によって、均質な地盤材料を想定した表層部においても不均一なせん断ひずみ分布が発生している。特に傾斜部直上でせん断ひずみが大きいのは、これは実際に浦安市で観測された液状化被害の様相とも符合し、非一様な液状化被害は、単に地盤の不均一性だけでなく、深部地層傾斜の影響もあったことが推測される。

以上まとめると、1) 基盤の傾斜によって傾斜基端部から表面波が生成され、表層地盤の継続的な揺れを引き起こすこと、2) それに伴い、傾斜部直上では加速度が大きくなると同時に、主要動終了後も比較的大きな揺れが継続するため、液状化が拡大すること、3) 均質な地盤材料であっても、層序の不均質性に起因して地震波が複雑に伝播し、地盤変状が大きくなること、を示し、多次元有効応力解析の必要性と有用性を示唆した。

Asaoka, A. et al.: Non-uniformity of surface layer liquefaction damage caused by layered system organization and dip of deeper layer, Japan Geoscience Union Meeting, SSS37-06, 2011.

Asaoka, A. et al.: Main shock ? aftershock interval effect on the liquefaction damage in Tohoku Region Pacific Coast Earthquake, Japan Geoscience Union Meeting, SSS33-P24, 2013.

Asaoka, A. et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 47-57, 2002.

Noda, T. et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, 48(6), 771-790, 2008.

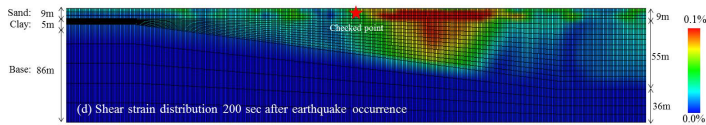
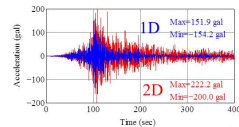
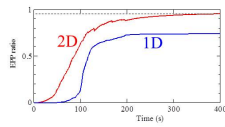
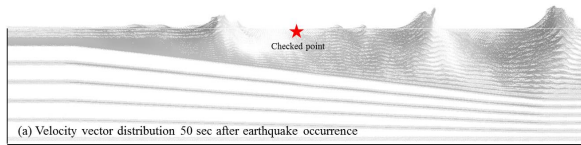
キーワード: 液状化, 傾斜基盤, 表面波, 有効応力解析

Keywords: liquefaction, stratum inclination, surface wave, effective stress analysis

SSS23-19

会場:211

時間:5月1日 15:15-15:30





## 2011年東北地方太平洋沖地震における液状化発生率と強震継続時間の関係の検討 Relationship between liquefaction occurrence ratio and strong ground motion duration for the 2011 off the Pacific coast

先名 重樹<sup>1\*</sup>; 若松 加寿江<sup>2</sup>; 松岡 昌志<sup>3</sup>  
SENNA, Shigeki<sup>1\*</sup>; WAKAMATSU, Kazue<sup>2</sup>; MATSUOKA, Masashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 関東学院大, <sup>3</sup> 東工大  
<sup>1</sup> NIED, <sup>2</sup> Kanto Gakuin University, <sup>3</sup> Tokyo Inst. Tech

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけての極めて広い範囲で液状化が発生した。特に関東の被害範囲・規模は非常に大きなものであった。被害が大きくなった理由について、今回の地震の余震を含めた継続時間の長さが被害規模を大きくしたとの研究報告もなされている。本研究では、液状化の発生率について、東北地方太平洋沖地震の地震動の継続時間の影響の検討を目的として、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体の地震計の波形記録から、震度および功刀・他(2008)による「リアルタイム震度」を計算し、若松・先名(2014)の液状化発生地点のデータと松岡・他(2011)の液状化発生率を計算する手法を参考に、継続時間の長さが液状化に与える影響を検討した。

### 2. 計測震度とリアルタイム震度分布の計算について

継続時間の考慮をするにあたり、まず、松岡・他(2011)による、液状化発生率の計算方法に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震の液状化発生地点に基づく、液状化発生率を計算した。なお、東北地方太平洋沖地震については、海岸付近は津波により液状化の痕跡が明瞭ではないことから、津波被害エリアを除いて評価した。入力としての地震動強さの指標は計測震度とし、地形・地盤分類 250m メッシュマップから推定した地盤の平均 S 波速度 ( $V_{s30}$ ) による地盤増幅率を考慮し、空間補間したものから地表の計測震度を求めている。一方、継続時間の考慮については、功刀・他(2008)の「リアルタイム震度」を用い、液状化が発生する計測震度閾値を 4.5 とし、その震度よりも大きくなる部分の面積 ( $\Delta I_s$ ) を求めた。求めた面積を、液状化を発生させる継続時間とみなし、計測震度分布同様の手法で空間補間をしたものから各メッシュの  $\Delta I_s$  を算出した。

計算結果と各地震についての液状化発生率との比較を行った。使用した強震観測記録は、防災科研の K-NET、KiK-net、気象庁および自治体の震度計等の地震観測記録を使用した。

### 3. 液状化発生率と継続時間との関係

東北地方太平洋沖地震の計測震度区分における東北地方の液状化発生率を微地形区分ごとに計算した。なお、全メッシュ数が 10 個未満については、算出される発生率の信頼性が低いと考えて検討対象外とした。東北地方単独で液状化の発生率を算出すると、松岡らのフラジリティカーブをやや下回る結果となり、関東地方の方が同じ計測震度で液状化発生率が高くなる傾向を示している。この原因を明らかにするために、継続時間の影響を考慮して、東北地方と関東地方の液状化発生率を比較した。同じ計測震度に対して東北地方の  $\Delta I_s$  は非常に大きく関東地域は比較的小さい。前述の東北地方と関東地方の液状化発生率の違いとは、逆の傾向を示している。液状化発生率と継続時間の関係を比較すると、関東地方の方が、より低震度・低継続時間で液状化が発生したといえる。なお、先名・他(2013)では、千葉県東方沖地震における液状化発生傾向は、東北地方太平洋沖地震での関東地方と同様に、 $\Delta I_s$  が小さくても発生率が大きくなる傾向がみられたが、液状化の震度に対する発生率は、東北地方太平洋沖地震の同じ震度に対し半分程度であった。すなわち、東北地方太平洋沖地震において関東地方の液状化発生率が高かったのは、継続時間の影響に加えて関東地方の地域性である可能性が高いことを示している。また、今回の検討では、地域性の違いを明らかにするために、松岡・他(2013)で示した 2 つの地域区分に分けて液状化の発生率を検討しており、ここでも地域性に大きな差があることを確認している。

### 4. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震における液状化発生に及ぼす地震動の継続時間の影響を検討するために、 $\Delta I_s$  を地震動継続時間の指標として東北地方と関東地方の液状化発生率を比較した。その結果、関東地方の方が低震度・低継続時間で液状化が発生したことが明らかになり、両地域の地域性に違いがある可能性が示唆された。今後、地震の大きさ ( $M_w$ ) と地域性を考慮した液状化発生率の検討をより詳細に行う予定である。

#### <参考文献>

功刀卓・中村光洋・青井真・森川信之・藤原広行：地震瞬時速報システムのための強震観測記録、地震、第 60 巻、2008 年、pp.243-252.

若松加寿江・先名重樹：4 章 1.1 液状化発生地域の分布と被害の傾向、東日本大震災合同調査報告 共通編 3 地盤災害、



SSS23-20

会場:211

時間:5月1日 15:30-15:45

丸善出版(株)、2014.3.

先名重樹・松岡昌志・若松加寿江・翠川三郎：2011年東北地方太平洋沖地震における液状化発生率と強震継続時間の関係の検討、第48回地盤工学研究発表会講演集、pp.1717-1718, 2013.7.

松岡昌志・若松加寿江・先名重樹：過去の液状化履歴からみた液状化発生率の地域性の検討、第48回地盤工学研究発表会講演集、pp.1715-1716, 2013.7.

キーワード: 液状化発生率, 強震継続時間, 微地形区分, フラジリティ曲線, 地域特性

Keywords: Occurrence of liquefaction, Continuation time of strong ground, Geomorphologic classification, Fragility curve, Regional peculiarity

## 波相論とソリトン The Wave Features Theory and Soliton

西澤 勝<sup>1\*</sup>  
NISHIZAWA, Masaru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし

<sup>1</sup> none

### 1. まえがき

筆者は文献1で、地震発生後50秒足らずで1回目の、90秒過ぎに急激な加速度の上下変動が認められ、文献2で示した(図-1)尾池和夫氏の宮城県南部沖のGPS波浪計の記録の、一つ目は“水面にゆっくりした上昇をもたらしたプレート型の地震動であり、二つ目は断層型という海底の急激な上下変動である”と述べた。本論文では、このゆっくりした水面上昇とSolitonを発生させるような急激な水面変動を生じさせる地震波を、Wave Features Theoryを用いて簡単に説明する。

### 2. 水面変動形態と Wave Features Theory

Frequencyがたとえば3 c/sと20 c/sのSeismic Waveを考える。筆者は直感で3 c/sの地震波は“ゆっくりした水面変動”を、20 c/sの地震波は、“より急激な水面変動”を起こすと考える。したがって、図-1の尾池和夫氏の著書の“緩やかな水面上昇”と記されている部分の地震波のFrequencyは小で、“急激な上昇”とある部分の地震波のFrequencyは大であるはずである。2011年、東日本大震災では、Solitonを発生させたわけである。尾池和夫氏の図で、②~⑦と波の山に番号が打たれていることは、この図の品格を著しく高めていることは、函館での地震学会で述べた通りである。②~⑦は孤立波ソリトン(Break down of Solitary Wave Solitons)の分裂を示しており、後のソリトンの衝突、追い越しを考えさせられるからである。3 c/sと20 c/sの地震波のスペクトル(振動数の大、小の異なる地震波)の山の形(正規分布形)(文献2)のちがいが理解されれば、水面がゆっくり上昇あるいはより急激に上昇するかが理解される。これは、水面変動ばかりでなく、地盤についても、建物についても同様である。構造物の場合には、大きな構造物(長周期構造物)と小さな構造物(短周期構造物)について、文献3、4、5等で述べた。2012.3.11東日本大地震では、壊れなかった建物が翌月4.7の宮城県沖地震で壊れたという建物がかかなりあったと聞く。この原因も、地震波のスペクトル形(正規分布形)により、判明すると考える。

### 3. 関東大震災の文学者達の眼(The eye of Writers under the title “The Great Kanto Earthquake (of 1923)”)

a) 正宗白鳥。「文明の薄弱さ」で“大磯なども東京人の別荘は全て破壊され、トタン屋根の貧弱な家は大抵は倒壊を免れた。田山花袋も「東京震災記」等で同じような記述をしている。

b) 竹久夢二。「変災雑記」で、昔の職人の建てた土蔵は所々に残ってゐる。陶磁器も眼で見た全体の感じと、質と量と形の上の釣合のとれたものはびくともしていない。一見してよくないものは倒れたり壊れたりしてゐる。アメリカ仕入れの西洋菓子のような、所謂文化建築は、いち早くぺちゃんこになった。又邪魔物にして、取り壊すとか、埋めるとか、二重橋の空き地にビルディングを建てるとかよくきいたが、上野の森や不忍の池、宮城の濠や芝や愛宕の山がどれだけ火事を防いでくれたかと、次の東京は、「緑の東京」でなくてはと述べている。文献3、4、5等で述べた、阪神大震災での、大きな構造物(長周期構造物)と小さな構造物(短周期構造物)の挙動のちがいについて、ここで述べた文学者達以外も描写記述されている。もしこれらの文学者達に科学的知識があれば、関東大震災直後から、今日の長周期・短周期構造物に対する諸問題の研究がスタートしていたように思われる。

### 4. これからの地震学について(From now on, Seismology)

これからの「地震学」は流体力学、特に「波動理論」が大切である。広くは「振動学」となる。構造物は「振動学」、「地盤の液化化」は「波動論」。又今回の2011東日本大震災の津波計算では、Solitonの発生によることから、「非線形波動」つまり「非線形波動とソリトン」、KDV方程式の学問等が必要となる。又NZ地震、浦安などの液化化も、湖のような“波動論”であつかう必要があることは、すでに述べた。

### 参考文献

1. 西澤勝(Masaru Nishizawa): GPS波浪計のSolitonと2011東日本大震災の地震波との関係(The Relationship between Soliton in GPS Wave gage and Seismic Wave of 2011 The TOHOKU District Pacific Ocean Earthquake), JpGU S-SS-33-19 (2013.5.19-24)
2. 西澤勝(Masaru Nishizawa): 地震動によるフーリエスペクトルの山の形(正規分布形)の考察(Study of Shape of Mountain (Normal Distribution) of Fourier Spectrum of Earthquake Motion), JpGU S-SS30-P12 (2012.5.20-25)
3. 西澤勝: 阪神大震災の調査結果の感想、第21回日本環境学会講演集、1995
4. 西澤勝: 1995年1月兵庫県南部地震の液化化に伴う免振力についての若干の考察
5. 西澤勝: 液化化に対する私見とその応用、第37回日本環境学会研究発表会、2011年6月

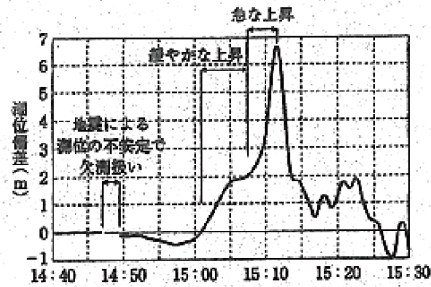
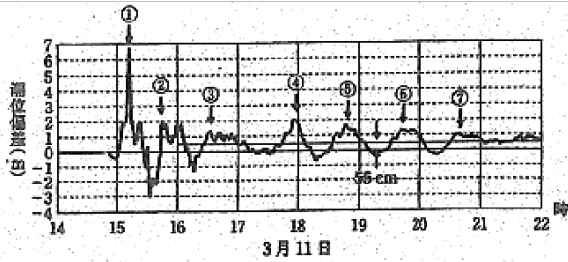
SSS23-21

会場:211

時間:5月1日 15:45-16:00

キーワード: 波相論, ソリトン, KDV 方程式, 非線形波動

Keywords: Wave Features Theory, Soliton, KDV Equation, Nonlinear waves



尾池和夫著  
 「日本列島の巨大地震」  
 岩波科学ライブラリー 185, P10  
 ①: Soliton  
 ②~⑦: Break down of Solitary wave Solitons  
 参考: 日野幹雄著「流体力学」  
 朝倉書店, 1992

岩手県南部沖のGPS波浪形の記録(左)と最初の部分の拡大図(右)  
 国土交通省のデータをもとに作成

## 地震ハザードカルテ - 多指標とりまとめ型地震ハザード情報提供ツールの開発 Seismic hazard karte : A Tool for distribution of seismic hazard information with Multi-index

東 宏樹<sup>1\*</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
AZUMA, Hiroki<sup>1\*</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### 1. 地震ハザードカルテの概要

防災科研は2013年7月に『地震ハザードカルテ』を公開した。『地震ハザードカルテ』とは地点ごとの地震ハザード情報をまとめたもので、任意の場所を検索しその場所に関する地震危険度の診断書を作成することができる。結果は健康診断の通知書のように地震の危険度に関する各種地盤情報・ハザードカーブなどの多指標を多数のチャートやグラフを用いてA4 1枚にまとめられた一覧形式で表示する。

### 2. 開発の目的

地震本部による地震ハザード情報に対する国民の認知度等に関する調査や、総合部会における議論等から、利用者自身に由縁を持つある地点を起点として診断する形式を利用することで、地震ハザードに対する認識を広めることが可能と考えられた。地震ハザードカルテは他の地震ハザード情報と同様に基本的には一般市民全体に向けての発信であるが、ユースケースに分解した場合に大きく分けて以下の領域において使われることを想定した。特に①保険・不動産などの事業者に対しては、顧客向けのサービス資料として。②防災教育関係者および防災に携わる地域住民に対しては、ワークショップや家庭で対策を進めるための道具や、地域の地震ハザード情報の見方を教える教材として。③IT関係者、開発者に対しては、公開APIであるJ-SHIS Web APIを利用してレスポンス(返値)を表現するやり方のサンプルとして、それぞれ利用がしやすいよう意識して設計し、開発を行った。

### 3. 公開した結果

公開した当初から多くの反響があり、国により一元的に評価された地震ハザード情報の見せ方の一つとして一定の効果を上げたと考えられる。今回地震ハザードカルテとして提供された情報の中にコンテンツとして新しいものは一つもなく、全てJ-SHIS | 地震ハザードステーションからもとより提供されていた情報を異なる形式で可視化したに過ぎない。しかしそれでもカルテに対してポジティブなものでは「大変わかり易くてよい。遠くに住む家族にも教えた」というものから、ネガティブなものでは「こんなものが出ると当社の所有物件の価値に影響して困る」というような、ハザード情報が新規に公開された時のような反応が多数みられた。

### 4. 参考 URL

地震ハザードカルテ <http://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/karte/>

地震ハザードカルテの見方 <http://www.j-shis.bosai.go.jp/karte-manual>

【ユレッジ特別企画】地震ハザードカルテの見方をざっくり解説 <http://www.yullege.jp/?p=282>

J-SHIS Web API : <http://www.j-shis.bosai.go.jp/api-list>

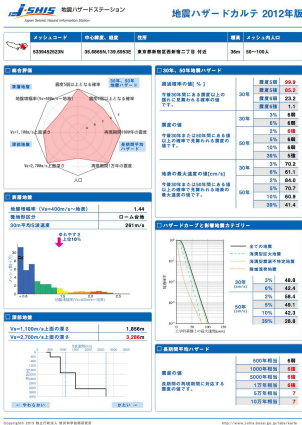
キーワード: 地震ハザード, 情報提供ツール

Keywords: Seismic hazard, information tool

SSS23-22

会場:211

時間:5月1日 16:15-16:30





## 1943年鳥取地震直後に実施されたアンケートから導かれる気象庁震度分布 JMA intensity distribution of the 1943 Tottori earthquake derived from immediately conducted questionnaire survey

中村 真理子<sup>1</sup>; 香川 敬生<sup>2\*</sup>; 野口 竜也<sup>2</sup>; 西田 良平<sup>2</sup>  
NAKAMURA, Mariko<sup>1</sup>; KAGAWA, Takao<sup>2\*</sup>; NOGUCHI, Tatsuya<sup>2</sup>; NISHIDA, Ryohei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>岡山市役所, <sup>2</sup>鳥取大学大学院工学研究科  
<sup>1</sup>Okayama City Office, <sup>2</sup>Tottori University

東京大学地震研究所および理学部地球物理学教室は、1943年鳥取地震、1944年東南海地震、1945年三河地震、1946年南海地震、1948年福井地震についてアンケート調査を実施し、震度集計資料が地震研究所に保存されていた(津村・他、2010)。西田・他(2013)はこのうち1943年鳥取地震の資料を整理し、改正メルカリ震度分布図を作成している。本研究では、改正メルカリ震度への換算を前提として作成されたアンケート項目のそれぞれについて現行の気象庁震度階との対応関係を求め、震度集計資料から気象庁震度階を評価することを試みた。

アンケートは主に学校に対して実施され、回答者の年代、住所、地震時に居た場所、その地形・地質情報などの基本事項に加えて、震度対応が見て取れる選択枝が設定され、回答者が感じ、見聞きした情報を回答するようになっている。これらを23項目に分類し、回答があったそれぞれの項目で改正メルカリ震度が求められ、その平均値が回答者の居た場所の震度として震度集計資料に整理されている。そこで、23項目の選択枝それぞれの記載項目について、改正メルカリ震度階に対応する気象庁震度を設定し、それらを複数の震度階でおこなうことにより、改正メルカリ震度から気象庁震度を評価する換算式とその適用範囲を求めた。実際には「立木など」に関する項目が気象庁震度階の解説に無いため除いたが、22項目について換算式を作成することができた。各回答についてそれぞれの項目で気象庁震度を算定し、その平均値から気象庁震度階を求めた。

活用することができたデータは、ほぼ糸魚川-静岡構造線以西から九州北東部までの全1935点であったが、これは現行の計測震度計の分布密度に匹敵するものである。その結果、これまで気象官署のデータのみから推定していた震度分布では把握出来なかった、横ずれ断層特有の断層延長に沿った強震動域や、遠地であっても堆積地盤で震度が大きいなど、防災資料としても有意義な震度分布図を作成することができた。当時のアンケート資料から現行気象庁震度分布を推定する方法を構築したことにより、他の4地震についても同様の解析をおこなうことで地震動の全容を把握することができるものと期待される。

謝辞 基礎データの編集作業では、放送大学鳥取センターの石賀晶仁氏にご協力頂きました。

参考文献 津村・他(2010)歴史地震, 25. 西田・他(2013)日本地震学会講演予稿集, 2013年度秋季.

キーワード: 1943年鳥取地震, アンケート調査, 気象庁震度, 改正メルカリ震度

Keywords: the 1943 Tottori earthquake, questionnaire survey, JMA intensity scale, modified Mercalli scale

## 東日本大震災に伴う死者の年齢依存性 (4) 乳幼児・高令者の死亡率は常に高いのか? Mortality in the East Japan Great Earthquake (4) Infants and elderlies should always suffer heavy rate of deaths?

太田 裕<sup>1\*</sup>; 小山 真紀<sup>2</sup>  
OHTA, Yutaka<sup>1\*</sup>; KOYAMA, Maki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科研, <sup>2</sup> 京大院工学研究科  
<sup>1</sup>TRIES, ADEP, <sup>2</sup>Engr. Fac. Kyoto Univ.

### 1. 前承け

今までの調査・研究を通じて、地震(津波)に伴う死者の年齢依存特性が意外に多様であることを明らかにしてきた。その一方で特筆すべきパターンが2つあることも判った。すなわち、横軸に年齢を右に向けて昇順にとり、縦軸を死亡率とした座標上でみた場合、その一つは英語大文字のU字型であり、他の一つはやはり大文字のJ字型である。特に、2011年東日本大震災においては後者、すなわちJ字型となる地域が多いことを確認した。そうだとすると、災害弱者といわれる乳幼児の死亡率が高令者に比べて格段に低いこととなり、このままでは一寸理解し難い。そこで、本論ではこの問題に注目し、2つの異なる視点から考察した。

### 2. 平常年死亡率との対比から

年齢別の死亡率を比較する方法の一つとして、平常年の人口10万人当りの年齢別死亡率と災害等異常時のそれを比較する方法が提案されている[尾崎, 2012]。この方法の自然の発展として、『ある地域で地震等の災害に起因して発生した死者総数と同数の死者を平常時1年間に齎すような仮想人口集団を考え、この集団による年齢別死者数との対比を試みるという方法がある。この観点から、東北3県(岩手, 宮城, 福島県)を対象にそれぞれで相当人口と年間相当死者数を算定し、震災に伴う死者との対比を試みた。その結果、今までのように年齢別死者の存在比を単純にみるだけでは判然としなかった乳幼児とか若年層の死亡率が相当際立って見えるようになった。その一方で、J字型パターンにおいて高令者側で目立っていた死亡率が平常時のそれよりも低いことが見出された。

### 3. 余命年数損失の視点から

この問題を今一つ違った視点で捉えてみる。いうまでもなく、人命は一様に尊い。しかし、彼らの余命年数を考えると同じ死者でも余命残存年の長い人間の死亡は、一当然有って然るべき生存の年月が剥奪されることに他ならず一乳幼児・若年者ではその損失が特に大きいことを意味する。このような視点から、余命残存年数を重み付け要素とした上で災害時死亡に伴う年齢別の余命年数の損失量をみる事が出来る。なお、ここで平均余命が問題となるが、これは0歳児のそれに他ならず、わが国では(男女を一体的にみると)80余歳である。しかし、現に100歳以上の生存者も多いことから、積算に際してはこの平均余命よりはかなり大きな値を考える方が妥当であろう。ここではこれを余命残存年数とし、(100-当該年齢)  $m$  を重み係数として採用した。ここに、べき乗指数 ( $m$ ) は任意量であるが、 $m=1\sim 2$  の間で幾つか変えて試算した。その結果、程度の差はあれ、余命残存特性量をみることで、乳幼児等若年層においてその損失が際立って大きいことを確認した。

### 4. 終りに

従来のように単純に死者発生率を年齢別の存在比でみた場合、J字型の関係が得られたとしても一乳幼児の死亡率が一見低いようにみえたとしても一視点を変えてみることで乳幼児を初めとする若年層側では相当高い死亡率となっていることが、今回の試算で明瞭になった。また、今回の結果は、先に得たU字型分布についてもさらに立ち入った考察が必要なことを示唆している。

#### 文献等

- 1) 尾崎, 地震災害時および災害後の健康被害, 厚生指針, 59, 2012. (志垣; 私信).
- 2) 太田・小山, 2011年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性 (2) 2013年春 J p GU 大会.
- 3) 太田・小山, 同上 (3), 2013年秋地震学会.
- 4) 小山他, 東北地方太平洋沖地震における浸水状況を考慮した市町村別・年齢階級別死者発生状況, 土木論文集, 64, 地震工学, 32, 2012.

キーワード: 東日本大震災, 死者, 年齢依存性, 余命特性

Keywords: East Japan Earthquake, Mortality, Age-dependency, Life Expectancy

## 遠山地震 (1718 年) の災害調査 Disaster research in the Toyama Earthquake(1718)

坂本 正夫<sup>1\*</sup>  
SAKAMOTO, Masao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 飯田市美術博物館  
<sup>1</sup>Iida city Museum

### 1. はじめに

過去約 1600 年間に長野県内で記録された被害地震の内、県南部で広範囲に被害をもたらした地震は、1718 年に飯田市南信濃和田を震源とする遠山地震のみである(新編日本の活断層,1991、気象庁精密地震室,2013)。遠山地震は、マグニチュード 7.0 で享保 3 年 7 月 26 日(1718 年 8 月 22 日に発生した(宇佐美、2003))。この地震は、中央構造線沿いで発生したと考えられている(坂本、1977)。この地震の災害について、文献収集と現地調査を行ったので報告する。

### 2. 調査結果

長野県南部で判明した災害場所は 22 ケ所である。この他、長野県内で 4 ケ所、静岡県内で 3 ケ所、愛知県内で 3 ケ所、岐阜県内で 3 ケ所、合計 35 ケ所であった。この内、特徴的な災害事例を示す。(1) 飯田市南信濃和田:震央付近で盛平山が崩れて裾野に出山を形成した。押出沢から押し出した土砂が遠山川をせき止めた。せき止め湖は一週間後に決壊し、遠山川の流路を替えて夜川瀬の平坦地を形成した。(2) 阿南町新木田(あらきだ):花崗岩の基盤に砂岩・泥岩を中心とした新第三紀層がおおひ、天竜川の右岸を構成している。地震によって「きび嶋」という場所の斜面が崩れて天竜川をせき止めた。せき止めた水は、上流の現存する大島という集落を水没させた。(3) 阿南町古城:新第三紀の砂岩・泥岩からなる地質である。古城では、山崩れが 24 ケ所で発生し、地名のついた田畑の崩壊は 33 ケ所あり、現在もその地名が使われている。(4) 下條村陽阜(ひさわ):第四紀扇状地や土石流の堆積物からなる。この流域で山崩れが起こり、寺や神社とその集落の多くが破壊された。また、この地区から東の方向に伊那山地、赤石山脈がそびえて見えるが、それらの山々が崩れる様子が見えたとの伝承がある。(5) 泰阜村金野(きんの):花崗岩類の地質からなる。山崩れで荒れた田が 24 ケ所あり、その内 12 ケ所は現在も使われている地名である。場所が特定できた 12 ケ所と特定できなかった 12 ケ所を含めて、幅約 1.5km で長さ約 2km の範囲内で 24 ケ所の災害密度はかなり高い。(6) 遠州「てうな」(静岡県浜松市横山町):「遠州『てうな』という所で天竜川が止まった」という文書が見つかった。現在この地名は使われていないが、『雲名』(うんな)という地名があり、この付近で天竜川がせき止められたと推測した。この地震で天竜川が 2 ケ所でせき止められたことが分かった。

### 3. 議論と考察

(1) 調査して見えたこと:飯田市南信濃和田の中央構造線沿いを震央として見つかった地震記録の分布はかなり偏っている。南北に近い方向で走る中央構造線を境にして、西側にしか被害の記録は見つからなかった。東側は赤石山脈でほとんど人が住んでいない地域であり、災害があっても記録が残らなかったのである。また、300 年の時間が経過し、様々な要因で記録が失われている。(2) 地質的な特異性:地質の違いと地震災害の分布から 3 種類に分けられる。一つ目は、花崗岩類の基盤に発生した災害で、規模の大きな山崩れである。二つ目は、新第三紀層の中に発生した災害である。これは阿南町を中心に分布し災害記録も多い。また、花崗岩の基盤と新第三紀層との境を走る富草断層が地震動を増幅させた可能性もある。三つ目は、第四紀の段丘礫層や扇状地礫層の上で発生した災害である。固結度が弱く柔らかい礫層では、人間生活に直結した家屋の倒壊や田畑への土石の流入が目立つ。(3) 中越地震との比較:中越地震は、2004 年(平成 16 年)に新潟県川口町の信濃川付近で発生したマグニチュード 6.8 の地震である。被害地域は新第三紀中新世から鮮新世にかけての地質である。約 300 年経った遠山地震の記憶は少なくなっているが、阿南町の似た新第三紀層での被害密度は似ている。(4) 宝永地震との関連:1707 年に日本の地震史上最大級のマグニチュード 8.6 の宝永地震が発生している。この 11 年後に遠山地震が発生している。すなわち、宝永地震の余震として遠山地震が発生したと見られる。

### 4. 引用文献

気象庁精密地震観測室、2013、ウェブサイト、坂本正夫、1977、中央構造線総合研究連絡誌 2、新編日本の活断層、1991、東京大学出版会、宇佐美龍夫、2003、東京大学出版会

SSS23-P01

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

キーワード: 遠山地震, 1718年, 地震災害, 中央構造線, 宝永地震

Keywords: toyama earthquake, the year 1781, earthquake disaster, median tectonic line, hoei earthquake



## アンケート震度算定方法の改良に関する一考察 A discussion on improvement of calculation technique for questionnaire survey of seismic intensities

齊藤 良平<sup>2</sup>; 山本 英和<sup>1\*</sup>; 齊藤 剛<sup>1</sup>  
SAITO, Ryohei<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Hidekazu<sup>1\*</sup>; SAITO, Tsuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岩手大学工学部, <sup>2</sup> 岩手大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Iwate University, <sup>2</sup> Graduate School of Engineering, Iwate University

本研究では、東北地方太平洋沖地震を含む過去に岩手県内で発生した大地震に対する高密度アンケート震度調査で得られた震度と計測震度とを比較した結果、東北地方太平洋沖地震の場合のみ、アンケート震度が計測震度より約0.5程度大きい値を示したが、他のすべての地震のほとんどの観測点ではアンケート震度が計測震度より小さい値を示すことがわかった。特に、2011年4月7日の余震では計測震度6弱を示すいくつかの観測点ではアンケート震度と計測震度との差が0.1-0.2程度で比較的小さいが計測震度5強を示す観測点ではその差が0.5以上と大きくなる。また2003年や2008年の地震の場合、計測震度5弱から5強の範囲でアンケート震度が計測震度より約0.3程度小さくなることが示された。そこで、高震度領域に対応可能な方法の一つとして井上ほか(1999)の方法を用いて太田ほか(1998)の方法と比較した。井上ほか(1999)によると、太田ほか(1998)では震度4.5程度の中震度領域ではアンケート震度が低く見積もられることを指摘している。彼らは太田ほか(1979)の算定方法を変更せずにその差異を解消するために経験式を用いて高震度領域まで対応可能な方法を提案した。我々の調査を両手法で検討した結果、井上ほかの経験式を用いた場合、東北地方太平洋沖地震以外の地震では、アンケート震度と計測震度との関係は良い対応を示すことがわかった。

計測震度とアンケート震度との差異についてアンケートの質問項目の回答の違いから考察した。揺れの長さに関する質問18において、計測震度が震度5強で同一である観測点近傍の調査票の回答分布を調査した結果、東北地方太平洋沖地震の場合の最頻値の回答番号は5の「非常に長かった」であるが、他の地震の場合は4の「長かった」であった。計測震度が震度6弱の場合も同様の結果であった。継続時間に関する回答の震度係数が算定震度に大きな影響を与えていると考えられる。計測震度は地震動の加速度記録にフィルター、ベクトル合成などの処理から得られるが最低0.3秒継続時間があれば同一の値となる。今までの算定式を作成する際の調査データとして東北地方太平洋沖地震に匹敵する継続時間を有する地震の調査が皆無であるためこのような結果になったと推察される。また、そのときの行動に関する質問22において、すべての地震で最頻値の回答番号は2の「意識的に身の安全を考えた」であったが、東北地方太平洋沖地震の場合のみ、3の「意識して戸外へのがれた」の回答の割合が高かった。質問22も長時間の継続時間に関連する質問と予想される。

参考までに、継続時間の長い東北地方太平洋沖地震のみのアンケート震度と計測震度を満足する経験式を作成した。

$I = 1.2872 \times (I_q) - 0.4727$ , ここで  $I_q$  は太田ほか(1979)のアンケート震度を示す。

なお、我々の所有するアンケート震度を用いて計測震度を満足するように、太田ほか(1998)の手法と同様に、震度係数は従来の値を利用して、質問のおもみを1, 2, 3の3段階の整数値として統計分析によって決定しなおした結果、震度の残差は井上ほか(1999)と同程度となった。よって、マグニチュード9の巨大地震を例外とすれば、頻りに発生するM7からM8程度の被害地震の際にアンケート震度調査を実施する場合、井上ほか(1999)のアンケート震度換算式を利用したほうが、計測震度とアンケート震度との差異が中震度から高震度領域にわたって比較的小さいことが期待でき、かつ過去のデータも活用できると考えられる。参考までに、井上ほか(1999)の方法で東北地方太平洋沖地震と4月7日の余震の詳細震度分布を作成した結果、当然のことながら計測震度観測点近傍では計測震度とアンケート震度はほぼ一致し、それ以外の地域では、山本ほか(2013)により震度4から5弱の地域が震度5弱から5強と大きい値を示すことがわかった。

### 参考文献

太田ほか(1979)北海道大学工学研究報告, 92, pp. 117 - 128.

太田ほか(1998)自然災害科学, 16, pp. 307 - 324.

井上ほか(1999)地震 第2輯, 51, 4, 1999, pp. 395 - 407.

山本ほか(2005), 物理探査学会題112回学術講演会講演論文集, pp. 180 - 183.

山本ほか(2009), 平成20年度北東北国立3大学連携推進研究プロジェクト, 岩手・宮城内陸地震被害調査研究報告書, pp. 4 - 17.

山本ほか(2013), 東北地域災害科学研究, 第49巻, pp. 29 - 34.

山本ほか(2013), 東北地域災害科学研究, 第49巻, pp. 35 - 40.

キーワード: アンケート震度算定方法, 計測震度, 高震度領域



---

SSS23-P02

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

Keywords: Calculation technique for questionnaire seismic intensities, Instrumental Seismic Intensity, Large seismic intensity range

## SATREPS Project on Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation in the Marmara Region and Disaster Education in Turkey

### SATREPS Project on Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation in the Marmara Region and Disaster Education in Turkey

CITAK, Seekin ozgur<sup>1\*</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>; ERDIK, Mustafa<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; OZEL, Nurcan meral<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>; HORI, Muneo<sup>3</sup>; KUMAMOTO, Kunihiko<sup>4</sup>; KALAFAT, Dogan<sup>2</sup>; PINAR, Ali<sup>2</sup>; OZEL, Oguz<sup>5</sup>; YALCINER, Ahmet cevdet<sup>6</sup>; NURLU, Murat<sup>7</sup>; TAMIRCAN, Gulum<sup>2</sup>; MIRZAOGLU, Mete<sup>7</sup>; ARIYOSHI, Keisuke<sup>1</sup>  
CITAK, Seekin ozgur<sup>1\*</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>; ERDIK, Mustafa<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; OZEL, Nurcan meral<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>; HORI, Muneo<sup>3</sup>; KUMAMOTO, Kunihiko<sup>4</sup>; KALAFAT, Dogan<sup>2</sup>; PINAR, Ali<sup>2</sup>; OZEL, Oguz<sup>5</sup>; YALCINER, Ahmet cevdet<sup>6</sup>; NURLU, Murat<sup>7</sup>; TAMIRCAN, Gulum<sup>2</sup>; MIRZAOGLU, Mete<sup>7</sup>; ARIYOSHI, Keisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan, <sup>2</sup>Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Researches Institute (KOERI), Turkey, <sup>3</sup>University of Tokyo, Japan, <sup>4</sup>Edogawa University, Japan, <sup>5</sup>Istanbul University, Turkey, <sup>6</sup>Middle East Technical University, Turkey, <sup>7</sup>Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Turkey  
<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan, <sup>2</sup>Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Researches Institute (KOERI), Turkey, <sup>3</sup>University of Tokyo, Japan, <sup>4</sup>Edogawa University, Japan, <sup>5</sup>Istanbul University, Turkey, <sup>6</sup>Middle East Technical University, Turkey, <sup>7</sup>Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Turkey

Since 1939, devastating earthquakes with magnitude greater than seven ruptured North Anatolian Fault (NAF) westward, starting from 1939 Erzincan (Ms=7.9) at the eastern Turkey and including the latest 1999 Izmit-Golcuk (Ms=7.4) and the Duzce (Ms=7.2) earthquakes in the eastern Marmara region. On the other hand, the west of the Sea of Marmara an Mw7.4 earthquake ruptured the NAF's Ganos segment in 1912. The only un-ruptured segments of the NAF in the last century are within the Sea of Marmara, and are identified as a "seismic gap" zone. The Sea of Marmara should be focused on through a multidisciplinary research and uncertainty in magnitude, epicenter, recurrence, fault segmentation, and their cross effects should be identified and characterized. To fill the necessity above, a comprehensive multidisciplinary research on earthquake and tsunami disaster mitigation in the Marmara region and disaster education in Turkey in the framework of Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS) sponsored by Japan Science and Technology Agency (JST) and Japan International Cooperation Agency (JICA) has been started.

The project is composed of four research groups.

The first is "Earthquake Source Model research" group. Long-term OBS observation, Electromagnetic observation, Seafloor extensometer observation and Trench survey studies will be conducted in order to identify the detailed seismic zone, fault geometry, 3D Velocity structure and reliable crustal deformation beneath the Sea of Marmara.

The second is "Tsunami prediction based on earthquake cycle simulation research" group. In this group earthquake and tsunami occurrence scenarios will be proposed based on especially the research Group 1's outputs and current knowledge on NAF's seismic activities. The outputs will be used for the simulation of strong ground motion, developing of advanced hazard maps and a tsunami early warning system.

The third is "Seismic characterization and damage prediction research" group. This group focuses on modeling of 3D velocity structure, theoretical prediction of ground motion and evaluation of existing structures in the selected urban areas using research outputs of the other groups. Also there will be an attempted of making an urban area model for Istanbul using available data for this area, and to execute earthquake hazard and disaster simulation for various scenarios of a possible earthquake. Improved hazard maps and visual materials for disaster education are expected.

The fourth is "Disaster education using research result visuals from each research" group In group four, effective use of media in the dissemination of disaster information will be examined and disaster management planning through regional disaster prevention community will be encouraged. as well as, using the research visuals a disaster prevention education program will be conducted through media, web, local communities and schools.

Goals of the project are as follows,

- 1- To develop disaster mitigation policy and strategies based on multidisciplinary research activities.
- 2- To provide decision makers with newly found knowledge for its implementation to the current regulations.
- 3- To organize disaster education programs in order to increase disaster awareness in Turkey.
- 4- To contribute the evaluation of active fault studies in Japan.

Through the project, the research results will be integrated for disaster mitigation in The Marmara region and disaster education in Turkey. The details of SATREPS Japan-Turkey joint research project and latest achievements will be presented.

SSS23-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

キーワード: sea bottom observation, earthquake disaster mitigation, tsunami disaster mitigation, disaster education, Turkey, SATREPS

Keywords: sea bottom observation, earthquake disaster mitigation, tsunami disaster mitigation, disaster education, Turkey, SATREPS

## 宮城県北部の建物被害データを用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の建物被害関数 Fragility curves of buildings during the 2011 Tohoku Earthquake using the damage data in the northern Miyagi Prefecture

呉 浩<sup>1\*</sup>; 正木 和明<sup>2</sup>; 入倉 孝次郎<sup>3</sup>; 倉橋 奨<sup>3</sup>

WU, Hao<sup>1\*</sup>; MASAKI, Kazuaki<sup>2</sup>; IRIKURA, Kojiro<sup>3</sup>; KURAHASHI, Susumu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛知工業大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 愛知工業大学都市環境学科, <sup>3</sup> 愛知工業大学地域防災研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Aichi Institute of Technology, <sup>2</sup>Department of Urban Environment, Aichi Institute of Technology, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology

Damage ratios in subdistricts of Osaki and Kurihara cities, northern of Miyagi Prefecture are obtained from the damage data provided by the local City Offices. Ground motions in these subdistricts are estimated by use of source model proposed by Kurahashi and Irigura (BSSA, 2013) and underground velocity structures identified from microtremor H/V spectral ratios. The estimated ground motion indices (PGA, PGV,  $I_{JMA}$ , and SI) are used to relate with the damage ratios to construct the fragility curves. It is found that the correlation in small subdistricts is improved, compared with that between the observed ground motion indices and corresponding damage ratios in a wider district.

In addition, we have added some microtremor measurement at plural sites inside each subdistrict, such as Furukawa, and Tajiri, in order to assess the representativeness of ground motions estimated at only one site for the entire subdistrict. We conducted such measurement at or near the preliminary schools inside the subdistricts. The ground motions during the mainshock are estimated with the identified velocity structures from the microtremor H/V spectra ratios. It is found that the variability of ground motions in the Furukawa subdistrict is relatively small. It suggests that the ground motions used for the fragility curves are representative for the entire subdistrict. In contrast, the variability of ground motions in Tajiri is relatively large. It may be caused by the limited numbers of preliminary schools with similar amplification factors.

キーワード: 建物被害曲線, 微動 H/V スペクトル比, 地下速度構造, 地震動の代表性

Keywords: Fragility curve of buildings, microtremor H/V spectral ratio, underground velocity structure, representative of ground motions



## IT強震計による建物震動観測—東京大学安田講堂における観測— The earthquake vibration observation of the Yasuda auditorium using the IT Kyoshin seismometer

伊藤 貴盛<sup>1\*</sup>; 鷹野 澄<sup>2</sup>

ITO, Takamori<sup>1\*</sup>; TAKANO, Kiyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学, <sup>2</sup> 東京大学 大学院情報学環/地震研究所

<sup>1</sup> Keio University, <sup>2</sup> IIS&ERI, The University of Tokyo

大地震による災害を軽減する為には、小さな地震のときに私たちの住宅や会社、学校など、身近な場所の揺れを調べてその弱点を探り、効果的な耐震対策をすることが有効と思われる。IT強震計は、このような目的で、利用者自身が設置して利用する新しいタイプの強震計として考案された(鷹野他 2004)。

このIT強震計を使用して、東京大学のいくつかの建物の振動観測を2006年より継続している。

安田講堂の改修工事が行われることとなり、工事の効果を確認するため、IT強震計を設置して観測を行うことになった。

安価な標準的なIT強震計に加え、微動計としても使用する高性能なセンサも併用して観測を行った。

現在、工事前の観測を終え、データを分析しており、その報告を行う。

工事が完了した後に、再びIT強震計を設置して、比較を行う予定である。

### 参考文献

鷹野・伊藤・原 2004, IT強震計-その概念と試作-, 地震学会秋季大会, 2004.10

キーワード: IT強震計, 構造物ヘルスマニタリング, 情報, 防災

Keywords: IT Kyoshin (Strong Motion) Seismometer, Structural Health Monitoring

1次元システム同定のための地震波干渉法による建物応答からS波速度の抽出にねじれと曲げ振動の影響  
The effect of torsional and bending vibration on shear-wave velocity extracting from building response by seismic interf

王欣<sup>1\*</sup>; 源榮 正人<sup>1</sup>; 正木 和明<sup>2</sup>; 入倉 孝次郎<sup>3</sup>; 久田 嘉章<sup>4</sup>  
WANG, Xin<sup>1\*</sup>; MOTOSAKA, Masato<sup>1</sup>; MASAKI, Kazuaki<sup>2</sup>; IRIKURA, Kojiro<sup>3</sup>; HISADA, Yoshiaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 愛知工業大学工学部都市環境学科, <sup>3</sup> 愛知工業大学地域防災研究センター, <sup>4</sup> 工学院大学建築学部

<sup>1</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Department of Urban Environment, Aichi Institute of Technology, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology, <sup>4</sup>Department of Architecture, Kogakuin University

Because shear-wave velocity correlates with the shear rigidity of buildings, the decrease of it is a indicator of the loss of stiffness, which is possibly caused by structural damage or degradation. Therefore, shear-wave velocity identification is intended for use in health monitoring of upper structures excluding the effect of soil-structure interaction. Shear-wave velocity can be extracted from tracing the propagation of a pulse from normalized cross-correlation of the motion between two points based on the view of response as the wave vertical propagation process. In this study, the reference point is the top of the building (virtual source) instead of the base (physical source) which results in the transfer function including the effect of rigid-body rocking. However, for high-rise and eccentric structures torsional motion and bending motion is inevitable. In practical measurement of horizontal motions with single sensors located on the side not the core of the building plane, it is unavoidable to record the torsional response which mixed with the shear-mode motions. Therefore, the effect of torsional response to shear-wave velocity extraction should be deliberated on to avoid erroneous use of the travel time of torsional wave instead of that of shear wave. Furthermore, the extraction of shear-wave propagation from building vibration generally in bending mode is valid or not should be examined.

In this study, firstly a 3D model with eccentricity is used to calculate the horizontal and vertical impulse response to analyze the effect of torsional and bending response to shear-wave velocity extraction. And the method to eliminate the effects of torsional and bending vibrations to obtain the shear-wave propagation with high resolution is presented. Secondly, a practical use of earthquake records measured in a high-rise building to examine the effect of torsional and bending vibration to shear-wave velocity extraction. Thirdly, velocities of shear wave, torsional wave, and bending wave are extracted separately to evaluate the changes of stiffness before and after the Tohoku earthquake for health monitoring.

キーワード: 建物のせん断波速度, 逆重畳法, ねじれ応答, 地震波干渉, 建物システム同定, 東日本大震災

Keywords: shear-wave velocity of buildings, deconvolution method, torsional response, seismic interferometry, system identification, Tohoku earthquake

## 2013年オホーツク海巨大深発地震による世界の強震動 Global "strong" ground motions from the 2013 Sea of Okhotsk great deep earthquake

久家 慶子<sup>1\*</sup>  
KUGE, Keiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Dept. Geophysics, Kyoto University

This study presents the characteristics of global ground motions caused by the Sea of Okhotsk deep earthquake (Mw8.3) of May 24, 2013. The earthquake occurred at a depth of 609 km in the subducting Pacific plate, and it is now the largest deep earthquake ever recorded. According to reports in NEIC, the earthquake was felt at very long distances in the world, including Dubai (~76 degrees) and Moscow (~58 degrees). In this study, by using global broadband seismic data from IRIS DMC, we examine ground motions from the earthquake. For the 1994 Bolivia deep earthquake (Mw8.3), which was formerly the largest and were felt in North America, the distant ground motions were examined by Anderson et al. (1995) from the perspective of strong motion seismology. Due to the location, the 2013 Sea of Okhotsk earthquake was recorded by a much better coverage of global stations, compared to the 1994 Bolivia earthquake. This study is an opportunity for exploring the distant "strong" ground motions from the perspective of Anderson et al. (1995).

Peak ground accelerations (PGA) from the 2013 Sea of Okhotsk earthquake decrease as distance increases out to 120 degrees, and have a peak at a distance of approximately 140 degrees. The variation as a function of distance is similar to that of Anderson et al. (1995) for the 1994 Bolivia earthquake. The values of PGA are a few times larger than those from the Bolivia earthquake. At distances between 30 and 80 degrees, PGA are associated with vertical components of direct P waves, and the values of PGA are often in a range from 0.1 to 1 gal. Peak ground velocities (PGV) vary with distance in a similar way to PGA. The values of PGV at distances between 30 and 80 are lower than 0.1 cm/s.

Large PGA at distances between 30 and 80 degrees are observed in the Eurasian continent. The values of PGA in the western part of the continent are larger than those in the eastern part. Because this difference is also observed for PGA of P waves from an outer-rise shallow earthquake near the Kurile trench, it can be attributed to regional structure in the Eurasian continent. PGA from the 2013 deep earthquake are not low in the southern part of the continent, although from a deep earthquake beneath Sea of Okhotsk that has a different focal mechanism from that of the 2013 earthquake, PGA decrease toward the south as distance increases. The focal mechanism of the 2013 earthquake represents that the P wave radiation is the maximum along a ray toward Karachi, Pakistan. This P wave radiation can account for the observations of PGA in the southern part. Global "strong" ground motions from the 2013 Sea of Okhotsk deep earthquake are thus likely to be affected by regional structure and P wave radiation, as suggested by Anderson et al. (1995).

## 東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測点における雑微動最小振幅と地震動最大振幅との関係 Relation between smallest microtremor amplitudes and largest seismic amplitudes observed at TRIES seismographic stations

田中 寅夫<sup>1\*</sup>; 大久保 慎人<sup>2</sup>  
TANAKA, Torao<sup>1\*</sup>; OKUBO, Makoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 名誉教授, <sup>2</sup> 東濃地震科学研究所  
<sup>1</sup>Kyoto University Emeritus Professor, <sup>2</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science

東濃地震科学研究所 (TRIES) の地震観測点は 1999 年 5 月に TRIES 点が設置され、順次拡張されて同年内に 10 点の観測網が完成した。この時期に観測された雑微動と地震動最大振幅の関係を調べるため、TRIES 観測点を「基準点」とし、他の観測点における雑微動と地震動は TRIES の値で除した相対値で与えることとした。設置された地震計は固有振動数 3.0Hz の過減衰型加速度計であり、0.1~10.0Hz の帯域でほぼ水平な振動特性である。トリガーによって、100Hz サンプリング記録が始まり、初動到来直前のデータから雑微動の最小振幅、それに続く地震動から最大振幅を求める。具体的には雑微動は数~10 秒間、地震動最大振幅については P 波、S 波または表面波部分を数秒~10 秒間、それぞれ離散フーリエ変換し、振幅を求めた。東濃地域における地震動観測から明らかにされた site effect に基づいて、振動数帯域を 2.0~4.0Hz の周波数帯域が地震動災害に大きく関わると予想し、上記帯域 2.0~4.0Hz を 20 区間の幅 0.1Hz 小帯域に分割して、各小帯域における地震動最大振幅と雑微動最小振幅を計算した。TRIES 観測点では 70 個を超える雑微動記録から最小振幅はかなり高い信頼性で決定できたが、例えば戸狩観測点は 10 個の雑微動データの解析であり、その信頼性はまだ高くない。結果は全て雑微動最小振幅、地震動最大振幅とも TRIES 点の値で除した相対値で与えて、マグニチュードや震央距離などの影響を少なくして site effect を強調することとした。恵那、瑞浪、明智、岩村、名滝、御高、土岐、犬山など全 10 観測点における予備的解析結果であるが、雑微動最小振幅と地震動最大振幅には有意な関連性が認められ、site effect を周波数帯域 2.0~4.0Hz におけるスペクトル振幅として表現することが出来た。

キーワード: 雑微動, 地震動, 離散フーリエ変換, 地盤, 最大振幅, サイト トクセイ

Keywords: microtremor, seismic waves, discrete Fourier transform, ground soil, largest amplitude, site effect



## 距離減衰式評価手法に関する数値実験

### A study on model selection methods for ground-motion prediction equations using synthetic data

野田 朱美<sup>1\*</sup>; 呉 長江<sup>2</sup>; 司 宏俊<sup>3</sup>; 西條 裕介<sup>1</sup>; 焦 凝<sup>1</sup>  
NODA, Akemi<sup>1\*</sup>; WU, Changjiang<sup>2</sup>; SI, Hongjun<sup>3</sup>; SAIJO, Yusuke<sup>1</sup>; JIAO, Ning<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 構造計画研究所, <sup>2</sup> 原子力安全基盤機構, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc., <sup>2</sup>Japan Nuclear Energy Safety Organization, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Numerous ground motion prediction equations (GMPEs) have been proposed for the purpose of assessing seismic hazard. However, a critical problem is that how to select appropriate GMPEs for the application of GMPEs to practical engineering problems.

Recently some model selection methods for GMPEs that evaluate the agreement between observed and predicted data have been proposed. In present study, in order to check the properties of model selection methods, we compare the model selection methods by using artificial dataset generated by a known GMPE. As candidate model selection methods, we have chosen three methods, that is, analysis of root mean square residual (RMR), the log-likelihood method (LLH method, Scherbaum et al., 2009, BSSA) and the Euclidean distance-based ranking method (EDR method, Kale and Akkar, 2013, BSSA). The analysis of RMR is one of the simplest methods to evaluate the difference between observed data and medians of GMPE model. On the other hand, the LLH method quantifies the distance between observed data and GMPEs defined as probability density function (both of median and standard deviation), based on information-theoretic perspective. However, Kale and Akkar (2013) points out the problem that the LLH method may favor GMPEs with larger standard deviations. The EDR method considers not only ground-motion uncertainty of model through standard deviation, but also agreement between the median estimations of models and observed data trend (model bias).

First, we assumed a vertical strike-slip fault with moment magnitude 7.0. We randomly chose 200 sites, whose fault distances are up to 200km. Next, we calculated theoretical PGA and response spectral acceleration for 16 periods using ground motion prediction model of Chiou and Youngs (2008, Earthq. Spectra), which is referred to as CY08 hereafter. And, we generated three kinds of synthetic dataset by adding three types of random noise with (1) zero standard deviation, (2) standard deviation of CY08, and (3) twice the standard deviation of CY08, respectively.

We selected five candidate GMPEs, that is, CY08, Abrahamson and Silva (2008, Earthq. Spectra), Campbell and Bozorgnia (2008, Earthq. Spectra), Zhao et al. (2006, BSSA) and Kanno et al. (2006, BSSA), and ranked the performance of candidate GMPEs for each synthetic dataset. In analysis of RMR that does not account for standard deviations of the prediction models, CY08 is stably ranked the best performing model for all kinds of synthetic dataset. The LLH method basically ranked CY08 as the best performing model for synthetic dataset (1) and (2), but it favored GMPEs with larger standard deviations for synthetic dataset (3). It suggests that the standard deviation of model is emphasized more than the median when we apply the LLH method to poor quality data. In the EDR method, in principle, the parameter to measure the level of model bias of CY08 is not able to be calculated for synthetic dataset (1) that does not have random noise. For synthetic dataset (2) and (3), however, the EDR method ranked CY08 as the best performing model both in the point of view of model uncertainty and model bias.

キーワード: 距離減衰式, 強震動予測モデル, 残差の二乗平均平方根, 対数尤度法, ユークリッド距離ランキング法

Keywords: attenuation relationship, ground motion predicting equation, root mean square residual, the log-likelihood method, the Euclidean distance-based ranking method

## 新しい地震動予測式による地震ハザード評価 Seismic hazard assessment using a new ground motion prediction equation

森川 信之<sup>1\*</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>; 奥村 俊彦<sup>2</sup>; 藤川 智<sup>2</sup>  
MORIKAWA, Nobuyuki<sup>1\*</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>; OKUMURA, Toshihiko<sup>2</sup>; FUJIKAWA, Satoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 清水建設株式会社

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Shimizu Corporation

地震調査研究推進本部による「全国地震動予測地図」では、司・翠川(1999)の最大速度の式(距離減衰式)による地震ハザード評価が行われており、震度の評価については最大速度との経験的な関係式による変換がなされている。現在の地震ハザード評価においてはモーメントマグニチュード(Mw)が9クラスの地震まで考慮することが必要不可欠となっているが、司・翠川(1999)の式はMw8.3までの地震による強震動記録から求められており、それよりも規模の大きな地震に対しては、振幅が頭打ちするという仮定のもとで適用されている。本検討では、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録も含めて求めた新しい地震動予測式により地震ハザードを試算し、全国地震動予測地図と比較した結果について報告する。

対象とする地震動は、工学的基盤上(ここでは、 $V_s=400\text{m/s}$ 層上面とする)の最大速度および地表の最大速度と計測震度とした。地表の値は、約250mメッシュの微地形分類全国マップに基づく表層30mの平均S波速度を用いて求めた。

まず、予測式から求められる地震動分布を比較した。ここでは、地殻内の地震として、①糸魚川-静岡構造線断層帯(Mw=7.4)、②六日町断層帯(Mw=6.6)、海溝型プレート間地震として、③南海トラフの最大クラスの地震(Mw=9.1)、④十勝沖地震(Mw=8.1)、海溝型プレート内地震として、千島海溝沿いのやや浅い地震(Mw=8.2)、千島海溝沿いのやや深い地震(Mw=7.5)を対象とした。いずれの地震についても、最大速度の比較では、工学的基盤上と地表のいずれも、新しい式で考慮した深部地盤による増幅特性の影響が顕著に見られ、新しい式で平野部が大きく、山地部で小さくなる。ただし、深部地盤の影響は地表の計測震度ではそれほど顕著ではない。また、最大速度と計測震度で共通に見られる傾向として、海溝型地震における遠方の地域(おおむね100km以上)で新しい式の予測値が小さくなっている。ただし、震源の深さが30kmよりも深い地震については、司・翠川式の距離減衰よりも観測記録の減衰の傾きが急で過大評価することが指摘されており(翠川・大竹, 2002)、実際に、観測記録との比較からも新しい式による予測結果が妥当であることを確認している。

続いて、南海トラフの巨大地震を対象とした地震ハザードを比較した。ここで、震源域および各震源域に対する「重み」の設定は地震調査委員会(2013)のものを用いた。また、ばらつきの値は、「全国地震動予測地図」における値をそのまま用い、計測震度(I)については、その半分の値(I/2)に対して正規分布を仮定して同じ値を適用した。上述の地震動分布の比較から予想される通り、全体的に新しい式によるハザードは特に遠方の日本海側で大きく減少する。ただし、深部地盤による増幅が特に大きい関東平野や大阪では極端な減少とはなっていない。また、計測震度で見た場合、低確率で反対に新しい式による結果の方が大きい場合も見られた。これは、設定しているばらつきの値が一致していないことが影響していると考えられる。ばらつきの値については、従来の評価で用いられているものから変更するのに十分な知見が得られていないことから現状のままとしているが、地震ハザード評価における適切なばらつきの値を設定するための検討が今後さらに重要となってくる。

キーワード: 地震ハザード評価, 地震動予測式, ばらつき

Keywords: seismic hazard assessment, ground motion prediction equation, variance of ground motion

## 超高密度地震観測による宮城県大崎市古川地区の地盤震動特性の評価 Ground amplification estimates based on very dense seismic array observation in Furukawa district, Osaka, Japan

後藤 浩之<sup>1\*</sup>; 盛川 仁<sup>2</sup>; 稲谷 昌之<sup>1</sup>; 小倉 祐美子<sup>2</sup>; 徳江 聡<sup>2</sup>; 濱崎 翔平<sup>2</sup>; ZHANG XINRUI<sup>2</sup>; Sakkrawit Sripunyaphikhup<sup>2</sup>; 岩崎 政浩<sup>3</sup>; 荒木 正之<sup>4</sup>; 澤田 純男<sup>1</sup>; Zerva Aspasia<sup>5</sup>  
GOTO, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; MORIKAWA, Hitoshi<sup>2</sup>; INATANI, Masayuki<sup>1</sup>; OGURA, Yumiko<sup>2</sup>; TOKUE, Satoshi<sup>2</sup>; HAMASAKI, Shohei<sup>2</sup>; ZHANG, Xinrui<sup>2</sup>; SAKKRAWIT, Sripunyaphikhup<sup>2</sup>; IWASAKI, Masahiro<sup>3</sup>; ARAKI, Masayuki<sup>4</sup>; SAWADA, Sumio<sup>1</sup>; ZERVA, Aspasia<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 東京工業大学, <sup>3</sup> 大崎市, <sup>4</sup> (株) aLab, <sup>5</sup> Drexel University

<sup>1</sup> Kyoto University, <sup>2</sup> Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup> Osaka city, <sup>4</sup> aLab Co.Ltd, <sup>5</sup> Drexel University

2011年東北地方太平洋沖地震では太平洋沿岸の津波被害だけでなく、東北地方から関東地方にかけての広い範囲で内陸部でも地震動による被害が発生した。震度6強を観測した宮城県大崎市古川地区では、地震動による建物被害、液状化被害が顕著であったことが報告されている (Goto and Morikawa, 2012 など)。地区内でも被害の顕著な地域は限定的であったため、地盤震動特性の違いによる影響が考えられていた。そこで、古川地区内の地盤震動特性を評価する事を目的として、同地区内で超高密度地震観測を展開することにした (Goto et al., 2012)。

2011年9月に観測を開始して以降、観測点数を徐々に増やしながら観測を継続し、2014年2月現在では36点が稼働している。観測網は古川地区市街地を中心として東西2km、南北3kmのエリアをカバーしており、従来の高密度地震観測と比べても1オーダー密な観測を実現している。センサーにはITK-002を採用し、常時接続回線を利用したリアルタイム連続観測を実現している。イベント記録は、連続記録からポストトリガーで切り出して処理しており、2014年2月現在で92イベントの記録を公開している。

地震記録の水平/水平スペクトル比を利用して各観測点直下の地盤構造を推定したところ、工学的基盤までの表層厚さは対象地区内で10-30mほどであり、地震動による被害の顕著であった地域で深い傾向にあった (稲谷他, 2013)。これは、重力探査による基盤深さの推定結果などとも整合した結果であるため、古川地区では地盤震動特性が空間的に変化している傾向を明らかにした。また、PGA, PGV, SI, 計測震度といった各種地震動指標の大きさを観測点毎に分析したところ、古川地区ではPGVと計測震度で似た傾向があること、被害の顕著であった地域でいずれの値も大きくなる傾向にあることが確認された。ただし、地震動指標の増幅度を反映すると考えられる空間平均からの偏差はイベント毎に大きくばらつくため、有意に揺れやすいかといった統計的な議論が必要である事も示唆している。

本地震観測では古川地区在住のボランティアの方の自宅や事務所に地震計を設置しているため、地震観測で得られた震度の情報やリアルタイム波形を提供して、その貢献に対するフィードバックを実施していることも特徴である。2014年3月をもって研究者主導の地震観測プロジェクトを終了するが、地域に根ざした地震情報の利活用という目的で地域コミュニティをベースとした枠組みでの観測継続を試みている。

### 参考文献

大崎市古川高密度地震観測プロジェクト: <http://sn.catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

Goto and Morikawa: Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, 52(5), 769-779, 2012.

Goto, Morikawa, Inatani, Ogura, Tokue, Zhang, Iwasaki, Araki, Sawada and Zerva: Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seism. Res. Lett.*, 83(5), 765-774, 2012.

稲谷昌之, 後藤浩之, 盛川仁, 小倉祐美子, 徳江聡, Xin-rui Zhang, 岩崎政浩, 荒木正之, 澤田純男, Aspasia Zerva: 大崎市古川高密度地震観測を利用した表層地盤構造の推定, *土木学会論文集 A1*, 69(4), 1.758-766, 2013.

キーワード: 地盤震動, 古川地区, 超高密度地震観測

Keywords: Ground amplification, Furukawa district, Very dense seismic array observation

## 地盤伝達関数展開を利用した地盤増幅特性の分解法について Physics-based decomposition of ground amplification using ground transfer function expansion

後藤 浩之<sup>1\*</sup>  
GOTO, Hiroyuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

表層の地盤震動特性は、地域の地震ハザードレベルを相対的に理解するためにも重要である。従来、様々な方法で地盤震動特性を定量的にモデル化する試みがなされてきたが、広い範囲で面的に評価するためには AVS30 などの単純化された指標に頼らざるを得なかった。単純でありながらも物理的背景を持つような特性化手法が存在するのであれば、非常に実用的であろう。

本発表では、単純な非減衰 2 層系伝達関数列によって任意の複素関数を級数展開できる、という特徴を利用して、任意の地盤増幅特性を級数展開した場合にその係数は物理的にどのように理解できるか、ということ論じる。この展開の存在や一意性については数学的に厳密に議論されているが、上述したような目的に利用するためには具体的に物理と対応させる事も重要である。

ここでは、いくつかの数値実験を行う事でその物理的性質を確認した。一例として、中間層の物性をランダムに構成した水平多層地盤についてその伝達関数を級数分解した。中間層が均質である 2 つの極端なモデルについて、それぞれに対応する展開係数の絶対値を調べると、中間層の平均インピーダンス比との間により対応が見られた。このことは、展開係数がそれぞれのモデルからの寄与の割合という物理的な意味を持つことを示唆するものである。

### 参考文献

Goto, H.: Series expansion of complex ground amplifications with a sequence of simple transfer functions, Earth. Engng. Struct. Dyn., 投稿中.

後藤浩之: 地盤伝達関数のクロスタームに関する基本的な性質, 土木学会論文集 A2, 69(2), I.435-446, 2013.

キーワード: 地盤震動, 地盤増幅, 関数展開  
Keywords: Ground amplification, Function expansion



## 震源深さの違いに着目した、堆積盆地を含む3次元構造中の波動場に関するケーススタディ Case study on the wavefield in the 3D structure including sedimentary basin and the effect of source depth on it

有末 真穂<sup>1</sup>; 筧 楽磨<sup>1\*</sup>  
ARISUE, Maho<sup>1</sup>; KAKEHI, Yasumaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大・理

<sup>1</sup> Faculty of Science, Kobe University

堆積層の存在は、表面波の生成に大きく影響すると考えられている。2011年4月11日の福島県浜通りの内陸地震(Mw 5.5, 深さ 10.6 km)では、震源から約 150 km 以上離れた新潟堆積盆地内の観測点で、長周期の表面波が記録され、波の継続時間は 100 秒以上に及んだ。一方、2012年4月1日に福島沖で発生した深いプレート境界地震(Mw 5.7, 深さ 53 km)においても、同一観測点で得られた記録は、波の継続時間が 100 秒に及び、前述の地震と波の継続時間に差はみられなかった。これは、震源が浅い地震の方が、表面波がよく発達するということと一見矛盾するように考えられる。

本研究では、震源深さの違いが盆地内の波動場に与える影響を検討する為に、震源深さが異なる地震を対象に、差分法を用いた数値シミュレーションにより堆積盆地を含む3次元構造中の波動場に関するケーススタディを行った。計算領域は、福島県沖から新潟堆積盆地までを対象とし、以下の3つの数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーション1では、2次元構造に円形の均質盆地を加えた単純な地下構造モデルを仮定した。震源は深さ 5 km と 85 km の位置に点震源を仮定し、震源継続時間は 3 秒とした。その結果、浅い地震、深い地震いずれの場合においても、盆地内の波の継続時間は 50 秒程度となり、震源深さの違いにより大きな差は生じなかった。盆地手前では、浅い地震の方が深い地震に比べ波の継続時間が 10 秒程度長かったが、盆地内の波の継続時間である 50 秒程度に比べ、この 10 秒という差が小さかったため、盆地内の波の継続時間に大きな差は生じなかったと解釈される。

数値シミュレーション2では、1と同様に均質円形盆地と2次元構造からなる単純な地下構造モデルを仮定し、均質盆地の物性値の違いに着目したケーススタディを行った。震源は深さ 5 km と 75 km の位置に点震源を仮定し、震源継続時間は 3 秒とした。その結果、浅い地震、深い地震いずれの場合においても、均質盆地内の S 波速度が遅いほど、盆地内の波の継続時間は長くなった(盆地内の波の継続時間は、均質盆地内の S 波速度 0.5 km/s の場合は 125 秒、1.0 km/s の場合は約 90 秒、2.0 km/s の場合は約 40 秒)。これは、均質盆地内の S 波速度が遅いほど、S 波と 2 次的に励起されたレイリー波のそれぞれの波の到達時間の差が大きくなったと考えられる。

数値シミュレーション3では、堆積盆地の内外ともリアリスティックな3次元地下構造モデルを仮定し、波動場を計算した。地下構造モデルには、Koketsu et al. (2012) の全国一次地下構造モデル(暫定版)を用いた。震源は深さ 5 km と 75 km の位置に点震源を仮定し、震源継続時間は 3 秒とした。その結果、浅い地震、深い地震いずれの場合においても、新潟堆積盆地内の波の継続時間は 90 秒程度と長くなった。最大振幅は、盆地手前に比べ、浅い地震では約 2 倍、深い地震では約 6 倍と非常に大きくなった。

リアリスティックな地下構造モデルの場合(数値シミュレーション3)と、速度、密度構造が2次元の単純な地下構造モデル(数値シミュレーション2)の計算結果を比較したところ、盆地内では、リアリスティックな地下構造を用いた場合の方が、単純なモデルに比べ、連続的な波群を持つ複雑な波形が得られた。一方、盆地手前の波形は、浅い地震、深い地震それぞれを比較して、振幅、継続時間共に顕著な差が見られなかった。この結果から、盆地内の波動場には、震源から盆地に至るまでの地下構造よりも、主として盆地そのものの構造が影響すると考えられる。

謝辞: 本研究では、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)、基盤強震観測網(KiK-net)の強震波形データ、F-netのメカニズム解のデータ、気象庁一元化震源データを使用させて頂きました。差分法による数値シミュレーションは、防災科学技術研究所の青井真博士をはじめとする関係者の方々によって開発されたGMS(Ground Motion Simulator)(青井・他, 2004) 1.6.0によって行いました。また波動場の計算には、東京大学の瀬藤一起博士が作成した全国一次地下構造モデル(暫定版)と、東北大学の中島淳一博士が作成した太平洋スラブの上面形状のデータを利用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 堆積盆地, 表面波, 数値シミュレーション, 震源深さ

Keywords: sedimentary basin, surface wave, numerical simulation, source depth



## 盆地堆積層内の表面波の伝播-関東平野中央部における局所的な伝播速度の変化- Surface wave propagation in the large-scale sedimentary basin: distinct lateral variation of Love wave velocity around m

武村 俊介<sup>1\*</sup>; 吉本 和生<sup>1</sup>  
TAKEMURA, Shunsuke<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Kazuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学  
<sup>1</sup>Yokohama City University

### 観測波形に見られる特徴

2013 年 2 月 25 日に栃木県北部で起きた地震による関東平野内で周期 4-8 秒の表面波の伝播の特徴を調べたところ、埼玉県南部の岩槻周辺のわずか 20 km の範囲で Love 波の伝播速度が 0.4-0.8 km/s と大きく変化していることが明らかとなった。この特徴は他の地震（例えば新潟県中越地方の地震）でも観測されており、関東平野中央部の狭い領域で堆積層内の速度構造または地震基盤構造が大きく変化していることが原因と考えられる。

### 3次元差分法による地震動シミュレーション

比較的単純な地震基盤構造で堆積層内の速度構造は指数関数型の速度勾配を持つ構造 (Ravve and Koren, 2006; Yoshimoto and Takemura, 2014) を仮定して、3次元差分法による地震動シミュレーションを行い、Love 波の伝播特性が地震基盤構造と堆積層内の速度構造により、どのように変化するかを調べた。

シミュレーションの結果、Love 波の伝播速度は深さ 2 km 以深の地震基盤構造よりも 1.5 km 以浅の浅部 S 波速度に非常に敏感であり、浅部 S 波速度構造の違いで観測される伝播速度の違いが説明できることが明らかとなった。4-8 秒程度の Love 波の伝播速度が浅部不均質のみで決まることはセンシティビティ解析からも明らかであり、埼玉県南部で見られた狭い範囲での Love 波の伝播速度の変化は地表付近の S 波速度の違いによるものと考えられる。

### 2013 年栃木県北部の地震の地震動シミュレーション

表面波の伝播速度解析の結果と関東平野内の 14 点の中深層観測井における VSP 調査 (山水, 1996; Yamamizu, 2004) の結果を元に、堆積層内の S 波速度構造モデルを構築した。構築した速度構造の妥当性を確認するために、栃木県北部の地震の地震動シミュレーションを行った。堆積層内以外の速度構造については、JIVSM (Koketsu et al., 2008) を用いた。

地震動シミュレーションの結果、構築した速度構造モデルを用いることで埼玉県南部における表面波の伝播速度および振幅、そして関東平野全域における 0.125-0.25 Hz の PGV の特徴を再現することができた。

### 謝辞

防災科学技術研究所の K-NET/KiK-net および首都圏強震動総合ネットワーク SK-net の波形記録を使用させていただきました。数値シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使わせていただきました。

キーワード: 長周期地震動, 盆地構造, 地震動シミュレーション, 表面波  
Keywords: long-period ground motion, basin structure, numerical simulation, surface wave

## 付加体の有無を考慮した関東平野の長周期地震動シミュレーション Long-Period Ground Motion Simulation in the Kanto Basin with/without Accretionary Prism

郭 雨佳<sup>1\*</sup>; 瀨 纈 一起<sup>1</sup>; 三宅 弘恵<sup>1</sup>  
GUO, Yujia<sup>1\*</sup>; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>; MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

プレート境界地震の場合、震源付近で生成された周期の長い地震波は平野や盆地の直下にある厚い堆積層に入り、そこで大きく増幅される。このような長周期地震動は大規模構造物などに大きな被害をもたらしている。例えば、2003 年十勝沖地震 ( $M_w$  8.3) の際、震源から約 250 km 離れた、厚い堆積層の上に位置する苫小牧市において周期 7-8 秒の地震動が卓越し、それによって大型の石油タンク 2 基がスロッシングを起こし火災が発生した (Koketsu *et al.*, 2005)。2011 年東北地方太平洋沖地震 ( $M_w$  9.0) においても、長周期地震動が震源から離れた大阪平野や関東平野で観測され、一部の高層建築物で揺れが 10 分程度継続するなど、被害が出た (JMA, 2011)。

また、近い将来南海トラフでの発生が懸念されるプレート境界地震でも、関東平野・濃尾平野・大阪平野などにおいて長周期地震動の発生が予想されている (Furumura *et al.*, 2008)。日本海溝または千島海溝と異なり、南海トラフではその陸側に厚さ数 km の比較的軟弱な付加体が発達している。したがって、南海トラフでのプレート境界地震による長周期地震動を評価する際、地震波の伝播経路にあたる付加体の影響の検討は重要である。Yamada and Iwata (2005) は近畿地方を対象とした長周期地震動シミュレーションを通じて、付加体は直達 S 波の振幅を抑えるものの、地震動の継続時間を長くするという結論を得ている。本研究では、付加体が伝播経路のみならず関東平野内の長周期地震動に与える影響を調べるため、2004 年 9 月 5 日 19 時 7 分頃に発生した紀伊半島南東沖地震の前震 ( $M_w$  7.1) を用いて長周期地震動シミュレーションを行った。

シミュレーションでは点震源を仮定し、震源パラメータや震源時間関数は Yamada and Iwata (2005) と同様とした。ただし、沈み込むフィリピン海プレートとの対応を取るため、震源の深さは Yamada and Iwata (2005) よりやや浅い約 16 km とした。また、三次元速度構造モデルは全国 1 次速度構造モデル (Koketsu *et al.*, 2008, 2012) を使用した。シミュレーションではボクセル有限要素法 (Ikegami *et al.*, 2008) を使用し、0.05-0.3 Hz の帯域において破壊開始時刻から 6 分半の波形を計算した。解析領域はおよそ 564 km × 198 km × 深さ 61 km であり、その外側に幅約 54 km の無反射境界を設けた。計算メッシュの大きさは深さに応じて変化させ、最も細かい所で一辺の長さが 175 m の立方体を設定した。南海トラフの付加体の有無による波形の違いを比較するため、付加体にあたる S 波速度 1.0 km/s の層を 3.2 km/s に変換し、付加体が存在しないと仮定した場合のシミュレーションも実施した。

付加体の有無による二種類のシミュレーションの結果、次の結論を得た。付加体ありの三次元速度構造モデルによる波形は付加体なしの場合と比べて、直達波の振幅は小さいが、後続波の振幅はやや大きい傾向にある。この結果は Yamada and Iwata (2005) と整合的である。後続波の振幅が大きくなる原因として、付加体領域内にトラップされた波が絶えずに表面波に変換され、その表面波が関東平野に入射し、関東平野内を伝播する波と重なり合った結果によるものと考えられる。

キーワード: 長周期地震動, 付加体, 南海トラフ, 関東平野

Keywords: Long-period ground motion, Accretionary prism, Nankai trough, Kanto basin

## 強震動記録と 1Hz GPS 記録を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震のセンブランスアレイ解析 Semblance analysis for the 2011 Tohoku earthquake using strong-motion and 1Hz GPS data

久保 久彦<sup>1\*</sup>; 岩田 知孝<sup>1</sup>; 浅野 公之<sup>1</sup>  
KUBO, Hisahiko<sup>1\*</sup>; IWATA, Tomotaka<sup>1</sup>; ASANO, Kimiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto Univ.

地震の震源過程の解析には震源インバージョンがよく用いられる。しかしながら震源インバージョンにはいくつかの仮定や拘束条件が必要であり、それらの設定が解析結果に大きな影響を及ぼすことがある。他方でアレイ解析は地震波の放射イメージを直接的に抑えることができる。本研究は強震動記録と 1Hz GPS 記録を用いたセンブランスアレイ解析を行い、2011 年東北地方太平洋沖地震（以下 2011 年東北地震）の地震波放射特性を調べた。

本研究では気象庁震度計、防災科学研究所 K-NET・KiK-net・F-net で観測された強震動記録に加えて、国土地理院 GEONET で観測された 1Hz GPS 記録を用いる。強震動記録だけでなく 1Hz GPS 記録を用いることによって観測点密度が増加し、先行研究 (Kubo & Kakehi, 2013) に比べて利用可能なアレイ数が格段に増加した。F-net 記録を除く強震動加速度記録は積分し速度波形にする。1Hz GPS 記録は RTKLIB Version 2.4.2 (Takasu, 2013) を用いた Kinematic PPP 処理によって変位波形に変換し、さらに微分し速度波形にする。これらの速度波形に 10-25 秒のバンドパスフィルターをかけ、0.1s でリサンプリングしたものを解析に用いる。観測点間距離が 3km である GEONET 観測点と強震動観測点での 2011 年東北地震時記録の比較から、上記周期帯域では 1Hz GPS 記録をアレイ解析に用いても問題ないことを確認している。

センブランスアレイ解析は Kubo & Kakehi (2013) と同じ手法を用いる。この手法では複数のサブフォルトで構成される震源断層面をまず仮定する。そして、入射波が球面波だと仮定した上で、各サブフォルトでそれを地震波の発生源とした場合のセンブランス値を算出し、断層面上に投影する。これを時間ごとに行うことで、震源断層面上での地震波の放射位置の時間変化を追うことができる。平面波入射を仮定したセンブランス解析で推定された見かけ速度は約 4km/s であり、またそれには分散が見られないことから、各アレイに到来している地震波は S 波だと判断して解析を行った。走時計算をする際の地下速度構造には Asano & Iwata (2012) の水平成層速度構造モデルを用いる。本解析では東北地方及び関東地方において全 9 つのアレイを構築し、理論 S 波到達時刻（破壊開始時刻に相当）から 250 秒間の各アレイでのセンブランスイメージを求めた。センブランス値を計算するタイムウィンドウは 20 秒とし、タイムシフトは 10 秒とした。ここでのセンブランス値は 3 成分それぞれで計算した値を平均したものである。

推定された地震波放射イメージは緯度 39 度以北に位置するアレイと緯度 39 度以南に位置するアレイで異なる。前者のアレイでのイメージからは約 150 秒後まで宮城県沖から地震波が強く放射され、その後も宮城県沖及びその北部から地震波が弱いながらも放射されていたことが分かる。一方で後者のアレイでのイメージからは震源周辺の地震波放射は約 100 秒までであり、その後は地震波放射源が福島県沖・茨城県沖の深部に移動していき、その放射は約 180 秒まで継続したことが分かる。このイメージの違いは 2011 年東北地震における地震波放射源が震源域南部に広がっていったこと、また宮城県沖では長時間（~200 秒）にわたって地震波が放射されていたことを示す。発表では傾斜方向の地震波放射源の空間変化に関しても考察を行う予定である。

【謝辞】解析には気象庁震度計、防災科学技術研究所 K-net・KiK-net・F-net の強震記録及び国土地理院 GEONET の 1Hz GPS 記録を使用しました。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 地震波放射特性, センブランスアレイ解析, 強震動記録, 1Hz GPS 記録

Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, Seismic-wave radiation characteristics, Semblance analysis, Strong-motion data, 1Hz GPS data



## 三次元 Qs 構造を考慮した統計的グリーン関数による強震動の評価— 2011 年東北地方太平洋沖地震の広域的地震動予測への適用— Stochastic green function considering 3-D Qs structure-Predicting ground motion of the 2011 Tohoku Earthquake-

中村 亮一<sup>1\*</sup>; 植竹 富一<sup>2</sup>; 引間 和人<sup>2</sup>  
NAKAMURA, Ryoichi<sup>1\*</sup>; UETAKE, Tomiichi<sup>2</sup>; HIKIMA, Kazuhito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東電設計株式会社, <sup>2</sup> 東京電力株式会社

<sup>1</sup>Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd., <sup>2</sup>Tokyo Electric Power Company

広域の地震動評価を目的に、三次元減衰構造を考慮した統計的グリーン関数法による検討を進めてきた。今回は 2011 年東北地方太平洋沖地震への適用を試み、三次元減衰構造を考慮した場合 (3-DQs 値モデル) と、Q 値を一樣とした場合 (一樣 Qs 値モデル) で広域的な波形合成の比較を行った。

ここで用いた三次元減衰構造を考慮した統計的グリーン関数法は、Boore (1983) に基づき、各要素の震源スペクトルから伝播経路において三次元減衰構造を考慮して基盤スペクトルを求め、サイト増幅率を乗算して得られた地表等の振幅スペクトルに適合する要素波を Boore (1983) の包絡形を用いて作成した後、震源破壊等を考慮して足し合わせるものである。今回、3-DQs 値モデルとしての Qs 構造は中村 (2009) による 1Hz~10Hz の周波数範囲で求められているものを用いた。S 波速度構造は気象庁の JMA2001 を用いた。一樣 Qs は、 $Q_s=100f^{1.00}$  を与えた。地震動は、各 K-NET 及び KiK-net 観測点の地表で評価し、サイト増幅率は中村 (2009) が地盤分類毎に求めたものを用いた。

まず、三次元減衰構造の効果を見るために、震源は滑りが一樣なモデルを用いて、三次元減衰構造を考慮した場合 (3-DQs 値モデル) と、Q 値を一樣とした場合 (一樣 Qs 値モデル) を比較検討した。断層面は長さ・幅・滑り方向にそれぞれ  $10 \times 10 \times 10$  に分割し、各要素の地震モーメントは Mw9 相当の 1000 分の 1 を一樣に与えた。また、応力降下量についても一樣に 25MPa を与えた。断層長・幅は 400km  $\times$  200km とし、走向及び傾斜角は 200° 及び 15° を与え、破壊伝播速度は 2.5km/s とした。まず、3D-Qs 値モデルと一樣 Qs 値モデルによる計算結果を観測記録に対する最大加速度の対数残差  $\log_{10}(O/C)$  の標準偏差で比較する。観測記録が 100Gal 以上の地点を見ると前者が 0.224 に対して後者は 0.231 であり、3D-Qs 値モデルがやや小さい程度であるが、1Gal 程度以上の地点で見ると前者が 0.253 に対し後者は 0.360 となり、3D-Qs 値モデルの方が合致度が高い。広域の応答スペクトルの分布を見ると、北海道や近畿などの遠距離においては、一樣 Qs 値モデルを用いた場合には 1Hz 程度では過小評価となるのに対して、3-DQs 値モデルの場合には観測記録をよく再現する。三次元減衰構造 (中村,2009) の、たとえば西南日本の Q 値をみると、深さ 0-30km が  $Q_s=88f^{0.93}$  であるのに対し、深さ 30-60km では  $Q_s=155f^{0.66}$  であり、深い方で周波数依存性が弱く 1Hz の Q 値が大きく、10Hz では小さめである。遠距離では、波線は深く Q 値が大きい場所を長く伝播するため、1Hz 程度の地震波は、より減衰しにくいと解釈できる。

断層面上の短周期地震動を発生する領域は一般に狭い領域に限られ、2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動については、SMGA モデル (Kurahashi and Irikura, 2011 など) や SPGA モデル (野津, 2012) によって説明されている。そこで、Kurahashi and Irikura(2011) による SMGA モデルを用いて検討を行ってみた。これは、5 つの SMGA からなるものである。なお、計算では、すべての SMGA で走向及び傾斜は 193° 及び 10° とした。計算結果の波形は、一樣震源モデルでは全体的に紡錘形であるが、SMGA 震源モデルでは震源に近い観測点では個々の SMGA に対応して波形が複数の波群に分かれ、SMGA モデルの方が観測記録形状をよく説明する。しかし、遠方の観測記録では紡錘形となっている場合があるのに対して、計算結果は複数の波群に分かれたままのものが多くみられる。これは、震源距離にかかわらず同じ包絡形状の要素地震を用い、伝播経路の散乱などの影響で継続時間が延びる効果が含まれていないことが、波形が途切れる一因と考えられる。一方、応答スペクトルをみると、今回の計算では一樣断層モデルと SMGA モデルで顕著な違いが見られなかった。

キーワード: 三次元減衰構造, 統計的グリーン関数, Qs, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 深さ依存性, 強震動予測

Keywords: 3D attenuation structure, Stochastic green function, Qs, 2011 Tohoku earthquake, Depth dependence, Strong ground motion prediction



## 広帯域の強震動波形を用いた岩手・宮城内陸地震の強震動生成域の構築 Estimation of Strong Motion Generation Area during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake using broadband strong ground

倉橋 奨<sup>1\*</sup>; 入倉 孝次郎<sup>1</sup>  
KURAHASHI, Susumu<sup>1\*</sup>; IRIKURA, Kojiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛知工業大学  
<sup>1</sup> Aichi Institute of Technology

### 1. はじめに

2008 年岩手・宮城内陸地震 (Mw6.7) では、地震の揺れにより建物被害や土砂災害などの被害が発生した。この地震は、地表断層が見つかっており、かつ、断層直上を含めた震源に非常に近い観測点が存在することから、これらの強震動波形を利用した震源メカニズムの解明が可能な地震の一つである。特に、短周期から長周期までの広帯域に対応した強震動生成域の推定および強震動の発生メカニズムの把握は、将来の強震動予測のためにも重要である。本研究では、本地震の広帯域の強震動波形を用いた岩手宮城内陸地震の強震動生成域モデルの構築を目的としている。

### 2. これまでの強震動生成域震源モデル

筆者らは、2008 年と 2013 年に経験的グリーン関数法を用いて、フォワードモデリングにより強震動生成域の推定を行ってきた。

2008 年の強震動生成域震源モデル 1) は、遠地実体波を用いて推定された波形インバージョン結果を参考として、震源付近の観測点における本震観測記録の再現を主眼としてフォワードシミュレーションを実施されている。この解析では、強震動生成域が震源よりも南側だけでなく北側にも必要であることが示されている。しかしながら、解析で用いられている断層面の幾何学的位置関係に関しては、精度が十分でないという問題があった。

2013 年の強震動生成域モデル 2) は、地震直後に行われた高密度な余震観測記録により推定された精度の高い余震分布を利用して、正確な断層の幾何学位置を決めて解析を実施されている。特に、IWTH25 (一関西) の上下動成分に注目し、経験的グリーン関数法と理論グリーン関数を用いて、強震動生成域の再決定を実施している。しかしながら、震源極近傍の記録は IWTH25 (一関西) 観測点しか利用されておらず、必ずしも一般性のあるモデルになっていない可能性があった。

### 3. 広帯域の強震動波形を再現する強震動生成域の構築

本研究では、IWTH25 (一関西) 観測点のみならず、震源近傍の地震観測点を利用して、強震動生成域の推定を試みる。特に、震源極近傍の記録として荒砥沢ダムがありこの記録が利用できれば、本地震の震源メカニズムの解明に繋がると考えられる。特に、荒砥沢ダムの本震波形は、比較的大きな強震動が観測されていることから、ダムの近くに強震動生成域が存在する可能性があるため確認が必要である。

荒砥沢ダムの本震記録は、断層モデルの地表境界付近に存在しており、Near-field-term の影響を受けている可能性がある。したがって、経験的グリーン関数法を利用する場合、本震波形を再現するためには、経験的グリーン関数となる要素地震にも同様な Near-field-term を含んだものが必要と考えられる。もし、そのような余震がない場合は、低周波側は理論波形、高周波側は要素地震を利用したハイブリッド法による解析が必要となる。現在、このダムにおける余震記録は入手できていないが、入手可能であれば経験的グリーン関数法による解析を実施する予定である。本発表では、理論手法により震源モデルを構築して本震の再現を試みたので報告する。

キーワード: 岩手宮城内陸地震, 強震動生成域, 広帯域の強震動

Keywords: Iwate Miyagi Nairiku earthquake, Strong Motion Generation Area, broad-band Strong Ground Motion

## 2013年2月25日栃木県北部の地震の震源モデルと強震動シミュレーション Source Model and Strong Ground Motion Simulation for the 2013 Northern Tochigi Prefecture, Japan, Earthquake

染井 一寛<sup>1\*</sup>; 宮腰 研<sup>1</sup>; 入倉 孝次郎<sup>2</sup>

SOMEI, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; MIYAKOSHI, Ken<sup>1</sup>; IRIKURA, Kojiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 地盤研, <sup>2</sup> 愛工大

<sup>1</sup>G.R.I., <sup>2</sup>A.I.T.

2013年2月25日栃木県北部の地震 ( $M_{JMA}$  6.3) により, KiK-net 栗山西観測点 (TCGH07) (点震源距離約 5km) では,  $1225 \text{ cm/s}^2$ ,  $39 \text{ cm/s}$  (いずれも地表記録の3成分最大値) の大きな強震動記録が得られた. この地震の発生域では活断層が特定されておらず, その地震規模も比較的小さいことから, 震源を特定しにくい地震に分類される可能性がある. 本研究は, この地震によって TCGH07 で観測された強震動の生成メカニズムを明らかにすることを目的とする. ここでは, 周辺の観測記録を広帯域に再現し得る最適な震源モデルの構築を目指し, 2つのアプローチから本地震の震源像を推定した.

1つ目は, K-NET, KiK-net の計 15 地点の速度波形 (0.1-1.0 Hz) を対象としたマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法 (Sekiguchi et al., 2000) による震源過程の推定である. 矩形断層面 (走向 12km × 傾斜 7km) を一辺 1.0 km の正方形の小断層で分割した. 各タイムウィンドウのすべり時間関数は, ライズタイム 0.6 秒の平滑化傾斜関数で表現し, 6つのタイムウィンドウを 0.3 秒間隔で置いた. また, 第 1 タイムウィンドウの破壊伝播速度 (FTWTV) は  $2.4 \text{ km/s}$  とした. なお, ライズタイムと FTWTV はパラメータを変えたインバージョンを行い, 波形フィットの残差が最小となる値を選択している. また, すべりの時空間方向の平滑化の強さは, ABIC により妥当な値を決定した. 一次元速度構造モデルは, 検層データなどを基にした初期モデルに対して, レシーバ関数と滑降シンプレックス法 (Nelder and Mead, 1965) を用いたモデルチューニングを行った. モデルの妥当性は余震を対象としてグリーン関数を計算し, 観測記録 (0.1-1.0 Hz) との比較を行うことで検証した.

波形インバージョンの結果, 最大すべり量が 0.98m, 断層面全体から解放された地震モーメントは  $6.67 \times 10^{17} \text{ Nm}$  ( $M_w$  5.8) であった. 大きなすべりを生じた領域は破壊開始点付近にあり, 主に北側, やや浅部に向かって広がっている. この傾向は, 引間 (2013) や芝 (2013) のすべり分布とも対応する. 今回の結果の各要素断層からの地震波の寄与とそれらの重ね合わせに注目し, 対象とした 0.1-1.0 Hz の周波数帯域における TCGH07 のパルス波形 (地表と地中) の生成要因を調べた. その結果, 震源近傍における横ずれ断層型の断層走向並行方向に対する放射特性による影響と, 破壊開始点から地表方向 (TCGH07 の方向) に向かう破壊伝播指向性に起因するパルス波形である事が明らかとなった.

2つ目は, 強震動生成領域 (SMGA) (Miyake et al., 2003) に注目し, より短周期の強震動 (0.3-10 Hz) を対象とした経験的グリーン関数法 (Irikura, 1986) による震源のモデル化を行った. 経験的グリーン関数 (要素地震) には 2013年2月25日 23時 32分に発生した余震 ( $M_w$  3.8) を採用した. SMGA の配置は, 波形インバージョンの結果を参考に破壊開始点を含んだ領域とし, SMGA のパラメータ (大きさ, 破壊開始点位置, ライズタイム, 破壊伝播速度) は, 加速度エンベロープと変位波形の残差評価を行い, 残差が最小となるパラメータをグリッドサーチにより探索した (Miyake et al., 2003).

推定された震源モデル (SMGA) は, 波形インバージョンによる大すべり領域と同様に, 主として北側, やや浅部に向かって破壊が伝播する様式である. TCGH07 の速度波形 (0.3-10 Hz) に着目すると, 速度波形に見られるパルス波は, やはり破壊伝播指向性 (破壊開始点から地表) によって生成されている事が確認できた. 一方で, 加速度波形に注目すると, 破壊伝播方向による違いは小さくなるが, 本モデルにおいて再現性は良好である. SMGA の応力降下量は,  $16.4 \text{ MPa}$  と内陸地殻内地震のアスペリティの平均応力降下量よりもやや大きく推定されているが, 震源近傍の記録は, 振幅が過大評価な地点もある.

これらの結果から, TCGH07 でのパルス波形はアスペリティ (SMGA) 近傍で放射特性の影響と, 傾斜方向の破壊伝播指向性の効果によって生成されたと考えられる. 1995年兵庫県南部地震では, 断層の走向方向の線上において, パルス状の大振幅波形が観測され, その成因が横ずれ断層型地震の走向方向に対する破壊伝播指向性の効果によるものである事が知られている (例えば, Sekiguchi et al., 2002). 今回のケースでは TCGH07 は横ずれ断層の走向方向に対して真横に位置しているが, 上述した効果によっても, 大きな強震動が生成される可能性があることは重要な問題である.

キーワード: 2013年栃木県北部の地震, 波形インバージョン, 経験的グリーン関数法, 震源モデル, 強震動シミュレーション  
Keywords: The 2013 Northern Tochigi Prefecture, Japan, Earthquake, Waveform inversion, Empirical Green's function method, Source model, Strong ground motion simulation

## 2013年2月25日に栃木県北部で発生した地震(M 6.3)の震源過程—その2 ~経験的グリーン関数を用いた検討~ Source process of the Feb. 25, 2013 Tochigi Hokubu Earthquake (M 6.3) [2] -Analyses using Empirical Green's Functions-

引間 和人<sup>1\*</sup>  
HIKIMA, Kazuhito<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京電力株式会社  
<sup>1</sup>Tokyo Electric Power Company

### ◆はじめに

2013年2月25日に栃木県北部でM<sub>J</sub> 6.3の地震が発生した。この地震の最大震度は5強であり、震源域が山間部であったことも影響し甚大な被害は報告されていない。しかし、震源近傍のKiK-net観測点(TCGH07, 栗山西)の地表地震計では1Gを超える加速度が記録された。このような観測波形は断層極近傍での強震動を考える上で貴重な記録である。その要因を考察するため、筆者は強震記録を使った震源インバージョン解析(引間,2013a)やサイト・伝播特性に関する検討(引間, 2013b)を実施してきた。しかし、震源過程解析に関しては十分な精度を有する地下構造モデルを構築することが難しく、理論的グリーン関数を使った解析では観測波形を十分に再現するには至っていない。そこで、今回は震源付近で発生した小地震を経験的グリーン関数として震源インバージョン解析を実施し、震源過程について検討を行った。

### ◆断層面・解析手順

断層面の設定は引間(2013a)と同様にした。まず、気象庁一元化データの初動読み取りデータを使い、本震・余震を合わせた2月25日から1週間の震源再決定を行った。震源決定はDouble Difference法[Waldhauser and Ellsworth (2000)]により行い、その際速度構造は気象庁一元化震源と同じJMA2001を使用した。本震の震源深さは気象庁一元化処理結果による2.8kmよりもやや深い3.5kmとなっている。仮定する断層面は、F-netのメカニズム解をもとに設定した。F-net解はほぼ純粋な横ずれ断層を示しているが、2つの節面のうち余震分布とおおむね一致する北北西-南南東の面(走向:165°, 傾斜:80°)に断層面を設定して解析を行った。

インバージョン解析は理論的グリーン関数を使った時と同様に、マルチタイムウィンドウ法[Yoshida *et al.* (1996), 引間(2012)]により行う。小断層サイズは経験的グリーン関数とする小地震の規模を考慮し1kmとした。解析にはKiK-netとK-NETの記録を用い、観測された加速度波形に0.03~1.5Hzのバンドパスフィルタを適用し積分した速度波形を使用した。なお、震源極近傍のTCGH07 栗山西の波形はインバージョンの際には使用せず、また、解析にはTransverse成分の波形を使用することを基本とした。

経験的グリーン関数としては、本震と同様の横ずれのメカニズムを有する2月25日15:26のM<sub>w</sub>4.0の小地震を使用した。要素とする小地震のS波初動走時を読み取り、断層面を分割した各小断層から観測点に対して計算される走時に合わせて時間シフトした波形をインバージョン解析の際のグリーン関数とした。

### ◆解析結果

以上の条件で解析を行ったところ、モーメント解放が大きな領域は震源付近の4km×3km程度の狭い範囲に集中しており、主には北側にすべりが拮がるような結果が得られた。この特徴は、引間(2013a)の理論グリーン関数による解析結果と同様の傾向であるが、大きなすべり域がより狭い範囲に集中する結果である。余震の広がり比べると、地震時すべり域は狭い範囲にとどまっており、これらの対応関係を含めて解析結果に関する考察はさらに検討を継続したい。なお、観測波形の再現は比較的短周期の位相まで良好に行われている。

### ◆おわりに

本稿では一つの小地震を使った解析結果を示したが、栃木県北部の地震ではこの地震以外にも多くの余震が発生している。発表時には本稿とは別の余震を使用した結果なども示し、経験的グリーン関数を使った震源過程解析の信頼性等についても確認したい。

### ※ 既往研究に関する文献

引間, 2013年2月25日に栃木県北部で発生した地震(M<sub>J</sub> 6.3)の震源過程, 日本地震学会 2013年秋季大会予稿集, P3?63, 2013a.

引間, スペクトルインバージョンを用いた2013年2月栃木県北部地震の震源域におけるサイト・伝播特性に関する検討, 日本地震工学会・大会-2013梗概集, 335-336, 2013b.

キーワード: 震源過程, 内陸地殻内地震, 震源近傍, 強震動, 2013 栃木県北部地震

Keywords: Source process, Crustal earthquake, Near source, Strong motion, 2013 Tochigi Hokubu earthquake



## 強震観測記録に基づく 2011 年長野県北部の地震 (Mj 6.7) の震源過程の解明 Source rupture process of the 2011 Northern Nagano earthquake (Mj 6.7) based on strong-motion records

芝 良昭<sup>1\*</sup>  
SHIBA, Yoshiaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所  
<sup>1</sup> CRIEPI

2011 年 3 月 12 日 3 時 59 分に発生した長野県北部地震 (M6.7) では、震源近傍の長野県栄村で震度 6 強が観測された。震源は、新潟—神戸ひずみ集中帯 (Sagiya et al., 2000) に位置し、2004 年新潟県中越地震 (M6.8) と 1847 年善光寺地震の中間の、いわゆる地震空白域に位置する。東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の翌日に発生した地震でもあり、同地震の発生後に各地で頻発した誘発地震の一つと考えられる。また震源域付近には十日町断層帯の南端部が位置しているが、特定の既存活断層との関係は明らかでない。震源近傍の K-NET 津南 (NIG023) では、EW 成分で最大加速度 704 gal を記録しており、震源のアスペリティ、あるいは強震動生成域 (SMGA) との幾何学的な位置関係を明らかにすることは、強震動評価のために重要である。

F-net のメカニズム解によると、この地震は北西—南東圧縮の逆断層の発震機構を持つと考えられる。一方で、この地震では気象庁の一元化震源カタログに基づく余震分布と、防災科学技術研究所の稠密地震観測記録による余震分布が空間的に大きく異なっており、震源域周辺の地盤における著しい不整形性の影響によるものと考えられる。干渉合成開口レーダー (InSAR) の解析結果によれば (例えば中埜・他, 2013)、地震時の地殻変動域は防災科技研の余震分布と調和的であり、さらに走向が異なる 2 枚の断層面が想定され、鉛直変位の不連続性から北部の主断層は南東傾斜、南部の副断層は北西傾斜と示唆される。このため、ここでは InSAR の地殻変動分布と防災科技研の余震分布に整合的な、傾斜方向の異なる 2 枚断層面モデルを設定し、震源インバージョン解析を実施した。

解析の結果得られた断層面上のすべり分布モデルからは、モーメント解放量の大きいアスペリティが破壊開始点から約 7 km 離れた領域に推定され、その大きさは 5km × 10km 程度である。また破壊開始点周辺にも二次的なアスペリティが認められる。地震モーメントの約 85% は主断層から放出されており、副断層からの寄与は小さいことから、InSAR にみられた副断層の変位は、本震の直後に発生した M5.9 の余震によるものである可能性がある。本検討で推定された主アスペリティの直上には背斜構造が存在しており、今回の震源運動は背斜構造を成長させる方向となる。

キーワード: 2011 年長野県北部地震, 震源過程, 強震動, インバージョン解析, 干渉合成開口レーダー, 背斜構造

Keywords: 2011 Northern Nagano earthquake, Source process, Strong ground motion, Inversion analysis, InSAR, Anticlinal structure



## 2013年4月13日淡路島M6.3地震の震源断層の構造解析 Structural analysis of seismogenic fault of the 2013 Mw 5.8 Awaji Island earthquake, NW Japan

林 愛明<sup>1\*</sup>; 片山 翔一<sup>1</sup>; Rao Gang<sup>2</sup>; 窪田 安打<sup>3</sup>  
LIN, Aiming<sup>1\*</sup>; KATAYAMA, Shouichi<sup>1</sup>; RAO, Gang<sup>2</sup>; KUBOTA, Yasu'uchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 浙江大学地球科学院, <sup>3</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Zhejiang University, China, <sup>3</sup>OYO Cooperation

Mw5.8 (Mj 6.3) 淡路島地震は、2013年4月13日5時33分ごろ、淡路島南西部で発生した。既存の地質資料や震源メカニズム解から、この地震は傾斜70度以上の高角逆断層型の未知の活断層により引き起こされたことが示された。しかし、地震後の調査により、震源周辺域にNW-SW走向で南西に高角な傾斜をなす断層（以下、山田断層とする）は、新しく発見された。

空中写真や3D画像の判読と現地調査及び断層岩の組織構造解析から、以下のことが明らかになった。

- 1) 山田断層は、中生代花崗岩類と新生代大阪層群との地質境界に発達した線状地形に沿って観察される。
- 2) 断層破碎帯は、幅10cm以下（約1~5cm）の断層ガウジ層と幅100cm以下の断層角礫帯を含む断層コアとカタクレーサイトや割れ目を伴う幅10~50mのダメージゾーンから構成される。
- 3) 断層剪断帯で発達するS-Cファブリックにより特徴づけられるフォリエーション及び層状構造及び断層条線から、南西側上がりの逆断層型の運動センスが示され、震源メカニズム解とも調和的である。
- 4) この地震に伴った地割帯が山田断層沿いに所々現れた。

以上の発見により、新しく認められた山田断層は活断層であり、2013年M6.3淡路島地震の震源断層である可能性が高いことが明らかにされた。従って、活断層及び古地震研究における断層モデルを再構築し、人口密度の高い淡路島の活断層による地震ハザードについて再評価する必要があると思われる。

キーワード: 2013年4月13日淡路島M6.3地震, 震源断層, 活断層, 山田断層（新称）, 断層岩組織構造, 断層破碎帯  
Keywords: 2013 M 6.3 Awaji Island earthquake, seismogenic fault, active fault, Yamada Fault, S-C fabrics of fault rocks, fault damage zone

## 地形を考慮した準円筒座標系地震波伝播モデリング Quasi-cylindrical seismic waveform modeling considering surface topography

豊国 源知<sup>1\*</sup>; 竹中 博士<sup>2</sup>; 岡元 太郎<sup>3</sup>; 趙 大鵬<sup>1</sup>  
TOYOKUNI, Genti<sup>1\*</sup>; TAKENAKA, Hiroshi<sup>2</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>3</sup>; ZHAO, Dapeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 岡山大・理, <sup>3</sup> 東工大・理工  
<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku Univ., <sup>2</sup>Okayama Univ., <sup>3</sup>Tokyo Tech

局所的な地震波伝播を精度と効率良くシミュレーションする手法としては、「準円筒座標系差分法」(Takenaka et al., 2003) が知られている。円筒座標系を用いて、震源を通る鉛直軸の周りに構造の軸対称性を仮定すると、計算時間とメモリをともに2次元計算並みに抑えて、3次元の波動場を計算できる。ただ通常の円筒座標系 ( $0 \leq r < \infty$ ,  $-\pi < \theta < \pi$ ,  $-\infty < z < \infty$ ) を使う場合、軸対称の仮定がネックとなり、震源を挟んで非対称な現実的な構造を扱えない。このため準円筒座標系差分法では、新たに定義した準円筒座標系 ( $-\infty < r < \infty$ ,  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ ,  $-\infty < z < \infty$ ) を用いることで、この欠点を克服した。

この手法はもともと構造探査をターゲットとした手法であり、軸対称震源のみが用いられていたが、現在は任意のモーメントテンソル点震源と非弾性減衰が取り扱えるよう、プログラムが拡張されている (Toyokuni et al., 2013, AGU Fall meeting). 今回は、さらに現実的な地震波伝播シミュレーションのため、地表地形の導入を行った。差分法で任意形状の固液境界や自由表面を精度良く取り扱うためには、差分格子に法線応力のグリッドを中心とする「単位セル」の概念を導入したのち、境界近傍で2次精度の差分を用いればよい (岡元・竹中, 2005; Takenaka et al., 2009; Nakamura et al., 2012). 今回は、このスキームを準円筒座標系差分法に導入し、東北地方の火山を対象として行った計算例を紹介する。

キーワード: 地震波形, 差分法, 地形, 固液境界

Keywords: seismic waveform, finite-difference method, topography, fluid-solid boundary

## 日本海溝における余震減衰特性の空間分布 Spatial distribution of aftershock decay property beneath Japan Trench

生田 領野<sup>1\*</sup>; 桑原 雅典<sup>2</sup>; 村上 裕記<sup>3</sup>  
IKUTA, Ryoya<sup>1\*</sup>; KUWAHARA, Masanori<sup>2</sup>; MURAKAMI, Hiroki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 静岡大学防災総合センター防災フェロー, <sup>3</sup> 静岡大学理学部  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Shizuoka University, <sup>2</sup>Center of Integrated Research and Education of Natural Hazards, Shizuoka University, <sup>3</sup>Faculty of Science, Shizuoka University

日本海溝において、東北地方太平洋沖地震前後の1997年から2013年までの16年間に起こったM6以上の地震について、余震の減衰特性を気象庁カタログデータを用いて調査した。プレート境界型地震17個について十分な数の余震系列が得られたので、改良大森公式でその特性を評価した。減衰の速さを規定するP値について、本震のマグニチュードに対する依存性は見られなかった。東北沖地震の大すべり域の周辺で余震系列の時空間分布に特徴的な傾向が得られることを期待したが、東北沖地震を挟んで大すべり域周辺のP値に変化はなく、安定していた。空間分布は東北沖地震との関係よりはむしろプレート境界の深さに依存した結果が得られた。プレート境界の深い部分でP値が小さく（減衰が遅く）、浅い部分でP値が大きくなる傾向であった。個別の余震系列について見ると、余震はGPSにより解析された余効すべり（Suito et al., 2011）の大きな場所で継続して多く発生している傾向が見られた。プレート境界地震の余震の発生メカニズムとして、本震後の本震周辺の安定すべり域での余効すべり、プレート境界深部での安定すべりに駆動されていることが示唆される。

参考文献; Suito et al., Earth Planets Space, 63, 615-619, 2011

キーワード: 余震, 修正大森公式, 東北地方太平洋沖地震, 地震活動度  
Keywords: Aftershocks, Modified Ohmori's Law, Tohoku-Oki earthquake, Seismicity

## 2011年東北地方太平洋沖地震の本震直後の地震活動：エンベロープを用いた地震の検出と震源決定 Location of early aftershocks of the 2011 Tohoku-oki Earthquake using seismogram envelopes as templates

小菅 正裕<sup>1\*</sup>; 境 優佳<sup>2</sup>  
KOSUGA, Masahiro<sup>1\*</sup>; SAKAI, Yuuka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学理工学研究科, <sup>2</sup> 弘前大学理工学部

<sup>1</sup>Graduate School of Sci. & Tech., Hirosaki Univ., <sup>2</sup>Fac. Sci. & Tech., Hirosaki Univ.

余震域は時間とともに拡大するので、本震直後の余震分布の推定は本震の断層の大きさを推定する上で重要である。しかし、本震直後の時間帯は本震のコーダ波や引き続く余震のために震源決定が困難である。そこで我々はエンベロープをテンプレートとした震源推定法を開発した。この方法ではまず、連続記録とテンプレートの相関係数を計算し、観測点平均した相関係数の時系列を全テンプレートに対して求める。次に、相関係数の降順に地震の検出（テンプレートの選択）を行う。その際、既に検出された地震の前後一定の時間帯からは地震を検出しないようにした。最後に、検出された地震の実際の波形とエンベロープ波形のラグを説明するように、テンプレートに対する相対震源決定を行う。この方法を2011年東北地方太平洋沖地震に対して適用した。33観測点における96テンプレートを用い、8 Hz帯域において本震直後30分間に22個の地震を検出した。この時間帯での気象庁一元化震源カタログに含まれる地震数は13個である。震源位置については詳細に検討する必要があるが、本研究の方法によって大地震の本震直後の地震検出が可能であることがわかった。

謝辞：本研究には防災科学技術研究所 Hi-net の波形記録を使用しました。本研究の費用の一部は科学研究費補助金（課題番号 23540487）によるものです。記して感謝の意を表します。

キーワード: 本震直後の余震, テンプレート, エンベロープ, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: early aftershocks, template, envelope, Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake



## 長期海底地震計による2011年東北地震震源域北部の余震分布 Aftershock distribution in the northern source region of the 2011 Tohoku earthquake by long-term OBSs

篠原 雅尚<sup>1\*</sup>; 山田 知朗<sup>1</sup>; 中東 和夫<sup>2</sup>; 望月 公廣<sup>1</sup>; 町田 祐弥<sup>1</sup>; 真保 敬<sup>3</sup>; 村井 芳夫<sup>4</sup>; 日野 亮太<sup>5</sup>; 伊藤 喜宏<sup>6</sup>; 佐藤 利典<sup>7</sup>; 植平 賢司<sup>3</sup>; 八木原 寛<sup>8</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>

SHINOHARA, Masanao<sup>1\*</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>; NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>2</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>; MACHIDA, Yuya<sup>1</sup>; SHINBO, Takashi<sup>3</sup>; MURAI, Yoshio<sup>4</sup>; HINO, Ryota<sup>5</sup>; ITO, Yoshihiro<sup>6</sup>; SATO, Toshinori<sup>7</sup>; UEHIRA, Kenji<sup>3</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>8</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 神戸大理, <sup>3</sup> 防災科研, <sup>4</sup> 北大理, <sup>5</sup> 東北大, <sup>6</sup> 京大防災研, <sup>7</sup> 千葉大理, <sup>8</sup> 鹿児島大理

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Kobe Univ., <sup>3</sup>NIED, <sup>4</sup>Hokkaido Univ., <sup>5</sup>Tohoku Univ., <sup>6</sup>DPRI, <sup>7</sup>Chiba Univ., <sup>8</sup>Kagoshima Univ.

The 2011 Tohoku earthquake occurred at the plate boundary and many aftershocks followed. To obtain a precise aftershock distribution is important for understanding of mechanism of the earthquake generation. In order to study the aftershock activity, we carried out extensive sea floor aftershock observation using more than 100 ocean bottom seismometers just after the mainshock. Deployment and recovery of the OBS were repeated, and we obtained the data from OBSs just after the mainshock to the middle of September, 2011. A precise aftershock distribution for approximately three months in the whole source area, with an emphasis on depths of events, was obtained from the OBS data. In the southern source region, an aftershock distribution until September, 2011 was also estimated. Totally urgent OBS observations located 1210 aftershocks (Shinohara et al., 2011, 2012). After the urgent aftershock observation using short-term OBSs, we continued the observation using long-term OBSs to monitor seismic activities in the source area. We deployed 40 LT-OBSs in the whole source region in September 2011 and have completed recovery of the LT-OBSs until November, 2012. In this presentation, we concentrate seismic activities in the northern source region using the data from the urgent aftershock observation and long-term seafloor observation.

We selected events whose epicenter is located below the OBS network from the JMA earthquake catalog, and P and S-wave arrival times were picked from the OBS data. Hypocenters were estimated by a maximum-likelihood estimation technique with one dimensional velocity structures. Thickness of sedimentary layer changes at each OBS site was evaluated and the estimated travel times by the location program were adjusted. We will report precise seismic activities in the northern source region with spatial and temporal variation. From preliminary analysis, seismic activity in off-Miyagi region was still low until the end of the long-term observation.

## A boundary of stress-field orientation in northwestern area of the Kanto plain A boundary of stress-field orientation in northwestern area of the Kanto plain

YANO Tomoko Elizabeth<sup>1\*</sup>; 武田 哲也<sup>1</sup>; 汐見 勝彦<sup>1</sup>  
YANO, Tomoko elizabeth<sup>1\*</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>1</sup>; SHIOMI, Katsuhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup>NIED

Kanto-Tokai area is particularly important in terms of seismic hazard and mitigating disaster since this area is having high potential to economic and social impacts. Despite the fact, the Kanto region is one of the most seismic active areas due to its complicated tectonics and has an active fault zone, containing Fukaya fault, in northwestern area of the Kanto plain, which has potential to the M8 class earthquake. Many studies and research projects have attempted to understand the seismic activity and stress field. However, reliable and high-resolution catalog is required for the detailed discussion.

We have launched Japan Unified High-resolution Relocated Catalog for Earthquakes (JUICE) project since 2013. Events were relocated using the Double-Difference method for high-resolution hypocenter location to estimate seismogenic layer thickness, to evaluate active faults, and to understand the tectonic processes in Japan. We have completed for the first version of Catalog in the region of Kanto-Tokai area for the shallow (>40 km) earthquakes between M0 and M6.5 from 2001 to 2012. Here, in this presentation, we introduce the result from JUICE focusing on the northwestern area of the Kanto plain that contains a sharp boundary in which pressure and tension axis dramatically change by 90 degrees.

The JUICE catalog clearly shows a band of seismicity from Izu peninsula to the north. This seismic band has a nearly constant width of about 50 km. The focal mechanisms show that strike and thrust type dominate throughout this seismic band continuously, though there exists a area where pressure and tension axis dramatically change within this seismic band. While this “area” has been already recognized (e.g. Suzuki, 1989), JUICE helps to draw a precise “line” as a stress-field orientation boundary where happened to be close to Fukaya fault.

Bouguer gravity anomaly and seismic exploration data imply structural changes at the stress-field orientation boundary. According to the Bouguer gravity anomaly (Komazawa, 2004), the boundary appears to be associated with the gravity-low zone. The gravity anomalies show a lineation that trends NW-SE, the same direction of the boundary. Seismic profile (Sato et al., 2003) displays changes in basement character showing the pattern of depression beneath Fukaya fault. The shape of depression corresponds to the pattern of seismicity beneath this area, and also the boundary sites beneath the lowest point of the depression.

It appears to split into different regimes at the stress-field orientation boundary. We conclude that it is possible to have major tectonic boundary underneath this northwestern area of the Kanto plain. Moreover, we suggest that Median tectonic line (MTL) is a major candidate underneath this area. MTL runs parallel to the island arc through southwest Japan and divides different geological structures into outer (the forearc side) and inner arc (the backarc side). The trace of MTL disappears on the eastern side of Itoigawa-Shizuoka tectonic line, but Takagi et al. (2006) found an evidence of inner arc materials in the core sample obtained around this area. Therefore we assume that MTL is buried underneath the boundary. This finding may eventually impact on the research relates to hazard of Kanto area.

キーワード: 地震活動とテクトニクス

Keywords: Seismicity and tectonics

## 火山地帯での群発地震活動の推定 Estimating earthquake swarms in volcanic regions

熊澤 貴雄<sup>1\*</sup>; 尾形 良彦<sup>1</sup>; 木村 一洋<sup>2</sup>; 前田 憲二<sup>2</sup>; 小林 昭夫<sup>2</sup>  
KUMAZAWA, Takao<sup>1\*</sup>; OGATA, Yoshiko<sup>1</sup>; KIMURA, Kazuhiro<sup>2</sup>; MAEDA, Kenji<sup>2</sup>; KOBAYASHI, Akio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute

In the eastern Izu region, earthquake swarms have occurred repeatedly since 1978. These events are known to be triggered by magma intrusions, and the amount of magma intrusion is correlated with volumetric strain of the crust. We show the background seismicity rate is highly correlated with the volumetric strain in this region, with a short time delay. We then discuss the possibility to forecast the seismicity in volcanic regions.

To calculate the background seismicity rate, we used the epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model extended for application to nonstationary seismic activity, introduced by Kumazawa & Ogata (2013). The time-dependent rates of both background seismicity and aftershock productivity in the ETAS model are optimally estimated from hypocenter data by Bayesian smoothing method. These rates can provide quantitative evidence for abrupt or gradual changes in shear stress and/or fault strength due to aseismic transient causes such as triggering by remote earthquakes, slow slips, or fluid intrusions within the region.

キーワード: ETAS モデル, ベイズ平滑化, 群発地震, 火山地帯, 伊豆地方

Keywords: ETAS model, Bayesian smoothing, earthquake swarm, volcanic region, Izu

**Source Characteristics and Coulomb Stress Change of the 19 May 2011 Mw 6.0 Simav-Kutahya Earthquake, Turkey**  
**Source Characteristics and Coulomb Stress Change of the 19 May 2011 Mw 6.0 Simav-Kutahya Earthquake, Turkey**

GORGUN, Ethem<sup>1\*</sup>  
GORGUN, Ethem<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysical Engineering, Istanbul University

<sup>1</sup>Department of Geophysical Engineering, Istanbul University

Abstract

On 2011 May 19, Simav district of Kutahya province in northwest Anatolia was hit by a moderate size (Mw=6.0) earthquake. Centroid moment tensors for 41 events with moment magnitudes (Mw) between 3.5 and 6.0 are computed by applying a waveform inversion method on data from the Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute broadband seismic network. The time span of data covers the period between 2011 May 19 and 2011 August 22. The mainshock is a shallow focus normal event at a depth of 10 km. Focal depths of aftershocks range from 5 to 20 km. The seismic moment ( $M_0$ ) of the mainshock is calculated  $1.15 \times 10^{18}$  Nm. The estimated rupture duration of the Simav mainshock is 30 s. The focal mechanisms of the aftershocks are mainly normal faulting with a variable strike-slip component. The geometry of focal mechanisms reveals a normal faulting regime with NE-SW trending direction of T-axis in the entire activated region. A stress tensor inversion of focal mechanism data is performed to acquire a more accurate picture of the Simav earthquake stress field. The stress tensor inversion results indicate a predominant normal stress regime with a NW-SE oriented maximum principal compressive stress. According to variance of the stress tensor inversion, to first order, the Simav earthquake area is characterized by a homogeneous intraplate stress field. Eventually, Coulomb stress analysis is performed to calculate the stress transfer and correlate it with the activated region. Positive lobes with stress more than 3 bars are obtained, indicating that these values are large enough to increase the Coulomb stress failure towards NW-SE direction.

キーワード: Aftershock, Coulomb Stress Analysis, Focal Mechanism, Simav earthquake, Stress tensor inversion, Western Anatolia

Keywords: Aftershock, Coulomb Stress Analysis, Focal Mechanism, Simav earthquake, Stress tensor inversion, Western Anatolia



## 関東大震災(1923)と横浜 The Great Kanto Earthquake (of 1923) and YOKOHAMA (1)

西澤 勝<sup>1\*</sup>  
NISHIZAWA, Masaru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし  
<sup>1</sup> none

### 1. 開港 (Open a port to foreign ships for trade)

1859年横浜は開港する (Open a port to foreign ships for trade)。開港の三ヶ月前に工事が着工される突貫工事であった (The port was built at full speed)。

アーサー・ブレンドの手記によると「建物は木材以外は使用されず、倉庫はドロと漆喰 (plaster/stucco) で出来ていたために、非常に火災が (a fire) 多く「豚屋火事」と言われるくらい、ひんぱんに火災があった。火災後、プラントンが近代的町づくりをし、防火帯として「日本大通」を造り、もう一つは、「本格的な石造り (made of stone)」の町を作ることをおしすすめた。石は房州からで、洋風の石積み・ブラフ (bluff) が山手を表す固有名詞ともなった。幕府は治安も考え、海、川と運河で囲まれた近代の出島に橋をもうけ、門門をもうけた。関内、関外の呼び名が生ずる。今の山下町界隈を外国人居留地、以西を日本人居留地と定めた。この二つの町の間に港崎遊郭は外国人のためにつくられた。1866年の火災で吉田新田に遊郭は移る。開港後は商人ばかりでなく、異国情緒の満つる横浜に、浮世絵師も集り、異人の生活、風俗を描いた作品は、「横浜絵」、「横浜浮世絵」あるいは、「横浜開化錦絵」とも呼ばれ、飛ぶように売れた。画題の主な三つは、(a) 開港場として整備していく横浜の絵図 (b) 港崎遊郭と遊興する外国人の姿 (c) 居留地の町並みと外国人の日常生活であった。横浜開化錦絵 (Yokohama civilization (enlightenment) color print) も彫り、摺りの技術面の低下など又画題のパターン化もあり、終焉してゆくが、横浜のエキゾチズム (exoticism) を表現、文化の媒体となったことは特筆に値する。

### 2. 関東大震災以後

関東大震災によって壊滅状態となった横浜の復興の街並みの中心となったのは、耐震性と耐火性の双方に勝れる、鉄筋コンクリート建築であった。「関東大震災と横浜」「横浜港と関東大震災」「横浜・関東大震災の記憶」等の横浜市等の資料及び博物館等での展示会を見ての感想は、まず、最近の中国内陸部や中近東での地震における、ブロック造りや土壁造りなどの家屋の崩壊の仕方と非常によく似た建物の崩壊をしているということであった。鉄筋が当時なかったのかと、一瞬思ったほどで、そのために、1.で開港の章を設けた。ブロック状で造られていたり、その間の繋ぎ目も不備であることが写真等で判る。次に、港や街中の写真からは、液状化の現象らしきものは認められない。しかし、復興後の計画を見ると、かなり埋立造成地が増加しており、液状化多発の要因を作っている計画となっている。なお現在の横浜は近代的ビルが建設され、港には一見、見かけは美しい横浜ベイブリッジなども建設され、見る者に複雑な想いに浸らせる。関東大震災以後に、重要視されたものを以下にいくつか示す。(1) ズロース：アメリカに留学した津田梅子ら少女五人が最初に着用したらしいが、大震災焼跡の女性の無惨さが、ズロースの必要性を悟らす。昭和7年白木屋の火事で着物のすそを気にして、手を離したり、脱出を拒んだ女性の焼死体以後徹底す。(2) 地下足袋は、全国から集まった、関東大震災復興作業の労務者が用いて広く普及。商品名の地下足袋が一躍普通名称に。平安時代、「尻切」、室町時代「足半」、江戸時代、竹皮草履、中貫、麻裏、板草履や雪駄が。地下は直に土地を踏むので「はだし足袋」とも。(3) スリッパは明治初年以來洋館が建つと共に普及。(4) アパートの普及。アパートは古代ローマに始まるが、欧米は18世紀産業革命に伴い、日本は1910年上野池の端の上野倶楽部竣工が最初。1925~1927年関東大震災後、住宅建設を目的の同潤会により、渋谷の青山、代官山に鉄筋コンクリート造りのアパート。以後木造アパートも個人経営の貸し家として企業化。(5) タイピストの出現。明治10年頃アメリカからの欧文タイプに刺激され、大正4年邦文タイプ完成。関東大震災復興後、婦人の職場進出が広がり、邦文タイピストは時代の先端をゆく新職業。しかし服装は依然和服。

### 参考文献

- 樋口清之監修：「起源のナゾ」光文書院、昭和49年
- 西澤勝：1995年1月兵庫県南部地震の液状化に伴う免振力についての若干の考察、2002年6月、第28回日本環境学研究発表会
- 西澤勝：液状化に対する私見とその応用、2011年6月、第37回日本環境学研究発表会
- 西澤勝：句集「行雲流水」(増補版)-地震考-一波相論に備へて-、平成22年10月(2010、10月)
- 宗像盛久編：横浜開化錦絵を読む、東京堂出版、平成12年

キーワード: 関東大震災, 横浜, 開港, 横浜開化錦絵, 鉄筋コンクリート

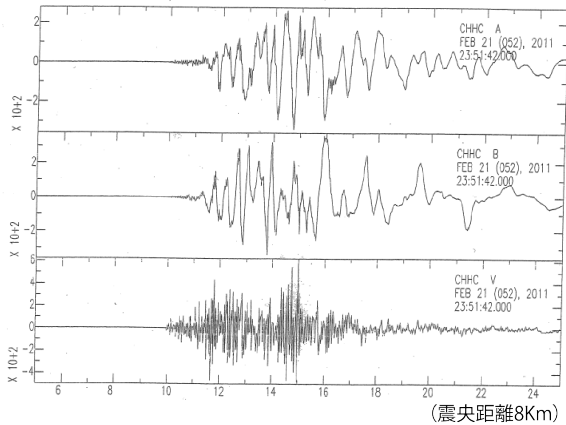
Keywords: The Great Kanto Earthquake (of 1923), Yokohama, Open a port, YOKOHAMA civilization color print, The reinforced concrete building

SSS24-09

会場:315

時間:5月1日 17:45-18:00

クライスチャーチの波形



東西、南北の波の位相は逆転していることは他と同じで、水平方向に建物に対して回転力(又はねじれ)が生じることが判る。

主要動以後の波形は波うっていることは他と同様。しかし、上下動も多少は波うってはいるが、東西、南北に比べると小さい。

## 日本列島内陸および震源域における東北地方太平洋沖地震後の地震活動の変化 Seismic activity in eastern Japan and the source region after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

魚落 昭子<sup>1</sup>; 久家 慶子<sup>1\*</sup>  
UOOCHI, Akiko<sup>1</sup>; KUGE, Keiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Dept. Geophysics, Kyoto University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本観測史上最大のM9.0であった。この地震直後には震源域のみならず日本列島でも地震活動の変化が報告された(Toda et al., 2011; Kato and Igarashi, 2012 など)。東北地方太平洋沖地震発生から3年が経過し、本研究では、震源域および日本列島内陸を含んだ広域を対象に、本震から2年半後までの地震活動の変化について系統的に調査した。

本研究では、緯度33.4~41° 経度136~145° の調査領域を緯度経度0.2° 幅の小領域に分割し、各々の小領域内において、東北地方太平洋沖地震発生前9年間での1年あたりの地震発生頻度に対する、東北地方太平洋沖地震発生から1年間、および発生1年半後から1年間の地震発生頻度の比を算出した。これらの比の比較と空間分布から、地震活動の変化を検出した。震源データには気象庁一元化震源を用いた。東北地方太平洋沖地震前に大きな内陸地震が発生した場所については、顕著な余震期間を除いて地震発生頻度を計算した。また、これに平行して、東北地方太平洋沖地震の震源域については、F-netのCMTカタログからプレート境界地震と思われる震源データを選び出して同様の手法を適用した。

算出した地震発生頻度比の結果から、東北地方太平洋沖地震震源域のプレート境界地震については、東北地方太平洋沖地震から2年半後には、岩手県沖をのぞく震源域全域が本震以前の地震活動より低下していることが明らかになった。日本列島内陸に関しては、本震からの1年間、磐梯山、日光白根山、草津白根山、苗場山、富士山の活火山周辺や、いわき、秋田県北部・中部、関東地方南部で顕著に活発な地震活動が検出された。2年半後には、日本列島内陸の広い範囲で、本震前よりも地震発生頻度が低くなり、磐梯山、苗場山、富士山周辺の地震活動も低下した。一方、秋田県北部・中部、関東地方南部やいわき、日光白根山、草津白根山周辺では、2年半後も依然として活発な地震活動が検出された。

本研究で検出された地震発生頻度比が顕著な地域を対象にして各々の地震活動を丁寧に調べると、日本列島内陸のその多くで、東北地方太平洋沖地震前後で地震発生場所やメカニズムに変化があったことが確認できた。更に、顕著な地震発生頻度比をもつ地域の東北地方太平洋沖地震後の地震活動に改良大森公式の適用を試みたところ(気象庁一元化震源を使用)、東北地方太平洋沖地震震源域から離れた日本列島内陸でも多くの地域でおおよそ改良大森公式に従うようにみられ、地震発生頻度が本震2年半後まで高い領域で $p=0.2\sim 1.1$ 、本震1年後まで高かった地震発生頻度が2年半後には低下した領域で $p=0.8\sim 1.1$ となった。特に関東地方南部では、 $p$ 値が0.2となり、他の地域と比較してかなり小さく、地震活動が比較的ゆっくり減少しているといえる。また、活火山の周辺では、地震発生頻度変化の違いに関わらず、比較的大きな $p$ 値となる。一方、東北地方太平洋沖地震の震源域では、震源域全域、余効すべり域、および余効すべり域外の領域で $p$ 値はいずれも1.0~1.1となり、余震の減衰の仕方に大きな違いが見られなかった。

## 日本列島内陸地震に先立つ異常地震活動の統計的特徴 A statistical feature of anomalous seismic activity prior to large inland earthquakes in Japan

河村 将<sup>1\*</sup>; 呉 イーシュエン<sup>2</sup>; 工藤 健<sup>3</sup>; 陳 建志<sup>2</sup>  
KAWAMURA, Masashi<sup>1\*</sup>; WU, Yi-hsuan<sup>2</sup>; KUDO, Takeshi<sup>3</sup>; CHEN, Chien-chih<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立台湾大学地質科学系, <sup>2</sup> 台湾国立中央大学地球物理研究所, <sup>3</sup> 中部大学工学部共通教育科

<sup>1</sup>Department of Geosciences, National Taiwan University, <sup>2</sup>Grad. Inst. of Geophysics, National Central University, Taiwan,

<sup>3</sup>General Education Division, College of Engineering, Chubu University

内陸地震発生に先立つ異常地震活動(地震活動静穏化・活発化)は、地震発生準備過程(応力蓄積過程)の反映と考えられる。日本の内陸地震発生の準備過程について、特徴的時間スケールが存在するとすれば、それを明らかにすることは準備過程解明に重要な情報となる。そこで、異常地震活動(地震活動静穏化・活発化)の位置(空間メッシュ)をパターンインフォマティクス法により特定し、さらにその後内陸地震( $M \geq 6.4$ )が異常地震活動の位置で発生する傾向にあるかどうかを、Molchan の error diagram を用いて統計的に評価した。解析には気象庁一元化震源を使用した。2000 年から 2010 年の間に、主に日本内陸で発生した  $M \geq 3.5$ 、 $M \geq 4.0$ 、および  $M \geq 4.5$  (3 通り)、深さ 30km 以浅の地震を用い、4・6・8・10・12・14 年の異なる時間スケールについて地震活動変化(平均的な日地震発生数の変化量)が有意に大きな位置を特定した。結果、日本の内陸地震発生に要する準備期間は 8 年から 10 年で、下限マグニチュードが  $M \geq 4.0$  と  $M \geq 4.5$  の場合には、この傾向が統計的にも有意となった。

キーワード: パターンインフォマティクス, 地震活動静穏化, 地震活動活発化, 誤差ダイアグラム, 応力蓄積, 内陸地震  
Keywords: pattern informatics, seismic quiescence, seismic activation, Molchan's error diagram, stress accumulation, inland earthquake



## 東北地方太平洋沖地震後の南東北～関東沿岸域のプレート境界近傍における応力変化の時間変化 Coulomb stress change inverted from the seismicity rate change in southern 2011 Tohoku earthquake's source region

高橋 豪<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Go<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University

本研究の対象地域である南東北～関東の沿岸域は東北地方太平洋沖地震の破壊域の南端に位置し、東北地方太平洋沖地震発生後余震が多発した領域である。対象地域内には太平洋プレート (PAC) 及びフィリピン海プレート (PHS) が沈み込んでおり、茨城沖の PAC 上面付近では本震発生から 30 分後に Mw7.9 の最大の余震、房総半島沿岸部の PHS 上面付近では 2011 年 10 月に平均発生間隔より短い期間でスロースリップイベント (SSE) が発生した。このような巨大地震発生後の余震活動は本震による応力の変化が重要な役割を果たしていると考えられている。そこで、本研究では地震発生回数の変化から応力変化の時間変化を求める手法を使用し、東北地方太平洋沖地震発生後、研究対象地域内のプレート上面近傍でどのような応力変化があったのかを推定した。

推定された応力変化は、東北地方太平洋沖地震が発生した直後に対象領域内の PAC および PHS 上面のほとんどの領域で非常に大きい値を示した。この大きな応力変化は房総半島沖付近まで達した。その後、これらの大きな応力変化は時間の経過とともに小さな値になったが、PAC 上面付近では、福島沖～銚子沖において本震発生後から 2012 年 2 月まで大きな応力変化を示した。PHS 上面付近では、PHS の北東端付近と 2011 年 10 月の SSE 発生域の北東部において 2013 年 3 月まで大きな応力変化が維持されていたことが示された。過去の研究では、PHS の北東端付近を本震の破壊域の南端と推定している。本研究では房総半島沖付近まで大きな応力変化が見られたことから、破壊域よりも更に南側まで大きな応力変化が達したことが示唆される。

地震発生回数から推定された応力変化について考察するため、PAC と PHS の上面において東北地方太平洋沖地震と Mw7.9 の余震、余効変動による応力変化の数値計算を行った。数値計算の応力変化の分布の特徴は地震発生回数の変化から推定した応力変化の特徴と類似した。このことから、本研究で示された対象地域内の東北地方太平洋沖地震発生後の応力変化は本震と Mw7.9 の余震、余効変動による影響でほぼ説明しうると考えられる。また、それらの大きな応力変化が房総半島付近まで達したことが明らかになった。一方で、2011 年 10 月の SSE 域北東部では、数値計算から求めた応力変化は相対的に小さい値であったが、地震発生回数から推定した応力変化は大きな応力変化となった。このことから、本震や Mw7.9 の余震、余効変動以外の影響があったか、この SSE 域北東部では破壊強度に近いレベルにあったことが考えられる。この SSE 北東部は 2011 年 10 月の SSE のすべりが開始したと指摘されている領域であることから、この領域での大きな応力変化が 2011 年 10 月の房総半島の SSE の発生に影響したことが示唆された。

キーワード: 応力変化, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 余震, スロースリップ

Keywords: stress change, 2011 Tohoku earthquake, aftershock, slow slip

## 長期海底地震観測で得られた2011年東北地方太平洋沖地震後の茨城・房総沖の地震活動

### Spatial distribution of earthquakes off the coast of Ibaraki and the Boso Peninsula after the 2011 Tohoku Earthquake

中東 和夫<sup>1\*</sup>; 町田 祐弥<sup>2</sup>; 真保 敬<sup>7</sup>; 山田 知朗<sup>2</sup>; 望月 公廣<sup>2</sup>; 塩原 肇<sup>2</sup>; 篠原 雅尚<sup>2</sup>; 村井 芳夫<sup>3</sup>; 日野 亮太<sup>4</sup>; 東 龍介<sup>4</sup>; 鈴木 健介<sup>8</sup>; 久保田 達矢<sup>4</sup>; 長谷川 和也<sup>4</sup>; 佐藤 利典<sup>5</sup>; 高田 裕能<sup>5</sup>; 植平 賢司<sup>7</sup>; 八木原 寛<sup>6</sup>

NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>1\*</sup>; MACHIDA, Yuya<sup>2</sup>; SHINBO, Takashi<sup>7</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>2</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>2</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>2</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>2</sup>; MURAI, Yoshio<sup>3</sup>; HINO, Ryota<sup>4</sup>; AZUMA, Ryosuke<sup>4</sup>; SUZUKI, Kensuke<sup>8</sup>; KUBOTA, Tatsuya<sup>4</sup>; HASEGAWA, Kazuya<sup>4</sup>; SATO, Toshinori<sup>5</sup>; TAKATA, Hiroyoshi<sup>5</sup>; UEHIRA, Kenji<sup>7</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学, <sup>2</sup> 地震研究所, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 千葉大学, <sup>6</sup> 鹿児島大学, <sup>7</sup> 防災科学研究所, <sup>8</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Kobe Univ., <sup>2</sup>Earthquake Research Inst., <sup>3</sup>Hokkaido Univ., <sup>4</sup>Tohoku Univ., <sup>5</sup>Chiba Univ., <sup>6</sup>Kagoshima Univ., <sup>7</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>8</sup>JAMSTEC

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake occurred on March 11, 2011, off shore of the northeast Japan region. Many aftershocks occurred following the mainshock. To obtain a precise aftershock activity is important for understanding the mechanism of earthquake generation, and the recovery of plate coupling at a ruptured plate boundary. In order to study the aftershock activity, we had deployed 66 long-term ocean bottom seismometers (LTOBS) off the coast of Ibaraki and the Boso Peninsula from October 2011 to November 2012.

For hypocenter determination, we selected 1606 events whose epicenter catalog which the Japan Meteorological Agency for hypocenter determination. P- and S- wave arrival times were manually picked using the WIN system (Urave and Tsukada, 1991). Hypocenters were determined by the maximum-likelihood estimation technique (Hirata and Matsuura, 1987). The hypocenter location program used in this study is based one-dimensional structure with constant  $V_p/V_s$  ratio of 1.73. Because a sedimentary layer below the sea floor generally has a large  $V_p/V_s$  value, an adjustment of the station corrections is needed. To obtain the station correction, we used the following method. First, we located the hypocenter using the P- and S-wave arrival times with the assumed station correction values for the velocity structure used. The averaged differences between observed travel time and estimated travel times (O-C times) for each station were then calculated. The averaged O-C times were added to the previous station correction values, and the hypocenters were relocated. We repeated this procedure eleven times. After this procedure, the averaged O-C times were less than 0.1 s for both the P-wave and S-waves. We estimated 458 hypocenter locations with an error of less than 5 km in the horizontal direction and less than 3 km in depth by using LTOBS data.

Most of the hypocenter locations have a depth shallower than 40km. The earthquakes form a plane dipping landward in the study area. Comparing the hypocenter locations with crustal structures obtained by active seismic studies (e.g. Miura et al., 2003). Many events occurred along the plate boundary. We also compared the hypocenter locations with aftershock distribution of the seismic observation conducted immediately after 2011 Tohoku Earthquake (Shinohara et al., 2012). Shinohara et al., (2012) reported that the low seismicity region has seen at the shallow part of the plate interface in the off-Fukushima. On the other hand, our results showed the seismicity is not low at the same region. This difference may reflect the change of stress fields at a ruptured plate boundary.

## 海底地震観測による2013年福島沖の地震活動 Spatial distribution of earthquakes off the coast of Fukushima deduced from a one-year OBS observation in 2013

山田知朗<sup>1\*</sup>; 中東和夫<sup>2</sup>; 篠原雅尚<sup>1</sup>; 望月公廣<sup>1</sup>; 塩原肇<sup>1</sup>

YAMADA, Tomoaki<sup>1\*</sup>; NAKAHIGASHI, Kazuo<sup>2</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 神戸大理

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Kobe Univ.

The 2011 Tohoku earthquake (M9.0) vastly changes stress field around the rupture zone, and many aftershocks and other related geophysical phenomenon such as geodetic movements have been observed. The seismicity not only keeps still high rate compared with that before the 2011 earthquake but is important to figure out the time-spacious distribution during the relaxation process for understanding the giant earthquake cycle. Many studies using ocean bottom seismometers (OBSs) [e.g. Shinohara et al., 2011, Nakahigashi et al., this meeting] have been doing since soon after the 2011 Tohoku earthquake in order to obtain aftershock activity precisely. Here we show one of the studies at off the coast of Fukushima which is located on the southern edge of the rupture zone of the 2011 Tohoku earthquake. 12 short-period type [Lennartz 3Dlite] OBSs (SOBS) and 4 broadband type [Guralp CMG 3T] OBSs (BBOBSs) in August 2012 were installed. 20 SOBSs and 4 BBOBSs attached with absolute pressure gauge [Paroscientific Model 8B] were added in November 2012. After one year continuous recording, 36 OBSs were recovered in November 2013. We selected characteristic 1,000 events in the vicinity of the OBS network based on a hypocenter catalog publish by the Japan Meteorological Agency, and extracted the events' data from all available OBS data after time corrections caused by each internal clock. Each P and S wave arrival times, P wave polarity and maximum amplitude were picked manually on a computer display using the WIN system [Urabe and Tsukuda, 1991]. We assumed one dimensional velocity structure that is modification of the result from an active source experiment close to our network, and applied time corrections every station which were estimated from differences from theoretical and observational travel times for removing ambiguity of the assumed structure. Then we adopted the maximum-likelihood estimation technique [Hirata and Matsu'ura, 1987] and calculated the hypocenters. Preliminary results show that intensive activity near the Japan trench can be seen while there was a quiet seismic zone between the trench zone and landward high activity zone.

キーワード: 福島沖, 余震活動, 長期型海底地震計

Keywords: off Fukushima, Aftershock activity, Long-term OBS

## 房総半島沖のプレート間すべりによる応力変化と地震活動の関係 (その2) Relation between Seismicity and Stress Change Associated with Interplate Slips off Boso Peninsula: Part 2

弘瀬 冬樹<sup>1\*</sup>; 前田 憲二<sup>1</sup>  
HIROSE, Fuyuki<sup>1\*</sup>; MAEDA, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

弘瀬・前田 (2012, 2013, JpGU; 2013, SSJ) は、房総半島沖のスロースリップイベント (以下, SSE) に伴う応力場の変化と地震活動度および  $b$  値とに時空間的な相関がみられることを指摘した。例えば、地震活動についてみると、(S-1) SSE 時に活発化、(S-2) 2002 年および 2007 年 SSE 前に静穏化、(S-3) 2007 年 SSE を境に発生率が増加、という 3 つの特徴が挙げられる。次に G-R 則の  $b$  値についてみると、(b-1) SSE 中および直後に小さくなる、(b-2) 次の SSE まで徐々に大きくなる、というサイクルを繰り返している。

ここで注目している地震活動域のすべり欠損レートはほぼゼロである。すなわち、安定的に滑っているプレート境界面に小さなアスペリティが分布しているため、地震が定常的に発生していると考えられる。一方、SSE の発生に伴って地震活動域のプレート間すべりレートも増加する。そして、歪蓄積レートが高くなるため、応力の増加率も高くなる。ここで、室内実験から得られた「応力の増加率が高い=地震発生率が高い (Dieterich, 1994, JGR)」または「応力と G-R 則の  $b$  値は逆相関 (Scholz, 1968, BSSA)」という結果を考慮すると、SSE 時に地震発生率が高くなり、同時に  $b$  値は低くなると予想される。観測結果はこの予想と整合している。

具体的にみてみると、SSE 時 (S-1, b-1) では、SSE の中心部は勿論のこと、SSE の縁に位置する地震活動域のプレート間すべりレートも SSE 間のそれより高くなる (GNSS データから推定されたすべり欠損および SSE 分布より確認できる)。そして、歪蓄積レートが高くなるため、応力の増加率も高くなる。それにより地震発生率が高くなり、同時に  $b$  値が低くなる。一方、SSE 間 (S-2, b-2) では、プレート間すべりレートが SSE 時より低下するため、上記と逆の現象となり、地震活動の静穏化が現れ、同時に  $b$  値は高くなる。2007 年 SSE を境に発生率が増加 (S-3) については、2007 年 SSE 前後ですべり欠損分布に大きな違いはない。この状況下で地震発生率に変化が現れるためには、Dieterich (1994) の枠組みで考えると、すべり欠損レートは変わらず、定常すべりレートだけが高くなればよい (定常すべりレートの値がいくつであろうとすべり欠損には影響しない (Savage, 1983, JGR))。つまり、プレート間カップリング率 (すべり欠損レート/定常すべりレート) の低下を意味する。このように、地震活動や  $b$  値の時間変化は、プレート間すべりレートの擾乱で包括的に説明できる。

ところで、房総 SSE は概ね 4-7 年間隔で発生していたが、2011 年末および 2014 年初めにも発生し、直近 2 回の発生間隔は 2 年程度とこれまでに比べて極端に短い。発生間隔が短縮した主な原因は 2011 年東北地方太平洋沖地震 (以下、東北沖地震) の影響によるものと考えられるが、これまでにみられた特徴が 2014 年 SSE でもみられるかどうか、期間を延長して解析した。その結果、(S-1) SSE 時の地震活動の活発化、(S-3) 2007 年以降の高い地震発生率、(b-1, b-2)  $b$  値の時間変化はこれまでと同じ傾向を示した。一方、東北沖地震の影響が依然強く、(S-2) SSE 前の地震活動の静穏化については認められなかった。

キーワード: 房総半島, スロースリップイベント,  $b$  値, 応力, 時間変化

Keywords: Boso peninsula, slow slip event,  $b$  value, stress, temporal change



## 紀伊半島南方沖の南海トラフ軸周辺における微小地震活動について Microseismicity around the Nankai trough south off the Kii Peninsula

山崎 明<sup>1\*</sup>  
YAMAZAKI, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所  
<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

紀伊半島南方沖の南海トラフ周辺海域で実施された海底地震観測はこれまでほとんどが海溝軸より陸側で行われており、海溝軸から南方にかけての地震活動についてはあまりよくわかっていなかった。気象研究所では2005年から2008年にかけて気象庁地震火山部と共同で紀伊半島南方沖の南海トラフ軸周辺とその南方海域で海底地震観測を実施した。観測は自己浮上式海底地震計を10台程度使用し、観測期間が約3カ月の観測を計4回行った。観測の結果、南海トラフ軸周辺では微小地震活動がかなり活発であることが明らかとなった。これらの微小地震は気象庁一元化震源のカタログには記載がなく、海底地震観測を実施することによって見出された地震活動であるといえる。

紀伊半島南方沖の南海トラフ軸周辺で発生している微小地震活動の特徴として次のようなことが言える。まず微小地震の震源の深さについてはほとんどの地震が10km~25kmに分布している。同海域の気象庁一元化震源では深さはおおむね30km~40kmに分布しているが、海底地震観測の実施により実際の震源は一元化震源より20km程度浅いことが明らかとなった。震源の深さ分布には比較的はっきりした下限の面が存在し、その面より下部ではほとんど地震は発生していない。全般的にみて微小地震活動の震源分布はトラフ軸を挟んでトラフ軸より海側では南傾斜、陸側では北傾斜で分布する傾向が認められる。微小地震の面的な分布は一様ではなくかなり偏った分布をしており、ところどころに地震クラスターや線状の地震配列を見出すことができる。また微小地震のほとんど発生していない直径が20km~30kmのサイズの空白域が数箇所存在し、フィリピン海プレート内に地震活動のセグメント構造が形成されているように見える。

南海トラフに限らずトラフ軸沿いの地震活動はプレートの屈曲やプレート間の固着状態の変化による沈み込み帯の力学的状態の変化の影響を受けている可能性がある。例えば、プレート境界型巨大地震の発生に伴ってアウターライズで発生する地震のメカニズムが圧縮場から張力場のメカニズムに変化することが指摘されている。このように南海トラフ軸沿いの微小地震活動の時間的变化は沈み込み帯の固着域の何らかの状態変化を反映している可能性があり、今後の活動の推移が注目される。

キーワード: 海底地震観測, 東南海地震, 南海地震, 南海トラフ, 微小地震活動, フィリピン海プレート

Keywords: ocean bottom seismograph, Tonankai earthquake, Nankai earthquake, Nankai trough, microseismicity, Philippine Sea plate

## 伊豆-小笠原および琉球海溝沿いの繰り返し地震活動 Repeating earthquake activity along the Izu-Bonin and Ryukyu trenches

日比野 剛大<sup>1\*</sup>; 内田 直希<sup>1</sup>; 松島 健<sup>2</sup>; 中村 航<sup>1</sup>; 松澤 暢<sup>1</sup>  
HIBINO, Kota<sup>1\*</sup>; UCHIDA, Naoki<sup>1</sup>; MATSUSHIMA, Takeshi<sup>2</sup>; NAKAMURA, Wataru<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院 理学研究科, <sup>2</sup> 九州大学理学研究院  
<sup>1</sup>Graduate School of Science Tohoku University, <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University

日本周辺には、いくつかの沈み込み帯が存在している。このうち、東北日本沈み込み帯では、2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、巨大地震と小繰り返し地震 (small Repeating Earthquake; RE) の関係が議論されている。他の沈み込み帯で、RE を抽出しその活動を調べることは、同じプレート境界上で発生する、大地震発生のメカニズムを考える上で重要である。

本研究では、2003年3月8日-2012年3月31日の間に記録された気象庁と防災科学技術研究所 Hi-net の地震波形データを使用し、伊豆-小笠原海溝および琉球海溝沿いで地震ペアの波形の類似性から、RE を選定した。これまでこの領域では、Igarashi (2010) や Yamashita et al. (2012) による研究があるが、本研究では、Uchida et al. (2010) の方法を踏襲し日本海溝沿いとこれらの沈み込み帯での RE の活動を比較した。

RE と同定にあたって、琉球海溝沿いにおいては、波形間のコヒーレンスの閾値を 0.95 以上と Uchida et al. (2010) と同じ基準を用いた。一方、伊豆-小笠原海溝沿いにおいては、観測点がまばらにしか存在しないため、震源から観測点までの距離が遠く、S/N 比が低い波形が多いため、閾値を 0.80 まで下げるとともに、地震波が記録されたのが 1 点だけだとしても複数成分で閾値をこえるような地震ペアも暫定的に RE として扱うこととした。

その結果、琉球海溝沿いでは、RE が比較的多い領域が海溝に平行に帯状にみられ、深さ 60km 程度まで RE が発生していた。繰り返し地震のみからこの帯に挟まれる部分の性質を解釈することは困難であるが、東北地方同様に、RE 発生域に挟まれている領域には広範囲で固着しているアスペリティが存在している可能性もある。一方、伊豆-小笠原海溝沿いでは、多数の地震が発生しており、閾値を下げていても関わらず、東北地方に比べ求まった RE は少ない結果となった。これらの RE は、プレート境界の浅部のみで発生しており、東北地方と異なり、上盤がマンツルの部分ではほとんど発生していないことが分かった。

以上のような各沈み込み帯での繰り返し地震の活動特性の違いは、沈み込み帯でのすべり過程の多様性を表しており、今後その特徴をより詳しく調べることで、プレート境界の摩擦特性の理解の進展に貢献できると考えられる。

キーワード: 沈み込み帯, 繰り返し地震, 伊豆-小笠原, 琉球, プレート間固着  
Keywords: subduction zone, repeating earthquake, Izu-Bonin, Ryukyu, interplate locking

## ニュージーランド北島沖合ヒクランギ沈み込み帯における海底地震観測 Ocean bottom seismic observation in the Hikurangi subduction zone offshore the North Island of New Zealand

齧島 大資<sup>1\*</sup>; 望月 公廣<sup>1</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>; 山田 知朗<sup>1</sup>; 篠原 雅尚<sup>1</sup>; HENRYS Stuart<sup>2</sup>; FRY Bill<sup>2</sup>; BANNISTER Stephen<sup>2</sup>  
HAIJIMA, Daisuke<sup>1\*</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>;  
HENRYS, Stuart<sup>2</sup>; FRY, Bill<sup>2</sup>; BANNISTER, Stephen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup>GNS Science

<sup>1</sup>Earthquake Reserch Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>GNS Science

ニュージーランド北島沖合のヒクランギ沈み込み帯では、太平洋プレート上に形成された厚さ 12 km 程度の地殻を持つヒクランギ海台がオーストラリアプレート下に沈み込んでいる。プレート境界の沈み込みが非常に浅いという特徴があり、このため地震波反射断面上で、プレート境界の構造が高解像度で詳細に見ることができる [Bell et al. 2010 など]。近年ニュージーランド北島では GPS 観測網が整備され、沈み込み帯に沿ったプレート間固着強度分布が求められている。沈み込み帯北部ではプレート間の固着域が狭く、固着域の上限は海溝軸近くまで延びており、その下限は 10-15km と浅い。固着域のほとんどが海底下となるが、これまで海域での地震観測は行われておらず、地震活動や震源分布の詳細はよくわかっていない。固着域の下限付近ではスロースリップイベントが観測されており、他の沈み込み帯と比較して非常に浅いところで起こっていることが特徴的である。

このような海域下の定常地震活動やスロースリップイベントに伴う低周波イベントの調査のため、2012 年 4 月から約 1 年間にわたり Gisborne 沖にてこの海域で初めての海底地震観測を実施した。設置された海底地震計は長周期地震計 2 台、1 Hz 地震計 2 台の計 4 台である。長周期地震計のうち 1 台の記録がレコーダーの不具合により断続的となってしまっているが、それ以外の 3 台では良好なデータが得られた。観測期間中の 2012 年 9~11 月には、本観測網の北方で群発地震活動が発生した。また、観測期間終盤の 2013 年 2 月中旬以降、観測網南方の Hawke Bay 周辺域で、これまでにない大きな規模のスロースリップが発生した。本データの解析では、まず得られたデータに対し STA/LTA アルゴリズムを適用し、地震活動の検知を行った。検知結果を見ると、北方の群発地震活動や南方のスロースリップイベントに対応して、海域での地震活動が活発化しているようである。本研究では海底地震計 4 台に陸上の観測点を加えこれらのイベントの震源決定を試みた。海域で発生している地震については海底地震計のほうが S/N 比が良く、陸の観測網だけではとらえられなかったイベントを多く捉えることができた。

キーワード: 地震活動, ヒクランギ, 海底地震計

Keywords: seismicity, Hikurangi, OBS

## グリーンランド氷床ダイナミクスと氷河地震活動 Greenland Ice Sheet Dynamics and Glacial Earthquake Activities

金尾 政紀<sup>1\*</sup>; 坪井 誠司<sup>2</sup>; 豊国 源知<sup>3</sup>; 姫野 哲人<sup>4</sup>; 東野 陽子<sup>2</sup>  
KANAOKI, Masaki<sup>1\*</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>2</sup>; TOYOKUNI, Genti<sup>3</sup>; HIMEMOTO, Tetsuto<sup>4</sup>; TONO, Yoko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 東北大学, <sup>4</sup> 成蹊大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Tohoku University, <sup>4</sup>Seikei University

近年グリーンランド氷床は、衛星観測データから氷体積が顕著な減少傾向にあり、かつ減少速度が加速している。グリーンランド氷床、特にその縁辺部での流動・崩壊・流出に伴う振動現象である、「(氷河地震, Glacial Earthquake)」が 21 世紀に入り顕著に観測されている。このような、氷床内あるいは氷床底部で起きていると考えている氷河地震の発生メカニズムと頻度は、氷河流動および近年の気候変動との関連性が指摘され、これらを解明することはグリーンランド氷床の変動メカニズムと温暖化増幅作用を知る上で重要である。グリーンランド氷床に広帯域地震計を設置して氷床及びその縁辺部で発生する氷河地震の頻度を観測し、氷床流動と氷河地震の関連から氷河地震の発生メカニズムを解明する。氷河地震の発生頻度は、21 世紀の最初の 5 年間で倍になっており、季節変動が見られることから、その活動は氷河の下を流れる水路の変動を反映しており、最近の気候変動による氷床の後退の速度変化が原因となっていることを示唆する。本研究では、グリーンランド氷河に設置した広帯域地震計によって、氷河地震の発生機構とその活動を解析することにより、地球温暖化による氷床後退と氷河地震発生との間の関連性を明らかにする。ETAS モデルを用いた統計解析からは、2005 年以降の氷河地震の分布は、グリーンランドの北西の海岸で増加している様子が見て取れる。このようにグリーンランド氷床の地震活動と発生過程から、地球温暖化の影響を評価する研究計画は独創的であり、グリーンランド氷床の気候変動に対する応答メカニズムの解明と将来予測について、新しいデータセットと学際的視点をもたらすことが期待される。

キーワード: グリーンランド, 温暖化, 氷河地震, 広帯域地震計, モニタリング

Keywords: Greenland, global warming, glacial earthquakes, broadband seismometer, monitoring



## 日本周辺における大規模プレート間地震の前震活動 Foreshock activity of the large-scale interplate earthquakes around Japan

田中 利佳<sup>1\*</sup>; 織原 義明<sup>1</sup>; 鴨川 仁<sup>1</sup>  
TANAKA, Rika<sup>1\*</sup>; ORIHARA, Yoshiaki<sup>1</sup>; KAMOGAWA, Masashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学物理学科, <sup>2</sup> 東海大学地震予知研究センター

<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., <sup>2</sup>Earthquake Prediction Reserch Center, Tokai University

本震に対する前震の有無に関する研究はこれまでも数多くある。例えば、Jones and Molnar(1976)では、本震から100km、40日以内に発生した地震を前震と定義したとき、1950年から1973年までに発生した $M \geq 7.0$ の地震のうち、44%が前震を伴っているという報告がある。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震についても、本震発生約1ヶ月前から本震破壊開始点の北側で群発的な前震活動が2回あり、その前震活動が本震に向けてゆっくり移動していたことが確かめられている(Kato et al, 2012)。このような前震に関する研究で、近年注目すべき研究結果がBouchon et al(2013)によって発表されている。それは、プレート間地震とプレート内地震の前震を調べたところ、プレート間地震はプレート内地震に比べ、本震に向かって加速度的に前震の数が増加している地震が明らかに多いというものである。このような明瞭な違いがプレート間地震とプレート内地震で本当に認められるのか、本研究では日本周辺の地震について、Bouchon et al(2013)と同様に累積地震数の時間変化と統計的検証の2つを中心に追試を行った。

キーワード: 前震, プレート間地震, 加速度的地震分布

Keywords: Foreshocks, Interplate earthquakes, Accelerating seismicity

## 地震発生場の構造と状態の実用的常時能動監視観測方法の開発 Development of Acoustic Frequency Comb technology by ACROSS appropriate for active monitoring of the earthquake field

熊澤 峰夫<sup>1\*</sup>; 東原 紘道<sup>2</sup>; 永井 亨<sup>1</sup>

KUMAZAWA, Mineo<sup>1\*</sup>; HIGASHIHARA, Hiromichi<sup>2</sup>; NAGAI, Toru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>東京大学

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>University of Tokyo

アクロス(精密制御定常信号システム)を使う音響周波数コム技術(AFC)は、地下の構造と状態の能動的常時監視観測法として、1994以来、名古屋大学(熊澤ら)と地震研究所(東原ら)で、開発研究がおこなわれてきた。現時点では、岐阜、静岡、愛知、兵庫、鹿児島各県で経常的な観測が行われている。「アクロスは、地震予知を進める上で欠かせない重要な要素の一つ」だが「装置の安定性や解析方法など解決すべき課題は多い」(地震予知の科学:日本地震学会地震予知検討委員会編 2007 東大出版会)。しかし、地震学における「この課題」の研究には、鎌と鋤が必要なのであり、現状の茶碗と箸では本来のニーズに応えられまい。

(1) 従来のアクロスでは、実効的には小さな質量  $M$  ( $\sim 100\text{kg}$ ) の相対的には大きな振動振幅  $u$  ( $\sim 0.1\text{m}$ ) の運動(実際は偏心質量の回転)を使って、シングルフォース  $F$  (ベクトル: モーメントテンソルでない) で、極めて精密な周期的周波数変調(周波数コム)信号を励起する。この力の信号

$$F = M d^2u/dt^2 = -\omega^2 (Mu) \quad (\text{この初等的な式の意味は多元的で深淵である!})$$

は、岩盤カップラと称する大きな送信用アンテナ(波の送信効率はこの寸法に比例。東濃送信所では、数mで $\sim 100\text{ton}$ の鉄筋コンクリートブロック)を介して地中に弾性波を送信する。上式が示すように送信信号のレベルは周波数の2乗に比例して、低周波数では小さくなる。これまでに実現した実用的送信周波数は5 Hz程度までである。ここで提案する新機軸は、 $M$ を従来よりも100 $\sim$ 10000倍大きくして、その変位  $u$ を回転でなく、直線振動で与えて、 $\omega$ を1/10 $\sim$ 1/100倍に下げる。これには大きな岩盤カップラを慣性質量  $M$ に活用して実現する。送信装置のエネルギー損失は格段に小さい。上で説明した新機軸の送信方式の原理と方法を現実的だと判断して、その開拓に着手したので、その中間報告をする。

(2) 1 Hz以下の低い周波数領域でのアクロスの使用は、実用的な日本列島常時監視システムを実現する。こうして得る高精度の周波数領域データに整合する的確なデータ解析法開発も推進する。アクロスで得るのは、励起点  $e$ と観測点  $d$ の間の周波数領域の伝達関数  $H_{de}(\omega)$ (時間領域ではグリーン関数)である。これは正規モード群(複素固有値  $\omega_k$ :  $k=1, 2, \dots$ で指定)の固有関数の2点( $x=d, e$ )における値の積に比例する物理量である。したがってどこかにAFCの送信点があり、特定地域に高密度の観測点アレイがあれば、送信信号とは独立に、その地域と近傍の構造情報(正規モード群間の多数の相互相関関数群)を極めて高い精度で取得できる。そのデータ解析に最適で必須の順逆問題最適化の数理(PANWAVE)のその後の発展も報告する。これは「いわゆる干渉法 interferometry」の精度を飛躍的に向上させるものだ。

(3) この研究開発で直ちに成果が得られるのは、耐震工学、地盤工学など急を要する減災対策である。地震や火山の予測や制御の課題が現実的なWP(well-posed)問題になるのは、場の構造とそこの物質の構造敏感特性の長期間にわたる精密な監視観測の愚直な積み上げと、さらに物質の実験的理論的な基礎研究の連携という基礎ができてからであると考えられる。

キーワード: 音響周波数コム, アクロス, 構造推定

Keywords: Acoustic Frequency Comb, ACROSS, Structure Estimation

## 地震は多様性を指向する ～数論的地震活動モデル～ Earthquakes are directed to diversity: An arithmetic seismic activity model

藤原 広行<sup>1\*</sup>  
FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科研  
<sup>1</sup> NIED

地震活動は多様である。地震発生過程を個別の素過程に分解し、詳細な物理モデルを各過程において組上げて総合する方法論では、定めるべき初期条件や境界条件が複雑で膨大な量となり、それらを決定論的な1つの方程式系の解として求めることは困難である。このため、近年試みられている地震活動の予測においては、統計的あるいは確率論的な手法が用いられている。確率過程論的なアプローチでは、地震活動が持つ特徴を経験的あるいは理論的に推定される確率分布としてモデル化し、モデル化された確率過程のサンプル・パスの1つが、観測される値と対応する。こうした手法は、地震活動全体の統計的性質を表現するには有効であるが、個々のサンプル・パスそのものの性質に踏み込んだ解析はできない。本研究では、地震活動の多様性をモデル化することを目指して、観測値に対応する具体的なサンプル・パスを数学的に構成し、それらが地震活動の持つ統計的性質を満たすことを示すことにより、確率過程論的なアプローチとは異なった考え方に基づく地震活動モデルを提案する。このため「数」による地震活動のモデル化を試みる。

「地震」と「数」の世界に対して、下記のような対応を考えてみる。 $p_i$  を  $i$  番目の素数とし、その素数に対応する指標として素数の出現間隔  $p_i - p_{i-1}$  をとる。 $i$  番目に発生する地震を  $e_i$  とし、その発生時刻を  $T(e_i)$ 、地震モーメントを  $M_o(e_i)$  としたとき、下記の関係式が成り立つと仮定する。

$$T(e_i) = p_i$$

$$\log(M_o(e_i)) = p_i - p_{i-1}$$

この対応関係に対して、数値実験を行うことにより、G-R 則に類似した性質が得られることがわかる。この対応によって得られるモデルを「数論的地震活動モデル」と呼ぶ。「数論的地震活動モデル」における「地震」は、素数分布論の研究対象である「素数」そのものであり、地震発生予測は素数の出現予測と同値なものとなる。

地震を場のエネルギーレベルの変化に対応する現象としてとらえ、地震発生場をある種の量子化された力学系を用いて表現することを考える。地震が発生する場のハミルトニアンを考え、地震発生をハミルトニアンに対する固有値問題として設定する。その固有値問題がゼータ関数と関連することがもし示されれば、地震活動と素数分布との類似性についての説明ができるのではないかと期待できる。現在のところ、このような考え方に基づいて地震発生場を説明できる力学系は知られていない。一方で、素数の分布に関する研究において、ある種の量子化された力学系の固有値問題として素数分布と同値な関係にある Riemann のゼータ関数の零点分布をとらえようとする研究が進んでいる。

素数分布に関連する Riemann 予想は、「数」が持ちうる多様性の限界、つまり秩序と無秩序のぎりぎりの境界がどこにあるのかということに関連しており、素数分布は、臨界現象と関係している可能性がある。地震も与えられた条件下での多様性の限界と関係した臨界現象として解釈でき、地震と素数の間に類似性が見られるのではないかと考えられる。

キーワード: 数論, 素数, G-R 則, 地震

Keywords: Number theory, Prime number, Gutenberg-Richter relation, Earthquake

## ベイズ統計手法によるポアソンモデル地震確率について Comments on a Bayesian approach to earthquake probabilities of the Poisson model

井元 政二郎<sup>1\*</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
IMOTO, Masajiro<sup>1\*</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>NIED

全国地震動予測地図の作成において地震発生確率は基本的情報であり、地震発生が Brownian Passage Time モデルやポアソンモデルに従うとして確率値が算出されている。モデルパラメータは過去の地震から推定されるが、地震数が少ない場合には推定誤差は大きくなる。ここでは、地震数が少ない場合における、ポアソンモデルによる確率値について検討する。

ポアソンモデルにおいて、単位期間における期待頻度を  $k$  とすると分散は  $k$  で与えられる。期間  $T_0$  において  $n$  個の地震が観測されると、 $k=n/T_0$  が期待頻度の最尤推定値となる。期待頻度が与えられると地震数を区間推定でき、地震数が与えられると期待頻度を区間推定することができる。地震数から期待頻度を推定する場合、最尤値  $k$  が同じなら、推定区間の幅は地震数により異なり、地震数の平方根に反比例する。また、地震数が少ない場合には、ポアソンの式から直接区間推定することが必要となる。長期評価によると、南関東地域においては最近 119 年間に 5 個の M7 クラス地震が観測されていて、最尤推定値として平均間隔（期待頻度の逆数）23.8 年が得られている。これに対し、95%信頼区間は 10 年～73 年となる。このように、少数の地震から推定された期待頻度には大きな幅が存在し、これに基づき算出される地震確率値には相当の誤差が存在する。

南関東 M7 クラス地震の例では、平均間隔の誤差を地震確率に反映させることが課題となる。ベイズ統計では、異なるパラメータのモデルから算出される確率値の重み付き平均により、確率値を算出する。ここで重みとして尤度を用いると、 $T_1$  期間において  $m$  個の地震が発生する確率は二項分布の式で与えられる。 $n$  個の地震発生間隔の和 ( $T_0$ ) が与えられている場合も同様の式で表される。 $n$  が十分大きい場合、この式は最尤推定値に基づく式と一致する。 $n$  が 5 個程度以下の場合について、両者の差を比較すると次のようになる。1)  $T_1=1/k$  の期間では、ベイズによる地震（1 個以上）確率値が最尤推定値の確率値より 3～12 % 大きい。2)  $T_1$  が  $1/k$  より短い一定期間において差が拡大する。簡単なシミュレーションによりベイズ統計手法の妥当性は検証できる。

全国地震動予測地図の作成においては、基礎となるデータの誤差やモデルの不確定性についての検討は十分とは言えない。これらの不確定性の検討は、全国地震動予測地図の信頼性を高める上で、重要な課題である。

キーワード: 地震確率, ポアソンモデル, ベイズ統計, 全国地震動予測地図, 関東

Keywords: Earthquake probability, Poisson model, Bayesian statistics, Seismic hazard maps for Japan, Kanto



## 地震カタログの不完全を考慮した南海トラフ地震の長期的発生確率 Long-term probability for large earthquake along the Nankai trough estimated from an incomplete catalog

岡田 正実<sup>1\*</sup>  
OKADA, Masami<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所地震火山研究部  
<sup>1</sup> MRI, JMA

はじめに： 地震調査委員会は、2013年5月に「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について」を発表し、南海トラフ沿いで今後30年間に大地震が発生する確率が60～70%であるとした。巨大地震の可能性もあり、報告書は社会的に大きな反響を呼んでいる。発生確率は、BPT(Brownian Passage Time)分布モデルを採用し、分布パラメータは最尤法や時間予測モデルによる推定値、または標準値( $\alpha=0.24$ )などを使用し、それらを条件付き確率の式に代入するものである(Plug-in方式)。パラメータ値は、いずれも少数のデータから得られたものであるが、不偏性や不確実性(推定誤差)の影響は考慮されていない。

昨年の本大会などで紹介したように、仮に地震の発生間隔がBPT分布に従うとしても、データが数個と少ないと、予測成績は、Plug-in方式のBPT分布予測モデルよりも、小標本論対数正規分布モデルの方が優れている。また、標準値 $\alpha=0.24$ を求める際に使用したデータには大きな問題もあった。

今回は、慶長地震(1605)が南海トラフの大地震であるのかどうか疑問であるとしている。カタログ不完全で、あいまいな事例が含まれていたり、該当地震が漏れている可能性がある場合は注意を要する。ここでは、ベイズ統計対数正規分布モデルを使用し、不完全なカタログから発生確率を計算する方法を考察し、南海トラフの大地震に適用した結果を紹介する。

発生確率の計算： 報告書では、南海トラフで3年以内に続けて発生した場合は一つのイベントとして扱い、白鳳(天武)地震以後の9イベントが取り上げられている。確率計算は、“発生間隔のみを利用する場合”と“時間予測モデルを用いる場合”が説明されているが、ここでは、データ及び計算方法が明らかな前者のみを対象とする。

該当地震を組み合わせを変えた5ケースについて、最尤法でパラメータ値を求め、2013年1月から30年間における発生確率を計算している。結果は、①9個の地震すべてを使用：10%程度(13%)、②①から慶長地震を除いた場合：6%(7%)、③正平(康安)地震以降をすべて使用：20%程度(22%)、④③から慶長地震を除いた場合：10%程度(14%)、

⑤宝永地震以降を使用：30%程度(21%)となっている。括弧内の数字は、小標本論対数正規分布モデルで計算した場合で、①～④のケースではあまり差がない。しかし、⑤の場合はデータ数が少ないことを考慮する小標本論の値がかなり小さくなっている。これらの結果は、完全なデータセットであるとして適用したものであり、不完全なデータを用いた計算方法としては不相当である。

不完全なデータセットには、小標本論が使用できないので、ベイズ統計(無情報事前分布)対数正規分布モデルを用いて、より現実的と思われる以下の条件の下で発生確率の計算を試みた。完全な発生間隔に対する尤度は確率密度関数の積であるが、不完全な発生間隔に対しては分布関数を使って尤度が定義される。

①3期間(白鳳地震～仁和地震、仁和地震～康和・永長地震、明応地震～宝永地震)内に他の南海トラフの地震が存在したかどうか分からない。慶長地震が南海トラフの地震であったかどうか分からない。

②康和・永長地震～正平(康安)地震の間(263.5年間)には、発生時不明だが、該当地震が1個以上存在した。

③3期間(正平(康安)地震～明応地震、宝永地震～安政地震、安政地震～昭和地震)のデータは完全であり、これらの期間内には他の該当地震が存在しない。

仮定②を満たす計算を表計算ソフト(Excel)で実行できなかったため、緩やかな条件「2個以上ある発生間隔のうち、短いものは全期間(263.5年)の半分以下である。長い方の発生間隔は全期間より短い。」に置き換えて計算した。

計算結果： 求めた2013年から30年間の発生確率は22.9%であり、報告書の値“60～70%”より大幅に低い。しかし、③の完全なデータだけからもとめた発生確率18.5%よりやや高い。

キーワード: 南海トラフ, 繰り返し地震, 発生予測, ベイズ定理, 地震カタログの不完全

Keywords: Nankai trough, recurrent earthquake, forecast, Bayesian approach, incompleteness of catalog

## 地震活動の静穏化現象の時間的・空間的安定性 (4) —静穏化領域と本震震源との関係— Space- temporal stability of the seismic quiescence (4) -Relation of seismic quiescence area and the main shock

吉川 澄夫<sup>1\*</sup>; 林元 直樹<sup>2</sup>; 明田川 保<sup>3</sup>  
YOSHIKAWA, Sumio<sup>1\*</sup>; HAYASHIMOTO, Naoki<sup>2</sup>; AKETAGAWA, Tamotsu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象研究所, <sup>3</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, <sup>3</sup>Japan Meteorological Agency

われわれは地震発生予測への適用を目的として地震活動静穏化現象の調査を継続している。今回、M7クラス以上の地震イベントに関する事例を改めて調査した結果、静穏化現象の検出事例において本震の震源と静穏化領域の中心との距離が地震規模に応じて拡がる傾向があることを見出した。この傾向を踏まえて過去の静穏化不検出事例を再調査したところ検出可能と考えられるものがあることが判った。

静穏化現象の検出にはこれまでと同様 e M A P (明田川・伊藤 (2008)、林元・明田川 (2010)) の方法を適用した。対象としたのは 1987 年以降に国内で発生した M6.7 以上で震度 5 弱以上を観測した地震 26 個である。以前の調査 (太田・他 (2009) および吉川 (2012)) では 11 個の検出事例と 15 個の不検出事例があった。特に 1995 年兵庫県南部地震の際には京大防災研 (1995) や気象庁 (1995) などにより静穏化現象が報告されていたが、本方法では検出できていなかった。この原因を今回改めて調査した結果、次の事柄を勘案すれば検出可能と考えられることが明らかになった。まず、当初の調査では静穏化現象が本震の震源付近で発生直前までに出現するというを前提条件としていたが、兵庫県南部地震では静穏化現象が本震の震源付近ではなく約 30km 離れた丹波地域で発生していたため本震に直結する現象と認識されなかった。また震源の明石海峡付近では本震発生前まで平常時の地震活動が低かったことから静穏化現象は検出しにくい状況であった。静穏化現象を地震イベントと関連付けるには時間的にも空間的にもある程度近接していることが条件となるが客観的な条件がこれまで明確ではなかった。そこで当初の検出事例 11 個を再調査したところ、本震の位置と静穏化領域中心との距離が地震規模に応じて拡大する傾向があることが明らかになった。これまで静穏化領域の大きさ (や静穏化継続期間) には地震規模に応じたスケーリング則があることを報告している (吉川・他 (2013))。静穏化現象が非地震滑りによる地震活動低下によって生じることから本震の震源が静穏化領域の中にはなく周辺地域にあるのは自然なことと考えられるが、静穏化領域の大きさが地震規模と共に拡大する傾向が本震と静穏化領域中心との間隔にも反映した結果と見られる。

1995 年兵庫県南部地震の例を参考に他の不検出事例を再調査してみると、1987 年千葉県東方沖地震、1994 年三陸はるか沖地震、2000 年鳥取県西部地震、2004 年紀伊半島東方沖地震など 4 個の地震イベントでも静穏化現象が認められることが分かった。この結果、調査対象とした 26 事例の内、検出は 16 個であるのに対して不検出は 10 個ということになった。

キーワード: 地震, 静穏化, 本震位置

Keywords: earthquake, quiescence, hypocenter

## 南海トラフ巨大地震発生域付近での最近の地下水異常変動 Recent anomalous groundwater temperature and water level changes and impending great earthquakes at the Nankai trough

佃 為成<sup>1\*</sup>  
TSUKUDA, Tameshige<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 日本女子大  
<sup>1</sup> Japan Women's Univ.

地下岩盤に不均等な力が加わって剪断応力が高まり、剪断破壊(地震)が発生する。剪断応力が集中する周辺では岩盤にねじれの歪が現れる。そこでは、収縮場と膨張場が隣り合わせで生成される。大地震ではねじれ場の規模が大きいのか、連結した小規模の場が多数生成される。剪断応力が岩盤の強度と同程度かそれを越えるレベルに増大したとき(臨界状態)、何かのトリガーがかかれば大地震が起こる。

大地震の準備過程では、地下岩盤の収縮領域(圧力上昇)と膨張領域(圧力降下)の形成に伴う間隙流体圧変化により、微小クラック群から成る流体移動のパスが存在すれば、地表へ向かう上昇流体の増加や減少が起こる。深部流体は高温なので、上昇深部流体が浅層地下水に混入すると、地下水温を上昇させる。また、移動流体の量の変化によって水温変化が起こる(Tsukuda et al., 2005)。

南海トラフの巨大地震の想定震源域に近い静岡県と神奈川県(東海地域)で5カ所、また和歌山県南紀地域では7カ所にて地下水温、そのうち2カ所にては水位も測定している。

東海地方の水温観測点の内、焼津市立大富小学校内井戸(OT)と静岡市中島下水浄化センター内自噴井(NK)には高精度水晶温度計が設置されている。

OT(焼津)の水温(深さ30m)は観測開始の2003年以来、平均上昇率24m°C/yearの単調増加であったが、2009年8月11日の駿河湾地震(M6.5)以降、44m°C/yearに上昇、2011年3月11日の東北の地震(M9.0)の頃から以前の上昇率に戻り、2012年末から上昇がさらに緩やかになってきた。焼津直下では岩盤は収縮を示すが、近年、収縮は減速している。

NK(静岡)の井戸は自噴しており、季節変化は極めて小さく水温変化のトレンドは2006年は34m°C/year、2007年春から67m°C/year、同年秋から年末までは14m°C/yearの上昇であったが、2008年初から上昇率は鈍化、同年9月頃から-40m°C/yearの率で下降に転じた(2009年8月の駿河湾地震の前兆)(佃, 2012)。M6.5地震以降、下降率が増加(-117m°C/year)し、2011年8月1日の駿河湾地震(M6.2)後、さらに下降率が増加したが、その後減少し、2012年末に水温一定となり、2013年5月下旬から急上昇に変化した。静岡付近の地下岩盤は、最近、膨張から急激に収縮に転じた。

和歌山県串本町潮岬の林組の井戸(HA)と和田商店の井戸(WA)には白金測温抵抗体の水温センサー、半導体感圧素子の水位センサーを2005年に設置した。観測点HAはWAに対してほぼ南へ約600m離れている。井戸の深さはどちらも約15m。水温および水位センサーは井戸底から約40cm上の水中に設置されている。WAの水温変化2°C p-pと水位変化7m p-pに対し、HAは降雨による変化が小さく、それぞれ0.2°C p-pと5m p-pである。HAの水位とWAの水位および水温は降雨の影響や季節変化を抑えた1年間の移動平均値のグラフから長期的変動が顕わになる。潮岬の水位は長期的に上昇している。水温も上昇しつつある。地盤の沈下と岩盤の収縮を示す。潮岬(串本)では1943年南海地震以後の隆起は1990年頃から沈下に転じ現在下降中である(国土地理院, 2009:小林, 2013)。

白金測温抵抗体水温センサー使用の和歌山県古座川町月野瀬(KZ)の自噴温泉では2002年からパイプの出口で測定している。KZの水温は長期的には単調に下降している。地下岩盤の膨張を示唆する。GNSSデータによる面積歪も付近一帯の膨張を示す(木村一洋:私信)。2004年紀伊半島沖地震(M7.4)発生以後、降下率が低下したが、2012年に入り降下率が増加し、2013年からはさらに急降下となっている。ここでは岩盤の膨張が近年、加速している。

観測点分布は限られているので、広域の状態は不明であるが、南海トラフの巨大地震発生域付近の一部地域の岩盤の変形の進行が加速している。早急に、総合的な地殻変動のモニタリングを進めるよう提案したい。

キーワード: 岩盤膨張, 岩盤収縮, 水温, 水位, 前兆, 地震予知

Keywords: dilatation, contraction, groundwater temperature, water level, precursor, earthquake prediction



## いわゆる「東海地震」の長期的及び短期的予知に関する2つの課題 Two questions related to short- and long-term prediction of the so-called Tokai earthquake

ゲラー ロバート<sup>1\*</sup>  
GELLER, Robert J.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地球惑星  
<sup>1</sup>UTokyo, Earth Planet. Sci.

70年代、いわゆる「東海地震」は“明日起きても不思議ではない”とされたが、検証可能な形での「東海地震説」は提出されなかった。その当時からこれまで、東海地方に大きな地震は起きていない。とすれば、「東海地震説」はどのように評価すべきなのだろうか？ 本稿での結論は、否定されたという評価である。つまり、東海地方に大きな地震の発生の恐れがないわけではないが、他の地域より危険であるといったことを裏付ける科学的根拠はない。

1978に採択された「大震法」によって、実用的短期的予知体制が確立されたが、現在まで正確な予知はどこでもできていない。また、その目処もたっていない。したがって、同法及び同法に基づく予知体制は廃止されるべきと考えられる。

In the 1970s there was widespread discussion suggesting that a large subduction zone earthquake was imminent in the Tokai district (the so-called “Tokai earthquake”), but the “Tokai earthquake hypothesis” was not stated in a testable form. About 40 years have passed, but no such event has occurred in Tokai. Under those circumstances it seems justifiable to conclude that the hypothesis has been falsified. That does not mean that Tokai is not at risk, just that the risk is not greater than other tectonically similar regions.

Under the Large Scale Earthquake Countermeasures Act (LECA), which was enacted in 1978, an organization for monitoring possible “precursors” and issuing short-term alarms was established. But no reliable precursors have ever been found. LECA should therefore be repealed and the monitoring organization abolished.

### Reference:

Geller, R.J., 1997, Earthquake prediction: a critical review, GJI, 131, 425-450.

キーワード: 地震予知, 東海地震

Keywords: earthquake prediction, Tokai earthquake



## 1946年南海地震前の四国太平洋沿岸部における海水位変化 On the sea level changes before the 1946 Nankai earthquake on the Pacific coast of Shikoku, Japan

梅田 康弘<sup>1\*</sup>

UMEDA, Yasuhiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

### 1. はじめに

1946年南海地震(以下では本震と呼ぶ)の前に、四国の太平洋沿岸部で海水位変化があったという目撃証言がある。「数日前から潮が狂っていた」という証言は通常の満潮・干潮の時刻がずれていたり、通常の潮位にならなかつたりしたことを意味する。本震は12月21日04時19分に発生したが、前夜(20日の夜)から直前にかけては、潮位が著しく低下していたため、帰港した漁船が接岸できなかったという証言がある。その反面、潮位の変化は無く(気が付かず)接岸できたという、相反する証言もある。これらの証言を満たす現象として、本震前に小規模な海底地殻変動があり、小規模な津波が発生していたのではないかと考えた。接岸できなかった漁船と、接岸できた漁船は帰港時がずれていて、前者は低潮位時に、後者は高潮位時に帰港したのではないかと推定した。海水位変化は本震の数日前から目撃されていることから、津波もその頃から発生し、次第に大きくなったと思われる。

### 2. 海水位変化の周期と振幅について

本震前に津波が発生していたとして、目撃証言や上記の推定を満たすような津波の振幅や周期がどの程度のものかを調べるため、2010年から2011年に高知県の須崎湾で潮位観測を行った。周期に関しては30分~40分の他に50分、80分という長い周期も観測された。これらの周期は、荒天下における波浪によっても、好天においても、また2011年東北地方太平洋沖地震津波においても観測された。おそらく須崎湾と土佐湾に固有な周期と思われる。振幅に関しては、室戸岬沖の水深約2300mに設置されていた海洋研究開発機構(JAMSTEC)による津波波形および室戸岬西方沖13kmで観測されたGPS津波波形(科研費基盤研究s1221)と比較した結果、津波振幅は前者で最大20倍、後者で最大8倍程度増幅されることがわかった。20倍の増幅なら10cm~15cmの、8倍なら25cm~38cm程度の津波振幅を起こすような海底地殻変動があれば、須崎湾で2m~3mの海水位変化が発生しうる事がわかっている(梅田・板場, 2012 秋季地震学会, D12-02)。

### 3. 本震前の海水位変化の推定

海水位観測から得られた振幅と周期に関する結果を、証言から推定される海水位変化に適用し、各港湾で起きていたと思われる本震前の海水位変化を推定する。推定海水位変化 $f(t)$ は、地殻変動が無く、従って津波も発生しなかった場合の海水位変化( $Ft(t)$ )と長期的な地殻変動( $Fl(t)$ )及び証言に基づく変化( $Fo(t)$ )の和、すなわち、 $f(t)=Ft(t)+Fl(t)+Fo(t)$ とする。 $Ft(t)$ には海上保安庁海洋情報部の潮汐推算(天文潮位)を採用した。

長期の地殻変動( $Fl(t)$ )は梅田・板場(2013\*)による $Fl(t)=a \ln(t)+D0$ を採用し、 $a$ 、 $D0$ は各地で得られている値を用いた。証言に基づく変化は、本震に近づくにしたがって、変化の周期が短くなり、振幅は大きくなるという点を考慮して、 $Fo(t)=AB(t)^m [\cos\{\omega \ln(t-tc)+\phi\}]$ と仮定した。 $\omega$ は振動数、 $\phi$ は位相差である。 $A$ は各港湾による津波波高の比を表す。各港湾で観測された2011年東北地方太平洋沖地震津波の最大振幅の比率であるが、ここでは須崎を基準( $A=1.0$ )とした各地の振幅比を採用している。

高知県須崎湾と室戸岬の推定海水位変化を天文潮位と共に図示した。須崎湾など本震前に隆起域と推定された港湾での推定海水位変化は、証言をおおむね満たしている。一方、本震までは沈降(相対的に海水位が上昇)していたと推定される室戸岬では、潮の狂いなどは説明できるものの、海水位の低下は説明できなかった。地殻変動( $Fl(t)$ )は長期的な変動しか考慮していないが、前節で述べた小規模な津波を引き起こすような本震直前の地殻変動(10cm~15cm)を考慮すれば、室戸岬での証言による海水位低下は幾分説明できる可能性はある。

\* 梅田康弘・板場智史, 2013, 1946年南海地震前の四国太平洋沿岸の上下変動曲線, 地質調査研究報告, 第64巻, p201-211, [https://www.gsj.jp/data/bulletin/64\\_07\\_02.pdf](https://www.gsj.jp/data/bulletin/64_07_02.pdf)

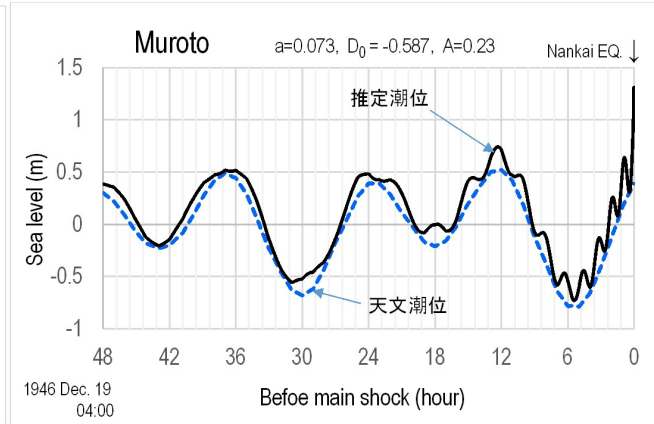
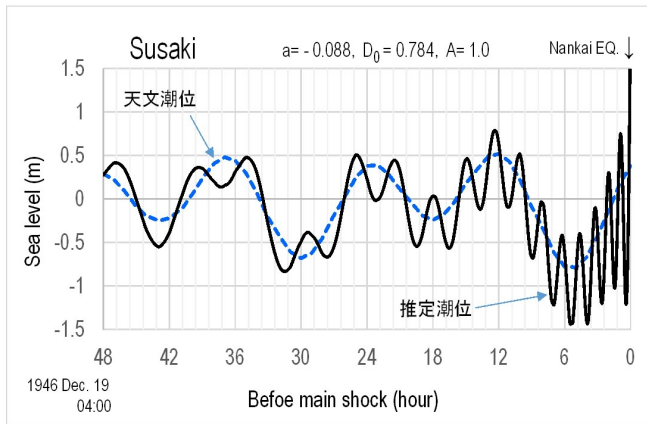
キーワード: 南海地震, 海水位変化, 目撃証言, 小規模津波

Keywords: 1946 Nankai earthquake, sea level change, witness testimony,

SSS25-09

会場:312

時間:5月2日 16:30-16:45



1946年南海地震の前に小規模な津波が発生していたとして、各地で推定される海水位の変化（黒の実線）と比較のための天文潮位（青の点線）

## 地震直前の前兆電界の発生メカニズム Mechanism of generating electric fields just before earthquakes

高橋 耕三<sup>1\*</sup>  
TAKAHASHI, Kozo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>無し

<sup>1</sup>none

### 1. 地震前兆電界

地震前兆電界は下記のメカニズムで発生するものとする(付図参照)。

- (1) 地震前に震源域の地殻内の結晶境界面に亀裂が発生し(推定)、この亀裂に間隙水が浸透する。
- (2) 結晶境界面には、ウラン化合物・ラジウム化合物・ラドンなどの放射性物質が存在し、この間隙水に溶け出す。
- (3) 地震前兆の亀裂により、間隙水と地下水とが繋がり、放射性物質を含む地下水が地表に噴出する。
- (4) 地表に出た放射性物質により、下層大気が電離し、電気伝導度が局所的に増加する。
- (5) 地表と電離層間には数百万 Volt の電位差があるため、宇宙線シャワーの軌跡に沿って、地表と電離層間に電流が発生する。
- (6) この電流から地震前兆電波が輻射され、間歇的脈流であるため、広帯域となる。  
上記のメカニズムが成立するためには、地震前兆の微小亀裂の発生が必須となる。

### 2. 地表・電離層間電流発生メカニズム

積乱雲の雲頂は約 30MV に達し、電離層にたいし高電圧となり、電離層から電子・負イオンが流れ込み、電離層と地表の電位差は数百万 Volt となる。雲頂は下記のメカニズムで高電圧になるものとする。

(I) 中緯度では、積乱雲の -10℃以下の領域では、水滴は氷晶となっているが、表面は負に帯電した水膜で覆われている。氷晶間の衝突により、小さい氷晶の水膜は大きい氷晶に移り、小さい氷晶は、正に帯電し、上昇気流により雲頂に運ばれ、雲頂は高電圧となる(1)。

(II) 低緯度では水滴は凍らないため、メカニズムは異なる。積乱雲内部の電界は、約 1000/m になっている。このため、水滴の上部は負に、下部は正に偏極している。小さい水滴は大きい水滴よりも高速なため、小さい水滴は、大きい水滴の下部に衝突し、小さい水滴の上部の負の電荷が大きい水滴の下部の負の電荷と中和し、小さい水滴は正に帯電し、中緯度の場合同様に、雲頂を高電圧にする(2)。

火山の噴煙でも雷の発生が観測されている。この際は火山噴出物の摩擦電気による帯電であり、帯電した噴出物は上記の(II)と同じ理由により、噴煙の上部を正の高電圧にする。このことが観測されれば上記のメカニズムが妥当な可能性が大きくなる。

### 参考文献

- (1) 高橋耕三 地震直前に観測される電磁界の発生メカニズム JpGU 2011 S-SS024-13
- (2) 高橋耕三 地震直前に観測される電磁界の発生メカニズム JpGU 2010 S-SS012-08

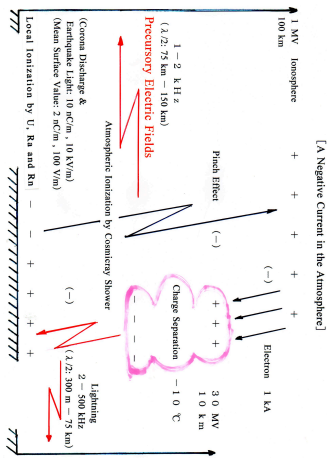
キーワード: 地震前兆電界, 雷発生メカニズム, 中緯度の雷, 低緯度の雷, 噴煙中の雷

Keywords: precursory seismic electric fields, mechanism of generating thunder, thunder in middle-latitude, thunder in low-latitude, thunder in smoke of volcano

SSS25-10

会場:312

時間:5月2日 16:45-17:00





# ハーフグラベン（地下基盤のV字谷構造）と深さ10kmでのP波高速帯の一致 7 Relationship between half-graben and high-velocities area at depths of 10 km 7

大石 幸男<sup>1\*</sup>  
OISHI, Yukio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>アトリエサイエンス  
<sup>1</sup>Atelier Science

つくばを中心とする茨城県南が上盤（埼玉県の秩父、寄居付近）の下方、深さ約20kmから東方へ抜け上がってきた下盤、すなわちリフト縁辺隆起帯であり、変成コアコンプレックスである可能性がある。（大石幸男 2011）

関東に存在する4つのだ円形をした深さ10kmのP波地震波高速帯（松原誠 2005）のうち2つは茨城県南にある。つくば市と鉾田市直下に存在するこの茨城県南の2つのだ円高速帯は、深度を増すにつれ面積が大きくなり深さ30km付近では県南を覆うほどの大きさのドーナツ型になり、そのまま深さ約50kmまで達する。

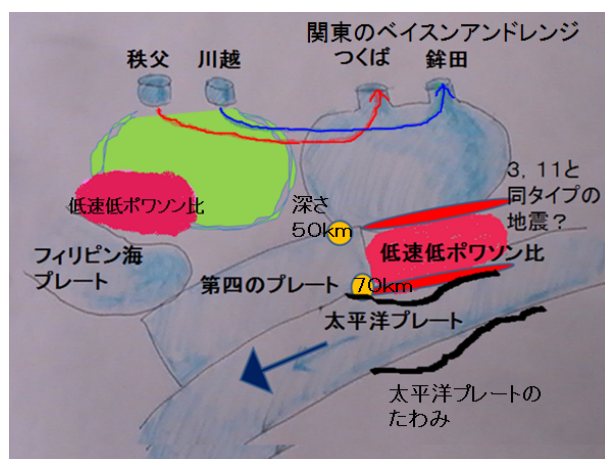
この茨城県南の巨大な高速帯のかたまりの西半分は、関東の第四のプレート（遠田晋次 2005）の上に乗っている。ちなみに第四のプレートの東淵の南北のライン、すなわち筑波山、つくば市、千葉市を通るエリアは地震多発の帯（つくば市 2004 M5, 7 千葉市 2005 M6, 0他）となっている。そして巨大な高速帯の東半分は低速、低ポワソン比帯の上に乗っている。（図 1）

この霞ヶ浦直下から南部にかけての低速、低ポワソン比帯のエリアは深さ約50kmから70km付近に存在し、沈み込んだ太平洋プレートの上に乗っている。この低速、低ポワソン比帯という特徴は、3, 11の震源付近の固着域の太平洋プレート上面部の特徴と一致し、さらには雲仙岳直下深さ約30kmから地表付近までの特徴と一致する。このことから珪長質の岩石やマグマの存在が考えられる。低速、低ポワソン比の柔軟性が、固着を強め、さらに定常的地震の発生を少なくしたために、巨大な固着面の発見を困難にした可能性がある。（大石幸男 2013）

霞ヶ浦直下から南部の低速、低ポワソン比のエリアの下部の太平洋プレートと接した部分も定常的地震発生は少なく、強く固着している可能性がある。今後このエリアでの大地震発生の可能性も再検討する必要があるように思われる。

なおこのエリアは低速ではあるが高ポワソン比帯である（中島淳一 2008）との指摘もあるので解決を待ちたい。

一方、霞ヶ浦直下の低速、低ポワソン比エリアの上面の深さ約50km付近は定常的地震発生地帯となっており、何故かその形状は側面が台形をした六面体や三角錐などの幾何学的形態をしている。さらにその上方深さ約20kmの香取市付近では3, 11以降、正断層地震が頻発している。霞ヶ浦およびその南方域直下の注視が望まれる。



## 常時微動を用いた地震波干渉法による鳴子火山群周辺の3次元S波速度構造 Three-dimensional S-wave velocity structure beneath the Naruko volcanic area by ambient noise seismic interferometry

田村 淳<sup>1\*</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>; 松澤 暢<sup>1</sup>  
TAMURA, Jun<sup>1\*</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ  
<sup>1</sup> RCPEV, Tohoku Univ.

2008年岩手・宮城内陸地震は岩手県南部から宮城県北部の南北約50kmの範囲において発生した。この地震の震源域は焼石岳・栗駒山・鬼首・鳴子火山に近接しており、これらの火山深部に存在するマグマと震源断層との位置関係を調査するため、いくつかの先行研究が行われている。Okada et al. (2010)は実体波トモグラフィにより深さ40kmまでのS波速度構造の推定を行い、余震域が栗駒山・鬼首・鳴子火山群付近の低速度域を避けて分布していることを確認した。本研究では、より密な観測網を用い、常時微動記録から相互相関解析を使用した地震波干渉法により、震源域南端に位置する鳴子火山浅部での詳細な速度構造を推定し、火山体の構造と余震域との詳細な対応関係を明らかにする。地震波干渉法とは、2観測点における波動場の相互相関関数から、仮想的に1点を震源とし、別の1点を観測点とした場合のグリーン関数を抽出するという手法である。

相互相関解析には、科学研究費補助金・新学術領域「地殻流体」の一環として鳴子・鬼首地域に設置された稠密な観測網とHi-netの観測点で記録された上下同成分の常時微動を用いた。まず、常時微動の性質を調べるためにスペクトル解析を行った。その結果、0.1-1 Hzと2-10 Hzに卓越したエネルギーをもつことが確認できた。ビームフォーミング解析により、0.1-1 Hzに含まれる常時微動の振動源は、主に太平洋側からの波浪であると考えられる。表面波の卓越する低周波側の常時微動に対し、それぞれの観測点間の組み合わせにおいて1日毎に相互相関関数を計算した。18ヶ月間の観測期間にわたる相互相関関数をスタックすることでSN比の高いグリーン関数を得た。その後、得られた相互相関数についてマルチプルフィルタ処理(Dziewonski et al., 1969)を施すことで3-10秒におけるレイリー波群速度分散曲線を推定した。さらに、得られた群速度に対してBarmin et al. (2001)の手法に基づき表面波トモグラフィを行い、周期3-10秒におけるレイリー波群速度分布を得た。最後に、その速度分布に対しS波速度インヴァージョンを適用することで、深さ10kmまでのS波速度構造を推定した。

S波速度構造の結果から、鳴子火山群の北西部と鬼首カルデラの南部に深さ3-4kmにおいて顕著な低速度域が確認された。これらの領域を震源断層および余震域と比較すると、鳴子付近に見られる低速度域には余震が発生しておらず、余震活動はこの低速度域の直ぐ北東部で止まった事がわかる。これらの低速度域は高温のマグマまたは熱水に寄ると考えられる。

キーワード: 地震波干渉法, 相互相関解析, 常時微動, トモグラフィ

Keywords: seismic interferometry, cross-correlation analysis, ambient noise, tomography

## 箱根火山から丹沢山地にかけての地震波速度構造 Three-dimensional velocity structures in the region between Hakone volcano and Tan-zawa Mountains, central Japan

行竹 洋平<sup>1\*</sup>; 本多 亮<sup>1</sup>; 原田 昌武<sup>1</sup>; 里村 幹夫<sup>1</sup>; 松原 誠<sup>2</sup>  
YUKUTAKE, Yohei<sup>1\*</sup>; HONDA, Ryou<sup>1</sup>; HARADA, Masatake<sup>1</sup>; SATOMURA, Mikio<sup>1</sup>; MATSUBARA, Makoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanagawa prefecture, <sup>2</sup> Earthquake Research Institute, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### 1. はじめに

箱根火山は伊豆衝突帯北部に位置し、周囲を直径約 15km の外輪山に囲まれる第四紀の活火山である。箱根カルデラ内では、群発地震が頻繁に発生しており、地下深部のマグマ由来の熱水が地震の発生に関与している可能性が指摘されている(例えば、Oki and Hirano, 1970; Yukutake et al., 2011) ほか、箱根カルデラ下深さ 15~20km 付近には低周波地震が観測されている。しかし、地下深部に存在すると考えられているマグマ溜りの詳細な位置やそれと低周波地震との関係、熱水とカルデラ浅部で発生する群発地震活動との関係について十分な理解が進んでいない。また、箱根火山から北に約 20km 離れた場所に位置する丹沢山地では、伊豆・丹沢の地塊が本州側に多重に衝突する複雑なテクトニクスを有する。箱根火山活動に関与するマグマ供給システムとそれに由来する熱水系と地震活動との理解や、衝突帯北縁のテクトニクスの理解を進めるうえで、この地域の地殻構造を詳細に推定することが重要となる。本研究では、定常地震観測点に加えて箱根カルデラ内および周辺域に設置された機動的な地震観測点を用い、3次元地震波速度構造の推定を試みた。

### 2. データ及び手法

2009年6月から2011年6月の期間に、神奈川県温泉地学研究所により箱根カルデラ内およびその周辺域において設置された22点の機動的な地震観測点のデータを解析に使用した。さらに、2009年から2011年の期間に、防災科学技術研究所により箱根から丹沢山地にかけて設置された約30点の機動的な地震観測点のデータ、温地研、防災科研、東大地震研、気象庁の定常地震観測点のデータもあわせて使用した。2009年6月から2011年4月の期間に発生した1200イベントについて、P波及びS波走時を手動検測しトモグラフィ解析に用いた。

3次元速度構造の推定には、Double-difference tomography法(Zhang and Thurber, 2003)を使用した。初期1次元速度構造は、JHD法(Kissling et al., 1994)より推定した。水平方向4km、深さ方向3km間隔のグリッドを配置し、3次元速度構造の推定を行った。

### 3. 結果と解釈

箱根カルデラ内の速度構造については、群発地震発生域の深さ3km付近においてP波速度( $V_p$ )が6.0km/sの比較的高速度であるのに対して、群発地震発生域の下限にあたる深さ6kmから15kmにかけて5.2km/sから6.6km/sの低 $V_p$ 域が推定された。S波速度( $V_s$ )についても、深さ6km~15kmにかけて3.5km/s~4.1km/sの低 $V_s$ 域が推定された。 $V_p/V_s$ に変換すると、深さ10km~15km付近にかけて領域では、 $V_p/V_s$ が1.9と高く、一方群発地震発生域下限の深さ6kmでは $V_p/V_s$ が1.6程度の比較的低い値となる。これらの結果をTakei(2002)による空隙のアスペクト比と $V_p/V_s$ との関係に当てはめると、 $V_p/V_s$ が高い領域は空隙に水またはメルト、 $V_p/V_s$ が低い領域は水またはガスが満たされた領域として解釈できる。高い $V_p/V_s$ の領域は、箱根カルデラ周辺で観測される山体の伸びを示す地殻変動のソース源(例えば、原田ほか、2009)と一致しており、マグマ溜りを反映していると考えられる。低い $V_p/V_s$ の領域はマグマ由来の熱水やガスの存在を反映しており、群発地震の発生と密接に関与していることが示唆される。

丹沢山地では、 $V_p$ が6.5km/s以上の非常に高速度な領域が地表付近まで存在する。丹沢山地では伊豆・小笠原弧の下部地殻物質に対応するトータル岩や斑レイ岩が地表に露出しており、これらの岩体は速い地震波速度を持つことが知られている(例えば、Kitamura et al., 2003)。丹沢山地の高 $V_p$ 領域は、丹沢地塊が本州弧に衝突することにより、地表まで露出した下部地殻物質を反映したもののと思われる。丹沢山地から箱根カルデラ北縁にかけての領域では $V_p$ 5.0-5.5km/sの低速度域が推定され、足柄層群(トラフ充填物)に対応すると考えられる。上記の結果は丹沢、伊豆の衝突の過程で形成された複雑な地殻構造を反映したものであり、Nakamichi et al. (2007)やArai et al. (2009)の先行研究と調和的である。

### 謝辞

本研究では、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所、気象庁観測点の地震波形データ、及び気象庁一元化の検測値を使用させて頂きました。本研究は文部科学省受託研究「神縄・国府津-松田断層帯における重点的な調査観測」により取得された地震データを利用しました。

---

SSS26-03

会場:315

時間:4月30日 16:30-16:45

キーワード: 地震波速度構造, 箱根火山, 丹沢山地

Keywords: Three-dimensional velocity structures, Hakone volcano, Tanzawa Mountains



## 紀伊半島下を南東にせり上がる大陸モホ面と中間層の地震 Continental Moho slanting upwards to the southeast beneath Kii Peninsula and middle layer earthquakes

澁谷 拓郎<sup>1\*</sup>; 今井 基博<sup>1</sup>; 平原 和朗<sup>2</sup>; 中尾 節郎<sup>1</sup>  
SHIBUTANI, Takuo<sup>1\*</sup>; IMAI, Motohiro<sup>1</sup>; HIRAHARA, Kazuro<sup>2</sup>; NAKAO, Setsuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大・防災研, <sup>2</sup> 京大・理

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto Univ, <sup>2</sup>Science, Kyoto Univ

我々は、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海プレートとその周辺の構造を推定するため、紀伊半島において2004年から2013年まで稠密リニアアレイ地震観測を行った。これまでにフィリピン海スラブの傾斜方向の4測線と直交方向の2測線を含む14断面でレーバ関数解析を行い、大陸モホ面、海洋地殻上面、海洋モホ面などの地震波速度不連続面の3次元的形状を推定した。その結果、北西下がり傾斜するスラブ上面と海洋モホ面をそれぞれ低速度層上面と高速度層上面として明瞭にイメージすることに成功した。大陸モホ面は、近畿地方の北部から中部にかけては深さ35 km~37 kmにほぼ水平に横たわっているが、紀伊半島下ではフィリピン海スラブの上をせり上がるように南東上がりに傾斜し、中部で深さ20 km、南部沿岸域で深さ15 kmに達していることがわかった。

Mizoue et al. (1983)は、当時紀伊半島に展開されつつあった地震の定常観測網のデータを用いて、紀伊半島をほぼ東西に伝播する波線におけるモホ反射波やモホ屈折波と直達P波の走時差が北部から南部に至るにつれて小さくなることを見出し、大陸モホ面が南上がりに傾斜していると推定した。さらに彼らは、上部地殻で発生する地震とフィリピン海スラブで発生する地震とは別の、それらの中間の深さで発生している地震を紀伊半島南部で検出し、中間層の地震と名付けた。彼らは、中間層の地震は南上がりに傾斜する大陸モホ面付近で発生していると指摘している。

我々のレーバ関数解析では、上述のように大陸モホ面の3次元的形状を精度良く推定することができた。その結果、中間層の地震は南東上がりの大陸モホ面の下方で発生していることが明らかになった。中間層の地震が発生している下部地殻相当の深さではふつう地震は発生しない。それは、その深さでは、地殻物質は流動的になり、塑性強度が脆性強度を下回ってしまうためである。ところが、大陸モホ面が下部地殻相当の深さまで浅くなった場合、その深さでのマントル物質の塑性強度が脆性強度を上回り、マントル内で脆性破壊、すなわち地震が発生する可能性が出てくる。これが中間層の地震の成因であると考えられる。

キーワード: 大陸モホ面, 中間層の地震, 紀伊半島, レーバ関数

Keywords: continental Moho, middle layer earthquakes, Kii Peninsula, receiver function

## 西南日本下フィリピン海スラブ内の地震波速度異方性 Seismic anisotropy within the subducting Philippine Sea slab beneath the central Japan

汐見 勝彦<sup>1\*</sup>  
SHIOMI, Katsuhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup> NIED

稠密な基盤の地震観測網データの解析や精力的な構造探査などを通じ、西南日本下に沈み込むフィリピン海スラブの複雑な形状が明らかになってきた。しかし、スラブ内の応力場と強い関係があると考えられる地震波速度異方性構造については、まだ未解明な点が多い。そこで、フィリピン海スラブ内の異方性構造の特徴を把握することを目的として、紀伊半島と四国に位置する防災科研 Hi-net, F-net および産業技術総合研究所の観測点等計 100 点にレシーバ関数解析を適用した。観測点下に傾斜した地震波速度不連続面や異方性媒質が存在する場合、地震波到来方向に対して、レシーバ関数中に記録される Ps 変換波の到着時および振幅に系統的な特徴が生じる。この特徴を定量的に評価するため、得られたレシーバ関数に対して、調和解析 (Bianchi *et al.*, 2010; JGR) を適用した。調和解析では、速度不連続面あるいは異方性軸の傾斜方向、もしくは異方性軸 (速い軸) の方位を推定可能である。

2000 年 10 月から 2013 年 11 月までに発生したマグニチュード 6 以上の遠地地震による記録のうち、S/N が良好なものを対象にレシーバ関数を推定した。レシーバ関数の推定には、コーナー周波数 1.0Hz と 1.5Hz の低域通過フィルタを適用した。調和解析の適用にあたっては、モホ面からの変換波がもっとも強調される深さ (=モホ面深度) を基準深さとして、CCD 重合を行った。重合には、Matsubara & Obara (2011; EPS) による速度構造を用いた。まず、モホ面からの変換波を含むデータに調和解析を適用した結果、紀伊半島東部、四国西部で得られた境界面の傾斜方向は radial 成分のレシーバ関数から推定した海洋モホ面モデル (以下、前モデル。Shiomi *et al.*, 2008; GJI) と良い一致が見られた。一方、紀伊半島南部で調和解析により得られた傾斜方向は、前モデルと比べて時計回りに回転する傾向がある。この特徴は、モホ面直上に南北方向の異方性媒質が存在する際に生じる。紀伊半島において、前モデルと整合する領域とズレが生じる領域は、Shiomi & Park (2008; JGR) の領域 A と B の境界に相当し、深部低周波微動やスラブ内地震の発生状況が変化する場所と一致する。海洋地殻では、深さ 40 km 以浅では異方性軸が比較的平坦であり、速い軸がスラブ傾斜方向を向く傾向がある。これは、スラブ内地震の北東-南西伸張場と調和的である。また、より深部では層が傾斜する特徴が顕著となる。四国下の海洋マントルでは、東側に傾斜する成分が顕著であるのに対し、紀伊半島南部では速い軸が東西方向に向き、傾斜成分は乏しい。この特徴は、紀伊水道周辺でのスラブ形状の急変ならびに紀南海山列を起点としたスラブ拡大の影響と考えられる。

キーワード: フィリピン海スラブ, レシーバ関数, 調和解析, 地震波異方性  
Keywords: Philippine Sea slab, Receiver function, Harmonic analysis, Seismic anisotropy

## 濃尾地震断層域におけるレシーバ関数解析(その2) The receiver function analysis at the area of the Nobi earthquake (II)

飯高 隆<sup>1\*</sup>; 五十嵐 俊博<sup>1</sup>; 加藤 愛太郎<sup>1</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>; 濃尾地震断層域 合同地震観測グループ<sup>1</sup>  
IIDAKA, Takashi<sup>1\*</sup>; IGARASHI, Toshihiro<sup>1</sup>; KATO, Aitaro<sup>1</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>; JOINT SEISMIC OBSERVATIONS, At  
the area of nobi earthquake<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・地震研

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo

### 1) はじめに

内陸地震の発生は、日本列島域周囲の海洋プレートの沈み込みなど、プレート運動に伴って生ずる歪が島弧地殻内部に蓄積し、それに伴い特定の断層への応力集中がおこり破壊に至るといえる。一連のプロセスから成ると考えられる。その物理メカニズムを理解するためには、島弧地殻内の不均質構造を解明するとともに、プレート境界から加わる歪・応力がその不均質構造や内部変形によって局在化していく過程を明らかにしなければならない。現在実施されている“地震及び火山噴火予知のための観測研究計画”においては、2009年から5ヶ年計画で、全国の大学・関係機関と共同で、1891年に発生した国内最大規模の内陸地震である濃尾地震の断層域を研究対象として、地震観測、地球電磁気観測、GPS観測等による地球物理的総合観測を実施している。この断層は、新潟-神戸歪集中帯の中に位置しており、断層への歪・応力集中の様子を調べるのに適した断層である。

これまでにおこなってきた跡津川断層などにおける合同観測の研究から、内陸地震の発生に関しては地表近傍の構造だけでなく、下部地殻の構造や地殻の下に沈み込んでいる海洋プレートから供給される流体の影響が大きいことがわかってきた。濃尾断層域でおこなっている総合観測の一環である自然地震のテレメータ観測のデータを用いた広域トモグラフィ解析によっても、濃尾断層域下のフィリピン海プレートから上部地殻へとつながる低速度域が検出された。この低速度域は、東西方向においては濃尾地震断層の西側の琵琶湖の下に存在するフィリピン海プレートから、下部地殻内部を通り断層域直下にまで伸びており、また断層の走向方向においても、1891年の濃尾地震の断層の北部の下部地殻に存在していることがわかった。本研究では、この領域においてレシーバ関数解析をおこなった。

### 2) データ

震源は、2002年8月から2011年3月10日までの震央距離30度から90度の遠地震を用いた。観測点は、本計画で設置した臨時観測網のデータに加え、防災科研のHi-netのデータを使用させていただいた。

### 3) 結果

濃尾地震断層域でのレシーバ関数の明瞭なイメージを得ることができた。この地域では、2012年に人工地震を用いた構造探査が実施されており、2013年の日本地震学会・秋季大会では、その測線に沿った構造において、構造探査の結果とレシーバ関数解析で得られた結果とを比較検討した結果を発表した。今回は、濃尾地震断層域を取り巻く、200km×150kmの広い領域でレシーバ関数解析の構造を切りだして、この地域の地球科学的特徴を抽出することを試みた。

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートは、これまでに地域的に大きく湾曲していることが示されてきた。ここでは、東西方向、南北方向で断面図を作成し、地殻及び最上部マントルの構造を推定した。

東経137.5度の南北断面では、沈み込むフィリピン海プレートの上面と海洋地殻のモホ面と推定される、北に向かって傾斜するレシーバ関数の負と正の明瞭な境界面が見られた。その深さは、浅部から80km程度までたどることができる。また、137度の南北断面でも、沈み込むフィリピン海プレートの上面と海洋地殻のモホ面と推定される負と正の明瞭な境界面が見られるが、60kmより深部では不明瞭となる。その西側の伊勢湾から若狭湾にかけての領域では、これまでの研究から沈み込むフィリピン海プレートが浅くなっていることが示されていたが、今回のレシーバ関数解析でも、沈み込む海洋地殻のモホ面と思われる境界面からも、浅いフィリピン海プレートの形状を裏付けることができた。このように、合同観測による空間的高密度の観測網を用いたレシーバ関数解析を行うことによって、より明瞭な地殻および上部マントルのイメージを描き出すことが可能となった。

キーワード: 地殻, マントル, レシーバ関数, 濃尾地震

Keywords: crust, mantle, Receiver function, Nobi earthquake

## 南西諸島海溝南西部における前弧域の地震波速度構造 P-wave velocity structure in the forearc region of the southwestern Nansei-Shoto (Ryukyu) Trench subduction zone

西澤 あずさ<sup>1\*</sup>; 金田 謙太郎<sup>1</sup>; 及川 光弘<sup>1</sup>; 藤岡 ゆかり<sup>1</sup>; 堀内 大嗣<sup>1</sup>  
NISHIZAWA, Azusa<sup>1\*</sup>; KANEDA, Kentaro<sup>1</sup>; OIKAWA, Mitsuhiko<sup>1</sup>; FUJIOKA, Yukari<sup>1</sup>; HORIUCHI, Daishi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁

<sup>1</sup> Japan Coast Guard

フィリピン海プレートの北西端は南西諸島(琉球)海溝で沈み込んでいるが、海溝南西部においてはM 8を越える地震については機器によって測定された記録はない。一方で、1771年にはおよそ12,000人の犠牲者を出した明和八重山地震津波が発生しているが、その波源域はまだ明確に決められていない。南西諸島前弧域の地震活動度は海溝軸に沿って変化が見られ、重力異常の分布に対応しているように見える。このように海溝軸に沿って変化する前弧域の構造を把握するために、2006年より海上保安庁では南西諸島域においてマルチチャンネル反射法地震探査(MCS)及び海底地震計を用いた屈折法地震探査を行なっている。本報告では、南西諸島海溝南西部においてこれまでに実施した海溝を横断する方向の5測線について、推定された前弧域の地震波速度構造の特徴についてその概要を述べる。

各調査は測量船「昭洋」により実施され、反射法探査における震源は総容量1,050(350×3)inch<sup>3</sup>(17.2 liter)のエアガンクラスターを使用し、50m間隔で発震を行った。データの収録には240chストリーマケーブル(3,000m)を用いた。屈折法探査では、総容量6,000(1,500×4)inch<sup>3</sup>(98 liter)のエアガンを200m間隔で発震し、約5km間隔で設置した海底地震計で受振した。

東経126度以西のフィリピン海プレートが斜めに沈み込んでいる領域では、前弧海盆が発達しておりその前面の付加体はP波速度が4km/s以下で厚さが最大8km程度の物質によって構成されている。東経126度以东のフィリピン海プレートの沖縄?ルソン断裂帯の沈み込みが前弧域まで明瞭に追跡できる領域では、P波速度分布からも断裂帯の沈み込みを確認することができる。正の重力異常が卓越している前弧域では他の領域と比較して、P波速度が4.5km/s以上の物質が浅部まで上昇して存在しているところが特徴的である。このような海溝軸に沿う速度構造の変化と地震活動度の関連性についても検討する。

また、陸側斜面上のいくつかの海底地震計では、沈み込むプレートのモホ面からの反射波と推定される信号が得られている。すべての信号を説明できる速度構造モデルを構築することは困難であるが、いくつかのモデルの推定を試みた。



## Spectral and spatial characteristics of the refined CRUST1.0 gravity field Spectral and spatial characteristics of the refined CRUST1.0 gravity field

TENZER, Robert<sup>1\*</sup> ; CHEN, Wenjin<sup>1</sup>  
TENZER, Robert<sup>1\*</sup> ; CHEN, Wenjin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

<sup>1</sup>School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

We investigate the density structure of the oceanic and continental crust using the global crustal model CRUST1.0, which has been refined by incorporating additional global datasets of the topography/bathymetry (ETOPO1), the polar ice sheets (DTM2006.0 ice-thickness data) and the global geoid model (GOCO-03S). The analysis reveals that the average crustal density is 2830 kg/m<sup>3</sup>, while it decreases to 2490 kg/m<sup>3</sup> when including the seawater. The average density of the oceanic crust (without the seawater) is 2860 kg/m<sup>3</sup>, and the average continental crustal density (including the continental shelves) is 2790 kg/m<sup>3</sup>. We further compile the gravity field quantities generated by the Earth crustal structures. The correlation analysis of results shows that the gravity field corrected for major known anomalous crustal density structures has a maximum (absolute) correlation with the Moho geometry. The Moho signature in these gravity data is seen mainly at the long-to-medium wavelengths. At higher frequencies, the Moho signature is weakening due to a noise in gravity data, which is mainly attributed to crustal model uncertainties. The Moho determination thus requires a combination of gravity and seismic data. In global studies, gravimetric methods can help improving seismic results, because (i) large parts of the world are not yet sufficiently covered by seismic surveys, and (ii) global gravity models have a relatively high accuracy and resolution. In regional and local studies, the gravimetric Moho determination requires either a detailed crustal density model, or seismic data (for a combined gravity and seismic data inversion). We also demonstrate that the Earth long-wavelength gravity spectrum comprises not only the gravitational signal of deep mantle heterogeneities (including the core-mantle boundary zone), but also shallow crustal structures. Consequently, the application of spectral filtering in the gravimetric Moho determination will remove not only the gravitational signal of (unknown) mantle heterogeneities, but also the Moho signature at the long-wavelength gravity spectrum.

キーワード: correlation, crust, density, gravity, Moho  
Keywords: correlation, crust, density, gravity, Moho

## 地理院地図を活用した重力測定値の補正と上町断層南部測線データの再検討 Correction of Gravity Measurements Utilizing GSI Maps and its Application in the Southern part of Uemachi Fault Zone

領木 邦浩<sup>1\*</sup>

RYOKI, Kunihiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 兵庫職業能力開発促進センター電気・電子系

<sup>1</sup> Hyogo Polytechnic Center

### 1. 概要

重力による地下構造解析などの野外調査を伴う地球科学研究では測定点などの地理位置情報の取得が不可欠である。特に重力測定においては各種の補正に際し測定点の緯経度のみならず標高を知ることが大きな負担となっている。これらの情報取得は現地での測地測量や GNSS 測量 (GPS 測量や GLONASS 測量など) で行われており、その補助的手段として大縮尺の地形図が併用されてきた。一方、近年数値化された地理情報の取得が Web 上で可能となりつつあり、例えば従来試験公開として試供されてきた国土地理院の Web 地図閲覧サービスは、2013 年 10 月 30 日に正式公開に移行し、その名称も“電子国土 Web.NEXT”から“地理院地図”へと変更(国土地理院, 2013a)になるなど、整備が進んできている。地理院タイル利用規約(国土地理院, 2013b)に沿う学術研究ではこのサービスを活用できることとされており、地球科学を始めとするフィールドワークへの支援が期待される。そこで、地理院タイル(国土地理院, 2013c)を用いて測定位置の情報を得られる JavaScript アプリケーションを作成した。このアプリケーションによってモバイルデジタル機器と併用することによって野外でも容易に地理位置情報が入手できることとなる。

一方、筆者らはこれまで上町断層系南部で該当地域の地方自治体が発行した大縮尺地形図を基図として重力測定を行ってきたが、これらの図は現行の日本測地系 2000 に基づくものと旧日本測地系によるものが混在していた。今回、前述のアプリケーションによってこれらを統合再検討したので、そのアプリケーションを紹介すると共に再検討した結果について報告する。

### 2. 対象地域

統合した測線は領木(2011)、領木・西谷(2013)の測定結果に今回測定したものを延長させたものである。この測線は和泉市いぶき野から泉大津市夕風町に至る約 9.7Km で、上町断層系のいくつかの断層に交差している。

### 3. 地理情報の取得

測定点の緯経度および標高は国土地理院が提供する数値情報を使用した。これらの取得に際し、地理院タイルを用いた構築サンプルに加筆修正して作成した JavaScript を主とする HTML アプリケーションを構築して使用した。一般に WWW ブラウザではシステム保護の目的で文字列をクリップボードに直接転写させないが、一部のブラウザには JavaScript を通じて転写する機能があり、その他のブラウザでも ZeroClipboard library (zeroclipboard.org, 2014) を用いることによって転写が可能となる。クリップボードに転写した数値情報はエディタソフトウェアまたは表計算アプリケーションで編集して使用した。今回は野外計測後に室内で一括処理するためのアプリケーションを作成したが、タブレット端末で運用すれば野帳代わりに測定現場で容易に数値情報を入手できる。これらの数値位置情報は重力測定点の図示および各種補正に使用された。

### 4. 結果

測定点に関する数値情報を得るために従前は地形図からデジタイズで緯度経度を得ると共に標高を讀図していたが、今回のアプリケーションを用いることによってこれらの作業にかかる時間が大幅に短縮できた。特に標高の読み取り誤差の精度が不安定であったものが地理院地図の精度に依存した一定のものとなり、データの等質性が確保できた。

### 5. 今後の課題

今回作成したアプリケーションは地球科学を始めとする各種野外調査において測定効率の向上およびデータの等質性確保に有用であることが明らかになった。今後はタブレット端末での運用に向けたシステム開発を行うと共に地形補正への適用を検討することが課題となる。

### 参考文献

国土地理院(2013): 地理院地図の公開について, 地理院地図, <http://www.gsi.go.jp/johofukyu/johofukyu40032.html>.

国土地理院(2013): 地理院タイル規約, 地理院地図, <http://portal.cyberjapan.jp/help/termsfuse.html>.

国土地理院(2013): 地理院タイルを用いた開発, 地理院地図, <http://portal.cyberjapan.jp/help/development.html>.

領木邦浩(2011): 和泉市西北部-中央部での都市地盤構造解析のための重力測定, 近畿職業能力開発大学校紀要, vol. 19, p. 18 - 19.

領木邦浩・西谷忠師(2013); 大阪湾岸中南部での重力測定, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集, SSS32 - P23. zeroclipboard.org (2014): ZeroClipboard, <http://zeroclipboard.org/index.html>.

SSS26-P02

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

キーワード: 重力構造, 数値地理情報, 上町断層, 測量, 野外調査, 測定効率

Keywords: gravity structure, digital geographic information, JavaScript, Uemachi Fault, field research, efficiency of measurement

## 南西諸島海溝の北端部における沈み込むフィリピン海プレートの地殻構造 The crustal structures of the subduction of the Philippine Sea Plate in the northern Nansei-Shoto trench

及川 光弘<sup>1\*</sup>; 西澤 あずさ<sup>1</sup>; 金田 謙太郎<sup>1</sup>; 藤岡 ゆかり<sup>1</sup>; 堀内 大嗣<sup>1</sup>  
OIKAWA, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; NISHIZAWA, Azusa<sup>1</sup>; KANEDA, Kentaro<sup>1</sup>; FUJIOKA, Yukari<sup>1</sup>; HORIUCHI, Daishi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁

<sup>1</sup> Japan Coast Guard

沈み込みに伴う海溝型の地震は、沈み込む海側プレート上面の海底地形や地殻構造、例えば沈み込む海山の存在がその地震の作用する範囲などに制約を与える可能性が指摘されている (Kopp, 2013)。南西諸島海溝の北端部には、奄美海台という古島弧が沈みこみつつあり、海溝軸を大きく湾入させる原因となっている。南西諸島海溝は、従来、大地震を生じる可能性が低いと考えられることが多かったが、近年の研究の結果から、大地震を生じる可能性が指摘されている。従って、奄美海台及びその周辺海域の沈み込む海側プレートの詳細な地形及び地殻構造を把握することは、巨大地震が何処でどのように発生するかを把握する際の重要な制約条件の一つとなる可能性がある。

海上保安庁は、2009年及び2012年に南西諸島北端部のフィリピン海プレートから南西諸島海溝・南西諸島島弧を横断し沖縄トラフにいたる海域において、2本の調査測線を設定し、海底地震計 (OBS) を用いた屈折法地震探査と、マルチチャンネル反射法探査をそれぞれ実施した。2009年の調査測線 (ECr10) は、奄美海台の西端から海溝を横断し奄美大島のやや北を通過する測線である。2012年の調査測線 (ECr11) は、奄美海台の北に位置する喜界海盆から海溝を横断し、屋久島のすぐ南方を通る測線である。二つの測線は、南西諸島島弧の構造的な境界の一つと言われているトカラ海峡のそれぞれ南北に位置している。

ECr10の南端は奄美海台の西端部に位置する。奄美海台はブーゲー重力の低異常から大陸性の地殻をもつ可能性 (植田, 2005) が示唆されており、また奄美海台の中央部を横断する地殻構造調査の結果から、比較的厚い地殻 (最大約16km) の古島弧的な構造を持つことが示されている (Nishizawa et al., 2009, 2014)。ECr11の南端部の喜界海盆では、ブーゲー重力の高異常から海洋性地殻の特徴を示している (植田, 2005)。当該海盆の中央部を横断する測線における地殻構造調査の結果からは、地殻の厚さが10km以下の比較的薄い地殻が確認されているが、水平方向には不均質性が大きいことが明らかになっている (Nishizawa et al., 2009, 2014)。

今回、上記の2測線の屈折法探査・反射法調査の結果に加えて、海上保安庁が取得した詳細な海底地形データを用いて、本海域における海側プレートの構造についての比較を行った。海底地形については、沈み込みに伴う海溝軸に平行方向の正断層群が広く認められることが分かった。これらの正断層は喜界海盆よりも奄美海台の方が特に顕著に認められるようである。地殻構造については、奄美海台が中部地殻 (6.0-6.5km/s) を持つことが確認されたが、比較的平坦な海域においても、中部地殻と思われる速度の物質の存在が認められた。

キーワード: MCS, 地殻構造, 沈み込み, OBS

Keywords: MCS, crustal structure, subduction, OBS



S-wavevector receiver functionによる九州地域における地殻及び最上部マントルの地震学的構造の推定  
Seismic structure beneath Kyushu island, Japan, inferred from S-wavevector receiver functions.

上田 拓哉<sup>1\*</sup>; 竹中 博士<sup>2</sup>; 村越 匠<sup>3</sup>; 岡元 太郎<sup>4</sup>  
UEDA, Takuya<sup>1\*</sup>; TAKENAKA, Hiroshi<sup>2</sup>; MURAKOSHI, Takumi<sup>3</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>岡山大学, <sup>3</sup>防衛大学校, <sup>4</sup>東京工業大学  
<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>Okayama Univ., <sup>3</sup>National Defense Academy, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

The underground structure of Kyushu region is characterized by active subduction of the Philippine Sea plate (PHS) beneath the Eurasian plate and several active volcanos, for example, Aso, Kirishima, and Sakurajima volcanos along with the volcanic front, and Unzen volcano located Beppu-Shimabara graben. And also there are very thick sediments at several plains in Kyushu. Therefore the seismic structure beneath Kyushu Island is seemed to be very complicated and it is very important to understand the detailed structure, especially around Moho and the top of PHS. There are many previous researches on seismic structure beneath Kyushu Island. Travel time tomography method is very useful tool for imaging the subsurface structures. In the previous works, a lot of characteristic structures are identified by the tomography for example, low velocity structure beneath volcanic front.

Receiver function analysis is also very useful tool to image the seismic velocity structures. We apply it to image seismic structure on Kyushu area. In this study, we use teleseismic records from Hi-net and F-net seismic stations in Kyushu, which are supplies by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

If those seismic stations are located at the top or in the sedimentary layer, the records include strong effect of reverberation within the sedimentary layer, which makes the image of the structure unclear. To overcome this problem, we exploit the modified S-wavevector receiver functions (SWV-RFs). The SWV-RFs are derived by deconvoluting the upgoing S-wave component with the upgoing P-wave component of the records. For suppressing the sedimentary layer effect, we apply SWV-RFs for borehole records and move virtually the seismic sensor to the top of the basement layer, and calculate the SWV-RFs at that location [Takenaka and Murakoshi, 2010]. This method needs the structure model from the surface to the sensor location. We employ the Integrated Velocity Structure Model by the Headquarters for Earthquake Research Promotion. We take several cross sections in Kyushu Island to map the calculated SWV-RFs. We then interpret the continental Moho and low velocity regions in the mapped SWV-RFs. It can be seen that characteristic low velocity regions in mantle wedge, some of which may be related to magma. We also model some SWV-RF sections by the 2.5-D finite-difference method to confirm our imaging results.

キーワード: レシーバ関数, 地殻構造, プレート上面, 九州地域  
Keywords: receiver function, crustal structure, top of plate, Kyushu region

## 反射法地震探査による警固断層南東部の構造調査 Seismic reflection survey at the Kego fault, Kyushu, Japan

松本 聡<sup>1\*</sup>; 清水 洋<sup>1</sup>; 中元 真美<sup>2</sup>; 宮崎 真大<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>3</sup>

MATSUMOTO, Satoshi<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>; NAKAMOTO, Manami<sup>2</sup>; MIYAZAKI, Masahiro<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山センター, <sup>2</sup>九州大学理学府, <sup>3</sup>地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>R&D Department, JGI, Inc

福岡市内を通る警固断層では北西部において 2005 年福岡県西方沖地震が発生し、その最大余震は南東部の北端で発生した。また、この地震後南東部の断層深部で微小地震活動が活発化しており、断層の活動を把握する研究が進められてきた。さらに、構造を詳細に調べるため、2013 年 7 月に断層の 2 箇所を横切る反射法地震探査を実施した。福岡市中央区においては測線長約 1km の高分解能探査を行った。また、福岡市早良区から飯塚市にいたる約 35km の調査測線において反射法・屈折法による探査を実施した。震源はバイブレータを用い、得られたデータに屈折法・反射法の処理を適用して反射断面を得た。高分解能測線では断層に対応した反射面の不連続が見出され、地下約 600 m において断層西側が隆起している結果が得られた。これらは従来得られている断層活動と整合的な特徴を示す。反射法・屈折法測線では反射強度の強い層が下部近くに見られ、その下端がモホ面に対応すると考えられる。また、地震発生層においては地表地質が花崗岩質である測線下で強い反射体が見られ、警固断層に対応する部分では反射強度が弱くなっていることが明らかになった。

キーワード: 警固断層, 反射法地震探査

Keywords: Kego fault, seismic reflection survey

## 人工地震を用いた警固断層周辺の地殻内不均質構造の研究 P-wave heterogeneous structure around the Kego fault inferred from reflection analysis for seismic network data

神薗 めぐみ<sup>1\*</sup>; 松本 聡<sup>2</sup>; 宮崎 真大<sup>1</sup>; 中元 真美<sup>2</sup>; 清水 洋<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>3</sup>

KAMIZONO, Megumi<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Satoshi<sup>2</sup>; MIYAZAKI, Masahiro<sup>1</sup>; NAKAMOTO, Manami<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター, <sup>3</sup>株式会社地球科学総合研究所研究開発部

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>R&D Department, JGI, Inc.

警固断層は福岡平野西縁を北西-南東方向に走る断層であり、福岡市街地やその周辺の直下を通っている。2005年3月20日には警固断層北西部の延長上で福岡県西方沖地震が発生し、断層帯南東部での活動が懸念されている。警固断層の今後の活動を考えるためには、断層の位置、構造など詳細な情報が求められている。本研究では、2013年7月22~24日に行われた反射法地震探査の震源を用いて、警固断層周辺の地下構造を明らかにすることを目的とする。

今回の探査(松本・ほか、本大会)ではバイプロサイズ震源が用いられ、測線長約35km上で屈折法・広角反射法データの取得のための発震は計8箇所で行われた。各ショットは発震時間24秒で、6-30Hzのスweep波を100回発生させた。データ収録は九州大学・防災科学技術研究所の定常および臨時地震観測点で行った。簡単のため反射面までは均質半無限速度構造を仮定し、観測された波形にNMO処理を行い反射波の検出を試みた。

処理した波形を観測点ごとにまとめ、深度断面を作成した。この断面は反射法測線と観測点の midpoint を通る、警固断層を横切っているため、断層の西側と東側での地下構造の違いを見ることができる。どの深度断面においても深部(深さ20数km~30km程度)からの反射波が多数検出された。このことから下部地殻にあたる領域は非常に不均質であるということがわかる。また、この反射波群の下限はモホ面に対応すると考えられる。浅部は、場所によって様相が異なっている。警固断層推定位置の東西で明瞭な違いのある地点がいくつかあり、警固断層の西側に顕著な反射波が見られたが東側では見られなかった。その一方で断層の東西で明瞭な違いのない地点もあった。このことから、警固断層の走行方向に不均質構造の変化が存在する可能性があるといえる。

今後は他の観測点のデータも解析し、より詳細に地殻内の不均質構造を明らかにする必要がある。

キーワード: 警固断層, 反射法地震探査

Keywords: Kego Fault, Seismic Reflection Profiling

## 稠密地震観測に基づく近畿地方北部の地震波速度構造 The seismic velocity structure in the Northern Kinki District using the dense seismic observation

海谷 絵未<sup>1</sup>; 片尾 浩<sup>1\*</sup>; 澁谷 拓郎<sup>1</sup>; 飯尾 能久<sup>1</sup>; 三浦 勉<sup>1</sup>  
KAIYA, Emi<sup>1</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; SHIBUTANI, Takuo<sup>1</sup>; IIO, Yoshihisa<sup>1</sup>; MIURA, Tsutomu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大防災研

<sup>1</sup> DPRI, Kyoto Univ.

近畿地方北部、特に大阪府北部から京都府中部(以下、丹波地域)では定常的に微小地震活動が活発である。この地域には、第四紀の火山は存在しておらず、これらの地震活動は近年発生した内陸大地震の余震でもない。震源は特定の活断層に沿うのではなく、広範囲にわたり二次元的に分布しているなど特異な特徴を呈している。この地域で微小地震が定常的に発生する原因はまだよくわかっておらず、その解明には詳細な地殻構造を把握する必要がある。

丹波地域では、2008年11月以降83点のオフライン臨時観測点を設置して稠密地震観測が行われている。丹波地域における平均観測点間隔は約5kmで、従来の約20km間隔に比べると稠密である。本研究では、稠密観測点と周囲の定常観測点75点と濃尾合同地震観測点5点で得られたデータを用い、従来よりも高解像度の3次元地震波速度構造を推定した。トモグラフィーにはRawlinson et al., (2006)によるFMTOMOを用い、グリッド間隔や使用データ数等を変化させて解析を行った。

これまで近畿地方北部で行われた地震波速度構造研究では、長期にわたる定常観測データを用いても、グリッド間隔は水平方向0.2°が限界であった。一方、本研究では1年分のデータであってもグリッド間隔0.1°以下の十分な解像度が得られることがわかり、下記のような様々な特徴が確認できた。P波速度構造には、おおむね丹波地域の微小地震が活発な領域に重なるように低速度異常が見られた。S波速度構造には、琵琶湖西岸から南西へと帯状に低速度異常が広がり、浅部では一部に高速度異常が顕著に見られる。また、琵琶湖西岸地域の深さ3km以浅には、帯状に広がる高Vp/Vsかつ低S波速度域が存在する。丹波地域においては、これまで反射波および散乱波解析、電気比抵抗構造研究により、地殻内の流体の存在が示唆されている。流体の局所的な分布が地震波速度構造や地震活動にも影響を与えている可能性が考えられる。

キーワード: 丹波山地, トモグラフィー, 微小地震, 地殻流体, 稠密観測, 満点計画

Keywords: Tamba Plateau, Tomography, micro-earthquake, crustal fluid, dense observation, Manten Project



## 立山火山下の地震波減衰構造 Seismic attenuation beneath Tateyama volcano

岩田 晃治<sup>1\*</sup>; 川方 裕則<sup>2</sup>; 土井 一生<sup>3</sup>  
IWATA, Koji<sup>1\*</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>2</sup>; DOI, Issei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>立命館大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>立命館大学理工学部, <sup>3</sup>京都大学防災研究所  
<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>Ritsumeikan University, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Institute

立山火山(弥陀ヶ原火山)は、飛騨山脈立山連峰(富山県南東部)に存在する活火山である。九重や霧島などの活動が活発な活火山については、地震波減衰を用いた地下構造研究が広くおこなわれており(例えば、及川ほか, 1994; 須藤ほか, 1996)、火山下に強減衰領域が存在することが示されている。一方、立山火山については、現在の活動は比較的静穏であり、その地下の構造はあまり詳しく調べられていない。防災科学技術研究所により Hi-net (高感度地震観測網) が整備されて以来、日本全国の地震波減衰構造が推定されるようになったが (Jin and Aki, 2005; Carcole and Sato, 2009)、局所的な構造については空間分解能が不足している。本研究では Hi-net による地震波形データを用いて立山火山下の地震波減衰について調べた。

用いる観測点は立山近傍に位置する上市東種、白馬、三郷、上宝、神岡の計五つの観測点とし、立山火山からの震央距離が 70km~140km で発生した地震のうち M2.5 以上、震源深さ 30km 以浅にあるものを解析対象とした。ただし、各観測点で P 波、S 波の主要部分の S/N 比が十分大きい地震のみを解析に使用した。また、解析期間は 2012 年 1 月から 2013 年 12 月までと短く設定したが、これは使用した観測点の中でも立山火山に近い上市東種が比較的新しく設置された観測点であるためである。

まず、立山火山を挟んだ 2 つの観測点に注目し、立山火山下近傍を通過する波線と通過しない波線でいくつかの地震波形記録を比較した。その結果、立山近傍を通過した波のうちのいくつかは、通過しなかったものに比べて、S 波が強く減衰していた。また、1~2Hz、2~4Hz、4~8Hz、8~16Hz のオクターブフィルターをかけて精査したところ、4~8Hz、8~16Hz において S 波の減衰が特に顕著であった。この特徴は、特定の観測点のみで見られるものではなく、北西から南東に向かう波線と南東から北西に向かう波線の両方で共通して確認された。

火山下にはマグマをはじめとする流体の存在が考えられており、地震波が流体中を通過した場合、S 波は P 波よりも強い減衰を受ける。P 波に対する S 波の相対的な減衰の強さを調べるために、同一の地震による地震波のスペクトルを P 波と S 波に分けて求め、その比を計算した。P 波、S 波各部分のスペクトルの計算には、マルチタイムウィンドウ法 (Imanishi and Ellsworth, 2006) を用いた。具体的には 50% オーバーラップさせた 5 つのタイムウィンドウ (各 200 サンプル; 2 秒間) のスペクトルをスタックすることでスムージングを行った。また、互いに震源の近い地震については一つのグループとしてまとめて考察をおこなった。

立山火山下を北西、南東方向に横切る地震波は立山火山下を通過した後に P 波に比べて S 波が大きく減衰している例が多く存在することが確認された。特に、4~5Hz 付近から高周波成分において急激に減衰が強くなるものが見られた。一方、立山を北東、南西方向に横切る地震波は P 波と S 波の減衰の程度に大きな差は見受けられなかった。これらのことから立山火山下には S 波だけが顕著に減衰する領域が存在するがその分布は一様ではないことが示唆された。

また、立山火山下を通過後の S 波については、顕著なピーク遅延が認められた。つまり、Takahashi et al. (2007) が東北日本で示したように、立山火山下においても S 波に対する強い散乱減衰をもたらす原因があることも示唆された。

キーワード: 減衰構造, 火山, スペクトル解析

Keywords: seismic attenuation, volcano, spectral analysis

## DONET データを用いた南海トラフ近傍の詳細地震波速度構造 Detailed velocity structure along the Nankai trough, off the Kii Peninsula, obtained from DONET data

中野 優<sup>1\*</sup>; 中村 武史<sup>1</sup>; 利根川 貴志<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
NAKANO, Masaru<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Takeshi<sup>1</sup>; TONEGAWA, Takashi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

南海トラフでは近い将来東南海・南海地震の発生が懸念されている。海洋研究開発機構では、その震源域の直上である熊野灘において、地震・津波検知能力の向上および早期検知を目的として、地震・津波観測監視システム (DONET) の構築を行なった。DONET の全観測点が設置されてから 2 年以上が経過し、地震記録も数多く蓄積された。これまでの解析で熊野灘直下における詳細な地震活動が明らかになり、2004 年の地震 ( $M_{JMA}=7.1, 7.4, 6.5$ ) の余震によく対応する領域に地震が分布していることが分かった。地震活動は現在ほぼ定常的である。また、地震の分布はフィリピン海プレート上面に形成した古銭洲海嶺との対応も指摘されている (Nakano et al., 2014, MGR)。地震のメカニズム解析は、P 軸が南海トラフの収束方向と直交することを示しており、この地域のテクトニクスについて詳しい調査が必要であると考えられる。そこで本研究では、その第一歩として地震波速度構造について詳しく調べる。

対象とする領域では反射法による構造探査が繰り返し行われており、P 波速度構造は詳しく調べられているが、S 波速度構造については不確定なところが大きい。したがって本研究では、以下に述べるように S 波速度を仮定した一次元構造からスタートし、走時データをよく説明するよう構造を順次更新、最終的に三次元構造を推定した。

1. 一次元構造を仮定し、観測網下の平均的な  $V_p, V_s$  構造を推定
  - 1.1. 構造探査による P 波速度構造をもとに一次元速度構造を作成、各層の  $V_p/V_s$  比は海洋堆積物等の影響を考慮し適当に仮定する。このモデルを用いて震源決定を行う。
  - 1.2. 得られた震源を初期震源として tomoDD (Zhang and Thurber, 2003, BSSA) によってトモグラフィーを行い、三次元構造を求める。
  - 1.3. トモグラフィーで得られた速度を深さごとに平均し、各 layer の地震波速度を更新する。
  - 1.4. 更新した一次元速度構造を用いて震源を再決定する。1.2~1.4 を構造が収束するまで繰り返す。
2. 三次元モデルを用いた速度構造の構築
  - 2.1. 東海・東南海・南海地震の運動性評価研究プロジェクト (中村ほか, 2011, JpGU) で推定された構造を基に、沈み込むプレートや海洋堆積益に対応した三次元速度構造を構築する。P 波速度構造は 1. のプロセスで得られた値を用いる。
  - 2.2. 各層の  $V_p/V_s$  比、すなわち S 波速度構造を変化させて震源決定を行い、走時残差が最小となる構造を求める。
  - 2.3. 残差の最も小さくなる速度構造に対し、サイト補正量を推定する。
3. トモグラフィーによって三次元速度構造を推定する
  - 3.1. 2. で得られた速度構造、震源分布を初期値とし、tomoDD を用いて詳細な三次元速度構造を推定する。この時、2.3. で求めたサイト補正を考慮して解析を行う。

得られた結果は、トラフ軸に平行な方向における地震波速度異常と地震活動の対応を示している。すなわち、海洋地殻では、地震の分布は低速度異常に対応する一方、上部マントルでは高速度異常と対応している。これらの特徴は 2004 年の地震の震源断層をはじめとする弱構造の形成や、フィリピン海プレート内の応力場を考察するために役立つと考えられる。一方、本研究では熊野灘下で起きた地震のみを用いたため、地震の分布が観測点の南東に偏っておりトモグラフィーの分解能は必ずしも良いとは言えない。また、得られた速度異常の分布は初期モデルにも依存する可能性がある。分解能と復元能に関する詳しい検討及び、内陸で起きた地震も用いた広域的なトモグラフィーを今後行っていく予定である。

キーワード: 南海トラフ, 海底地震観測  
Keywords: Nankai trough, Ocean-bottom seismic observations

## 関東・中部地方の内陸被害地震と構造不均質の関係 Mechanism of large crustal earthquakes in Kanto and Chubu: Influence of structural heterogeneities

藤澤 萌人<sup>1\*</sup>; 趙 大鵬<sup>1</sup>; 豊国 源知<sup>1</sup>; 北川 弘樹<sup>1</sup>; 西園 幸久<sup>2</sup>; 稲倉 寛仁<sup>2</sup>  
FUJISAWA, Moeto<sup>1\*</sup>; ZHAO, Dapeng<sup>1</sup>; TOYOKUNI, Genti<sup>1</sup>; KITAGAWA, Hiroki<sup>1</sup>; NISHIZONO, Yukihisa<sup>2</sup>; INAKURA, Hirohito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 西日本技術開発 (株)

<sup>1</sup>RCPEV, Tohoku Univ., <sup>2</sup>West Japan Engineering Consultants, Inc.

内陸で発生する地震は直下型のために大きな被害をもたらすと考えられ、減災を考える上でその発生メカニズムの解明が必要不可欠であると考えられる。過去に日本列島内陸の地殻内で発生した地震では、沈み込むスラブから脱水された水の関与が指摘されている (Zhao et al., 2010)。そこで本研究では関東・中部地方に焦点を当て、地殻と上部マントルの3次元速度構造と内陸の地殻内で1900年以降に発生したM6以上の被害地震 (宇津, 1999; 宇佐美ほか, 2003) の分布を比較することで、その発生の原因について調査した。

本研究では、気象庁の一元化カタログの2002年6月3日から2013年11月10日までの地震データと、東北大読み取り値の2003年3月10日から2013年6月26日までの地震データから、以下の基準で地震を選んだ。(1) 20点以上の観測点で観測されたもの; (2) 震源の決定誤差が4 kmよりも小さいもの; (3) 研究領域を5 km × 5 km × 1 kmのブロックに分け、各ブロックの中で最もデータ数の多いもの、計21,831個の地震を選出し、877点の観測点による824,742個のP波到達時刻データと、627,664個のS波到達時刻データをインバージョンに使用した。解析手法はZhao et al. (1992)の手法を適用した。グリッド間隔は0.20°間隔とした。

本研究で得られた3次元速度モデルは、火山周辺の下部地殻と上部マントルにマグマと思われる低速度異常を確認することができた。また、太平洋側から内陸に向かうフィリピン海スラブと考えられる高速度異常も確認することができ、場所によってはその直上に低速度異常を確認できた。この低速度異常はフィリピン海スラブの脱水された水と考えることができる。本研究の結果では、地殻内で発生したほぼすべての被害地震の震源の周囲に流体と考えられる低速度異常を見ることができた。これらの低速度異常は沈み込むスラブ起源の水やマグマと考えることができ、地震の発生に深く関与したと思われる。

### 参考文献

宇津徳治, 1999. 地震活動総説. 東京大学出版会.

宇佐美 龍夫・石井 寿・今村 隆正・武村 雅之・松浦 律子, 2003. 日本被害地震総覧. 東京大学出版会.

Zhao, D., A. Hasegawa, S. Horiuchi, 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.

Zhao, D., M. Santosh, A. Yamada, 2010. Dissecting large earthquake in Japan: Role of arc magma and fluids. *Island Arc* 19, 4-16.

キーワード: 地震波トモグラフィー, 地殻流体

Keywords: seismic tomography, crustal fluid

## 富士川河口地域における反射法地震探査 Seismic Reflection Survey around the Mouth of Fuji River

伊藤 忍<sup>1\*</sup>; 山口 和雄<sup>1</sup>; 入谷 良平<sup>1</sup>; 山中 義彰<sup>2</sup>; 伊東 俊一郎<sup>2</sup>; 村田 和則<sup>2</sup>  
ITO, Shinobu<sup>1\*</sup>; YAMAGUCHI, Kazuo<sup>1</sup>; IRITANI, Ryohei<sup>1</sup>; YAMANAKA, Yoshiaki<sup>2</sup>; ITO, Shun'ichiro<sup>2</sup>; MURATA, Kazunori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> サンコーコンサルタント株式会社

<sup>1</sup>GSI, AIST, <sup>2</sup>Suncoh Consultants Co., Ltd

2014 年 2 月に、富士川河口地域において反射法地震探査を実施した。この地域では富士川河口断層帯が確認されている。下川ほか (1996) はこの地域で反射法地震探査を実施し、入山瀬断層を確認している。また、静岡県総務部地震対策課 (1996) は中山断層を確認している。我々の目的は、過去の研究よりもこれらの断層周辺の構造をより詳細に把握することである。調査路線は 2 本である。測線 1 (FJK1) は、富士川河口から西に海岸沿いを通り、向田川に至り、長さは 3.5km 程度である。測線 2 (FJK2) は、富士川右岸を海岸から 2km 程度北のほぼ東西の路線であり、いわゆる蒲原地震山を横切る。FJK2 の長さは 1km 強である。震源は大型パイプレーター (IVI 社製 Y2400) を使用した。FJK1 と FJK2 のスイープ周波数はそれぞれ 10-100Hz と 10-120Hz とした。いずれの測線においても、スイープ長は 12 秒、記録長は 16 秒とした。受振には Sercel 社製 SG-10 (固有周波数 10Hz) とサンコーコンサルタント社製の分散型探鉱機 DSS-12 を使用した。FJK1 の同時展開長は約 1km である。FJK2 は固定展開とした。いずれの測線においても受振器は 5m 間隔で設置した。FJK1 の発震記録例には反射波と推定されるイベントが見られる。しかしながら、これらは堤防によって生成されている可能性もある。今後、詳細な結果を示す予定である。

キーワード: 反射法地震探査, 富士川

Keywords: seismic reflection survey, Fuji River



## P 波及び S 波地震波干渉法より推定される関東堆積盆地内の地震波速度の深さ変化 Depth variation of the P- and S-wave velocities in the Kanto sedimentary basin inferred from seismic interferometry

吉本 和生<sup>1\*</sup>;菅原 勇真<sup>1</sup>;鍛冶川 謙吾<sup>1</sup>;小林 学<sup>1</sup>;増田 啓<sup>1</sup>;武村 俊介<sup>1</sup>;平田 直<sup>2</sup>;酒井 慎一<sup>2</sup>;佐藤 比呂志<sup>2</sup>;中原 恒<sup>3</sup>

YOSHIMOTO, Kazuo<sup>1\*</sup>; SUGAWARA, Yuma<sup>1</sup>; KAJIKAWA, Kengo<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Manabu<sup>1</sup>; MASUDA, Kei<sup>1</sup>; TAKE-MURA, Shunsuke<sup>1</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>2</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>2</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学生命ナノシステム科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 東北大学理学研究科

<sup>1</sup>Nanobioscience, Yokohama City Univ, Yokohama, Japan, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan, <sup>3</sup>Geophysics, Science, Tohoku Univ, Sendai, Japan

### 1. はじめに

関東平野における長周期地震動の発生を正確に評価するためには、関東堆積盆地内の新第三系以降の堆積層の地震波速度の深さ変化を詳細に明らかにする必要がある。しかしながら、深層井での VSP 法調査などを除いて、P 波と S 波を同時に解析対象として、それらの速度の関係を調べた研究の数は限られる。本報告では、堆積層内を伝播する P 波及び S 波の地表-地震基盤間の走時を地震波干渉法によって測定し、この測定結果に基づいて推定した P 波速度と S 波速度の関係の深さ依存性などについて紹介する。

### 2. データと解析

首都圏地震観測網 (MeSO-net) の地震観測点で得られた 160 の近地地震の波形記録を解析した。地震波干渉法では、各観測点の加速度波形を変位波形に変換し、S 波については初動から 10 秒間の SH 成分、P 波については初動から 5 秒間の上下成分について自己相関関数を求めた後に、重合処理により地盤のレスポンス関数 (地盤の地震波反射応答関数) を評価した。さらに、各観測点で得られたレスポンス関数において地震基盤の反射波の波相を検出し、堆積層内を伝播する P 波及び S 波の地表-地震基盤間の往復走時を測定した。

### 3. 結果

上記のデータ解析により、関東堆積盆地内の 266 地点において、P 波及び S 波の地表-地震基盤間の往復走時 (以下、それぞれ  $T_p$  と  $T_s$  とする) の測定に成功した。これまで S 波地震波干渉法に関しては多くの研究報告があるが、本研究の結果は、大深度地盤構造探査手法としての P 波地震波干渉法の有効性を示すものであると言える。測定された地表-地震基盤間の往復走時の範囲は、 $T_p$  で 0.5~4.0 s 程度、 $T_s$  で 2.0~8.0 s 程度であった。全ての測定値を用いて  $T_p$  と  $T_s$  の関係をグラフ化すると、きれいな右肩上がりの比例関係が確認された。グラフの傾きは、左端で 4 程度であるが、 $T_p$  の増大とともに徐々に緩やかになり、右端では 2 弱程度になる。興味深いことに、この  $T_p$  と  $T_s$  の関係は、岩槻の深層井における VSP 法調査 (Yamamizu 2004) の測定結果に極めて類似するものであった。このことは、岩槻における地震波速度構造を関東堆積盆地の標準的な構造であると指摘した Yoshimoto and Takemura (2014) の報告と整合的である。この結果をもとに、今回の測定結果を解釈すると、堆積層の P 波速度 ( $V_p$ ) と S 波速度 ( $V_s$ ) の比は、深さ約 0.5 km 以浅では平均値として 4 程度であるが、深さとともに漸減し、深さ約 2.0 km 以深では 2 弱程度になると言える。

### 謝辞

本研究では、首都圏地震観測網の地震波形記録を使用しました。本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました。ここに記して感謝します。

キーワード: 地震波干渉法, 関東堆積盆地, 堆積層構造, 地震波速度構造

Keywords: seismic interferometry, Kanto sedimentary basin, sedimentary structure, seismic velocity structure

## 福島-山形県境地域の地震活動と減衰構造 Seismic activity and attenuation structure in fukushima-yamagata prefectural border area

宮垣 敬一郎<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>1</sup>  
MIYAGKI, Keiichiro<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学院理学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Science, Chiba University

福島-山形県境地域では、東北地方太平洋沖地震後から急激に地震活動が活発化した。これらの地震の詳細な発生場所とメカニズム、活発化の原因を明らかにするために、防災科学技術研究所が設置している高感度地震観測網 Hi-net の定常地震観測点で得られた M2.0 以上のイベント波形データを解析して、本震前後の期間で詳細な震源決定とメカニズム解を求めた。解析期間は東北地方太平洋沖地震前の 2002 年 6 月 3 日から 2011 年 3 月 10 日と以後の 2011 年 4 月 1 日から 2011 年 8 月 31 日である。その結果、本震発生以後は、それ以前の期間に起こっていた震源域とは異なる領域で活発化しており、それらの震源が 5 つのクラスター状に分布することが分かった。地震活動が活発化した領域の北側には活動度 A、南側には活動度 B の活断層が存在することが知られており、クラスターによっては活断層の断層面の走向・傾斜に近い面状に震源が分布するものがあった。一方で、活断層の断層面と共役な関係にある面状に震源が分布するクラスターも存在した。また、地震活動を詳細にみるとクラスターによっては、時間経過に従って震源が緯度、経度、深さ方向に一定の方向、速度で移動する現象が見られた。また、本震以前、以後ともに逆断層型のメカニズム解をもつ地震が卓越していた。さらに、地震発生にマグマや水が関与している可能性を検討するため、温度や流体の存在などに敏感な指標である Q 値の推定を試みた。P 波と S 波の速度振幅スペクトルの比をとって  $Q_p/Q_s$  値を推定する方法を用いた。震源域近傍の 9 観測点で得られた 152 個の地震の P 波・S 波スペクトル 898 個について震源と観測点を結ぶ経路上の平均的な  $Q_p/Q_s$  値を計算した。また、この値を求めるために Tsumura et al.(2000) で推定されたこの地域の  $Q_p$  値も使用した。その結果、震源域から水平方向に 20 km 以内の相対的に近い観測点に向かう経路で高  $Q_p/Q_s$  値を示した。遠い観測点は低  $Q_p/Q_s$  値を示すため、この地震活動が活発化した領域の浅部付近に高減衰をもたらす要因があると考えられる。

キーワード: Q 値, 減衰, 福島-山形県境地域, 地震活動, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: Q value, attenuation, In Fukushima - Yamagata prefectural border area, seismicity, off the Pacific coast of Tohoku earthquake

## 国際極年での広帯域地震観測による東南極大陸の地殻・上部マントル構造 Crustal and upper mantle structure of East Antarctica, derived from broadband seismic deployments at the International P

金尾 政紀<sup>1\*</sup>; 坪井 誠司<sup>2</sup>

KANAO, Masaki<sup>1\*</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Deployment of broadband seismic stations on the Antarctica continent have been an ambitious project to improve the spatial resolution of seismic data across the Antarctic Plate and surrounding regions. Several international collaborative programs were conducted in Antarctica during the International Polar Year (IPY 2007-2008). The Antarctica's GAMBURTSEV PROVINCE (AGAP; IPY #147), the GAMBURTSEV MOUNTAIN SEISMIC EXPERIMENT (GAMSEIS), a part of AGAP, and the POLAR EARTH OBSERVING NETWORK (POLENET; IPY #185) were major contributions in establishing a geophysical network in Antarctica. The AGAP/GAMSEIS project was an internationally coordinated deployment of more than 30 broadband seismographs over the crest of the Gamburtsev Mountains (Dome-A), Dome-C and Dome-F area. The investigations provide detailed information on crustal thickness and mantle structure; provide key constraints on the origin of the Gamburtsev Mountains; and more broadly on the structure and evolution of the East Antarctic craton and subglacial environment. In addition to the PASSCAL observation system by USA, original coordinated systems were developed by Japan (at Dome-F (GM07) and GM06 stations), as well as by other groups in China and France. Regarding Japanese instrument system, the same sensor and data logger as used by US/PASSCAL were utilized, but the electric power supply system and enclosures were developed independently. Data were recorded in MiniSEED format, a commonly accepted international standard, to ease analysis. Logistical and staff support were provided by the US researchers and staff at AGAP-S camp in the installation of the Japanese stations GM06 and GM07. From GAMSEIS and POLENET data obtained, local and regional seismic signals associated with ice movements, oceanic loading, and local meteorological variations were recorded together with a significant number of teleseismic events. In this presentation, in addition to the Earth's interiors, we will demonstrate some of the remarkable seismic signals detected during IPY that illustrate the capabilities of broadband seismometers to study the sub-glacial environment, particularly at the margins of Antarctica. In future, monitoring stations inland ice plateau of Antarctic, such as Dome-F, firmly attribute a crucial role in the Federation of Digital Seismographic Network (FDSN) in southern high latitude.

キーワード: 南極大陸, 国際極年, 地殻構造, 広帯域地震計, 国際共同観測

Keywords: Antarctica, International Polar Year, crustal structure, broadband seismographs, international project

## Seismo-stratigraphy and structure of the Adventure Plateau (Sicily Channel): an example of old data recovery

### Seismo-stratigraphy and structure of the Adventure Plateau (Sicily Channel): an example of old data recovery

CIVILE, Dario<sup>2</sup> ; ALP, Hakan<sup>1\*</sup> ; LODOLO, Emanuele<sup>2</sup> ; CENTONZE, Jacques<sup>2</sup>  
CIVILE, Dario<sup>2</sup> ; ALP, Hakan<sup>1\*</sup> ; LODOLO, Emanuele<sup>2</sup> ; CENTONZE, Jacques<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Istanbul University Department of Geophysics, <sup>2</sup>Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

<sup>1</sup>Istanbul University Department of Geophysics, <sup>2</sup>Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

We present here a seismo-stratigraphic and structural study of the Adventure Plateau, the north-westernmost sector of the Sicily Channel. This bank, where water depths do not generally exceed 150 m, is the shallowest part of the whole Sicily Channel, with relief which sometime rises up to less than 50 m. This analysis is based on a large set of multichannel seismic profiles and well information acquired mostly for commercial purposes in the 70s and 80s. Despite the general poor quality and consistency of the data used, it was possible to draw with sufficient detail the various seismo-stratigraphic sequences, calibrated with well information. The sedimentary sequence crossed by wells in the Adventure Plateau comprises deposits ranging from Triassic to Plio-Quaternary. A broad lithological distinction can be made between the sequences ranging from Triassic to Middle Miocene, predominantly carbonate, and the sequences ranging from Tortonian to Quaternary, predominantly siliciclastic. Moreover, we observe in the wells the presence of various hiatuses, particularly at the top of the Miocene and at the Early Jurassic. Three main structural domains have been identified within the Adventure Plateau: (a) a compressional belt in the N-W part of the bank, deformed during Middle-Late Miocene, and corresponding to the SW-trending offshore part of the Maghrebian Chain; (b) the Adventure foredeep of the Maghrebian Chain, located in the central part of the bank, and filled by over 2000 m of siliciclastic Late-Miocene to Quaternary deposits; (c) the Adventure foreland of the Maghrebian Chain, corresponding to the S-W part of the bank, affected from the Early Pliocene by a strong extensional phase associated to the Pantelleria Graben rifting. The eastern boundary of the Adventure Plateau is part of a broadly NS-trending, lithospheric-scale transfer zone which separates the Sicily Channel into two distinct sectors. This study shows the potential and capability of old data in areas where there is scarce geophysical knowledge. They represent an important source of information, especially for the shallow water areas of the Sicily Channel that are still poorly known in terms of geology and stratigraphy.

キーワード: Sicily Channel, Adventure Plateau, seismo-stratigraphy, synthetic seismograms, structural setting  
Keywords: Sicily Channel, Adventure Plateau, seismo-stratigraphy, synthetic seismograms, structural setting



## イメージ領域地震波干渉法によるタイムラプス調査の可能性 Possibility of timelapse survey by seismic interferometry in image domain

白石 和也<sup>1\*</sup>  
SHIRAISHI, Kazuya<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>(株)地球科学総合研究所  
<sup>1</sup>JGI, Inc.

### (1) イメージ領域の地震波干渉法

地震波干渉法 (seismic interferometry, SI) は、異なる受振点の観測波形を相互相関処理して新たな地震波形記録を合成する、速度など媒質の情報とは独立したデータ領域における処理であるというのが一般的な理解である (データ領域 SI)。この場合、地下構造イメージングのためには、SIにより合成された仮想震源記録に対してその後の処理が必要である。一方、速度情報に基づくモデリングによって観測波形記録から外挿された波動場を相関処理して構造を直接イメージングするのは、イメージ領域において地震波干渉法を適用することと理解できる (イメージ領域 SI)。このようにイメージ領域 SI には、観測波形記録に加えて媒質の情報 (速度モデル) が必要となる。しかし、速度モデルを如何に準備するかはさておき、構造のイメージングまで含めて考えれば、イメージ領域 SI とデータ領域 SI では必要な情報は同じである。

反射法地震探査におけるリバースタイムマイグレーション (reverse time migration, RTM) の原理は、発震点から震源波形を順伝播させた波動場と受振点から観測波形を逆伝播させた波動場について、同一時刻における両者の相関結果を時間積分することで地下の反射面や散乱体を結像させることである (イメージングコンディション)。この RTM に SI の概念を導入すると、パッシブな観測波形記録について信号を含む任意の時間窓で記録を切り出し、仮想発震点となる受振点から観測波形記録を順伝播させ受振点側からは観測波形記録を逆伝播させることで、イメージングコンディションを満足する点では反射面や散乱体が結像する。

パッシブな観測の場合、受振点毎に波動場は独立ではないため、同時に取得された一組の観測記録に対する順伝播と逆伝播は、全受振点から同時にそれぞれ一回限り行えばよい。データ領域 SI に基づくイメージングの場合、観測記録毎に相互相関処理を行った後に全てを加算し、各受振点位置で合成された仮想震源記録はそれぞれ独立なものとして利用する必要があるため、最終的に一度きりの RTM であるものの仮想震源の数だけ順伝播と逆伝播を繰り返す必要がある。従って、同じ速度モデルと RTM アルゴリズムを用いる想定では、条件次第ではイメージ領域 SI の方が全体の計算コストを抑えることができる。その他の特徴的な違いは、データ領域 SI では干渉処理によって観測点に情報が集約されるのに対して、イメージ領域 SI では波動場外挿によって情報が分散された後にモデル上で干渉処理が行われる。この違いによる効果については今後検討したい。

### (2) パッシブなタイムラプス調査への適用可能性

近年、各方面で常設型観測機器等を用いたパッシブな地震観測が行われつつある。また、タイムラプス調査では、自然または人為的な要因で地下の一部が変化するかしないかの把握が目的である。制御震源による調査では発震点と受振点ともに高い再現性を保持可能だが、パッシブな観測では震源の分布やメカニズムについて再現性が全く保証されない。

本研究では、イメージ領域 SI を用いて、パッシブなタイムラプス調査による構造イメージの再現性と地中で生じる物性変化の抽出可能性について、数値シミュレーションによる検討を行った。今回は第一段階として、音響場において地中の震源は全て同じメカニズムであると単純な仮定を設けた。震源分布と媒質について一方または両方に変化を与えたモデルに対する観測波形合成とイメージングを行い、いずれにも変化を与えないモデルから得た結果との相違について、複数の再現性指標を用いて評価を行った。修正を加えた SEG/EAGE の overthrust モデル (15km × 5km) を用いて、上述の各モデルについて地中にランダムに配置した震源 (P 波震源、10Hz リッカーウェーブレット) に対する 151 点の地表受振点における観測波形記録を 128 組ずつ合成し、RTM にはスムージングした速度モデルを共通して用いた。媒質の変化として、モデル中央付近の背斜部に鉛直方向には波長以下のサイズである楕円状 (1km × 0.1km) に 10% 速度低下を与えた。

シミュレーション結果からは、解釈に足る大局的な構造は再現されたものの、再現性指標を用いて評価すると、本手法によって媒質変化を抽出できる可能性がある一方で、震源分布の違いによる変化も無視できないほど大きいことがわかった。媒質の変化のみを捉えるには、それ以外の影響を取り除く手段を講じる必要がある。また、現実の問題では、震源分布以外に、メカニズムの違い、弾性体の効果、ノイズの存在などの影響で、なお困難を伴うことが予想される。

キーワード: 地震波干渉法, タイムラプス, リバースタイムマイグレーション  
Keywords: seismic interferometry, timelapse, reverse time migration

## 相似地震解析による東北地方太平洋沖地震 M9 に伴う P 波・S 波速度の時間変化 Temporal changes of P and S wave velocities in NE Japan associated to the M9 Tohoku-Oki earthquake from doublets analyses

pacheco-vivero karim<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>1</sup>; 中原 恒<sup>1</sup>  
PACHECO-VIVERO, Karim<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>1</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 理学部 地球物理学

<sup>1</sup> Geophysics, Science, Tohoku University

Application of seismic interferometry using ambient noise and coda waves of regional earthquakes have shown notable seismic wave velocity decreases associated with the occurrence of the M9.0 Tohoku-Oki earthquake. These analyses can be generally attributed to S-wave velocity changes at shallow structures because these waves are dominant in surface waves. On the other hand, analyses of doublets have also succeeded in detecting temporal changes of direct arrival times of P waves as well as those of S waves. Also, the seismic rays pass deeper portions. However as the medium changes by the M9 earthquake are widely observed in East Japan, it is difficult to separate the observed travel time differences into the effects of hypocenter parameters and the travel time differences caused by the change in the medium beneath the stations. In this study, therefore, we develop a new method to determine temporal changes of P and S wave velocities beneath stations by simultaneously determining hypocenter parameters of doublets. We relate travel time differences of doublets to site factors at each station and the differences of hypocenter parameters. We further give a constraint in which the sum of the differences in origin times of the doublets analyzed is set to be zero, since the doublets are considered to randomly occur. As a result, our inverse problem estimates the model parameters, namely the site factors for P and S waves at each station and the relative locations of hypocenters and origin times of the doublets. Seismic data at 454 stations of the Hi-net seismic network in East Japan are used. We analyze 35 doublets with magnitudes ranging from 3.7 to 4.7 and depths from 30 to 60 km located offshore in East Japan for the period from 2005 to 2013. The seismic data are band-pass filtered between 1-2 Hz and travel time differences of arrival times of P and S waves are measured by applying a cross-spectrum method. The inversion results show that hypocenters of doublets differ by about 0.05 km and 0.12 km at a maximum each other in the horizontal and vertical directions, respectively. Even when we change the data set of doublets, the relative hypocenter locations do not significantly change, which indicates our inversion method is stably determining the hypocenter parameters. For the site factors, we find significant delays of arrival times as large as 0.04 s for the S-waves and about 0.01 s for the P-waves. Time delays are observed mainly at stations located widely in Tohoku region between 37 and 40 degrees in latitude, which are west from the M9 fault zone. The observed spatial distributions of time delays seem not to be well matched with the regions strongly shaken, which are located mostly in the eastern area of Tohoku region, or the regions where seismic velocity reductions at shallow medium are detected from analyses of bore-hole and ground surface records. These discrepancies suggest that the time delays detected from doublets originate from different regions, maybe deeper portions beneath Tohoku region.

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, Velocity change, Similar earthquakes, Direct P and S waves

## 地震波干渉法に基づく農業用フィルダム等土構造物の地震波伝播特性評価 Estimation for seismic wave propagation property of soil structure based on seismic interferometry

黒田 清一郎<sup>1\*</sup>; 増川 晋<sup>1</sup>; 田頭 秀和<sup>1</sup>  
SEIICHIRO, Kuroda<sup>1\*</sup>; MASUKAWA, Susumu<sup>1</sup>; TAGASHIRA, Hidekazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 農研機構 農村工学研究所

<sup>1</sup> National Institute for Rural Engineering, NARO

地震波干渉法は地盤だけではなくビル等の比較的大きな公共構造物の地震波伝播特性評価にも適用されてきた。また同手法の震源を用いることなく、受動的な観測記録から繰り返しの評価が可能であるという特徴と、高い再現性や微小変化に対する高い感度等の特徴から、伝播特性変化のモニタリングにも用いられて来た。

本報では同手法のフィルダム堤体等の土構造への適用性を検証するために、特に地震計が整備されているフィルダム等に注目し、デコンボリューション干渉法の適用性の検討を行なった結果について述べる。

地震計が基盤に相当する監査廊、堤体中間部、堤頂上に設置してある農業用フィルダムにおいて観測された地震データに対して、デコンボリューション干渉法の適用を行なった。得られた時間領域の応答波形は、基盤から堤頂へと上方進行波が伝播する様相を示し、またその波形の初動ピークを上昇進行波の伝播とみなしたときの伝播時間と速度は、基盤-堤頂間のスペクトル比のピーク（卓越周期）と調和的な結果となった。このことからフィルダムにおいても地震波伝播特性を地震計観測記録へのデコンボリューション干渉法によって評価できるものと考えられた。

土構造物はその材料である土の特徴から、強震動等の影響による剛性等の変化により、地震波伝播特性も大きく変化することが予測された。そこで土堤体模型の遠心力载荷振動実験において、圧縮変形や強い振動に起因する地震波伝播特性の変動の実態を明らかにするために、同手法の実験時の振動データへの適用性を検証した。遠心場における人工的な強制加振による振動時のデータだけではなく、非加振時の雑振動データからも地震波伝播特性を評価することができた。これにより、遠心力増加時の圧密・圧縮の進行に伴う剛性の上昇過程を地震波伝播速度の増大として捉えることができた。

また強制加振により、加振時に土の非線形性により一時的に見かけ上地震波伝播速度が低下するだけではなく、加振前に比べて加振完了後の剪断波速度が低下することが確認された。その後時間の経過とともに伝播速度は上昇し、剛性が回復する過程を確認できた。人工的な加振の強度の増大にともない、速度低下は顕著なものとなったが、同様に回復過程も確認することができた。400Gal相当の加振により土模型において亀裂が発生した後は回復過程は鈍化した。

以上の結果をもとに、地震波干渉法とその繰り返し計測（モニタリング）による、フィルダムやため池等土構造物の地震波伝播特性評価、および長期供用時の経年変化監視への適用性について検討する。

キーワード: 地震波干渉法, 土構造物, 堤体, 剪断波速度, 遠心载荷振動実験, フィルダム

Keywords: Seismic interferometry, Soil Structure, Dam body, Dike, Shear velocity, Centrifuge test, Fill dam



## 箱根火山の火山活動に伴う雑微動による自己相関関数の時間変化 Temporal changes of auto-correlation functions associated with the volcanic activity in Hakone volcano, central Japan

行竹 洋平<sup>1\*</sup>; 上野 友岳<sup>2</sup>; 本多 亮<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>; 原田 昌武<sup>1</sup>; 里村 幹夫<sup>1</sup>  
YUKUTAKE, Yohei<sup>1\*</sup>; UENO, Tomotake<sup>2</sup>; HONDA, Ryou<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>; HARADA, Masatake<sup>1</sup>; SATOMURA,  
Mikio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### 1. はじめに

雑微動の自己相関関数 (ACF) の時間変化は、地殻構造の時間変化をモニタリングする有用なツールとなりうる。大地震の体積変化あるいは、強震動による表層地盤の速度変化の検出のみならず、地熱地帯や火山地域における群発地震活動に伴う速度変化の検出例も報告されている (例えば、Wegler et al., 2009; Maeda et al., 2010; Ueno et al., 2012)。本研究では、活発な地震活動が頻発する箱根火山において ACF の時間変化を求め、火山活動との関係について調査した。

### 2. 箱根火山の群発地震活動

箱根火山は伊豆衝突帯北部に位置し、周囲を直径約 15km の外輪山に囲まれる第四紀の活火山である。箱根カルデラ内では、群発地震が頻繁に発生しており、近年では 2001 年、2006 年、2008~2009 年、2011 年及び 2013 年に特に活発な群発地震活動が発生した。このうち、2011 年東北地方太平洋沖地震直後に発生した地震活動を除く、それぞれの地震活動に対応して、周辺の国土地理院 GNSS 観測点において山体の膨張を示す地殻変動が観測された。こうした地殻変動は、カルデラ下深さ 10km 付近における、球状圧力源の変動もしくはダイクより説明することができる (例えば、代田ほか、2009; 原田ほか、2009)。加えて、2001 年及び 2013 年の地震活動時においては、カルデラ内に設置されている傾斜計にも地殻変動が観測され、これらの変動源として浅部での開口クラックが推定されている (例えば、代田ほか、2009; 宮岡ほか、2013)。深部のダイクについてはマグマの貫入もしくは体積増加、浅部の開口クラックについては熱水の貫入を反映したものとして考えられている (代田ほか、2009)。マグマや熱水の貫入や体積増加に伴い、その周辺の数構造が変化すると予想されるため、ACF においても変化が生じることが期待される。

### 3. データ及び手法

箱根カルデラ内及び周辺に設置された、神奈川県温泉地学研究所、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁観測点における連続地震波形データを解析に使用した。2013 年 1 月~3 月の活発な地震活動に関係した速度変化の検出をターゲットとし、2012 年 1 月から 2013 年 12 月までの 2 年間の波形データを使用した。上下動成分の連続地震波形データに 1-3Hz のバンドパスフィルター処理を施すとともに、振幅値を 1bit に規格化した。1 時間毎の ACF を計算し、それを 24 時間分足し合わせ 1 日毎の ACF を求めた。さらに、より安定した ACF を得るために、1 週間分の ACF をスタッキングした。このようにして得られた 1 日毎の ACF に対して、時間遅れ 4-15 秒に見られる波群の変化が観測点周辺の速度構造の微小な変化によるものと仮定して、その速度変化量を全期間の ACF のスタッキングからもとめたりファレンス ACF との比較により求めた (例えば、Wegler et al., 2009)。

### 3. 結果と解釈

カルデラ内に設置された観測点のうち、駒ヶ岳観測点と二の平観測点において、群発地震活動に先行して 2012 年 12 月上旬ごろから緩やかな速度低下が始まり、2013 年 6 月頃にかけて 0.4%~0.6% 低下した。カルデラ内の大涌谷噴気地帯近傍に設置されている大涌谷観測点では、地震活動が活発化した 1 月下旬頃から 0.8% 程度の急激な速度低下が見られた。それ以外の観測点については、変動幅の大きな速度変化が常時から生じており、一連の活動に関連する速度変化は検出できなかった。駒ヶ岳観測点と二の平観測点の速度低下については、箱根火山周辺の国土地理院 GNSS データによる山体の膨張を示す基線長変化の開始時期と一致している。大涌谷観測点の速度変化については、地震活動の活発化時期並びに傾斜変動の開始時期直後から始まっている。こうしたことから、火山活動やそれに伴う地殻変動変化に伴い、ACF が時間変化した可能性が示唆される。ACF の時間変化の原因には地殻内へのマグマなどの貫入 (例えば、Maeda et al., 2010) やマグマ貫入に伴う開口クラックで生じたひずみ変化によるもの (例えば、Ueno et al., 2012) が考えられる。今後は、地殻変動源によるひずみ分布や ACF のラグ時間毎の位相遅れを調べることにより、速度変化の原因についてより詳細な議論を行う予定である。

### 謝辞

本研究では、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁観測点の地震波形データを使用させていただきました。東京大学地



SSS27-04

会場:411

時間:4月29日 09:45-10:00

震研究所前田拓人博士から自己相関関数の計算に関するアドバイスをいただきました。

キーワード: 自己相関関数, 火山活動, 箱根火山

Keywords: auto-correlation functions, volcanic activity, Hakone volcano

## 2011年東北地方太平洋沖地震における津波の分散性と非線形性 The roles of dispersion and nonlinear effects in the 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami

齊藤 竜彦<sup>1\*</sup>; 稲津 大祐<sup>1</sup>  
SAITO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>; INAZU, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

津波の伝播過程の理解を深めることは、信頼度の高い震源過程推定や津波予測に不可欠な高精度グリーン関数を得るためだけでなく、波動現象の基礎研究として興味深い。本研究では、波動現象としての2011年東北地方太平洋沖地震津波（以後、東北地震津波）に注目し、波の分散性と非線形性が伝播過程で果たした役割を解明することを目的とする。まず、高分解能の津波波源モデルと非線形分散波方程式に基づく差分シミュレーションによって、沿岸・沖合で実際に観測された津波波形記録、そして、仙台平野の浸水域を忠実に再現した。これにより、使用する津波波源と伝播方程式の妥当性を確認した。さらに、非線形分散波方程式の代わりに、分散現象をモデル化できない非線形長波方程式、そして、非線形現象をモデル化できない線形分散波方程式を使用し、シミュレーション結果と比較することで、東北地震津波における分散性と非線形性の影響を評価した。その結果、以下の知見を得た。太平洋を伝播する津波のモデル化においては分散性を考慮することが非常に重要であり、分散性を考慮しない場合、津波最大波高分布を過大評価する。実際、外洋（水深>1000 m）において最大波高(>2m)を得た観測点の津波波形記録を正確に再現するには分散性を考慮する必要があった。非線形現象は沿岸浅部での津波の振る舞いを再現するために必要であることが知られている。沖合に位置する観測点であっても、津波波形記録の後続波群は陸から反射する津波で構成される。そのため、非線形現象を正確に考慮することで沖合波形記録の再現性が高まることを確認できた。特に、岩手沖で観測された東北地震津波の場合、陸地の浸水を考慮することよりも方程式の非線形項を考慮することのほうが、沖合波形の後続波を忠実に再現することに重要な役割を果たしている。

キーワード: 津波, 分散, 非線形, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: tsunami, dispersion, nonlinear wave, the 2011 Tohoku-Oki earthquake

## 地すべりや山体崩壊に伴う津波の数値解析 Numerical simulation of tsunamis due to a landslide

吉川 諒<sup>1\*</sup>; 柿沼 太郎<sup>1</sup>  
YOSHIKAWA, Ryo<sup>1\*</sup>; KAKINUMA, Taro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

MPS法を適用し、地すべりや山体崩壊に伴う津波生成の数値解析を行なった。桜島の山体崩壊に伴う土砂流入を想定した場合、ここで設定した条件では、最大で10 m強の津波高さが算出された。津波高さは、流入土砂の総質量、初期形状の高さ及び長さや、流入速度に依存する。また、水面下で生じる地すべりでは、水に対する初期の相対的な位置エネルギーが大きくないため、津波高さがあまり大きくならない。

キーワード: 津波, 地すべり, 山体崩壊, MPS法  
Keywords: tsunami, landslide, sector collapse, MPS method

## 震源イメージングに対する点広がり関数 Point spread functions for earthquake source imaging

中原 恒<sup>1\*</sup>; ヘイニー マシュー<sup>2</sup>  
NAKAHARA, Hisashi<sup>1\*</sup>; HANEY, Matthew<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> アメリカ地質調査所  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku Univ., <sup>2</sup> U.S. Geological Survey

### はじめに

近年、地震の震源イメージングにおいて、波形インバージョン法 [例えば Hartzell and Heaton (1983)] に加えて、バックプロジェクション (BP) 法 [例えば Ishii et al. (2005)], 時間反転 (TR) 法 [例えば Larmat et al. (2006)], ハイブリッドバックプロジェクション (HBP) 法 [Yagi et al. (2012)] などの手法が適用されている。また、それらの手法間の理論的な関係も明らかにされている [例えば Kawakatsu and Montagner (2008), Fukahata et al. (2013)]。本研究では、光学分野で用いられる点広がり関数 (Point Spread Function; PSF) の概念を用いれば、震源イメージングの物理的意味を理解しやすくなることを示す。また理想的な場合には、震源イメージングの PSF は、地震波干渉法の問題として解釈できることを示す。

### 定式化

(運動学的) 震源インバージョンとは、観測される波動場から、既知のグリーン関数を用いて、震源断層面上のすべり量分布を推定することであり、その基礎となる観測方程式は表現定理に基づいている。この手法は震源過程解析の正攻法と考えるとよいと思うが、もう少し簡略化された震源イメージング法もあり、BP 法、HBP 法、TR 法などがこれにあたる。Claerbout (2001) の物理探査の教科書によれば、イメージングとは、観測方程式にグリーン関数のアジョイントをかける操作として数学的に定義されている。つまり、各観測点の波動場とグリーン関数との相互相関をとり、それをすべての観測点について重畳したものが、求められる震源イメージとなる。Fukahata et al. (2013) により指摘されているように、この操作は HBP 法とかなり近い。この震源イメージが、観測点数の制限や分布の片寄りなどのため、どれだけ真の震源過程からずれる (ぼける) かを示すのが、PSF である。この PSF は、観測点から震源の 2 点までのグリーン関数の相互相関をすべての観測点について重畳したものととして、表現することができる。

震源と観測点を空間的に離散化すれば、観測方程式を行列で書き下すことができる。正規方程式の導出には、観測方程式の両辺にグリーン関数のアジョイント (随伴) 行列をかければよい。こうして得られる正規方程式を解くことが震源インバージョンである。そして、これは PSF を補正することによって、真の震源過程を推定することを意味する。また、その他の震源イメージングの手法では、PSF の影響を補正できていないことになり、この影響によるゴーストに注意する必要がある。

### PSF の地震波干渉法による解釈

以下では、震源イメージングの PSF をさらに物理的に解釈することを考える。そのため、理想化された状況であるが、観測点が震源をぐるりと取り囲むように連続的に分布していると仮定する。そのときに、点広がり関数は、震源の 2 点へのグリーン関数の相互相関を全観測点について重畳したものであることを思い出そう。震源と観測点とを入れ替えるグリーン関数の相反性を利用すると、点広がり関数は、ぐるりと取り囲んだ震源に対して、2 点の観測点間の波形の重畳された相互相関を求める問題に置き換えることができる。これは地震波干渉法によるグリーン関数復元の問題と完全に等価である。これにより、震源イメージングの点広がり関数は、地震波干渉法の問題として解釈可能になる。さらに具体的に考察を進めるため、2 種類の震源を考える。まずはシングルフォース震源の場合である。この場合は、点広がり関数は、2 点間の (シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部に等しいことが分かる。この結果は、全く等価ではないが類似の TR 法の観点から、すでに Fink (2006) によって指摘されている。次に、モーメントテンソル震源を考える。この場合は、点広がり関数が、(シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部を、2 点の観測点座標で、それぞれ 1 階ずつ空間偏微分したものに对应することが導かれた。これは、本研究により初めて明らかになった結果である。また 2 種類の震源のいずれの場合にも、地震波干渉法が成立する場合には、震源イメージは、真の震源過程を 1 回時間積分した結果になることが示唆される。

### まとめ

震源イメージングの問題を PSF の概念を利用して考察した。その結果、震源インバージョンでは PSF の影響を補正した震源イメージが得られること、他のイメージング手法では PSF の影響が残るため、データの適切な重みづけを行うなどゴーストの影響に注意する必要があることが分かった。また、グリーン関数の相反性を利用すると、PSF は地震波干渉法の問題として解釈可能であることも明らかになった。本研究は、震源インバージョン法の意味をよく理解する上で有益であろう。



---

SSS27-07

会場:411

時間:4月29日 11:00-11:15

キーワード: 震源イメージング, 点広がり関数, 地震波干渉法

Keywords: Earthquake source imaging, Point spread functions, Seismic interferometry

## 減衰媒体におけるスイープ波形の伝播過程とその利用 Analysis and application of wave propagation process of sweep signals in attenuative media

松島 潤<sup>1\*</sup>

MATSUSHIMA, Jun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

The sweep signal is the most extensively used land seismic exploration technique. In conventional data processing using sweep signals, a received trace is cross-correlated with source sweep to convert the extended sweep signal into a pulse signal. For attenuation estimation, a time window is often used to compute the frequencies of the direct-arrival waveforms. Uncorrelated sweep signals are useful in the discussion of harmonics simply because the uncorrelated data are one of the few situations in which we commonly input a nearly pure frequency into the earth. Our previous study proposed a method that enables accurate measurement of ultrasonic attenuation using sweep signals under the assumptions that velocity dispersion can be ignored and the quality factor ( $Q$ ) is not dependent on frequency. This method is independent of the effect of windowing while the windowing effect underestimates the attenuation results due to a spectral leakage effect. In most cases, however, the presence of attenuation is accompanied by velocity dispersion because of causality. The presence of velocity dispersion causes attenuation to be disturbed, although the proposed method is not so sensitive to the presence of velocity dispersion. The present paper elucidates the wave propagation process of sweep signals in attenuative media with velocity dispersion to develop the method which can take the effect of dispersion into account. We obtain a time-scale representation of sweep signals by using the continuous wavelet transform method to perform a time-series analysis of a seismic trace that decomposes the trace into its respective amplitude and phase components in both the frequency and time domains.

キーワード: 地震波減衰, 速度分散, スウィープ波形

Keywords: Seismic attenuation, velocity dispersion, sweep waveform

## 不均質な岩石試料内の3次元波動伝播シミュレーション 3D numerical simulation of seismic wavefield in inhomogeneous rock samples

吉光 奈奈<sup>1\*</sup>; 古村 孝志<sup>1</sup>; 前田 拓人<sup>2</sup>  
YOSHIMITSU, Nana<sup>1\*</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>1</sup>; MAEDA, Takuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大院情報学環, 地震研, <sup>2</sup> 東大地震研

<sup>1</sup>CIDIR/ERI, The Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>ERI, The Univ. of Tokyo

### はじめに

岩石試料の透過波実験を3次元差分法(FDM)による波動伝播のシミュレーションで再現し、実測波形に見られる特徴的な位相の起源を、計算波形の比較によって同定した。室内岩石実験では、試料内部の構造変化や亀裂生成の様子を詳細に観察するために透過波を用いたモニタリングが行われてきた(例えば, Yukutake et al., 1989)。しかし、実験室で通常扱われる岩石試料は一辺が数cm程度と小さく、記録された透過波には試料の端面で何度も反射したと考えられる多数の後続相が含まれる。そのため、これまで行われてきた解析は、後続相の影響を受けない初動付近の波を用いたものが一般的だった。後続相の成因を明らかにし、波形全体を解析に積極的に利用できるようなれば、得られた透過波形から媒質の構造をより詳細に評価することが可能になると期待される。

### 解析手順

まず、岩石実験における実測波形の取得では、Westerly 花崗岩試料の周表面上に貼付した圧電素子に対してステップ電圧を与え、透過波による試料表面の振動をレーザー Doppler 振動計によって速度波形として記録した。震源位置は円筒軸方向の中央とした。

シミュレーションでは、実験室で集録された波形との比較をおこなうため、縦横比1:2の円柱形試料に相当する解析領域を、格子間隔100 $\mu$ mで512 $\times$ 512 $\times$ 1024グリッドに離散化してモデル媒質とした。岩石試料の持つ不均質性を計算モデルに取り入れるために、マイクロフォーカスX線CTスキャナを用いてWesterly花崗岩の試料内部を撮影し、X線吸収係数と密度・弾性波速度が比例関係にあると仮定して、計算モデルの各グリッドにおける密度(2.5-3.1g/cm<sup>3</sup>)、P波速度(5.0-6.0km/s)、S波速度(2.8-3.5km/s)を与えた。岩石実験に用いた圧電素子の動きを模したシングルフォースの点震源を入力として、3次元FDM計算により波動場を計算した。得られた計算波形には、圧電素子の感度帯域と同じ50kHz-2MHzのバンドパスフィルタをかけて、実測波形との比較をおこなった。

### 結果・議論

計算によって得られた波動場は、速度の発散場と回転場からP波とS波の速度振幅に分離して評価した。波動伝播のアニメーションから、試料内部に入射した波が曲率のある試料の周境界で反射波(PP, SS, PPP, SSS等)やその変換波(PS, SP, PPS等)を生成しながら伝播していく様子が確認できた。震源から出た波が試料周境界で反射して震源方向へ戻っていくと同時に、試料の上下端で反射した波が試料全体を覆うように伝播し、別起源の反射波と変換波が重畳することによって、時間の経過とともに複雑な波動場が形成されていく。また、鉱物粒子による不均質性による散乱が試料全体に見られたが、現時点で仮定した構造下ではこれらの反射・屈折波が波動場へ与える影響は限定的であった。

震源と同一平面内にある観測点で得られた速度波形を、動径方向に回転して実測波形との比較を行ったところ、波形全体の位相形状は比較的よく一致することが確認できた。観測波形には、大きな振幅を持つ2つの特徴的な位相が見られたが、計算波形との比較からこれらが直達P波とSS波であることがわかった。さらに、SS波到達後の複雑な波形は、主として試料周境界上で何度も反射・変換されたS波によって構成されていることが明らかになった。

キーワード: 透過波, 反射波, 岩石試料, 数値シミュレーション

Keywords: transmitted wave, reflected wave, rock sample, numerical simulation

## 深さ依存速度構造下の大規模地震波伝播数値シミュレーションのための曲線座標系 差分法 Curvilinear grid finite difference method simulation of seismic wave propagation for depth-dependent velocity structure

前田 拓人<sup>1\*</sup>  
MAEDA, Takuto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>ERI, The University Tokyo

深さに応じてグリッドサイズが滑らかに増大するような曲線座標系を用いた差分法に基づく地震動シミュレーションを提案する。地震波伝播シミュレーションに広く用いられている差分法は、空間を一波長あたり6?10格子程度以上に細かく分割し、弾性体もしくは粘弾性体の運動方程式を離散化して陽的に解く方法である。この方法は簡便であり、かつ大規模な並列シミュレーションにも非常に向いているが、数十?数百 km スケールの計算においては、深さに依存する地震波速度構造のために波長帯域が広く、計算領域全体を一様な格子間隔で覆うのはきわめて不経済である。浅部の堆積層はきわめて細かい空間格子を要求するが、そのような格子では深部の高速度領域で安定条件を満たすため非常に細かい時間刻みを取らざるを得ない。この問題に対処するため、浅い部分と深い部分で異なる格子サイズを用い、それらを空間補間で繋ぐ不連続格子法 (Aoi and Fujiwara, 1999; Lee et al., 2008) が用いられてきた。しかし、この方法では急激に格子サイズが変わることに伴う数値不安定の可能性が指摘されている (Kristek and Moczo, 2010)。Pitarka (1999) や Moczo (1989) は差分公式を改変することで深さ方向にのみ格子サイズを柔軟に変更可能な手法を提案した。しかし、座標系の直交性を維持しつつ格子形状を変更するには限界がある。本研究で報告する曲線座標系では、平均的な地震波速度の増大に合わせてすべての方向の格子間隔が滑らかに大きくすることができるため、一波長あたりの格子数を一定程度に保つことで経済的に大規模なシミュレーションが可能になる。

本研究で採用した曲線座標系によるシミュレーションでは、数値微分ならびに積分を行う座標系を任意の計算座標系に変換しつつ、速度・応力等の成分は物理空間のカーテシアン座標系のものをそのまま用いる。計算座標系で空間等間隔刻みの差分法を適用することで、実空間で複雑な座標系形状であっても簡便な差分法で計算が可能となる。従来この手法は複雑な地形形状に沿った座標系を用いるために使われてきた (Hestholm, 1999) が、本研究ではこれを深部と浅部の間の速度コントラストを吸収するために利用する。一方、地表あるいは海底の境界は階段形状で近似した。近年のスタガードグリッド差分法の関する研究 (e.g., Nakamura et al., 2012) から、解像度が十分細かければ二次の差分法と適切な媒質平均化を用いることで階段形状近似によって境界条件がよく再現できることが明らかにされている。曲線座標系は任意の座標系形状に適用可能であるが、本研究では深さ方向の計算座標値にのみ依存し、深さとともに滑らかに増大する関数を通じて座標系を定義する。このような1変数関数を用いることで、運動方程式の座標変換のために必要となる係数ならびにヤコビアンを簡略化し、曲線座標系の欠点である計算量と所要メモリ量の増大を最小限にすることができる。また、計算座標系における水平面は物理空間においても水平面になり、対応関係が明確であるという特徴もある。一方この座標系は非直交座標系であり、座標変換された運動方程式はカーテシアン座標系よりも多くの方向への空間微分を必要とする。そこで、回転食い違い格子座標系 (RSG; Saenger et al., 2000) を採用した。この座標系では応力テンソルと速度ベクトルの各成分がそれぞれ同じ場所に配置されるため、いかなる方向の微分についても中心差分を維持することが可能である。

具体的な座標系として、鉛直方向に相当する座標軸がバターワースフィルタの伝達関数形状に比例するような形状関数を試験関数として検討した。この座標系は特徴的なカットオフ深さを持ち、それ以上の深さでグリッド間隔が深さに比例して増大する一方、浅い側はカーテシアン座標系に漸近するという特徴をもつ。したがって、浅い側を一定深度まで十分に細かいカーテシアン座標系で解き、一定深度より深い部分は深さとともにほぼ線形にグリッドを粗くすることが特段の接続操作なしに可能となった。予備的な二次元SHならびにP-SVシミュレーションの結果、浅い部分で急峻に座標軸が変化し、最大10倍のグリッドサイズ比があるような構造下でも安定かつ高精度に地震動が計算できることが確認された。本研究の座標系はすべて解析的な関数形状で与えられるため、座標変換に伴う変換係数の数値誤差の影響は非常に小さく、かつ高速・省メモリの評価が可能である。今後この方法を三次元に拡張することによって、浅部低速度から深部構造までをより適切にカバーした広帯域シミュレーションが実現可能になると期待される。

キーワード: 地震波伝播, シミュレーション, 差分法, 曲線座標系



---

SSS27-10

会場:411

時間:4月29日 11:45-12:00

Keywords: seismic wave propagation, numerical simulation, finite difference method, curvilinear coordinate

## 反射法データの波形インバージョンと断層構造調査への適用 Waveform inversion of seismic reflection data and its application to fault structure survey

渡辺 俊樹<sup>1\*</sup>; 小林 雅実<sup>1</sup>; 山岡 耕春<sup>1</sup>; 伊藤 谷生<sup>2</sup>; 狩野 謙一<sup>3</sup>; 阿部 進<sup>4</sup>

WATANABE, Toshiki<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Masami<sup>1</sup>; YAMAOKA, Koshun<sup>1</sup>; ITO, Tanio<sup>2</sup>; KANO, Ken-ichi<sup>3</sup>; ABE, Susumu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>帝京平成大学, <sup>3</sup>静岡大学, <sup>4</sup>(株)地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Teikyo Heisei University, <sup>3</sup>Shizuoka University, <sup>4</sup>JGI, Inc.

波形インバージョン (Tarantola, 1984) は地下構造イメージングの最新の手法であり、非線形最小二乗法により観測データの波形を最もよく説明する物理パラメータのモデルを再構築する手法である。波形インバージョンは走時トモグラフィよりも高分解能な構造モデルを与える。近年の計算機環境の発展により、2次元、3次元のフィールドデータへの実際的な適用が加速されている研究分野である。

本研究では、本来孔間データに向けて開発されたこの手法を反射法データに適用するための検討を行った。問題点として、(1) 地表に設置した震源と観測点付近で感度が特異点的に振る舞うこと、(2) 断面の深部における感度の減衰、(3) 表面波の混入、がある。これらの問題点の影響を低減するために、修正勾配への深度に関する重み付けの導入とニアオフセットトレースの抑制をおこなった。与えられた構造モデルに対して数値的に生成した波形データを用いて、反復修正により明瞭な構造イメージを再構成できることを示した。

さらに、この手法を、2012年に実施された富士川河口断層一糸静構造線反射法構造探査(2012FIST)(伊藤ほか, 2013)における広角反射法のフィールドデータに適用し、大宮断層の詳細構造の解明を試みた。再構成された速度構造は大宮断層が逆断層であるという最新の解釈と整合しているものの、調査で使用した震源数が不足していたため、よく収束した結果とは言い難かった。将来の調査デザインのための問題点や必要事項について議論する。

キーワード: 反射法, 波形インバージョン, 断層構造, 非線形逆問題

Keywords: seismic reflection method, waveform inversion, fault structure, non-linear inversion

## Hi-net 観測点のサイト増幅特性 Site amplification factor of the Hi-net stations

上野 友岳<sup>1\*</sup>; 齊藤 竜彦<sup>1</sup>; 汐見 勝彦<sup>1</sup>  
UENO, Tomotake<sup>1\*</sup>; SAITO, Tatsuhiko<sup>1</sup>; SHIOMI, Katsuhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup>NIED

防災科学技術研究所が運用する基盤の地震観測網の一つに高感度地震観測網 Hi-net がある。Hi-net 観測点では、地表における様々な地動ノイズを低減するために、3成分速度型高感度地震計がボアホール底部に設置されている。その多くは深さ 100-300m に設置されているが、地震基盤が深いとされる平野部では 2000m 以深にセンサーを設置している観測点もある。また、他のプロジェクトにより整備された旧式あるいは簡易型の観測施設では、地表もしくは深さ数十 m にセンサーが設置されている点もある。このように、Hi-net では、様々な設置環境で観測を実施しているため、観測点固有の増幅特性が存在する。そこで、我々は観測された地震波形データに基づき、Hi-net 観測点のサイト増幅特性を求め、その特徴を調べた。

サイト増幅特性を求めるためには、比較的広範囲の観測点で記録されるマグニチュードが中程度以上の地震データが必要とされる。しかしながら、Hi-net では感度の高いセンサーを用いているため、このような地震の実体波記録は飽和してしまう可能性がある。そこで、観測記録を確実に利用するため、地震波のコーダ部分を用いてサイト特性を推定した。2000年10月から2010年12月に日本全国の内陸の深さ 20 km 以浅で発生した M3.5 以上の地震を解析対象とし、震央距離 150 km 以内に位置する観測点で得られた地震波形のコーダ部（地震発生時からの経過時間 65-75 秒部）をデータとした。なお、解析においては、その総和が 0 になるように条件付けした。この解析を 0.6-1.0Hz, 1-3Hz, 2-4 Hz, 2-6 Hz, 4-8 Hz, 6-9 Hz, 8-12 Hz の各帯域に分け、時間領域でサイト特性を求めた。

サイト増幅特性の頻度分布は高周波側で正規分布に近い特徴を示す一方、低周波側で正規分布が崩れ、増幅率が相対的に小さい観測点が多くなる傾向が見られた。サイト増幅特性と地表面標高、センサー標高、掘削長を比較すると、いずれも相関が低かった。一方で、地震計設置位置における地震波速度とサイト増幅特性には、若干の相関性が見られた。ただし、S 波速度が 1.5km/s 程度以上となる場所にセンサーが設置された観測点では、サイト増幅特性はほぼ一定値となった。一方、空間的な特徴としては、主に西南日本でサイト増幅率が小さく、東北日本で相対的に大きくなる傾向が見られた。東北日本では房総半島、新潟県、北海道東部地域のような平野部、あるいは東北脊梁部のような火山地域に集中してサイト増幅率の高い観測点があることが分かった。

キーワード: Hi-net, サイト増幅特性

Keywords: Hi-net, Site amplification factor

## 常時微動の相互相関テンソルのクロスタームを用いた実体波とレイリー波の分離 Separating body and Rayleigh waves with cross terms of the cross-correlation tensor of ambient noise

高木 涼太<sup>1\*</sup>; 中原 恒<sup>2</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>  
TAKAGI, Ryota<sup>1\*</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>2</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 東北大・理・地球物理

<sup>1</sup>RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Geophysics, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

We develop a novel method to separate body and Rayleigh waves with the vertical-radial (ZR) and radial-vertical (RZ) components of the cross-correlation tensor of ambient noise. Furthermore, analyzing ambient noise records observed at a seismic array, we validate the method. For the separation, we utilize the difference in polarizations between the rectilinear P and the elliptic Rayleigh waves. Assuming the two-dimensional surface and three-dimensional body waves are the superposition of random uncorrelated plane waves, we derive two fundamental characteristics of the ZR and RZ correlations. One is that, between the ZR and RZ correlations, Rayleigh wave contributions have the opposite signs and P waves have the same signs. The other is that, for both ZR and RZ correlations, Rayleigh wave contributions are time-symmetric and P waves are time-antisymmetric. Accordingly, we can separate P and Rayleigh waves by just taking the sum and difference between ZR and RZ correlations and by just taking the time-symmetric and time-antisymmetric components. This method can be performed (1) without any knowledge of velocity structure, (2) using only two stations with three-component sensors on a ground surface, (3) even in the case of anisotropic wave incidence, and (4) with the quite simple procedure. We consider that the developed method can make better use of three-component observations of ambient noise for evaluating the cross-correlation tensor accurately, for improving deep velocity structure using both of extracted body and surface waves and, more fundamentally, for understanding the composition of ambient noise.

キーワード: 常時微動, 地震波干渉法, 相互相関関数, 波動場分離, 粒子軌跡, 実体波とレイリー波

Keywords: ambient noise, seismic interferometry, cross-correlation function, wavefield separation, polarization, body and Rayleigh waves



## アクティブソースによる高周波地震波の伝搬の研究 Study of high-frequency seismic wave propagation by active-source experiments

谷本 俊郎<sup>1\*</sup>; 岡元 太郎<sup>2</sup>  
TANIMOTO, Toshiro<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>カリフォルニア大学サンタバーバラ校, <sup>2</sup>東京工業大学地球惑星科学科  
<sup>1</sup>University of California, Santa Barbara, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Seismic wavefields generated by resonant shaking experiments of the Millikan Library, on the campus of California Institute of Technology (Pasadena, California, USA), were analyzed. Because the resonant shaking frequencies are 1.12 Hz (the east-west direction) and 1.64 Hz (the north-south direction), this active-source experiment can provide opportunities for studying high-frequency seismic wave propagation in Southern California.

Two such experiments for each frequency were analyzed; for the north-south shaking experiments, the harmonic signals were observed up to distance 323 km in one experiment and up to 396 km in another experiment. For the east-west shaking (1.12 Hz), the maximum distance was 200 km but most observations were confined to less than 100 km.

Spectral amplitudes showed a systematic decaying trend with distance in all cases. Numerical simulations indicated that the predominant signals were surface waves. Assuming that all signals were surface waves, we obtained estimates for the parameter  $QU$  for surface waves where  $Q$  is the attenuation parameter and  $U$  is the group velocity (in km/s). There was, however, a major break in the amplitude-distance trend at a distance about 50 km; for data with distance less than 50 km,  $QU = 95 \pm 16$ , where  $U$  is in km/s. For data beyond 50 km, we obtained  $QU = 1454 \pm 226$ . This change in trend must be related to the regions sampled by waves, as the shorter-distance data were dominated by paths in the Los Angeles basins while the longer-distance data did not contain paths in the basin structures.

Through cross correlations between MIK (station in the Millikan library) and a station in the regional network, phase information was also analyzed. For many stations, phase was stable for frequencies between 1.637 and 1.638 Hz which meant that phase is locked between MIK and a station. While it was not possible to estimate phase velocity, because the number of cycles cannot be resolved for high-frequency waves, a stacking approach for multiple-window data allowed us to estimate frequency derivative of phase and group velocity for 25 paths. Group velocity between MIK and network stations are mostly less than 2 km/s. For stations with distance less than 50 km, most group velocity results were about 0.5 km/s or less. Combined with the estimate for  $QU$  from the amplitude-distance data,  $Q$  is estimated to be 190 for distances less than 50 km. This estimate, however, contains uncertainty up to a factor of two as variations in group velocity estimates differ from station to station.

キーワード: 地震波伝搬, 地殻構造, アクティブソース実験  
Keywords: Seismic wave propagation, Crustal structure, Active source experiment

## 海底地震計記録を用いた北西太平洋域の構造推定: 短周期成分 (>1 Hz) の活用 Estimations of seismological structure in the northwestern Pacific using OBS records: Approaches from >1 Hz component

利根川 貴志<sup>1\*</sup>; 深尾 良夫<sup>1</sup>; 藤江 剛<sup>1</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 杉岡 裕子<sup>1</sup>; 伊藤 亜妃<sup>1</sup>  
TONEGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>; FUKAO, Yoshio<sup>1</sup>; FUJIE, Gou<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; SUGIOKA,  
Hiroko<sup>1</sup>; ITO, Aki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

Tentative ocean bottom arrays using seismometer, hydrophone and pressure gauge have recently been deployed through many scientific projects all over the world. However, in Japan, a permanent ocean bottom monitoring system, called DONET, is now working, and dense cabled-OBSs (ocean bottom seismometers) have been constructed around the Japan Trench. It seems that, compared to other countries, such environments in Japan potentially give us some advantages for investigating the Earth's interior, seismic activity, and wavefields under the ocean. In order to easily kickoff the use of these records, it would be better to know characteristics of wavefields observed at seafloor.

A large amplitude in the frequency range of 0.07-0.5 Hz can be often seen in the spectrum of noise record observed at seafloor, which is known as microseisms that are generated by wind propagating sea surface. This large amplitude also emerges at land observation. At frequencies longer than 0.02 Hz in the spectrum observed at typical broadband OBS, the amplitude of infragravity wave is strong in the vertical component, and that of tilt effect is dominant in the horizontal component.

In this presentation, avoiding the use of such longer period components, we focus on shorter period components than 1 Hz of records observed at OBSs. We introduce what kind of analyses we can do hereafter with permanent OBS records, which is based on the use of records observed at tentative ocean bottom arrays. In particular, we will introduce ambient noise and receiver function analyses, in which short period components are mainly used.

キーワード: 海底地震計記録, 短周期成分, レシーバ関数, 地震波干渉法

Keywords: OBS records, short period components, receiver function, seismic interferometry

## 震源振動の非線形放射と地震予知 Nonlinear radiation of hypocenter and prevision of earthquakes

菊池 年晃<sup>1\*</sup>  
KIKUCHI, Toshiaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学  
<sup>1</sup> National defence Academy

活断層や地殻の歪みに関する多くの報告がなされている。これらの静的な知見も必要であるが、近い将来の地震の予知には活断層の動態を知ることが重要である。

地震波エネルギーの大部分は S 波に含まれているが、S 波の振動は地表近くの地殻構造や断層等により大きく影響を受ける。そこで震源の動的な基本的振動を把握するために、それらの影響の少ない P 波に着目する。観測点で得られた P 波から震源の振動を求めるために、タイムリバーサル法を用いる。タイムリバーサルは、始めに光学の分野で位相共役波として研究された。その後、各分野に波及すると共に時間領域での位相共役波、即ちタイムリバーサルとして発展している。

観測点で受波した地震波の中から P 波成分を切り出して、その波を時間的に反転させる。その反転させた信号をシミュレーション上で放射して、震源位置に形成される波、即ちタイムリバーサルパルス (TRP) を求める。これが等価的な震源の動的な振動に相当する。

富士山付近で発生した地震に着目して、それらの震源の動的な振動を求める。始めに、2009 年 8 月に駿河湾の中部で発生した地震に対して、震源を囲む 44 ヶ所の観測点で受信した P 波信号にタイムリバーサル処理を施し、震源の位置に形成されるパルス、即ち、タイムリバーサルパルスを求めた。この TRP は震源が放射する等価的な音源に相当する。一般に、雑音はランダムな振動であるから干渉性を持たない。しかしながら、求められた TRP には明確な方位依存性が存在した。この方位依存性の成因を解明するために、方位に対する TRP の周波数スペクトルを求めた。周波数スペクトルは方位角によって大きく変化した。そこで、方位角に対する最大振幅周波数の分布を求めた。その結果、方位が西から東に移動するにつれて最大振幅周波数が大きく上昇して、そして下降した。音源の周波数変動は音源の移動によるドップラー効果が一般である。しかしながら、上記地震の場合、震源と観測点の相対位置は大きく変化していないのでドップラー効果ではない。この場合の周波数上昇は音源が局所的に高速で移動したためであると考えられる。移動方向は西伊豆西、河津及び伊東方向へ集中した。

これらの観測点で受信した P 波を調べると特徴ある波形が表れた。西伊豆西の受信波の先頭部が膨張していた。しかし、西伊豆西に近い伊東と河津での受信波は通常の波形であった。この様に頭部が大きくなることは活断層中での亀裂の進行速度が伝搬速度に近くなった場合に発生する。亀裂によって発生した圧力が高速で移動することにより累積的に加算される、即ち、パラメトリック効果によって生じると考えられる。西伊豆西はこの地震の特性を反映する特定点である。この観測点で受波した余震の波形は、本震以上に P 波の先頭部が膨張していた。これは亀裂が断層全般に拡大したためと考えられる。一方、本震以前に発生した前兆地震でも先頭部の膨張が多く観測された。これらの結果から震源振動の動的モデルを提唱した。活断層から放射された狭角のビームが地表に達する点をパラメトリックスポット、ここで観測される頭部の増大したパルスの頭部をパラメトリックヘッドと呼ぶ。

このモデルを、2009 年から 2012 年の間に富士山付近で発生した M5 以上の 4 つの地震について検証する。発生日と震源は、S1): 2009/8/11 駿河湾中部、S2): 2011/3/15 富士裾野、S3): 2011/8/1 駿河湾南部、S4) 2012/1/28 山梨県東部である。各地震に対して、周辺に配置されている観測点で受信した信号に、タイムリバーサル処理を施した。それらの TRP と周波数スペクトルの最大振幅周波数を求めた。その結果から、震源振動の移動方向を求め、その方向の観測点の受波波形を調べて、パラメトリックスポット (PS) を求めた。全ての地震に対してパラメトリックスポットが確認できた。各地震のパラメトリックスポットは、S1): 西伊豆西、S2): 西野原、S3): 真鶴、S4): 駒ヶ根であった。

動的モデルは上記のように、前兆、本震及び余震に関して一貫して成立する。従って、その特性を地震予知に利用することが出来る。2009 年 8 月に駿河湾の中部で発生した本震より前の、2008/1/26 から 2009/8/11 までに、同じ震源域で発生した M2 以上の地震は 17 回である。その中でパラメトリックヘッドを伴った波形は 7 回観測された。これらは活断層中を亀裂が高速で移動し始めた前兆を示している。従って、各活断層に固有のパラメトリックスポットで、M2 程度の微弱な段階の地震波を観測して、その変化を調べることは、その後の大きな地震を予知することができると考えられる。

本報告では、防災科学技術研究所の Hi-net による地震データを使用しました。ここに謝意を表します。

キーワード: 震源振動, 動的モデル, タイムリバーサル, 地震予知  
Keywords: hypocenter vibrations, dynamic model, time reversal, prevision of earthquakes

海溝沿いに伝搬する地震動の伝播解析—周波数領域 FEM 計算による Q 一定減衰の反映  
Frequency domain calculation of the seismic wavefield propagating along an ocean trench, with a constant Q attenuation

三橋 祐太<sup>1\*</sup>; 古村 美津子<sup>2</sup>; 松浦 律子<sup>2</sup>; 庄司 正弘<sup>1</sup>  
MITSUHASHI, Yuta<sup>1\*</sup>; FURUMURA, Mitsuko<sup>2</sup>; MATSU'URA, Ritsuko S.<sup>2</sup>; SHOJI, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(株) 構造計画研究所, <sup>2</sup>(公財) 地震予知総合研究振興会  
<sup>1</sup>KKE, <sup>2</sup>ADEP

我々 (e.g. 古村ほか, 2011) は、東北日本の東西断面に相当する構造で、海溝軸外側の浅い震源の地震の場合に、海水の存在によって大きい振幅でやや遅い後続波が陸の観測点で見られることを 2 次元差分計算で示した。今回は、海溝軸の伸長方向に地震波が伝播した場合の海水の影響を見た。差分計算では、Graves(1996) が狭帯域の波形計算という条件で示した方法、つまり、Q 自体ではなく、 $f/Q$  が定数とした減衰を用いて計算している。そこで、Q が定数という、この方法より現実的な減衰を与えても同様に深い海を伝播した場合に大きい後続波が存在することを確認するため、周波数領域 FEM による 2.5 次元の構造で海水があった場合と無い場合との計算の比較を行った。2.5 次元構造は、南西諸島海溝に垂直な断面の構造が 1000km 程長さ方向に続く場合、たとえば 1911 年喜界島沖地震から本州に向けて地震波が伝わるケースを念頭に、海溝沿いに長距離を地震波が伝播する例を設定した。その結果、海溝軸に直行する方向に深い海を通過して地震波が伝播する場合と同様、海溝軸に平行な方向に長距離を地震波が伝播した場合でも、海水があると、大きい振幅でやや遅く長く続く後続波が陸の観測点で見られることが判った。また、差分法のように、 $f/Q$  が定数と設定した場合には、Q を定数とした場合より、差分計算上の Q 値参照周波数  $f_0$  より長周期側で振幅が小さくなることも、あたりまえであるが、確認できた。震源から数百キロ以上離れた場所のやや長周期地震の大きさを差分法を用いた手法で見積もる際には、 $f_0$  からの乖離具合によって数%以上の調整が必要であることに、注意を喚起したい。また、深い海を伝播してきた波を用いて昔の地震の規模を決める場合は、海水の影響による「やや長周期の大振幅後続波」の影響で規模が大きめになる傾向にも注意を喚起したい。



## 堆積盆地内を伝播する長周期地震動の発達と消失 Development and extinction of long-period ground motion in thick sediments

武村 俊介<sup>1\*</sup>; 吉本 和生<sup>1</sup>  
TAKEMURA, Shunsuke<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Kazuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学  
<sup>1</sup>Yokohama City University

### 観測波形に見られる特徴

2011年3月12日に長野・新潟の県境付近で発生した地震について関東平野で観測された強震記録を調べてみると、卓越周期5秒の孤立的な大振幅の表面波が見られた。この孤立的な大振幅の表面波は、群馬県南部の盆地端で生成され、群馬・埼玉県境の堆積層の厚い(>3 km)地域にそって発達しながら伝播してきたLove波であることがわかった。Love波の振幅は、盆地構造が急変する埼玉・茨城県境付近で突如弱まる。

厚い堆積層内におけるLove波の発達過程を明らかにするため、現実的な盆地構造モデルを用いた差分法による地震動シミュレーションを行った。

### 3次元差分法による地震動シミュレーション

盆地端で生成された表面波に着目するため、半無限均質媒質内にJIVSMによる関東平野の盆地構造を入れ込んだモデルでシミュレーションを行った。JIVSMでは関東平野の堆積層を $V_s = 0.5, 0.9, 1.5$  km/sの3層でモデル化されおり、関東平野北部では堆積層の厚さが3.5 kmを超える大規模な盆地構造が発達している。関東平野から見て北西に45°の方向から、卓越周波数0.2 Hzの平面SH波を入射させ、盆地端で励起した表面波の伝播・発達の様子を解析した。

現実的な盆地構造を含んだ地震動シミュレーションにより、観測されたLove波の発達、伝播速度および極性を概ね再現することができた。シミュレーション結果と仮定した構造モデルを比較すると、Love波の発達は堆積層の厚さが伝播方向に増加していることが原因であることが示唆された。また、深部(>3 km)地震基盤構造を大きく変化させてシミュレーションを行っても計算波形に大きな変化が現れないことから、2 km以浅の浅部低速度層によって表面波の振幅が大きく増幅していることを明らかにした。

### 謝辞

防災科学技術研究所のK-NET/KiK-netおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-netの波形記録を使用させていただきました。

キーワード: 長周期地震動, 表面波, 関東平野, 盆地構造, 地震動シミュレーション

Keywords: long-period ground motion, surface wave, kantou basin, basin structure, numerical simulation

## レシーバ関数走時トモグラフィー Receiver function travel time tomography

平原 和朗<sup>1\*</sup>; 山崎 朋奈<sup>1</sup>; 安部 祐希<sup>1</sup>; 澁谷 拓郎<sup>2</sup>  
HIRAHARA, Kazuro<sup>1\*</sup>; YAMASAKI, Tomona<sup>1</sup>; ABE, Yuki<sup>1</sup>; SHIBUTANI, Takuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院地学研究所, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

。Hirahara et al. (2006) は、従来の近地および遠地地震からの P 波及び S 波走時をデータとするトモグラフィーとレシーバ関数解析を結び付けるレシーバ関数 (RF) トモグラフィーを提唱した。RF トモグラフィーでは、ガウシアンビーム法による RF 合成波形を用いることにより、RF 解析から得られる速度不連続面で P から S 波へ変換した波 Ps 相の振幅および走時をデータに加えることによって、3次元 P 波及び S 波速度構造に加えて、起伏を持つ地震波不連続面の形状も推定する。しかしながら、RF に見られる Ps 変換波の振幅から速度不連続面での地震波速度コントラストを安定に推定することは現状では困難である。

そこでここでは、直達 P 波と Ps 変換波の走時差を直達 P および S 波走時データに加えて、3次元速度構造と地震波不連続面の形状を推定する RF 走時トモグラフィーコードを開発する。Abe et al.(2011) では、30度から70度の傾斜角を持つ傾斜する地震波不連続面の形状を RF 関数から推定する方法を開発している。彼らは、波面を追跡する Fast marching method (de Kool et al., 2006) を用いて、地震波不連続面での屈折・変換波の波線を安定に推定している。3次元セルでスタックした RF 振幅の大きなセルで Ps 変換波が生じたとして、これを走時に戻し、直達 P 波との時間差を P-Ps 走時としてデータに加えることが考えられる。

本講演では、実際のデータを扱っていないが、Rawlinson (2007) による FMTOMO (Fast Marching Tomography) に基づいて、RF 走時トモグラフィーコードを開発している。まず、沈み込み帯を想定して、モホ面および沈み込むスラブ形状を含む3次元不均質構造を仮定し、近地および遠地の直達 P 波および S 波走時、およびモホ面およびスラブ上面、海洋モホ面での Ps 変換波走時データを作成する。これらの合成データに RF 走時トモグラフィー法を適用して、3次元速度および不連続面形状推定能力を検討する。

キーワード: レシーバ関数, トモグラフィー, Ps 変換波, 走時, 地震波不連続面

Keywords: Receiver function, Tomography, Ps converted wave, Travel time, Seismic velocity discontinuity interface

## 地震波による音響レーリー波の定常的な励起 Ocean acoustic Rayleigh wave persistently excited by earthquake signals

利根川 貴志<sup>1\*</sup>; 深尾 良夫<sup>1</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
TONEGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>; FUKAO, Yoshio<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

In the interferometry, the wavefield propagating between two positions can be retrieved by correlating ambient noise recorded on the two positions. This approach is useful for applying to various kinds of wavefield, such as ultrasonic, acoustic (ocean acoustic), and also seismology. Off the Kii Peninsula, Japan, more than 150 short period (4.5 Hz) seismometers, in which hydrophone is also cosited, had been deployed for 2 months on 2012 by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) as a part of “ Research concerning Interaction Between the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes ” funded by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. In this study, correlating ambient noise recorded on the hydrophones, we attempt to investigate characteristics of wavefield observed at seafloor.

The observation period is from Sep. 2012 to Dec. 2012. Station spacing is around 5 km. For 5 lines off the Kii Peninsula, the 30 - 40 seismometers are distributed at each line. Sampling interval is 200 Hz for both seismometer and hydrophone. The instruments are located at 100 - 4800 m in water depth. In the processing for the both records, we applied a bandpass filter of 1 - 3 Hz, replaced the amplitude to zero if it exceeds a value that was set in this study. We calculated cross correlation function (CCF) by using continuous records with a time length of 600 s, stacked the CCFs over the whole observation period.

We first aligned only CCFs using two stations with a separation distance of 5 km along lines off Kii Peninsula. As a result, we could detect strong signals in the CCFs that clearly show travel time variation as a function of water depth. The group velocity of the signal gradually changes from 1.3 km/s to 0.7 km/s at water depths from 2000 to 4000 m. In addition to the wave, a relatively weak signal with a group velocity of 1.4 - 1.5 km/s can be seen in the region at water depth of 4,000 m.

We investigated the wavefield by using a numerical simulation with finite difference technique. As a result, all of these signals can be explained by acoustic Rayleigh wave, which has the energy within not only the ocean but also sediment. A case in which vertical forces are located at subseafloor generated the acoustic Rayleigh wave well, and the CCFs using synthetic waveforms match well with the observed ones. However, another one in which vertical forces are located at sea surface failed to describe the observation. This means that the observed acoustic Rayleigh wave in background wavefield would be generated by earthquake signal, not signals due to microseisms. Moreover, we will show that the amplitude of the signals possibly correlates with seismicity distribution, which also supports that the signals are excited by earthquake signals.

キーワード: 音響レーリー波, 常時微動, 相関解析

Keywords: acoustic Rayleigh wave, ambient noise, correlation analysis

## 2次元差分格子における傾斜した亀裂のモデル化 Modeling inclined cracks in a 2-D finite difference grid

那須野 新<sup>1</sup>; 河原 純<sup>1\*</sup>; 椎名 高裕<sup>2</sup>; 岡元 太郎<sup>3</sup>  
NASUNO, Arata<sup>1</sup>; KAWAHARA, Jun<sup>1\*</sup>; SHIINA, Takahiro<sup>2</sup>; OKAMOTO, Taro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>茨城大学, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>東京工業大学

<sup>1</sup>Ibaraki University, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology

亀裂による地震波散乱を数値的に扱う手法には、境界積分方程式法、有限要素法、差分法などがある。その中で差分法は、格子の形状に制約はあるものの、取り扱いが容易であるという大きな利点を持つ。Saenger et al. (2000, *Wave Motion*) は、彼等が開発した rotated staggered grid を用いることにより、弾性定数を 0 とした格子点の集合により亀裂や空隙を表現することに成功した。一方、Suzuki et al. (2006, 2013, *Earth Planets Space*) は、標準的な 2 次元差分法 (Virieux, 1984, 1986, *Geophysics*) に基づき、スタガード格子に応力 0 の点を線状に並べることで中空亀裂を表現した。彼等はこの手法により、亀裂による地震波の散乱が精度良くシミュレートできることを示した。しかし、彼等の手法では格子に沿った亀裂しか扱えないという制約があった。

本研究では、面外剪断応力 0 の亀裂をモデル化した Suzuki et al. (2006) の手法を、差分格子に対して傾斜した亀裂の場合に拡張した。自由地表面を階段状に離散化する Ohminato and Chouet (1997, *Bull. Seis. Soc. Am.*) の手法を参考にして、スタガード格子内に面外剪断応力 0 の格子点を階段状に並べることにより中空亀裂をモデル化した。この亀裂に対して平面正弦 SH 波を斜め入射させ、亀裂を振動させるという差分シミュレーションを行った。そして振動が安定した時点で変位不連続の振幅を計測し、その結果を境界積分方程式法 (Murai et al., 1995, *Geophys. J. Int.*) による計算結果と比較した。その結果、格子間隔が亀裂長よりも十分に小さく、階段近似された亀裂面の凹凸が十分に小さければ、亀裂の傾斜角によらず両手法の結果はよく一致した。このことは、傾斜した亀裂をモデル化する本手法の妥当性を示唆する。

謝辞：数値計算の一部に東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用し、村井芳夫氏（北海道大学）による計算プログラムを使用させていただいた。

キーワード: 差分法, 亀裂, SH 波

Keywords: finite difference method, crack, SH wave



## 気象庁における緊急地震速報関連の最近の技術的動向とビジョン The recent movement and the future plans of the JMA EEW

中村 雅基<sup>1\*</sup>; 小寺 祐貴<sup>1</sup>; 溜瀨 功史<sup>1</sup>; 相澤 幸治<sup>1</sup>; 小上 慶恵<sup>1</sup>; 平野 和幸<sup>1</sup>; 山田 安之<sup>1</sup>; 崎原 裕和<sup>1</sup>; 浦谷 純平<sup>1</sup>; 森本 雅彦<sup>1</sup>  
森本 雅彦<sup>1</sup>  
NAKAMURA, Masaki<sup>1\*</sup>; KODERA, Yuki<sup>1</sup>; TAMARIBUCHI, Koji<sup>1</sup>; AIZAWA, Koji<sup>1</sup>; OGAMI, Yoshie<sup>1</sup>; HIRANO, Kazuyuki<sup>1</sup>; YAMADA, Yasuyuki<sup>1</sup>; SAKIHARA, Hirokazu<sup>1</sup>; URATANI, Junpei<sup>1</sup>; MORIMOTO, Masahiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁

<sup>1</sup> JMA

気象庁における緊急地震速報の精度向上、情報発表の迅速化に向けた取り組みについては、これまでも報告しているところであるが(詳細は気象庁 HP 審議会・検討会等のページ参照)、最近の動向について報告するとともに、今後の予定について述べたい。

気象庁は、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震に対して、緊急地震速報(警報)を、最初の地震波の検知から 8.6 秒後に発表した。緊急地震速報(警報)を発表した全ての地域に対して主要動の到達前に発表した。しかし、この時点で推定した M は 7.2 であったため、震度予測が過小となった。緊急地震速報は、第 15 報(最終報)まで発表し、第 14 報以降において M8.1 を推定、最大震度 6 弱を予測、東北地方から関東地方や北陸地方の広い範囲に震度 4 以上を予測した。しかし、緊急地震速報(警報)の発表・更新は、地震波検知から 60 秒後までとして運用しているため、更新報を発表することはなく、例えば関東地方を対象とする緊急地震速報(警報)の発表をしていない。また、現在の緊急地震速報では、揺れの振幅予測式の距離減衰補正に用いる断層までの最短距離として、震源を中心とした推定 M に応じた半径の球面上からの距離を採用している。これが一因となって、この巨大地震の断層面の広がりや正しく評価できず、適切な震度予測ができなかった。さらに、この地震の発生後、全国の地震活動が活発化し、時空間的に近接して複数の地震が発生した場合などに適切な緊急地震速報が発表できない事例が多数あった。

また、平成 25 年 8 月 8 日 16 時 56 分頃、和歌山県北部を震源とする M 2.3 の地震に際し、近畿地方を中心に関東から九州までの 34 都府県を対象とする緊急地震速報(警報)を発表したが、震度 1 以上は観測されなかった。過大な緊急地震速報を発表した原因は、和歌山県北部の地震により震源近傍で地震波を検知したのとほぼ同じタイミングで、震源から離れた東南海海底地震計で大きな振幅を観測したとのデータ(システムの不具合による誤ったもの)が得られ、これらを同一の地震によるものとして処理した結果、M7.8 の地震が発生したと推定したためであった。この事態を受けて気象庁では、原因となった海底地震計システムの緊急地震速報への利用を約 2 ヶ月間停止し、ハードウェア・ソフトウェアの改修を行い、慎重に動作確認を行ったのち緊急地震速報への利用を再開した。しかし、全ての機器故障を想定したシステムを構築することは困難であり、このケースの次善策は同一の地震と誤って判断しないようにすることだと考えられる。

これらに対処するため、気象庁では、①震源断層の広がりによる過小評価(M の飽和)による震度の過小予測の克服と、②ほぼ同時に発生する地震を適切に分離できないことによる不適切な情報発表対策を主要課題としてとらえ、これまでも対策を講じてきており報告しているところであるが、処理システムの更新を機に緊急地震速報処理のより一層の高度化を予定している。具体的には、②の対策として、従来型の震源要素に基づく予測の高度化として溜瀨・他(2013, 2014)によるパーティクルフィルタを用いた手法であり、①と②の対策として、実時間震度モニタ型予測と従来型の震源要素に基づく予測のハイブリッド化(小寺・他, 2014)である。前者は、尤度関数として、各観測点における地震波検知時刻だけでなく、最大振幅、B-Δ法、主成分分析法の処理結果、未着情報を用いており、従来の緊急地震速報処理の迅速性と同時多発地震識別におけるロバスト性の両方を兼ね備えた震源推定手法である。後者の実時間震度モニタ型予測は、Hoshiba(2013)の簡易版で、観測された大きな震度をもたらし波動場は四方八方に伝播すると仮定し、予測対象観測点周辺半径 Xkm 以内の観測点における最大観測震度を予測震度とするものであり、これを従来型の震源要素に基づく手法とハイブリッド化する手法である。

また、気象庁では、平成 25 年 3 月から長周期地震動に関する観測情報の発表を、気象庁 HP を通じて試行的に開始した(相澤・他, 2014)。現在、長周期地震動版の緊急地震速報である予測情報の発表について技術的検討を行っているところであり、現行の緊急地震速報と同様の距離減衰式を用いた手法をひとつの候補に考え、評価を行っている(小上・他, 2014)。予測情報の発表については、2~3 年後程度を目途に試行的運用を開始したいと考えている(詳細は気象庁 HP 審議会・検討会等のページ参照)。

引用文献: 相澤・他, 2014, 本大会予稿集, Hoshiba, 2013, DOI: 10.1002/jgrb.50119. 小寺・他, 2014, 本大会予稿集. 小上・他, 2014, 本大会予稿集. 溜瀨・他, 2013, 地震学会予稿集秋季大会. 溜瀨・他, 2014, 地震 2 投稿中。

キーワード: 緊急地震速報, 長周期地震動, 気象庁, 震度, 長周期地震動階級, 震源決定

Keywords: EEW, long-period ground motion, JMA, seismic intensity, intensity scale on long-period ground motion, hypocenter

---

SSS28-01

会場:312

時間:5月2日 10:00-10:15

determination

## 実時間地震動予測を併用した緊急地震速報 Earthquake Early Warning system combined with real-time ground motion prediction

小寺 祐貴<sup>1\*</sup>; 山田 安之<sup>1</sup>; 平野 和幸<sup>1</sup>; 森本 雅彦<sup>1</sup>; 干場 充之<sup>2</sup>; 中村 雅基<sup>1</sup>  
KODERA, Yuki<sup>1\*</sup>; YAMADA, Yasuyuki<sup>1</sup>; HIRANO, Kazuyuki<sup>1</sup>; MORIMOTO, Masahiko<sup>1</sup>; HOSHIBA, Mitsuyuki<sup>2</sup>; NAKAMURA, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地震火山部, <sup>2</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup>Seismology and Volcanology Department, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute

簡易版実時間地震動予測法と現行の緊急地震速報とを併用した緊急地震速報（ハイブリッド法）の紹介を行う。また、過去に予測震度が過小評価や過大評価であった事例に対してハイブリッド法を適用した結果を報告する。

現行の緊急地震速報（従来法）は、観測された地震波をもとに震源要素を求めることで予測震度を計算している。初期段階で正確に震源要素を推定できれば、迅速に全国の予測震度が得られ、多くの地区で猶予時間を稼げる。一方で、誤った震源要素を推定した場合は、予測震度を極端に過小評価したり過大評価したりするという欠点がある。

震源要素を介さず揺れの予測を行う手法として、Hoshiba (2013) は実時間地震動予測法を提案している。実時間地震動予測法は、変位に関する境界積分方程式により、波動場から波動場を直接予測する手法である。この手法では実際の揺れの情報をそのまま用いるため、実測により近い値を確実に予測できると期待される。実時間地震動予測法で震度予測を行う場合、以下のアルゴリズムで簡易的に計算できる（簡易版実時間地震動予測法）。

(1) 予測対象点から距離  $R$  以内にあるリアルタイム震度（功刀・他, 2013）の観測値を集める。

(2) 集めたリアルタイム震度の最大値を、予測対象点の予測震度とする。

このアルゴリズムでは、大きな震度をもたらす波動場が、距離  $R$  だけ減衰せずに四方八方に伝播すると仮定して震度予測を行っている。簡易版実時間地震動予測法では、距離  $R$  以内にある波動場の情報しか用いないため、迅速性の面ではある程度劣ることが想定される。

従来法と簡易版実時間地震動予測法は、迅速性と確実性においてそれぞれ相補的な特徴を持っている。従って両手法をうまく組み合わせることで、迅速かつ確実な予測手法（ハイブリッド法）が得られると期待される。そこで以下の処理で、ハイブリッド法を実行する。

(1) 通常時は、従来法と簡易版実時間地震動予測法の両予測値の最大値をとる。

(2) 両予測値に整合性が無いときは、従来法が正しくないとして従来法の予測値を棄却する。

入力を気象庁観測点のリアルタイム震度、出力を全国の震度観測点の予測震度、距離  $R$  を 30km として、過去事例に対してハイブリッド法を適用した。東北地方太平洋沖地震に対しては、従来法では関東地方の震度階級を 2 階級以上過小評価したが、ハイブリッド法では概ね ± 1 階級までのずれで震度階級を予測した。最大震度 5 弱の予測時刻は従来法と同じであったが、最大震度 6 弱の予測時刻は従来法よりハイブリッド法が 37 秒早かった。2011 年 4 月 3 日に発生した同時多発地震に対しては、ハイブリッド法による従来法の品質管理を利用することで、予測震度の過大評価を回避できることが分かった。2013 年 2 月 25 日に発生した栃木県北部の地震に対しては、従来法は概ね正しい震源を求めていたにもかかわらず、1, 2 階級の過大評価をした。そのため、ハイブリッド法も従来法の過大評価に引きずられ、1, 2 階級の過大評価となった。

参考文献：

Hoshiba, M. (2013), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 1038-1050.

功刀卓・青井真・中村洋光・鈴木亘・森川信之・藤原広行 (2013), *地震*, **65**, 223-230.

キーワード: 緊急地震速報, 気象庁, 震度

Keywords: Earthquake Early Warning, Japan Meteorological Agency, seismic intensity

高精度・高速の緊急地震速報を目指して - Hi-net 地震計の気象庁地震計への統合処理 -  
Achievement of Faster and More Accurate Earthquake Early Warning System - Combining JMA and Hi-net data -

山田 真澄<sup>1\*</sup>; 溜瀨 功史<sup>2</sup>  
YAMADA, Masumi<sup>1\*</sup>; TAMARIBUCHI, Koji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 気象庁地震火山部  
<sup>1</sup>DPRI Kyoto University, <sup>2</sup>JMA

Earthquake Early Warning systems (EWS) are designed to quickly determine locations and magnitudes of earthquakes and then provide predictive warnings about the arrival time and amplitude of the strong shaking. Current JMA EWS uses data from two seismic networks: JMA accelerometer network and NIED high sensitive seismometer network (Hi-net). Currently, these two datasets are processed in the different scheme and the results are merged to issue a warning. Combining these two datasets and processing in the same framework should improve the accuracy and speed of the warning.

In this study, we tried to develop a method to use these two dataset in the same framework. A major barrier to do this is that the instrument responses are different in these networks. Hi-net seismometers are velocity-type sensor with the corner frequency of 1Hz, which means that the response of long-period components underestimates ground motions. It also saturates for very large ground motions. We need a special care to use this Hi-net data in the same framework.

We applied time-domain recursive filters to correct instrumental response of Hi-net sensors and adjust them to the response of mechanical seismometers. We successfully developed a method to produce records with the same response to the JMA acceleration data. We evaluated the saturation of the Hi-net data with the data in 2 month after the Tohoku earthquake, and found the effect of saturation was minor. Therefore, we can use Hi-net data and JMA acceleration data in the same scheme theoretically. Speed of the warning improved by 3 seconds in the average for the inland earthquake by combining these two networks.

Keywords: earthquake early warning, Hi-net, saturation, instrument response



## 人間以上に高精度の地震波自動読み取り システムの開発 (その6) Automatic arrival time picking compared to manual picking (6)

堀内 茂木<sup>1\*</sup>; 堀内 優子<sup>1</sup>; 飯尾 能久<sup>2</sup>; 高田陽一郎 高田陽一郎<sup>2</sup>; 澤田 義博<sup>3</sup>; 関根 秀太郎<sup>3</sup>; 中山 貴史<sup>4</sup>; 平原 聡<sup>4</sup>; 河野 俊夫<sup>4</sup>; 中島 淳一<sup>4</sup>; 岡田 知己<sup>4</sup>; 海野 徳仁<sup>4</sup>; 長谷川 昭<sup>4</sup>; 小原 一成<sup>5</sup>; 加藤 愛太郎<sup>5</sup>; 中野 優<sup>6</sup>; 中村 武史<sup>6</sup>; 高橋 成実<sup>6</sup>

HORIUCHI, Shigeki<sup>1\*</sup>; HORIUCHI, Yuko<sup>1</sup>; IIO, Yoshihisa<sup>2</sup>; TAKADA, Youichiro<sup>2</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>3</sup>; SEKINE, Shutaro<sup>3</sup>; NAKAYAMA, Takashi<sup>4</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>4</sup>; KONO, Toshio<sup>4</sup>; NAKAJIMA, Jyunichi<sup>4</sup>; OKADA, Tomomi<sup>4</sup>; UMINO, Norihito<sup>4</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>4</sup>; OBARA, Kazushige<sup>5</sup>; KATO, Aitaro<sup>5</sup>; NAKANO, Masaru<sup>6</sup>; NAKAMURA, Takeshi<sup>6</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 株式会社ホームサイスマメータ, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所, <sup>3</sup> 地震予知総合研究振興会, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター, <sup>5</sup> 東京大学地震研究所, <sup>6</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Home Seismometer Corporation, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, <sup>3</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction, <sup>4</sup>Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruptions, <sup>5</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>6</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに 海底地震計の整備や、安価な地震観測装置の開発に伴い、P波、S波到着時刻の読み取り量が増え、オペレータによる読み取りは、限界を超えつつある。我々は、到着時刻読み取りのための評価関数を定義し、地震の専門家のノウハウを組み込んだP波、S波自動読み取りシステムを開発した。また、P波、S波到着時刻に対応する時刻で、振幅が大きくなる疑似波形を作成し、センブルス解析法を応用した震源決定手法を開発することにより、複数の地震が同時発生する場合にも対応できることを示した。本システムは日本の全リアルタイム地震観測データやローカル観測網を用いた震源決定に利用されるようになりつつある。また、臨時地震観測データを用いた自動震源決定にも適用されている。本発表では、S波読み取りの高精度化のための開発を行ったので報告する。

2. 自動処理システムの改良 S波到着時刻の読み取りが、オペレータに比べ系統的に遅いことが示された(中山他,2013)。調べた結果、rotation成分を用いる限り、系統的遅れを解消することができなかった。そこで、N S成分と、E W成分のそれぞれの絶対値の和を用いるようにした。

一般に、S波が到来すると、卓越周波数が低くなることが知られている。そこで、速度と加速度の振幅比を用いて、卓越周波数の時間変化を求めるようにした。水平動成分について、次式のように、差分と、2回差分、

$$V(t)=u(t)-u(t-\Delta t)$$

$$A(t)=u(t)-2u(t-\Delta t)+u(t+2\Delta t)$$

を計算し、その絶対値の0.1秒移動平均を求め、両者の比に定数を掛けることにより、卓越周波数の移動平均を求めるようにした。ここに、U(t)は観測波形、 $\Delta t$ は0.02秒とした。この計算方法は、緊急地震速報でマグニチュードの決定に使われている $\tau_c$ の計算方法に類似している。式(1),(2)は、差分と2階差分であるため、長周期成分の振幅は小さくなり、STS等の長周期地震計によるデータでも、脈動の影響を取り除いた卓越周波数の時間変化が計算できる。P波、S波到着時刻読み取りでは、評価関数に、上記から計算される卓越周波数の時間変化を組み込むようにした。この他、波形の自己相関、振動継続時間、コーダ波振幅の減衰特性等のパラメータを抽出し、地震とノイズとの識別機能を強化した。

### 3. 結果

1) 卓越周波数が顕著に小さくなる時刻と、S波到来時に対応しており、卓越周波数の時間変化の指標が、S波読み取り精度向上に有効であることが示された。P波到来時にも、卓越周波数は小さくなる場合が多いが、逆に大きくなる場合もある。

2) 日本全体の2011年9月3日の連続波形データを用いて、自動処理による解析結果と一元化震源によるそれとを比較した。気象庁一元化震源による震源決定個数はそれぞれ588個、自動震源決定によるそれは1523個で、自動震源決定できた地震数は、一元化の2.6倍であった。P波、S波読み取り数は、それぞれ、35366, 30164で、これは、一元化の2.1倍、1.6倍であった。

3) オペレータによる読み取りと、自動処理によるそれとの時間差の絶対値の平均値は、それぞれ、0.06秒、0.13秒である。この値は、人間と人間との読み取り値の差に近い。

4) 到着時刻の読み取りが正しければ、近傍に位置する2観測点の、P波、S波到着時刻から計算される発震時刻の差は、地下構造の違いの影響を受けにくく、値がほぼ一致するはずである。そこで、観測点間距離が30km以内のすべての観測点の組み合わせについて、P波、S波到着時刻から計算される発震時刻の差を調べた。自動処理の場合の平均的発震時のズレは、0.27秒、一元化のそれは0.26秒であった。

これらの比較から、人間に近い、あるいは、それ以上に高精度の自動読み取りシステムが完成されつつあると結論される。

SSS28-04

会場:312

時間:5月2日 11:00-11:15

キーワード: 震源決定, P波、S波自動読み取り, 評価関数, センブランス, 卓越周波数, 人間と同等

Keywords: Hypocenter location, Automatic P and S wave picking, Evaluation equation, Senblance, Predominant frequency, compatible to manual picking

## 相対サイト増幅率の広域評価とリアルタイムサイト補正への適用 Real-time site correction based on evaluating relative responses to common reference station for wide area network

青木 重樹<sup>1\*</sup>; 干場 充之<sup>1</sup>  
AOKI, Shigeki<sup>1\*</sup>; HOSHIBA, Mitsuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所  
<sup>1</sup> MRI, JMA

Hoshiba (2013a, JGR) は震源や M の推定を介さずに、波動場のモニタリングを用いて地震動を予測する手法を提案している。その手法で用いるサイト補正はリアルタイム処理が可能であることが求められる。青木・干場 (2013, 地震学会) は、Hoshiba(2013b, BSSA) が開発したリアルタイム処理が可能で、相対サイト増幅率と振幅特性が一致する漸化式デジタルフィルタを用いて、隣り合う 2 観測点間でのサイト特性の置き換えに基づく、震央距離 100km 以上の地震 (遠方地震) に対する震度予測実験を行った。その結果、2 観測点間の平均震度差を用いた周波数依存しないスカラー量による補正よりも、周波数依存する相対増幅率を用いた方が、より適切に予測を行うことを示した。

本研究では、青木・干場 (2013) の手法により、近接 2 観測点で同時に観測された複数の遠方地震記録のスペクトル比の平均から、距離減衰や震源の効果を仮定せずに、2 観測点間の相対増幅率を推定した後、これを広域にわたって近接 2 観測点ネットワークで連結して最小自乗法で解く (池浦・加藤, 2011, 地震工学会論文集) ことにより、遠隔観測点も含めて全ての観測点に対して共通の基準観測点をもつ相対増幅率を評価した。ここでは、気象庁震度観測点、防災科学技術研究所の強震観測点 (K-NET, KiK-net (地中点も含む)) のうち観測点間隔 25km 以内のもので観測点ペアを作成し、これらをネットワークで連結することにより、ほぼ本州全域と四国地方をカバーした相対増幅率を評価することができた。

次に、Hoshiba(2013b) の手法により、これらの共通の基準点 (本論では気象庁の千代田区大手町観測点を基準点とした) に対する相対サイト増幅率と振幅特性が一致する漸化式フィルタを作成し、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2004 年新潟県中越地震の各加速度時刻歴に適用した。これらの補正された記録は、全ての観測点が基準点と同様のサイト増幅特性となった場合の模擬的な加速度時刻歴とみなすことができる。補正前と補正後の記録から震度分布を作成し比較すると、補正前の地上点震度分布に見られる短波長の空間的な不均質は補正後には解消され、震央からの距離とともに滑らかに震度が減衰する傾向が見られた。また、KiK-net の地中点震度については、補正前は地上点と比較して全体的に震度が小さくなるが、補正後は震度が増大し、その分布は地上点の補正後の震度分布とほぼ一致する傾向があった。これらは、本研究で用いたリアルタイムサイト補正手法が、適切にサイト補正を行っていることを示すものである。

### 謝辞

本報告では、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET, KiK-net) および気象庁の震度観測点の記録を利用しました。記して感謝いたします。

キーワード: サイト増幅率, スペクトル比法, リアルタイム処理, 強震観測網, 地震動予測

Keywords: Site amplification factor, Spectral ratio method, Real-time processing, Strong motion seismograph network in Japan, Prediction of the ground motion

## 実時間地震動予測 —データ同化手法の実データへの適用と予測— Real-time prediction of earthquake ground motion -application of data assimilation and its application to actual data-

干場 充之<sup>1\*</sup>; 青木 重樹<sup>1</sup>  
HOSHIBA, Mitsuyuki<sup>1\*</sup>; AOKI, Shigeki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Res. Inst., JMA

緊急地震速報における迅速化と震度予測の精度を高めることを目指して、新しい処理手法を考察している。これまで、データ同化手法を用いて波動場の実況値を推定し、そこから波動伝播の物理に則り予測することを考察してきた。今回は、東北地方太平洋沖地震（2011年）や中越地震（2004年）などの実データを用いた適用例について紹介する。

提案している手法では、波動場の空間分布の実況値を推定することが鍵となる。そこで、漸化式デジタルフィルタを用いてサイト増幅特性を補正し（青木・干場, 2014, 本大会）、さらに、功刀・他（2008）による震度演算のためのバンドパスフィルタに通し、その3成分合成値のエンベロップを求める。このエンベロップの値から、データ同化手法を用いて地震動強度と伝播方向の詳細な空間分布を求める。

この地震動強度と伝播方向を初期値として、波動伝播の物理に則り未来を予測する。波動伝播の物理として、今回は、輻射伝達理論を用いた。輻射伝達理論は、波形の山谷を無視しエンベロップを考え、波動の伝播をエネルギーの伝播で置き換えて考察するもので、高周波近似の一種である。これまでも、高周波地震波のコーダ部分の形状を考察する際に広く用いられている。今回の発表では、10秒後と20秒後の予測の例を紹介する。

東北地方太平洋沖地震の例では、複数のSMGAから次々と地震動が広がっていく様子が再現され、また、その分布にも方位依存性があることが分かる。震源時からかなり遅れて、福島県沖のSMGAで強震動が発生し、関東地方を伝播し、さらに、甲府付近から名古屋付近に進んでいく様子が見える。これに応じて、10秒後や20秒後の予測も、この方位分布を反映したものとなっている。従来の震源要素（震源位置とマグニチュードなど）を推定しそれらの情報から地震動を予測する方法では、遅れて発生する強震動に対処することは難しく、また、方位分布を精度よく予測することは困難だったが、この方法では、これらの課題を克服している。

中越地震の例では、次々と余震が発生し、地震動が伝播していく様子が見える。特に震源域付近では、揺れが収まる前に次々と新たな地震動が伝播してきている。予測も、この次々と発生する余震による地震動分布を推定している。従来の震源要素を推定する方法では、このように連発する地震に対処することは難しかったが、この方法では、活発な余震活動を伴う場合でも予測を行うことが可能である。

この様に、提案している方法では、従来の方法では困難だった場合にも対処でき、緊急地震速報における迅速化と震度予測の精度向上に資するものと期待できる。

キーワード: 緊急地震速報, データ同化, 地震動即時予測, 輻射伝達理論, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: Earthquake Early Warning, Data assimilation, Prediction of ground motion, Radiative transfer theory, 2011 Tohoku earthquake



## 長周期地震動に関する予報に向けた距離減衰式の比較 Investigation for earthquake early warnings of long-period ground motion

小上 慶恵<sup>1\*</sup>; 相澤 幸治<sup>1</sup>; 崎原 裕和<sup>1</sup>; 浦谷 純平<sup>1</sup>; 中村 雅基<sup>1</sup>  
OGAMI, Yoshie<sup>1\*</sup>; AIZAWA, Koji<sup>1</sup>; SAKIHARA, Hirokazu<sup>1</sup>; URATANI, Junpei<sup>1</sup>; NAKAMURA, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁

<sup>1</sup> JMA

高層ビルにおける地震時の人の行動の困難さの程度や、家具や什器の移動・転倒などの被害の程度は震度では適切に表現できないことがある。そのため、気象庁では高層ビル等における地震後の防災対応等の支援を図るため、長周期地震動による高層ビル内での被害の発生可能性等について知らせる「長周期地震動に関する観測情報（試行）」の提供を気象庁 HP を通じて開始した（相澤・他, 2014）。現在、長周期地震動版の緊急地震速報である予測情報の発表について技術的検討を行っている。予測情報の発表については、2~3年後程度を目途に試行的運用を開始したいと考えている（詳細は気象庁 HP 審議会・検討会等のページ参照）。

長周期地震動の予測に利用する手法は様々なものが考えられるが、その中でも任意の位置の震源で計算でき、かつ算出の早い距離減衰式を取り上げて議論を行う。

検討に用いた距離減衰式は、政府内での各種検討に用いられ、距離減衰式の係数や観測点増幅率の詳細なデータが入手でき、かつ、式のタイプやサイト補正手法の異なる以下の3つの論文で提唱されている式とする。

- ・佐藤・他, 2012 及び佐藤・他, 2010
- ・Morikawa and Fujiwara, 2013
- ・横田・他, 2010

これらの距離減衰式について、緊急地震速報（警報）が発表され、かつ最終的に決定した気象庁マグニチュードが5.5以上である地震について、緊急地震速報の計算結果及び最終的に決定した震源要素で速度応答スペクトルの計算を行い、それぞれの結果について波形から計算した絶対速度応答スペクトルと比較し検討を行った。予測観測点は気象庁震度観測点、K-net 観測点及び KiK-net 観測点、予測事項は長周期地震動階級とする。

その結果、いずれの式も傾向を表現でき、特に気象庁一元化震源を用いた場合には、実際の階級と予測階級が±1以内に入る確率は概ね7~8割程度となった。しかし断層までの最短距離として、震源を中心とした推定Mに応じた半径の球面上からの距離を採用しているため、震源近傍では過大評価に、震源から遠い地域では過小評価になる傾向があること、長周期地震動が増幅しやすい地域で過小評価になる傾向があること等の問題点が認められる。また、緊急地震速報の1報毎に計算された震源を用いた場合、計算の精度により距離減衰計算精度も左右されるため、どのタイミングの震源を用いて予測情報を発表するかについては議論が必要である。

引用文献：相澤・他, 2014, 本大会予稿集。佐藤・他, 2010, 日本建築学会構造系論文集 2010年3月号, 2010, p521-530。佐藤・他, 2010, 日本地震工学会論文集 第12巻, 第4号（特集号）, 2012, p354-373。Morikawa and Fujiwara, 2013, Journal of Disaster Research Vol.8 No.5, 2013, p878-888。横田・他, 2010, 日本地震工学会論文集 第11巻, 第1号, 2011, p81-101。

キーワード: 長周期地震動, 気象庁, 緊急地震速報, 距離減衰, 応答スペクトル

Keywords: long-period ground motion, JMA, EEW, attenuation relationship, response spectrum

## 長周期地震動のための緊急地震速報の高度化 Updating of Earthquake Early Warning for Long-Period Ground Motions

入倉 孝次郎<sup>1\*</sup>; 倉橋 奨<sup>1</sup>  
IRIKURA, Kojiro<sup>1\*</sup>; KURAHASHI, Susumu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛知工業大学

<sup>1</sup> Aichi Institute of Technology

はじめに

現在の気象庁による緊急地震速報は、マグニチュード  $M$  と震源距離の情報から対象サイトの地盤条件を考慮して地震動を予測する方法をとっている。地震規模が大きくなると震源域の広がりも無視できなくなる。この方法は、破壊が止まるまでは原理的に精度ある情報が決まらないため、長周期地震動による被害が問題になるような大規模地震に対しては、早期に精度ある情報を伝達するのは極めて困難である。従って、長周期地震動のための緊急地震速報の高度化には、 $M$ 、破壊域の広がり、震源距離などを決めることなく、リアルタイムで観測された地震動情報から、大きな揺れがまだ届いていない地域の揺れを予測する方法がこの問題を一気に解決することができる。本研究は、Hoshiba(2013)により提案されている実時間地震動予測方法を長周期地震動の予測のための適用性を検討する。

方法

揺れがまだ到着していない地点  $P$  の地震動は、すでに揺れの到着した地点  $r$  を含む表面  $S$  が  $P$  を取り巻く閉空間を構成していると考え、Kirchhoff-Fresnel 積分方程式で式 (1) のように表わせる。

この式の適用は、地震動の波長が  $u$  や  $G$  の空間的揺らぎよりも小さい、という条件が必要とされる。さらに、地震動の波長が、観測点および予測点の震源からの距離に比べて小さい場合、地震動は平面波で近似できるので、式 (2) のような簡単な式で表わされる。

震源点  $r_0$ 、観測点  $r$ 、および予測点  $P$  が一直線に並んでいると仮定できるとき、予測点  $P$  と観測点  $r$  の相互相関は、式 (3) で表わされる。

(3) の式の  $T$  は 2 点間の伝達関数を表わすが、地震動が一次的に伝播する平面波と考えられるときは、予測点  $P$  と観測点  $r$  間の Green 関数とほぼ同じと考えてもいい (Wapenaar et al., 2010)。ここでは、より一般的な適用可能性を検討するため、伝達関数で定義している。(3) の式の  $S$  は、式 (4) のように震源時間関数の自己相関関数として定義される。

予測点  $P$  が強震動観測点である時は、事前に小規模の地震の強震動記録を用いて、(3) の関係から 2 点間の伝達関数を求めておくことができる。その場合、観測点  $r$  で入射方位の検出し、伝達関数は入射方位に応じて事前評価しておく必要がある。観測記録がない場合でも、理論的なシミュレーションから  $T$  の推定は可能である。

大規模地震が起こったときには、震源域に近い側の観測点  $r$  での観測記録と伝播方位の情報に基づき、まだ観測されていない地点  $P$  の長周期地震動の予測が可能となる。超高層ビルや大規模石油タンクなどの被害に関係する長周期地震動は、周期が  $2 \sim 10$  秒、その波長は数 km から数十 km と比較的短いため、長周期地震動が問題となる多くの地震で (2) や (3) が適用可能と考えられる。 $(P \sim r)$  が  $(r \sim r_0)$  に比べてあまり小さくない場合には、(1) に戻った計算が必要となる。

キーワード: 緊急地震速報, 長周期地震動, 実時間地震動予測方法

Keywords: Earthquake Early Warning, Long-Period Ground Motions, the applicability of the front detection method

SSS28-08

会場:312

時間:5月2日 12:00-12:15

$$u(\mathbf{P}, t) = \int \frac{1}{v(\mathbf{r})} \cdot (\cos \theta + \cos \theta') \cdot G(\mathbf{P} - \mathbf{r}, t) * u(\mathbf{r}, t) dS \quad (1)$$

$$u(\mathbf{P}, t) = G(\mathbf{P}, \mathbf{r}, t) * u\left(\mathbf{r}, t - \frac{|\mathbf{P} - \mathbf{r}|}{v} \cos(\theta' - \theta)\right) \quad (2)$$

$$u(\mathbf{P}, \mathbf{r}_\theta, t) * u(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\theta, -t) = T(\mathbf{P}, \mathbf{r}, t) * S(\mathbf{r}_\theta, t) \quad (3)$$

$$S(\mathbf{r}_\theta, t) = s(\mathbf{r}_\theta, t) * s(\mathbf{r}_\theta, -t) \quad (4)$$

## 緊急地震速報の放送開始条件の現状と課題 Current Status and Issues of the Broadcast Start Condition of Earthquake Early Warning

鷹野 澄<sup>1\*</sup>  
TAKANO, Kiyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 情報学環/地震研究所  
<sup>1</sup> III and ERI, the University of Tokyo

緊急地震速報の伝達手段として館内放送は広く利用されているが、その放送開始条件は、それを導入した利用者が導入業者と相談して決めている。例えば、建物内に危険物等がある場合は、予想震度3以上で放送開始し、あまり危険物のない建物では、予想震度5弱以上で放送開始するなど、利用環境を考慮して利用者側が定めているのが現状である。

放送開始条件が適切に設定されているかどうかの判断基準となるものは、2011年4月に気象庁がガイドライン(気象庁、2011)を公表するまでは存在していなかった。このガイドラインでは、特に、不特定多数向けの館内放送に用いる場合は、気象庁が発表する緊急地震速報の警報に整合する放送を行うことが推奨されている。

緊急地震速報の警報は、「地震波が2点以上の地震観測点で観測され、最大震度が5弱以上と予測された場合」に、「強い揺れ(震度5弱以上)が予測される地域及び震度4が予測される地域」に対して出される(気象庁、2007)。これに整合するように、民放テレビや携帯電話会社などでは、気象庁が警報を出した地域に緊急地震速報を放送している。

我々も当初、この気象庁の警報の条件に整合するように、館内放送の放送開始条件を設定した。それに加えて、東北地方太平洋沖地震の時には、緊急地震速報の警報の予想震度が実際よりかなり低くなったことから、予想震度だけでなくマグニチュードも併用した巨大地震向けの放送開始条件を設定して運用してきた。しかし、運用開始から1年間に3回の放送が流れたが、いずれも実際の震度が震度2から3で、結果的に、放送は過剰放送となった(鷹野他、2013)。このことを受けて、緊急地震速報の放送開始条件について改めて見直した結果について報告し、より適切な放送開始条件とそれを実現するための課題について議論したい。

### 参考文献

気象庁(2007)「緊急地震速報のしくみと予報・警報」、気象庁、

[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/eew\\_naiyou.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/eew_naiyou.html)

気象庁(2011)「緊急地震速報を適切に利用するために必要な受信端末の機能及び配信能力に関するガイドライン」、気象庁報道発表資料、平成23年4月22日

鷹野澄・鶴岡弘・石黒佳彦(2013)「緊急地震速報はどのように放送すべきか(2)ー構内放送の開始条件はどうあるべきかー」、日本災害情報学会15回大会、A-6-3、2013年10月27日

キーワード: 緊急地震速報, 放送開始条件, 警報条件

Keywords: Earthquake Early Warning, Broadcast Start Condition, Alarm Condition



## DONET データのリアルタイム表示システムの開発 New-development of real-time seismic waveform viewing system feeding from DONET

高江洲 盛史<sup>1\*</sup>; 堀川 博紀<sup>1</sup>; 末木 健太郎<sup>1</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 園田 朗<sup>1</sup>; 三浦 誠一<sup>1</sup>; 坪井 誠司<sup>1</sup>  
TAKAESU, Morifumi<sup>1\*</sup>; HORIKAWA, Hiroki<sup>1</sup>; SUEKI, Kentaro<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; SONODA, Akira<sup>1</sup>; MIURA,  
Seiichi<sup>1</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

独立行政法人海洋研究開発機構では、東南海地震の想定震源域である熊野灘周辺に、地震計・水圧計等を備えた大規模かつ稠密海底観測網を整備し、地震・地殻変動・津波といった物理的諸現象をリアルタイムで観測・監視するシステム(DONET)を構築した。それらを用いた地震学的な成果としての研究情報と防災減災に寄与する情報を積極的に発信するためには、DONET データに加えて、既存地下構造データや地震津波シミュレーション結果などを取り込んだ統合データベースの構築が必要不可欠である。そのため、地震津波・防災研究プロジェクト(地震研究)、地球内部ダイナミクス領域(地下構造研究)、地球情報研究センター(情報発信)からなるデータベース構築チームを立ち上げた。

データベースの利用者は、地震研究者のみならず、地方自治体等の防災担当者を大きなユーザーターゲットとし、それぞれに向けたより利用しやすいデータベースの構築を検討してきた。そのうち、防災担当者向けのコンテンツ提供サービスとして、DONET から送られてくる強震計・水圧計の波形データをリアルタイムにウェブブラウザ(Google Chrome)上で表示するシステムを開発した。

2011 年東北地方太平洋沖地震以降、特に南海・東南海巨大地震発生帯に隣接する地方自治体は、国が示す広域的な防災対策を念頭に置きつつ、それぞれの地域に応じた独自の防災対策を構築していくことが求められている。最新の研究で得られた成果や地震減災に関する情報についての地道な広報活動だけでなく、海溝型巨大地震発生帯の直上・直近において稠密展開した観測装置が検知した生の観測波形データを、リアルタイムに防災担当者が確認できることで、より迅速な防災減災対応の判断に資することができる。

現在、平成 26 年 4 月の本格稼働を目指し、一部地方自治体に向けて試験運用を行っており、本発表では本システムの概要について紹介する。

キーワード: DONET, データベース, リアルタイム表示, 地方自治体への情報展開

Keywords: DONET, database, real-time trace view, outreach for local government

## 海底地震計の相対的地盤増幅特性の評価とその実時間補正の検討：防災科研の相模湾 OBS を例として Examination of the relative site amplification factor of OBS and their real-time correction: examples of Sagami Bay OBS

林元 直樹<sup>1\*</sup>; 干場 充之<sup>1</sup>  
HAYASHIMOTO, Naoki<sup>1\*</sup>; HOSHIBA, Mitsuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

Hoshiba (2013, JGR) は、次世代の緊急地震速報として、震源やマグニチュードの決定を介さずに、波動場の実時間把握により地震動を予測する手法を提案している。観測点におけるサイト増幅特性の補正はこの手法の重要な要素の 1 つであり、これまでに KiK-net の深井戸観測点 (岩切・干場, 2011, JpGU) や気象庁の震度観測点 (青木・干場, 2013, 地震学会) において、周波数依存する相対的なサイト増幅特性の調査が進められてきた。海域で発生した地震の地震動の早期把握には、海底地震計の活用が重要である。林元・干場 (2013, 地震学会) では、東南海海域に設置されている気象庁の東南海 OBS と JAMSTEC の DONET において、陸上の観測点とのサイト特性の比較を行った。本発表では、OBS 近傍に陸上観測点が多く存在する防災科学技術研究所の相模湾 OBS (Eguchi *et al.*, 1998, MGR) のデータを用いて、OBS の周波数依存する相対的なサイト増幅特性について調査し、サイト増幅特性のリアルタイム補正について検討した結果を報告する。

相模湾 OBS とその周辺の K-NET・KiK-net 観測点について、震央距離が 100km 以上離れた地震の S 波部分のスペクトルを算出し、近接観測点間におけるスペクトル比を相対的なサイト増幅率として推定した。OBS 近傍の基盤相当の観測点 (KNGH23, KiK-net 地中) に対するサイト増幅率をみると、相模湾 OBS では水平動の増幅が上下動に比べ増幅する傾向があり、特に 1~10Hz で水平動の増幅が大きい。また、OBS によっては 1Hz より長周期側でも増幅が大きい観測点が見られる。これらの増幅の特徴は、OBS 直下の堆積層や地震基盤までの深さなどの構造の違いによるサイト増幅特性を反映していると考えられる。

得られた相対的なサイト増幅率を用いて、比較元の観測点での波形を比較先の観測点相当のサイト特性に置き換えることで比較先の震度を予測し、サイト補正に周波数依存性を考慮する効果を検証した。サイト増幅率の補正には、Hoshiba (2013, BSSA) による漸化式フィルタを上下動・水平動それぞれに設計して用いた。また、震度の計算には功刀・他 (2008, 地震 2) のフィルタを用いた。これらはいずれも実時間処理が可能なフィルタである。2 地点間の平均震度差で補正した、周波数依存性を考慮しない予測との比較を行った結果、OBS の記録から陸上の震度を予測する場合においても、陸上同士での予測と同様に周波数依存性を考慮することで予測震度の実震度との残差の RMS が改善することが確認できた。これらの結果は、OBS においても陸域同様にサイト特性を実時間補正することで、波動場の早期把握に活用できる可能性を示している。

謝辞：本報告には防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net のデータを利用しました。

キーワード: 緊急地震速報, 海底地震計, 地震動予測, 地盤増幅特性

Keywords: Earthquake Early Warning, Ocean Bottom Seismograph, Real-time prediction of ground motion, Site amplification factor

## 地震波伝播の外挿を用いた緊急地震速報の改善:みかけ速度と伝播方向の活用 Improvement of earthquake early warning system using the extrapolation of wavefield with apparent velocity and direction

佐藤 明日花<sup>1\*</sup>; 蓬田 清<sup>1</sup>

SATO, Asuka<sup>1\*</sup>; YOMOGIDA, Kiyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻グローバル地震学研究室

<sup>1</sup> Global Seismology, Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

現在の日本の緊急地震速報は、震源に近い観測点でのP波の到着時間によって推定された震源の情報を利用している。しかし (a) 複数の地震がほぼ同時に起こった場合、(b) 地表でのみかけ速度が非常に速くなるような、震源の深い地震の場合、(c) 震源域が無視できないような規模の地震 ( $M > 8$ ) の場合などにおいて効率的でない。これらはすべて非円形波面が拡大しているためであり、このような場合に対処するために、我々は震源地を決定せずに観測された初期の波動場を単に外挿する新たなアプローチを提案する。従来のマイグレーションの方法は与えられた波面に沿った波動場を利用していたが、緊急地震速報のシステムでは表面上での波動場の拡大の方向とその速度を得る事が出来る。グリーン関数の標準的な表現定理に基づいて、我々は観測波形だけでなくその空間微分を用いて波動場を推定する。このことによって従来の波形のアプローチと比較して、外挿した波動場の分解能と信頼性を向上させる事が出来るだろう。

正確かつ安定した波動場の外挿のために、信頼性の高いグリーン関数が必要である。しかし、P波とS波の伝播は複雑な形で3次元の速度構造に敏感であるため、これを忠実に予測しようとする事は現実的ではない。緊急地震速報のためには、地表面を伝播する波面の到達位置と振幅だけがわかれば良いので、2次元的な波動伝播のみを現象論的に表現する事を試みる。すなわち、P波のみかけ速度による地表の伝播である。このみかけ速度は震源の深さと、地域によって変化する。例えば北海道での震源の浅い地震では見かけ速度は7.1km/sであるが、長野県の浅い地震では5.5km/sである。また、同じ北海道でも震源が浅い場合は7.1km/sであるが、震源が100kmの場合8.9km/sであった。また速度は特に震源が深い場合、震央距離の関数として変化もする。地震が発生した際に波面の外挿に使う適切なグリーン関数(みかけ速度)を求める事が出来るように、我々は異なる深さや地域、震源の見かけ速度の表を作成し、これらを順次改良していく。

さらに、我々は初期の観測波形からみかけ速度や進行方向をリアルタイムにどのようにして推定するかについても考察した。緊急地震速報に波動場の外挿を適用するために重要な事は、初期の入力データとして観測される地震波形の間での良好な相関が必要である。しかしHi-netのデータのような高周波の地震波形は一般的に相関が悪い。隣接する観測点間での相関関係を向上するために、我々は各観測点でのサイト応答を修正する。浅い地震と深い地震の両方を使用して北海道のHi-net観測点で周波数の関数としてサイト補正を推定した。

最後に、ウラジオストクや韓国の下での震深地震では、日本の太平洋側だけが振幅が大きくなる'異常震域'と呼ばれる領域が見られる。2010年2月18日のウラジオストクの下での深さ590kmの震深地震に対して、我々は日本でのP波の伝播方向とみかけ速度を推定し、その異方性を測定した。例えば、北海道北部の宗谷、留萌地方では見かけ速度が約7.5km/sであるのに対し、南部の日高、十勝地方では約13km/sであった。このようなみかけ速度の違いを用いることで、いわゆる異常震域のような一定方向のみに増幅する現象も、本研究の波動場の外挿によって再現、予測することができる。

キーワード: 緊急地震速報, 地震波伝播の外挿, マイグレーション, みかけ速度, サイト補正, 異常震域

Keywords: earthquake early warning system, extrapolation of seismic wave field, migration, apparent velocity, site effect, abnormal seismic intensity

## 大地震直後のエネルギー輻射関数を用いた早期余震予測の試み Early forecasting of aftershocks from seismic energy release rate immediately after the mainshock

澤崎 郁<sup>1\*</sup>; Enescu Bogdan<sup>2</sup>  
SAWAZAKI, Kaoru<sup>1\*</sup>; ENESCU, Bogdan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 筑波大学  
<sup>1</sup> NIED, <sup>2</sup> University of Tsukuba

大地震直後には短時間に大量の余震が発生するため、その一つ一つを地震記録上で区別することは極めて困難となり、地震の検出率は低下する。そのため現行の気象庁の余震予測発表は、地震が十分に検出されるようになる本震発生翌日以降から行われる。最近、Sawazaki and Enescu (査読中) は、Hi-net の連続波形記録を用いて大地震直後からのエネルギー輻射率の時間変化 (エネルギー輻射関数) を見積もることに成功した。この手法では、個々の余震を離散的に決めるのではなく、震源時間関数と似た連続的な時系列として全ての地震からのエネルギーの総和の時間変化を推定する。そのため、本震発生直後における余震の取りこぼしは理論上存在しない。推定したエネルギー輻射関数は、本震発生後 40 秒後以降には改良大森則と似た経過時間のべき乗で減衰し、エネルギー輻射関数をその回帰曲線で割った値は Gutenberg-Richter 則と似たべき乗型の分布を示す。余震予測はこの二つの統計則を用いて行われるため、本震直後の比較的短時間のエネルギー輻射関数を用いることにより、より早期の余震発生予測が可能となると考えられる。

国内で発生した 3 個の内陸地震について、本震発生後 1, 3, 6 時間後までに得られた 8-16Hz 帯域におけるエネルギー輻射関数を用いて、 $10^8$  J/s 以上のエネルギー放出率 (約  $M_w 4/s$  に相当) の 24 時間後までの発生回数を予測した。その結果、2008 年岩手・宮城内陸地震では、1, 3, 6 時間後時点での予測回数 (分子) と 24 時間後までに実際に観測された回数 (分母) の比が 24/35, 12/20, 20/10 であった。同様に、2004 年新潟県中越地震では 1524/223, 231/99, 113/50、2007 年新潟県中越沖地震では 17/59, 8/59, 30/21 となった。中越地震では 1 時間後時点で 7 倍の過大評価、中越沖地震では 3 時間後時点で 1/7 の過小評価をしている。前者では 1 時間以内に  $M_J 5.9$ 、 $M_J 5.8$ 、 $M_J 6.3$  の大規模余震が生じたが、1 時間後以降 24 時間後以内に生じた余震は最大でも  $M_J 5.5$  であった。後者では 3 時間後までには 1 度も  $M_J 5$  以上の余震が起こらなかったが、5.4 時間後に  $M_J 5.7$  の最大余震が起こった。これら大規模な余震の発生前後における地震活動パターンの変化が、極端な過大評価および過小評価の原因と考えられる。

キーワード: 余震, 早期予測, エネルギー輻射関数, 改良大森公式, Gutenberg-Richter 式  
Keywords: aftershocks, early forecasting, energy release rate, modified Omori law, Gutenberg-Richter law



## 自動 CMT 解決定精度向上のためのパルス状異常波形の除去方法の検討 A method to remove non-seismic long-period pulses for improved estimations of automatic centroid moment tensor solutions

酒井 孝英<sup>1\*</sup>; 熊谷 博之<sup>1</sup>; 中野 優<sup>2</sup>; 前田 裕太<sup>1</sup>; 山品 匡史<sup>3</sup>; プリード ネルソン<sup>4</sup>; 井上 公<sup>4</sup>; Melosantos Arnold<sup>5</sup>; Figueroa Melquiades<sup>5</sup>; Punongbayan Jane<sup>5</sup>; Narag Ishma<sup>5</sup>  
SAKAI, Takahide<sup>1\*</sup>; KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1</sup>; NAKANO, Masaru<sup>2</sup>; MAEDA, Yuta<sup>1</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>; PULIDO, Nelson<sup>4</sup>; INOUE, Hiroshi<sup>4</sup>; MELOSANTOS, Arnold<sup>5</sup>; FIGUEROA, Melquiades<sup>5</sup>; PUNONGBAYAN, Jane<sup>5</sup>; NARAG, Ishma<sup>5</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学環境学研究科, <sup>2</sup>海洋研究開発機構, <sup>3</sup>高知大学理学部, <sup>4</sup>防災科学技術研究所, <sup>5</sup>フィリピン火山地震研究所  
<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Kochi University, <sup>4</sup>NIED, <sup>5</sup>PHIVOLCS

はじめに：広帯域地震計では非地震性の長周期のパルス状波形が、P波もしくはS波が到達したとき発生するという現象が知られている(例えば、Delorey et al., Bull. Seism. Soc. Am., 2008)。このような異常波形は波形インバージョンによるメカニズム解の推定に影響を及ぼすが、その波形を適切に補正あるいは取り除く手法は確立されていない。フィリピン・インドネシア地域に、地震・津波監視のために整備された広帯域地震計ネットワークにおいても、このようなパルス状波形がしばしば記録されている。これらの広帯域地震計ネットワークのデータは、Nakano et al. (Geophys. J. Int., 2008)によって開発されたSWIFT震源解析システムによる自動メカニズム解の決定に用いられている。このシステムは長周期(50 - 100 s)の波形データから波形インバージョン法を用いてCMT解とモーメント時間関数を推定しているが、パルス状波形によりメカニズム解が適切に決定できない場合がある。津波監視のためには、適切なメカニズム解を早く決定する必要があるため、このような不適切な解の存在が問題となっている。そこで、本研究では簡便にパルス状波形を取り除く手法について検討した。

手法：各観測点の長周期波形の最大振幅について、表面波を仮定して震源までの距離と非弾性による減衰を補正したものを震源振幅と定義する。フィリピン・インドネシア地域で2012年に発生した地震のうち、SWIFTを用いて手動でメカニズム解を決定したイベントについて、各観測点の最大振幅から震源振幅を推定した。地震波の放射パターンにより震源振幅にはばらつきが生じるが、ここでは各イベントの最大の震源振幅を用いた。その最大震源振幅とモーメントマグニチュード( $M_w$ )を比較すると、両者には比例する関係が見られた。この関係は最大震源振幅の常用対数と $M_w$ について2次の関数でフィッティングすることができた。この関数からイベントの $M_w$ を用いて最大震源振幅を推定し、観測点までの距離と非弾性による減衰を考慮したものを観測点での波形の最大振幅と考えた。SWIFTはドイツ地球科学研究所(GFZ)のGEOFONプロジェクトで開発されたSeisComPから震源位置とマグニチュード( $M$ )の情報を受け取ると、自動でメカニズム解の推定を始める。最大震源振幅と $M_w$ の比較に用いたイベントについて、 $M$ と $M_w$ を比較すると、 $M_w$ が4.5 - 8.7の間で $M$ は $M_w$ とほぼ一致していた。そこで $M_w$ の代わりに $M$ を用いて観測点での最大振幅を推定することとした。

結果：フィリピン地域で2013年6月から2014年1月の間にSWIFTが自動でメカニズム解を決定したイベントについて、 $M$ から上記の関係をj用いて各観測点の最大振幅を手動で推定した結果、14のイベントで最大振幅より大きい振幅を持つ波形が見られた。これらはパルス状の異常波形に対応しており、その波形を取り除いた結果、11のイベントについて、自動解の推定に必要な波形の数が満たされなかったか、あるいは適切なメカニズムの推定が可能となった。この結果は、この手法がパルス状波形を取り除き、適切な波形の選択を行う上での有効性を示している。しかしながら、SeisComPが実際の地震より小さい $M$ を推定する場合もあり得るため、実際のオペレーションにおいては、この手法とこの手法を使わない従来のやり方を同時に用いて、最終的にオペレーターがより適切なメカニズム解を採用する方法での運用が必要であると考えられる。今回検討した手法はSWIFTの自動解決定の精度向上に貢献すると考えられ、さらにSWIFT以外の広帯域地震計を用いた自動CMT解決定システムにも広く適用できる可能性を持っていると考えられる。

## 気象庁が発表する長周期地震動に関する情報 Japan Meteorological Agency information on long-period ground motion

相澤 幸治<sup>1\*</sup>; 小上 慶恵<sup>1</sup>; 浦谷 純平<sup>1</sup>; 崎原 裕和<sup>1</sup>; 中村 雅基<sup>1</sup>  
AIZAWA, Koji<sup>1\*</sup>; OGAMI, Yoshie<sup>1</sup>; URATANI, Junpei<sup>1</sup>; SAKIHARA, Hirokazu<sup>1</sup>; NAKAMURA, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地震火山部地震津波監視課

<sup>1</sup> Japan Meteorological Agency

### 1. はじめに

長周期地震動による高層ビル内の揺れの大きさは震度では認識することが出来ない。過去の地震で、震源域から離れた震度が3や4以下の地域において高層ビル内で大きな揺れが生じた事例があった。このため、気象庁では概ね軒高45m以上の高層ビル内の人の体感や行動の状況や室内の状況について4つに区分した長周期地震動階級を新たに設け、地震計の加速度波形から長周期地震動階級を計算し、気象庁HPでの掲載を試行している。

ここでは、気象庁による長周期地震動に関する観測情報の内容について報告する。

### 2. 長周期地震動階級

気象庁では、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震等における高層ビル内での揺れの状況に関するアンケート調査や聞き取り調査(肥田・永野(2012)、久保ほか(2012)、相澤ほか(2012)、金子ほか(2012)等)等による人の体感・行動や室内の状況の結果や、周期1~2秒程度以上の人の体感・行動が床応答速度の大きさと関係していると考えられる(肥田・永野(2012)、相澤ほか(2012))ことを踏まえて、長周期地震動階級を新たに設けた。長周期地震動階級とは、固有周期が1~2秒から7~8秒程度の揺れが生じる高層ビル内における地震時の人の行動の困難さの程度や、家具や什器の移動・転倒などの被害の程度から4つの段階に区分した揺れの大きさの指標である。

気象庁では、地震発生直後地上に設置している地震計の観測データから求めた絶対速度応答スペクトル $S_{va}$ (減衰定数5%)の周期1.6秒から周期7.8秒までの間における最大値の階級をその地点の「長周期地震動階級」としている。

### 3. 長周期地震動に関する観測情報

気象庁では、平成25年3月28日より、長周期地震動に関する観測情報(試行)として、長周期地震動階級や強震解析結果等について、気象庁HPでの掲載を開始した。

気象庁の震度計において震度1以上を観測した場合、その震度を観測した60秒間の加速度波形データが長周期地震動分析システムに送信される。長周期地震動分析システムでは、この波形データについて品質管理と、地震かノイズかの判定を行った上で、地震の場合は、負荷分散を図るため並列処理を用いて、周期1.6秒から7.8秒の間で周期0.2秒幅で4つの減衰定数(0.5%, 2%, 5%, 20%)の絶対速度応答スペクトルおよび絶対加速度応答スペクトル、地動速度時刻歴や地動変位時刻歴について計算し、長周期地震動階級の分布図や、波形/スペクトルグラフ、データのcsvファイルを作成し、HPに掲載する。地震発生から気象庁HPでの公開までは、概ね10~20分程度となっている。

キーワード: 長周期地震動, 強震動

Keywords: long-period ground motion, strong motion

## Prediction of long-period ground motion intensity for earthquake early warning Prediction of long-period ground motion intensity for earthquake early warning

DHAKAL, Yadab prasad<sup>1\*</sup>; KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>; SUZUKI, Wataru<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>  
DHAKAL, Yadab prasad<sup>1\*</sup>; KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>; SUZUKI, Wataru<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The 2011 Mw 9.1 Tohoku-oki earthquake caused strong shakings of high rise buildings constructed on deep sedimentary basins in Japan. During the earthquake, many people got into difficulty with their movements inside the high rise buildings even on the Osaka basin located at distances as far as about 750 km from the epicentral area. Japan Meteorological Agency (JMA) has started to provide people with information on intensity of long-period ground motions based on the absolute velocity response spectra (1.6 to 7.8 s) of the observed records on the grounds (Aizawa et al., 2013). The intensity scale of long-period ground motions is classified into four: 1, 2, 3, and 4 having spectral values of 5 to 15 cm/s, 15 to 50 cm/s, 50 to 100 cm/s, and more than 100 cm/s, respectively. The spectra were computed at natural periods of 1.6 to 7.8 s using 5% of critical damping. The maximum value of the computed spectra among 1.6 to 7.8 s defines the class of intensity. We have recently constructed empirical prediction equations of absolute velocity response spectra in the period range of 1 to 10s aiming for earthquake early warning application (e.g., Dhakal et al., 2013). The equations use JMA displacement magnitude and hypocentral distance as basic parameters. Earthquakes having JMA magnitude 6.3 or larger and focal depths shallower than 50 km were used. One of the difficulties in empirical prediction of long-period ground motions is to effectively include the effects of local geological structure such as 3-D basin effects in the prediction equations. To simplify this problem, we obtained site correction factors at K-NET and KiK-net strong motion sites as the mean value of the logarithmic residuals. To make predictions possible at sites other than the strong motion observation sites, we derived correction coefficients based on the relationships between the average residuals and depths of deep sedimentary layers, which are available for whole Japan at Japan Seismic Hazard Information Station (J-SHIS). We found that the standard deviations are minimized by corrections using the depth of layer having Vs value of 1.4 km/s.

To define intensity at a site, we obtained the maximum value of the predicted spectra among  $T=1.6$  to  $7.8$  s using the empirical prediction equations explained above. However, we found that the maximum predicted values were somewhat biased against the observed maximum values. Therefore, we applied an additional correction factor to the maximum predicted values to finally obtain the intensities. When a prediction equation was constructed using the maximum value of the observed spectra as the independent parameter, the additional correction factor was eliminated as the resulting residuals were normally distributed; also, the predicted intensities were almost identical to those obtained based on the regression analysis results for each natural period. In this study, we illustrate and discuss the application of empirical prediction equations for the prediction of JMA intensity of long-period ground motions for earthquake early warning application.

### References

Aizawa K, Kawazoe Y, Uratani J, Sakihara H, Nakamura M (2013), Japan Meteorological Agency information on long-period ground motions, Abstract S41A-2410 presented at 2013 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 9-13 Dec.

Dhakal Y P, Kunugi T, Suzuki W, Aoi S (2013), Attenuation relation of absolute velocity response spectra (1-10s) in Japan - a preliminary analysis. Proceedings: 2nd Intl Symp. on Earthq. Engg, Japan Assoc. of Earthq. Engg., Tokyo, Nov 11-12, vol 2, pp 39-48.

キーワード: Long-period ground motion intensity, Earthquake early warning, Absolute velocity response spectra, Attenuation relations

Keywords: Long-period ground motion intensity, Earthquake early warning, Absolute velocity response spectra, Attenuation relations

## Regional Earthquake Early Warning Applications in Marmara Region Based on KOERI Seismic Network

## Regional Earthquake Early Warning Applications in Marmara Region Based on KOERI Seismic Network

PINAR, Ali<sup>1\*</sup> ; COMOGLU, Mustafa<sup>1</sup> ; ZULFIKAR, Can<sup>1</sup> ; TUNC, Suleyman<sup>1</sup> ; ERDIK, Mustafa<sup>1</sup>  
PINAR, Ali<sup>1\*</sup> ; COMOGLU, Mustafa<sup>1</sup> ; ZULFIKAR, Can<sup>1</sup> ; TUNC, Suleyman<sup>1</sup> ; ERDIK, Mustafa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Turkey

<sup>1</sup>Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Turkey

KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute) operates a seismic network in Marmara Sea region (NW Turkey) consisting of 40 broadband and 30 strong motion inland and OBS stations which has a good topology for regional EEW studies. Data transmission between the remote stations and the base station at KOERI is provided both with satellite and fiber optic cable systems. The continuous on-line data from these stations is used to provide real time warning for emerging potentially disastrous earthquakes.

The Virtual Seismologist in SeisComp3 and the PRESTo regional EEW (earthquake early warning) softwares are the two regional EEW algorithms that have been recently setup at KOERI data center to generate the EEW signal. Onsite EEW application are underway for more than a decade.

The early warning signal is communicated to the appropriate servo shut-down systems of the receipt facilities, that automatically decide proper action based on the alarm level. Istanbul Gas Distribution Corporation (IGDAS) is one of the end users of the EEW signal. IGDAS, the primary natural gas provider in Istanbul, operates an extensive system 9,867 km of gas lines with 550 district regulators and 474,000 service boxes. State-of-the-art protection systems automatically cut natural gas flow when breaks in the pipelines are detected. IGDAS uses a sophisticated SCADA (supervisory control and data acquisition) system to monitor the state-of-health of its pipeline network. This system provides real-time information about quantities related to pipeline monitoring, including input-output pressure, drawing information, positions of station and RTU (remote terminal unit) gates, slum shut mechanism status at 581 district regulator sites. The SCADA system of IGDAS receives the EEW signal from KOERI and decide the proper actions according to the previously specified ground acceleration levels. Presently, KOERI sends EEW signal to the SCADA system of IGDAS Natural Gas Network of Istanbul.

The EEW signal of KOERI is also transmitted to the serve shut down system of the Marmaray Rail Tube Tunnel and Commuter Rail Mass Transit System in Istanbul. The Marmaray system includes an undersea railway tunnel under the Bosphorus Strait. Several strong motion instruments are installed within the tunnel for taking measures against strong ground shaking and early warning purposes. This system is integrated with the KOERI EEW System. KOERI sends the EEW signal to the command center of Marmaray. Having received the signal, the command center put into action the previously defined measures. For example, the trains within the tunnel will be stopped at the nearest station, no access to the tunnel will be allowed to the trains approaching the tunnel, water protective caps will be closed to protect flood closing the connection between the onshore and offshore tunnels.

キーワード: EEW signal, Virtual Seismologist, PRESTo, end users, IGDAS, Marmaray

Keywords: EEW signal, Virtual Seismologist, PRESTo, end users, IGDAS, Marmaray



## 2013年オホーツク海深発地震の6成分モーメントテンソル解析 Full moment tensor inversion for the 2013 Sea of Okhotsk deep earthquake

原辰彦<sup>1\*</sup>; 川勝均<sup>2</sup>

HARA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>; KAWAKATSU, Hitoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>IISEE, BRI, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

We performed full moment tensor inversion for the May 24, 2013 Sea of Okhotsk deep earthquake, which is the largest deep earthquake (the moment magnitude is 8.3 after the Global CMT solution). Following Kawakatsu (1991), we redefined the diagonal components of the moment tensor, and determined full six component moment tensors. In order to determine the isotropic component independently from the CLVD component, we analyzed long period signals in the period range between 550 and 1000 s following Kawakatsu (1996), and Hara et al. (1995, 1996). We retrieved VHZ channel broadband waveform data from the IRIS DMC. The duration of the time series is five hours. We used the Direct Solution Method (Hara et al., 1991, 1993) to calculate the Green's functions. We considered the 3-D velocity structures of model SAW24B16 (Mégnin and Romanowicz, 2000) and crust 2.0 (Bassin et al., 2000; <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>) to calculate synthetic seismograms. We set spatial grids around the PDE hypocenter for possible centroid locations and temporal grids around the centroid time of the Global CMT solution for possible centroid times. We conducted linear moment tensor inversions for pairs of the spatial and temporal grids to investigate the dependence of solutions on centroid location and time. In the preliminary analysis, the isotropic components of the solutions with larger variance reductions and smaller correlation coefficients with the isotropic component and the other moment tensor components are in the range around 2 to 4 per cent (implosive) of the seismic moment of this event. This preliminary result is consistent with Okal (2013), who obtained the implosive isotropic component with about 2 per cent of the seismic moment by the analysis of the normal modes  ${}_0S_0$  and  ${}_1S_0$ , although further evaluation on uncertainty of the estimates obtained in this study is required.

キーワード: 深発地震, モーメントテンソル, 等方成分

Keywords: deep earthquake, moment tensor, isotropic component

## 遠地実体波を用いた地震波エネルギーの推定 Estimation of Radiated Seismic Energy from Teleseismic Body Waves

木内 亮太<sup>1\*</sup>; Mori James<sup>1</sup>  
KIUCHI, Ryota<sup>1\*</sup>; MORI, James<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

### 1. はじめに

地震発生時の震源における物理を理解する上で、動的な情報を持つ震源パラメーターは重要な情報である。そのうちの一つである地震波エネルギーは、無限空間において遠方まで伝播する波動エネルギーの総量として表現される。Choy and McGarr (2002) は遠地 P 波を用いて、海洋性地殻で発生する横ずれ型地震の場合に、見かけ応力（地震波エネルギーと地震モーメントの比に剛性率を乗じた量）が高い値を示すという結果を報告した。しかしながら、横ずれ型地震の際には遠地 P 波が放射パターンの節に近くなるため、振幅値の補正が難しく過度の補正を施している可能性がある。さらに、非弾性減衰の効果や観測点近傍での地殻構造の影響により、その推定にはまだ大きな誤差が存在する。そこで本研究では、新しく開発した手法でこれらの補正を行った上で、遠地実体波を用いて地震波エネルギーの推定を行った。

### 2. 方法

本研究では Boatwright and Choy (1986) の解析手法を改良して用いている。この手法では、遠地 S 波の減衰が大きく、また多数の後続波と干渉し合うため解析が困難であることから、遠地 P 波のみから推定を行っており、直達 P 波に pP 波と sP 波の 2 つの後続波が重なって観測されることを考慮している。さらに、前述の問題点を解決するため、本研究では次の 2 点の改良を加えている。(1) 用いるメカニズム解の誤差を考慮するために、放射パターンの補正值に関して strike, dip angle, rake angle それぞれの数値に幅を持たせて計算した後、その平均を取り解析に使用している。(2) それぞれの観測点についての観測点補正を取り入れて解析を行う。

データは IRIS の GSN ネットワークにおいて、震央距離 30-90° に位置する観測点で記録された P 波上下動成分を用いた。また、メカニズム解は Global CMT カタログで公表されている値を使用している。解析は、2000 年以降に発生した Mw 7.0 以上の地震 168 個を対象に行った。

### 3. 結果及び考察

本研究で推定された見かけ応力から、横ずれ型地震においてその値が正断層型や逆断層型地震の場合に比べて大きいことが分かった。また先行研究で指摘されているように、特に海洋性地殻の横ずれ型地震で高い値が見られた。これらの結果は先行研究の主張を支持するものである。しかしながら、定量的には本研究で推定された横ずれ型地震における見かけ応力は先行研究で推定された値よりも有意に小さく、過度な補正によりその値を過大に見積もる可能性があることを示唆している。さらに、従来の手法を用いて計算した場合に比べて誤差のばらつきが小さいことから、本研究で行った補正により、より信頼性のある見かけ応力を求めることが可能となった。

キーワード: 地震波エネルギー, 見かけ応力, 横ずれ型地震

Keywords: Radiated seismic energy, Apparent stress, Strike-slip earthquake

## 東北沖繰り返し地震発生領域を対象とした地震波エネルギー推定 Seismic energy estimation of repeating earthquake sequences offshore northeastern Japan

荒 諒理<sup>1\*</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>; 内田 直希<sup>2</sup>  
ARA, Masamichi<sup>1\*</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>; UCHIDA, Naoki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東北大学理学研究科

<sup>1</sup>The University of Tokyo, EPS, <sup>2</sup>Graduate school of science Tohoku university

プレート境界では、ほぼ一定速度でゆっくりとしたすべりが進行しており、その境界の時間変化しにくい特徴的な構造によって周りのすべりから遅れる場所、「固着域」がうまれると考えられている。固着域が周りのすべりに追いつくために定期的に破壊することで繰り返し地震が発生する。繰り返し地震の周囲では応力が局所的に大きく変化する。この変化は繰り返し地震の地震波エネルギーの空間的、時間的な変化に影響するだろう。本研究は東北沖で起きる多数の中小規模の繰り返し地震の地震波エネルギーを推定し、その周囲の応力変化や特徴的な構造を理解するための手がかりを得ようとするものである。

地震波エネルギーは地震時の断層の運動によって放射されるので、地震の規模についての動的な指標となる。それに対し、地震前と地震後の状態のみで決まる地震モーメントは地震の規模についての静的な指標である。地震モーメントは地震波スペクトルの低周波部分のみから求められるため推定精度が高いが、地震波エネルギーはスペクトル全体を考慮しなければならず、途中経路や観測点近傍における減衰・増幅効果の影響を補正しなければならないので推定誤差が大きい。また、地震波エネルギーの規模依存性について、現在の地震学において統一した見解は得られていない。特に scaled energy(地震波エネルギーと地震モーメントの比)が地震の規模(地震モーメント)に依存するか否かという問題が明らかでない。したがって、地震波エネルギーの放出様式の空間分布や時間変化などを議論するには、様々な規模の地震について、できるだけ正確に地震波エネルギーを推定する必要がある。

地震波エネルギーを推定するには上で述べた途中経路や観測点近傍の影響を除く必要があるが、本研究では経験的グリーン関数(EGF)法を用いることでこの問題を回避する。EGF法では、同じ震源を持つ複数の地震の同じ観測点における地震波間でスペクトルの比をとる。これにより共通の途中経路や観測点近傍の影響を取り除いて、震源での地震波スペクトル比を得ることができる。本発表では Baltay et al.(2010) のコーダ波を用いた EGF 法をもとに、コーナー周波数の不確実性やノイズの影響について、より厳密に検討する手法を開発した。

この手法を、東北沖の複数の繰り返し地震発生領域に適用した。Mw2-6 程度の地震に対して防災科学技術研究所 Hi-net の速度波形水平 2 成分の S コーダ波のエンベロープからスペクトル比を求めることにより地震波エネルギーを推定した。地震波エネルギーの規模依存性を調べたところ、scaled energy が M0 に対しておおよそ一定か、小さな正の依存性を持つという結果を得た。ただし、地震波エネルギーの推定値、および規模依存性は仮定する震源スペクトルのモデル(オメガ 2 乗モデルなど)に依存する。より適切な震源スペクトルのモデルを用いる必要があり、まだ検討の余地が残されている。

## 東北地方沈み込み帯における小地震の応力降下量の空間分布と2011年東北地方太平洋沖地震との関係 Stress drop variations among small earthquakes in the Tohoku-oki region - implications for the 2011 megathrust event

内出 崇彦<sup>1\*</sup>; Shearer Peter<sup>2</sup>; 今西 和俊<sup>1</sup>  
UCHIDE, Takahiko<sup>1\*</sup>; SHEARER, Peter<sup>2</sup>; IMANISHI, Kazutoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup> Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego

沈み込み帯のように大地震が発生することが懸念される地域で、事前にその破壊過程の性質を把握することは重要である。その手段のひとつとして、断層における何らかの物理パラメータの分布を調べることが考えられる。本研究では、東北地方沈み込み帯において、2011年東北地方太平洋沖地震(以後「本震」と呼ぶ)以前に80 km以浅で発生した1536個のMw 3.0 - 4.5の小地震の応力降下量を求め、断層状態を知る手がかりを得ようと試みた。応力降下量の計算には、Shearer et al. [2006]によるスペクトル解析法を用いた。この手法では、観測波形のスペクトルを震源項、伝播項、サイト項に分解した上で、経験的グリーン関数法により震源スペクトルを得て、そのコーナー周波数を計算する。Madariaga [1976]の円形クラックモデルを適用することで、応力降下量を求める。

応力降下量は深い地震ほど大きくなる傾向が見えた。また水平方向の不均質も明らかになり、青森県東方沖や宮城県沖では比較的高い応力降下量を持つ地震が多いのに対し、三陸沖ではそのような傾向は見られなかった。宮城県沖で応力降下量が高い地域は、本震のすべり域の端部に位置しており、本震の破壊を食い止める役割をした可能性も考えられる。なお、この高応力降下量域は1978年宮城県沖地震の破壊域の西側に位置する。

本震の大すべり域内の小地震の応力降下量は、同域内での本震の応力降下量と同等であった。本震では蓄積されていた剪断応力がほぼ完全に解放されたと考えられる [Hasegawa et al., 2011; Yagi and Fukahata, 2011] ことから、小地震においても剪断応力の大部分を解放しており、残留応力が低いであろうことが示唆される。ただし、本研究では推定された応力降下量同士の相対値はよく求まっているのに対し、絶対値は応力降下量計算で採用する震源モデルなどによって変わってしまうことに注意が必要である。小地震による剪断応力の完全解放については、他の研究による検証を待つ必要がある。

本震では高周波数の地震波が主に深部から放射されていたが、本研究で解析した小地震でも、深い地震の方がより多くの高周波数地震波を放射していることがわかった。

本研究によって、本震以前に発生した小さい地震によって、なんらかの断層状態の不均質性を知る手がかりを得る道筋が見えてきた。応力降下量の不均質が、具体的にどのような断層状態や地質などに対応づけられるのか検討を重ねていく必要がある。それによって、将来の地震の破壊過程モデルに制約を与えることが期待される。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 応力降下量, 宮城県沖, 断層状態の空間不均質

Keywords: The 2011 Tohoku-oki earthquake, Stress drop, Miyagi-oki, Spatial Heterogeneity of Fault Properties



## 強震動記録を用いて構築した2011年東北地方太平洋沖地震の広帯域震源像 Broad-band source image for the 2011 Tohoku earthquake constructed by strong-motion data

久保 久彦<sup>1\*</sup>; 浅野 公之<sup>1</sup>; 岩田 知孝<sup>1</sup>; 青井 真<sup>2</sup>  
KUBO, Hisahiko<sup>1\*</sup>; ASANO, Kimiyuki<sup>1</sup>; IWATA, Tomotaka<sup>1</sup>; AOI, Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>DPRI, Kyoto Univ., <sup>2</sup>NIED

長周期(概ね10秒以上)の地震波に基づく時空間すべり分布と短周期(0.1-1秒)の地震波の励起源の比較から、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.1, 以下2011年東北地震)における地震波放射特性は空間的な周期依存性を有していて、それはプレート境界上のすべり挙動の空間変化を反映していると考えられている(例えば Koper *et al.*, 2011; Lay *et al.*, 2012)。しかし、先行研究は異なる手法による解析結果の比較を基にしており、異なる周期帯における震源モデルの定量的な比較は行われてこなかった。そのため、2011年東北地震の震源特性をより深く議論するには同一手法を用いた周期帯別震源モデルを構築する必要がある。久保・他(2013, 日本地震学会秋季大会)では三つの異なる周期帯域(10-25秒・25-50秒・50-100秒)での時空間すべり分布を推定した。本研究は久保・他(2013)を拡張し、強震動記録を用いて周期10-25秒・17-33秒・25-50秒・33-67秒・50-100秒という連続的に異なる5つの周期帯域における2011年東北地震の時空間すべり分布を構築する。そして、周期帯別の空間的なすべり速度時間関数の違いに基づき、その震源特性を議論する。

時空間すべり分布の推定には Multiple time windows を用いた Kinematic linear waveform inversion (Hartzell and Heaton, 1983) を使用した。Green 関数は、三次元地下速度構造モデル(全国一次地下構造モデル, Koketsu *et al.*, 2012) を仮定した上で、三次元差分法プログラム GMS (Aoi and Fujiwara, 1999) によって計算した。解析には防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net・F-net の25観測点における強震波形記録を用いた。2011年東北地震の震源域で発生した中規模地震の上記観測点における地震動記録を用いて、解析対象周期における三次元地下速度構造モデルの妥当性を確認した。

推定された周期別震源モデルから、周期10-100秒における2011年東北地震の震源像は次のようにまとめられる。①破壊開始後0-60秒における宮城県沖深部での一回目の破壊(down-dip方向)。比較的短周期(周期10-25秒)を中心とした地震波が励起された。②破壊開始後45-90秒における宮城県沖浅部における長い継続時間を持つup-dip方向の破壊。③破壊開始後45-90秒における宮城県沖深部での二回目の破壊(down-dip方向)。一回目比べてより長い周期(周期25-100秒)の地震波が強く励起された。宮城県沖深部における二回の破壊での励起地震波の卓越周期の違いは、断層面上における small scale の不均質が最初の破壊によって取り除かれたために生じたのかもしれない。④破壊開始後90-135秒における福島県南部沖深部での破壊。

発表では現在構築中の周期5秒から100秒までの連続的な周期帯域における震源モデルについても報告する予定である。

【謝辞】本研究では防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, F-net で観測された強震記録を使用しました。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 広帯域震源像, 周期帯別震源モデル, 震源インバージョン, 強震動記録  
Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, Broad-band source image, Source models on different period bands, Source inversion, Strong-motion data

## ゆっくり滑りを示唆する前震活動 Foreshocks implying slow slip transients leading to large earthquakes

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>  
KATO, Aitaro<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> ERI University of Tokyo

In the recent decades, a growing number of geophysical evidences has clarified that a major fault zone along plate interface hosts not only the unstable fast sliding during rupture of ordinary earthquake, but also slow slip transients without any seismic radiations. Because slow slip transients quasi-statically release the shear stress in the adjacent seismogenic regions, the slow slip transients may have caused stress loading on the nearby seismic patch and might play a role in a slow nucleation process leading to a large earthquake (Beroza and Ide, 2010; Bouchon et al., 2011; Kato et al., 2012). Therefore, it is quite important to reveal interplay between slow slip and unstable fast slip, in order to shed light on the nucleation process of large earthquake.

Here, we explored foreshock activities implying slow slip transients leading up to large earthquakes. We applied the matched filter technique to continuous waveform data around 10 days prior to the past large earthquakes in Japan ( $M > 6.5$ ), and created newly foreshock catalog for each sequence. We found out accelerating seismicity preceding some large earthquakes at plate interfaces and intraplate at time scales of days to hours. These foreshocks were located very close to the initiation point of each mainshock rupture. The increase in foreshock seismicity implies that a fault may begin to slowly slip before large earthquake, as like recognized in the foreshock sequence prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

## 震源過程と Vere-Jones の分枝モデル間の類似特性 Similar Characteristics between the earthquake source process and Vere-Jones' Branching model

庄建倉<sup>1</sup>; 王<sup>2\*</sup>

ZHUANG, Jiancang<sup>1</sup>; WANG, Dun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

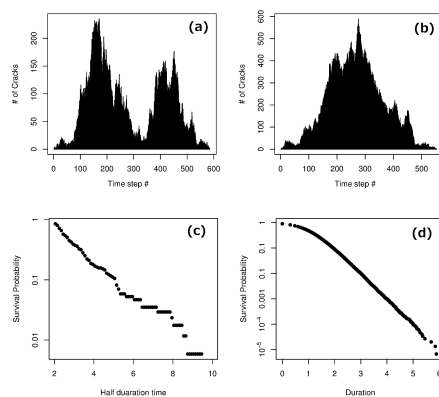
Vere-Jones' branching crack model was developed in 1970s. In this model, the earthquake source is regarded as the results of the total population of crack elements in a critical or near-critical branching process, where the crack does not propagate in a single continuous movement, but through a series of steps. At each step, each crack element simply terminates or generates several other crack elements nearby. Regarding the total number of steps (generation) as the duration time and the total number of crack elements as the total energy released, the following similarities are found between earthquake sources and this model:

1. The distribution of energies is asymptotically a Pareto distribution (power law) for the critical case, or a tapered Pareto distribution (tapered power law, Kagan distribution) for the subcritical case.
2. The duration time of ruptures has a tapered inverse power distribution.
3. The number of crack elements at each generation (time step) show similar patterns of earthquake source time functions.

Figure 1 (a) and (b): Plots of the numbers of crack elements at each time step in two simulation examples. (c): Distribution of half duration times in real earthquake catalog. (d): Distribution of duration times in synthetic catalogs.

キーワード: 分枝過程, ガーテンベルグ・リヒター則, テーパーパレート分布, 震源過程

Keywords: Branching process, Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency Relation, Tapered Pareto distribution, Earthquake source



## 震源タイプのプロット法に関する再考察 Review on Source Type Diagrams

麻生 尚文<sup>1\*</sup>; 太田 和晃<sup>1</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
ASO, Naofumi<sup>1\*</sup>; OHTA, Kazuaki<sup>1</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo

地震における力のシステムは、内部力源による点震源の仮定のもと、対称なモーメントテンソルで表現され、特徴的な向き・地震サイズ・震源タイプの情報をもつ。震源タイプとして、ダブルカップルを仮定することも多いが、主に誘発地震や火山性地震について、等方成分など非ダブルカップル成分の存在が指摘されている。また、ダブルカップルの組み合わせから非ダブルカップル成分が生じうることも分かっている。震源タイプに関する議論のため、震源タイプを分かりやすく可視化して表現することが重要である。

震源タイプの情報は二自由度であるため、二次元平面上に表現可能である。Hudson et al. [1989] によるダイアグラム (HPR ダイアグラム) がよく用いられるが、主な問題点として、スカラーモーメントを地震サイズとする概念 [Aki and Richards, 2002] と整合的でないこと、が挙げられる。これは、モーメントテンソルの固有値を座標とする三次元空間上の点 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) を、立方体の面上に投影していることに起因する。

そこで、Chapman and Leaney [2012] は球面投影とステレオ投影とを組み合わせた図法 (CL ダイアグラム) を考えた。球面投影により HPR ダイアグラムの問題点を解決し、ステレオ投影により球面上の点が面密度を保ったまま平面上にプロットされる。CL ダイアグラムは、任意のメカニズムとダブルカップルとの合成で得られるメカニズムが中心を通る一直線上にプロットされる利点があるが、ダイアグラムが曲線に囲まれた煩雑な領域になること、等方成分が卓越した際に非等方成分の様子が分かりにくいこと、などの欠点もある。

本研究では、HPR ダイアグラムの問題点を解決しつつ、CL ダイアグラムよりも直感的に理解しやすい矩形ダイアグラム (AOI ダイアグラム) を新たに開発した。点 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) を球面投影したのち、面密度を保ったまま円筒に投影して展開する。等方軸 (等方成分だけを変化させた際の軌跡) と非等方軸 (非等方成分をスカラーモーメント一定のもとに変化させた際の軌跡) との直交座標系になっている。等方成分は P 波の情報だけが現れる一方で、非等方成分は P 波と S 波からの情報が等価に現れるため、AOI ダイアグラムは地震波形解析と調和的な図法だと言える。

震源タイプのプロット法には、地図投影法と同様に万能な物は存在しないので、それぞれの図法の利点・欠点を理解して用いることが重要である。本研究では、実際の地震メカニズムの解析結果例をプロットしながら、ダイアグラムごとの見え方の違いや注意すべき点についても言及する。

キーワード: モーメントテンソル, 震源タイプ, 図法, ダブルカップル, CLVD, 等方変形

Keywords: moment tensor, source type diagram, double couple, CLVD, isotropic deformation



## Stress concentration ahead of supershear rupture Stress concentration ahead of supershear rupture

福山 英一<sup>1\*</sup>; 徐 世慶<sup>1</sup>; 溝口 一生<sup>2</sup>; 山下 太<sup>1</sup>  
FUKUYAMA, Eiichi<sup>1\*</sup>; XU, Shiqing<sup>1</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>2</sup>; YAMASHITA, Futoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup>Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev., <sup>2</sup>Centr. Res. Inst. Elect. Pow. Ind.

We report the shear strain field ahead of a supershear rupture. The strain data was obtained during the large-scale biaxial friction experiments conducted at NIED in March 2013. We conducted friction experiments using a pair of meter-scale gabbro rock specimens whose fault area was 1.5m x 0.1m. We applied 2.6MPa normal stress and loading velocity of 0.1mm/s. At the long side of the fault edge, which is parallel to the slip direction, 32 2-component semi-conductor strain gauges were installed at an interval of 50mm and 10mm off the fault. The data are conditioned by high frequency strain amplifiers (<0.5MHz) and continuously recorded at an interval of 1MHz with 16-bit resolution. Many stick slip events were observed and a unilateral rupture event was chosen in this analysis that propagated with supershear rupture velocity. By focusing at the rupture front, stress concentration was observed and sharp stress drop occurred immediately inside the rupture. We found that the stress concentration becomes mild as the rupture propagates and length of the stress concentration area becomes longer. This observation is quite interesting because the rupture propagates at a constant speed close to square root two times the shear wave velocity and thus a longer stress concentration region suggests more energy dissipation. We might speculate that such longer stress concentration area suggests longer plastic region ahead of the rupture (or longer cohesive distance). I.e. The cohesive zone length might be longer as the rupture propagates to maintain constant rupture velocity propagation.

キーワード: Earthquake rupture, Stress concentration, Supershear rupture  
Keywords: Earthquake rupture, Stress concentration, Supershear rupture

## 摩擦すべりに伴う AE 活動・摩擦特性の累積変位・法線応力依存性 Effects of normal stress on the evolution of AE activities and frictional properties of a fault

飯田 拓郎<sup>1</sup>; 矢部 康男<sup>1\*</sup>  
IIDA, Takuro<sup>1</sup>; YABE, Yasuo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku University

To numerically investigate earthquake generations on a plate interface or a fault, we need to know their frictional properties. This study provides a clue to evaluate the frictional properties from spatio-temporal variations of such observations as seismicity and aseismic sliding on the interface of the fault.

We performed frictional sliding experiments using a rotary shear apparatus under a variety of normal stress from about 5 MPa to about 15 MPa. Stepwise change in the sliding rate was imposed to investigate rate dependences of AE activity and friction. Cumulative displacement up to 200 mm was achieved to elucidate their evolutions.

We confirmed similar evolutions of AE activities and friction to those shown by Yabe (2002). That is, the frictional property (rate dependence of friction) of the fault was first the velocity strengthening. The velocity strengthening became weak with an increase in the cumulative sliding. Then, the fault showed the frictional property of velocity weakening. Finally, the rate dependence of friction converged to a constant negative value, when the cumulative sliding reached a critical distance. The  $m$ -value of AE events increased with sliding, when the cumulative sliding distance was smaller than a critical distance. After the critical sliding distance, the  $m$ -value took a constant value. The critical sliding distances of the frictional property and the  $m$ -value were almost the same each other. The rate dependence of the  $m$ -value, which was negative under a small sliding distance, also converged to a constant value of about zero at the cumulative sliding distance.

The evolutions were quantitatively evaluated by applying an exponential-decay function to data that is similar to the function proposed by Wang and Scholz (1994) to express wear processes of a fault. The function well reproduced the experimental data, suggesting that AE activities and frictional properties evolved in association with the wear. The decay distances of evolutions of the AE activities and the frictional properties were equal to each other and in inverse proportion to the normal stress. The latter could be understood by taking into account that the larger the overlap volume of asperities on the fault, the larger the normal stress. Further, when the normal stress was increased, the velocity weakening became weak and the  $m$ -value was decreased.

These results imply that there exists interrelations among seismicity and frictional properties of the fault.

キーワード: 摩擦すべり, AE 活動, 摩擦特性, ロータリーせん断, 変位依存性, 法線応力依存性  
Keywords: frictional sliding, AE activity, frictional property, rotary shear, evolution, normal stress dependence

## グリッドサーチ法による $M_{hdd}$ の係数決定 Determination of the coefficients of $M_{hdd}$ by a grid search approach

原 辰彦<sup>1\*</sup>  
HARA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター  
<sup>1</sup> IISEE, BRI

Hara (2007) developed an empirical magnitude formula using durations of high frequency energy radiation and maximum displacement amplitudes using tele-seismic P waves. Recently, Hara (2013), who referred to this magnitude as  $M_{hdd}$ , tried to re-determine the coefficients of the formula using a larger dataset by a linear inversion. The  $M_{hdd}$  calculated by the proposed coefficients better agree with the moment magnitudes from the Global CMT catalog. However, there is slight epicentral distance dependence for their differences. In this study, in order to reduce this epicentral distance dependence, we performed a grid search to determine the coefficients of  $M_{hdd}$  by minimizing both the differences between  $M_{hdd}$  and moment magnitudes and the dependence of their differences on the epicentral distance. The dataset is the same as that of Hara (2013). The search ranges for each coefficient can be set reasonably based on the studies of Hara (2007) and Hara (2013). The preliminary result suggests that it is possible to reduce the epicentral distance dependence using the coefficients obtained by the grid search method.

キーワード: マグニチュード, 高周波エネルギー放射, グリッドサーチ法  
Keywords: magnitude, high frequency energy radiation, Grid search method

## 震源での地震波放射周波数特性解明のためのウェーブレット係数インバージョンの試み Wavelet domain inversion for examination of the frequency-dependent characteristics of the seismic wave radiation

鈴木 亘<sup>1\*</sup>; 青井 真<sup>1</sup>; 関口 春子<sup>2</sup>; 功刀 卓<sup>1</sup>  
SUZUKI, Wataru<sup>1\*</sup>; AOI, Shin<sup>1</sup>; SEKIGUCHI, Haruko<sup>2</sup>; KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所/防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University/NIED

震源における地震波放射の周波数特性の解明は、震源の動力学の理解や強震動予測の高度化のために重要な課題であり、多くは周波数帯域ごとの地震記録の特徴に応じて推定された震源モデルの比較より議論が行われている。特に、2011年東北地方太平洋沖地震について、0.01-0.1 Hz 程度の地震波形から推定されるすべり分布は海溝に近い断層面浅部に大すべりを持つ一方、より高周波数帯域の地震記録を用いた経験的グリーン関数法やバックプロジェクション法からは陸に近い断層深部域より地震波を放射したという結果が多く、巨大地震発生場の特性を示す結果として関心を集めた。我々は、0.01-0.125 Hz の強震波形を用いた震源過程解析において各すべり領域による波形合成への寄与を検討し、断層浅部の大すべりは 0.02 Hz より低い超低周波数帯域の地震波を放射し、深部のすべりからはそれよりも速く変動する地震波形が合成されることを示した (Suzuki et al., 2011)。この結果は多くの研究で指摘されているよりも低周波数帯域での震源過程の周波数依存性を示唆している。Suzuki et al. (2011) では、0.01-0.125 Hz の合成波形の特徴と周波数帯域を変えた解析結果より周波数依存性の検討を行っているが、時間周波数領域の情報を持つウェーブレット係数をインバージョンの対象とすることで、より直接的に、特徴的な破壊イベントごとの各周波数帯域への寄与を評価することができると思われる。本研究では、ウェーブレット係数をフィッティング対象とする、マルチタイムウィンドウの震源インバージョン手法の開発を行った。Suzuki and Iwata (2009) は経験的グリーン関数と理論的手法を組み合わせ Irikura (1986) の手法により広帯域波形合成を行うウェーブレット係数インバージョンを開発し、2000 年鳥取県西部地震について 1 Hz を境とする低周波数帯域と高周波数帯域の地震波放射の特性を調べたが、本研究で開発した手法は波形合成手法およびモデルパラメータ数の制約から現在のところ低周波数帯域にて検討を行っている。東北地方太平洋沖地震の最大余震である茨城県沖の地震 (MJMA7.6) に適用した予備的な解析では、0.01-0.125 Hz の周波数帯域においては明瞭な周波数依存性は見られていない。今後はより高周波数帯域への適用や東北地方太平洋沖地震本震への適用を行う予定である。

### 参考文献:

- Irikura, K. (1986): *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 151-156.  
Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi (2011): *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G16.  
Suzuki, W. and T. Iwata (2009): *J. Geophys. Res.*, **114**, B08302.



## Tracing Rupture Process of the 2011 Tohoku M 9.0 Earthquake Using Small Seismic Arrays in China Tracing Rupture Process of the 2011 Tohoku M 9.0 Earthquake Using Small Seismic Arrays in China

XUELIN, Shen<sup>1</sup> ; WANG, Dun<sup>2\*</sup>  
XUELIN, Shen<sup>1</sup> ; WANG, Dun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>1.Key Laboratory of Earthquake Geodesy Institute of Seismology, China Earthquake Administration, <sup>2</sup>2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<sup>1</sup>1.Key Laboratory of Earthquake Geodesy Institute of Seismology, China Earthquake Administration, <sup>2</sup>2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Back projection(BP) can trace rupture front of large earthquakes. It has been widely applied for better understanding rupture processes of recent large earthquakes. An important result/output from BP is rupture length, which roughly corresponds to the final size of earthquakes given geological environment. Thus it can be used for fast estimate of the size of large earthquakes for the purpose of tsunami warning and disaster evacuation.

Most studies were focused on using data recorded at distances of 30 to 85 degrees to epicenter, in which distance range the first coming wave is direct P wave which ensures a good resolution for the results from BP.

Here we applied several sub China array data to trace the rupture propagation of the Tohoku earthquake to investigate the effect of the other regional phases such as Pn. We tested the effects with seismograms recorded in sub arrays of China seismic array. The results suggest that the overall rupture length can be recovered, though there is some visible disconvergence, especially for those results derived from distant sub arrays.

キーワード: Back projection, Rupture Process, The 2011 Tohoku M 9.0 Earthquake, Small Seismic Arrays in China  
Keywords: Back projection, Rupture Process, The 2011 Tohoku M 9.0 Earthquake, Small Seismic Arrays in China

## 高サンプリング地震波形を用いた小繰り返し地震の波形相関解析 Waveform correlation analysis of small repeating earthquakes using high sampling-rate seismograms

畠山 範重<sup>1\*</sup>; 内田 直希<sup>1</sup>; 松澤 暢<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>; 中島 淳一<sup>1</sup>; 松島 健<sup>2</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 平原 聡<sup>1</sup>; 中山 貴史<sup>1</sup>; 2011 年東北地方太平洋沖地震 合同余震観測グループ<sup>3</sup>

HATAKEYAMA, Norishige<sup>1\*</sup>; UCHIDA, Naoki<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>1</sup>; MATSUSHIMA, Takeshi<sup>2</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>1</sup>; NAKAYAMA, Takashi<sup>1</sup>; TOHOKU-EQ, Group for the aftershock observations<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 九州大学大学院理学研究院, <sup>3</sup> 2011 年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Group for the aftershock observations of the 2011 Tohoku Earthquake

繰り返し地震は、きわめてよく似た波形を持つ地震群であり、断層面の小アスペリティが繰り返し破壊することにより発生すると考えられている。しかし、繰り返し地震アスペリティの詳細な構造、破壊様式の再現性やゆらぎに関しては不明なことが多く、それらを明らかにすることは、プレート境界地震の発生メカニズムを理解する上で非常に重要である。

大地震の余効すべりなどの応力擾乱によって、同一アスペリティの破壊様式が変化する場合があることが、数値実験から明らかになっており、実際に大地震直後にその周りの小繰り返し地震のマグニチュードが系統的に変化したという観測結果もある。破壊様式が変化すると、地震波形の高周波成分が特に変化すると考えられる。そのため、小繰り返し地震の破壊様式の変化を捉えるためには、地震波形の高周波成分の違いを詳細に調べる必要がある。

本研究では、東北地方太平洋沖地震直後の 2011 年の 4 月から 11 月にかけて、東北地方太平洋側沿岸の定常ボアホール観測点で 1 kHz サンプリングの地震観測を行い、三陸沖で発生する小繰り返し地震の波形相関を調べた。具体的には、同一グループに属する小繰り返し地震同士でペアを作り、それらの波形のコヒーレンスを計算した。その結果、どのペアも低周波側では非常に高い波形相関を持つが、高周波側では、波形相関の高いペアと低いペアが存在することがわかった。また、波形相関が低下する周波数帯域は、どのペアもほとんど同じであった。この結果は、同一アスペリティの破壊でも、破壊様式がゆらいでいることを示唆している。

また、他の地震との高周波側の波形相関が低い地震は、近傍の地震の直後に発生していることがわかった。これは、近傍の地震による応力擾乱によって、同一アスペリティの破壊様式がゆらぎ、地震波形の高周波成分が変化した可能性を示している。

キーワード: 繰り返し地震, アスペリティ, 高サンプリング地震波形, 波形相関解析, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: repeating earthquake, asperity, high sampling-rate seismogram, waveform correlation analysis, Tohoku-Oki earthquake

## 大正関東地震最大余震の震源過程に関する考察 Study on the source process of the largest aftershock of 1923 Kanto earthquake

本多 亮<sup>1\*</sup>; 木村 尚紀<sup>2</sup>; 笠原 敬司<sup>3</sup>; 行竹 洋平<sup>1</sup>; 原田 昌武<sup>1</sup>; 道家 涼介<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>  
HONDA, Ryou<sup>1\*</sup>; KIMURA, Hisanori<sup>2</sup>; KASAHARA, Keiji<sup>3</sup>; YUKUTAKE, Yohei<sup>1</sup>; HARADA, Masatake<sup>1</sup>; DOKE,  
Ryosuke<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 温泉地学研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute, <sup>2</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>3</sup> Association for the Development of Earthquake Prediction

1923年大正関東地震(M7.9)の特徴の一つとして、M7以上の大きな余震が他のM8級の地震に比べて多かったことが挙げられる。余震群の中で最大のものは、本震の翌日に発生した地震で、M7.5(武村, 2003)と推定されている。関東地震の直後のため観測記録が少なく詳細は明らかになっていないが、S-P時間の再解析などを行ったいくつかの研究(例えば、武村, 1994; 浜田ほか, 2001)によれば、震源は房総半島沖の海溝軸付近から九十九里浜付近直下と推定されている。また Kimura et al. (2009)は、地殻変動データから最大余震の断層面を推定し、フィリピン海プレート境界のスロースリップが発生する領域およびプレート境界の固着域と重複することを示した。しかし、その震源過程などについてはいまだ不明な点が多く、房総半島沖のフィリピン海プレート境界の地震発生様式を考えるうえで、震源過程を明らかにすることは重要であると考えられる。そこで本研究では手始めに、岐阜測候所、高田測候所、仙台(東北帝国大学向山観象所)、秋田測候所の今村式強震計による観測記録を用いて最大余震のアスペリティの位置を推定し、房総半島沖のフィリピン海プレート境界で発生するスロースリップや繰り返し地震などとの位置関係について考察した。

### 手法

Kimura et al. (2009)で推定された断層面を基に、アスペリティ位置の推定を行う。まず、断層面上の最浅部(S1)、中央部(S2)、最深部(S3)の3か所に仮想震源をおき、それぞれの場合について各観測点までのS波の理論走時を計算して観測波形を並べる。S波の到達時刻は、武村(1994)、武村他(1995)、武村・野澤(1996)、武村・野澤(1998)の読み取り値を採用した。次に、3つの震源パターンそれぞれについて、S1~S3にポイントソース(アスペリティ)をおき、ライズタイム20秒のsmoothed ramp関数を仮定して理論波形を計算する。メカニズムは、Kimura et al. (2009)のものを使用した。震源とアスペリティのすべての組み合わせ(9通り)について、観測波形と理論波形の相関係数を計算し、そのスコアが最も良い組み合わせを探した。このとき、破壊開始からアスペリティが破壊されるまでの時間は、試行錯誤的にもっとも相関が良くなる時間を探した。

### 結果

S1もしくはS3を破壊開始点とし、S1~S3にアスペリティを仮定して理論波形と観測波形の相関係数を計算した場合、各サイトによって相関係数が高くなるアスペリティの位置がばらつく結果となった。一方、S2を破壊開始点とした場合は、仙台以外はS3にアスペリティをおいた場合についてもっともよくなった。したがって、断層面中央付近(S2)で破壊が始まり、深いほう(S3)に向かって破壊が進展したと考えられる。この時のアスペリティの破壊時間は、破壊開始から12秒後であり、およその破壊伝播速度は3km/sである。ライズタイム20秒を仮定しているため、全体の破壊時間は32秒程度となり、M7.5という規模とは矛盾しない。

### 謝辞

観測波形は、デジタル化し基準線補正を施したものを、鹿島建設から提供していただいた。ここに記して感謝いたします。

キーワード: 大正関東地震, 最大余震, 震源過程

Keywords: 1923 Kanto earthquake, the largest aftershock, source process

## 2013年サンタクルーズ地震の震源過程と津波 Earthquake source process of the 2013 Santa Cruz earthquake and the tsunami

朴 舜千<sup>1\*</sup>; 金 セッピョル<sup>2</sup>; 李 準桓<sup>1</sup>  
PARK, Sun-cheon<sup>1\*</sup>; KIM, Satbyul<sup>2</sup>; LEE, Jun-whan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 韓国気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 韓国プギョン大学

<sup>1</sup>National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, <sup>2</sup>Pukyong University, South Korea

In order to understand the characteristics of large tsunamigenic earthquakes, we analyzed the earthquake source process of the 2013 Santa Cruz earthquake and simulated the tsunami. We first estimated the fault length of about 200 km using 3-day aftershock distribution and the source duration of about 110 sec using the duration of high-frequency energy radiation (Hara, 2007). From these results, we used the initial value of rupture velocity as 1.8 km/s for teleseismic waveform inversions. Teleseismic body wave inversion was carried out using the inversion package by Kikuchi and Kananmori (1991). Teleseismic P waveform data from 28 stations were used and band-pass filter of 0.005 ~ 1 Hz was applied. Our best-fit solution indicated that the earthquake occurred on the northwesterly striking (strike = 290) and shallowly dipping (dip = 15) fault plane. Focal depth and rupture velocity were determined to be 23 km and 1.3 km/s, respectively. Moment magnitude of 7.8 was obtained showing somewhat smaller than the result of previous study (Lay et al., 2013). Slip distribution of the event showed roughly two patches of large slip, one around the hypocenter and the other to the southwest.

Using the slip distribution obtained by teleseismic waveform inversion, we calculated the surface deformations using formulas of Okada (1985) which would be assumed as the initial change of sea water by tsunami. Then tsunami simulation was carried out using Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model (COMCOT) code and 1 min-grid topographic data for water depth. Two DART buoy data were used to verify our simulation. In the presentation, we will discuss more details on the results of source process and tsunami simulation and compare them with the previous study.

キーワード: サンタクルーズ, 震源過程, 津波  
Keywords: Santa Cruz, source process, tsunami



## 2013年オホーツク海深発地震の震源過程とスラブの温度構造 Relationship between the source process of the 2013 Sea of Okhotsk deep earthquake and the thermal structure of the slab

遠藤 俊<sup>1\*</sup>; 八木 勇治<sup>1</sup>; 中尾 篤史<sup>2</sup>  
ENDO, Suguru<sup>1\*</sup>; YAGI, Yuji<sup>1</sup>; NAKAO, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大・生命環境, <sup>2</sup>東京工業大学  
<sup>1</sup>Univ.Tsukuba, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology

Deep earthquakes occur at depths where, due to the high normal pressures and the prominence of plastic behavior caused by high temperatures, the brittle fracture is difficult to explain. As a consequence, the mechanism of deep earthquakes has been long standing challenge in Earth Science since the early twentieth century. Some mechanisms of deep earthquakes have been suggested and these mechanisms are sensitive to the thermal structure of slabs. Accordingly, the purpose of this study is (1) to infer the source process of the Sea of Okhotsk deep earthquake (Mw 8.3, depth 608.9 km) on 24 May 2013 (UTC) by using the Hybrid Back-projection (HBP) method (Yagi et al., 2012) and waveform inversion (Yagi and Fukahata, 2011) and (2) to elucidate the relationship the source process and the thermal structure in the Kurile slab.

We found that the reactivation of the rupture occurred near the hypocenter. This means that a stress concentration near the hypocenter overcomes the fault strength and reactivates rupture at the hypocenter (Gabriel et al., 2012). We investigated the relationships between our results and the thermal structure of the Kurile slab and found that (1) the main shock started to rupture from the outer portion of the slab (2) the source region of the earthquake extended in a temperature range between 740 °C and 990 °C. This study does not clearly support transformational faulting as a mechanism for occurrence of the Sea of Okhotsk deep earthquake suggested by Zhan et al. (2013) because it is unlikely that metastable olivine exists all over the slab at the depth of the main shock.

キーワード: 深発地震, HBP 法, 破壊の再活性化  
Keywords: deep earthquake, HBP method, rupture reactivation

## 日奈久断層帯下部で発生した誘発微動の発震機構解推定 Focal mechanisms of the triggered tremor beneath the Hinagu fault zone, southwestern part of Japan

宮崎 真大<sup>1\*</sup>; 松本 聡<sup>2</sup>; 清水 洋<sup>2</sup>

MIYAZAKI, Masahiro<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Satoshi<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 九大・理, <sup>2</sup> 九大・地震火山センター

<sup>1</sup>Grad. Sch. Sci., Kyushu Univ., <sup>2</sup>SEVO, Kyushu Univ.

遠地大地震で励起された振幅の大きな表面波が通過する際に、プレート境界 (Miyazawa and Mori, 2005; Nadeau and Dolene, 2005) や火山近傍 (Obara, 2012) で、表面波の位相に同期して微動が発生する現象が知られている。九州地方における主要な内陸の活断層の 1 つである日奈久断層帯下部においても、Chao and Obara(2012, 地震学会秋季大会) や小原他 (2012, 地震学会) 等により、2004 年・2012 年のスマトラ地震や 2008 年の四川地震等で微動が誘発されていることが確認されている。宮崎他 (2013, 地震学会) では、定常観測網に独自の臨時観測点のデータを加えることで、微動が地震発生層より深い部分で発生していることを明らかにしている。

本研究では、2012 年スマトラ地震で誘発された微動の発震機構解の推定を行った。誘発微動の検出および震源決定では、通常、エンベロープ相関法 (Obara, 2002) が用いられるが、微動が主に S 波から構成されているという仮定をおいている。そこで、微動波形の振動軌跡に対して固有値解析を行い、最大固有値に対応する固有ベクトルから求められる S 波 polarization angle をデータとして、Hirasawa(1970) による手法を用いて発震機構解の推定を行った。誘発微動は、振幅が小さいものの振動継続時間が長く、微動のエネルギーが到達している時間内においても固有ベクトルの方向が大きく変化する。そこで、3 成分を合成した 10 分間の RMS 振幅をノイズ振幅とし、固有値解析を行った時間窓における 3 成分の RMS 振幅から S/N 比を求め、高 S/N かつ最大固有値が他の固有値と比較して大きいものを抜き出して、S 波 polarization angle のデータとした。

解析の結果、誤差が大きいものの広域の応力場におおむね一致する発震機構解が得られた。得られた発震機構解から、表面波による動的応力による影響がより詳細に議論できることが期待される。

### 謝辞

本研究では、九州大学の定常観測点・臨時観測点に加え、気象庁・防災科学技術研究所・鹿児島大学の定常観測点のデータを使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 誘発微動, 発震機構解, 日奈久断層帯

Keywords: triggered tremor, focal mechanisms, Hinagu fault zone

## 水圧破碎によって誘発された微小地震の応力降下量の時空間変化 Spatio-Temporal Variation of Stress Drop Observed at Carthage Cotton Valley Gas Field, Texas

飯田 周平<sup>1\*</sup>; 金 亜伊<sup>1</sup>  
IIDA, Shuhei<sup>1\*</sup>; KIM, Ahyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学  
<sup>1</sup>Yokohama City University

シェールガス開発では水圧破碎技術が一般的に用いられる。水圧破碎によって誘発される微小な地震は付近に設置された観測井を通して常時モニタリングされている。これらの誘発地震の発生メカニズムを解明することは注入される流体とフラクチャーの成長を関係づける上で非常に重要である。近年の水圧破碎実験現場などで誘発地震の発震機構の研究がいくつかなされているが（例えば、Horalek et al., 2010 ; Sileny et al., 2009）、ダブルカップルのみで説明できるものから、体積変化を示唆する非ダブルカップル成分を有意に含む例まで、水圧破碎の条件の違いから結果は一様ではない。これらの発震機構の解析を困難にしている原因は、実際の開発現場においてはコストの関係上多数の観測井を設置する事ができず、発震機構の推定に必要な多方位からの観測が行えないこと、また地震のマグニチュードが微小（主に-1以下）であるために良好な波形を得ることが難しい事等が挙げられる。本研究ではこれらの困難を克服するために経験的グリーン関数を用いて応力降下量を求める事により、誘発地震の震源特性について考察した。解析には1997年アメリカ合衆国テキサス州東部に位置するガス開発地域（Cotton Valley）で行われた水圧破碎実験のデータを使用した。実験では5回に分けて異なる種類の流体が深さ約2.6 km から2.9 km に注入され、約2500個の震源がRutledge and Phillips (2003)によって再決定されている。本研究ではそれらの地震から大小のペアを探せる地震に限り応力降下量を見積り、その時空間的な変化、特に観測井の圧力、流体の注入量などとの相関を調べ誘発地震のメカニズムについて考察する。

キーワード: 応力降下量, 水圧破碎, 誘発地震, 間隙水圧  
Keywords: Stress Drop, Hydraulic Fracturing, Induced Seismicity, Pore Pressure

## 南海・東南海・東海地震はスラブ内が潰れて付加体がはがれ、スラブが横ずれ回転すること～どうしてプレート間地震か～ Collapse of intraplate earthquake, Separation of accretionary wedge, and Rotation of plate by lateral-fault type

間瀬 博文<sup>1\*</sup>  
MASE, Hirofumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 所属なし

<sup>1</sup> none

(図面を参照のこと)

中部地方はマントルが西方から押されて沈み込みプレートを登坂することで支えられている。この力学の中で中国・近畿北西部・北陸地方は東進する。一方南海トラフから沈み込んだ“南海スラブ”は北西に向けた斜面を形成し、(川岸から流れに差し込まれた洗濯板のように)東進するものの中に浸かっている。その縁は抵抗を受ける形である。それで“南海スラブ”は右回転力を受けて弱い部分が潰れ、その場所より深い部分(北側)は這い上がり、全体的な右回転も起こりうる。“南海スラブ”のプレート内地震(A)と、“東海スラブ”との境界が起こす横ずれ断層型地震(B)が南海～東海地震そのものである。地震(A)でプレートは次第に短くなり、付加体は発達し、結果トラフは南に張り出す。プレート間地震でなく南海トラフ地震はプレート内地震であり、“南海スラブ”が、陸側プレート(紀伊半島)と一体で地中から出てくる。そのことを2004年の地震が明らかにした。(この項(1)(2)より)

海底地形図(3)を見れば、右回転に関係すると思われる巨大な亀裂が2本存在する。

亀裂(a):大王崎の東約10km点から始まり南へ延びトラフに達する(北は伊勢湾内に続くように見える)。これを境に西側はトラフが南に張り出している。下盤“南海スラブ”に対し上盤(陸側プレート・付加体)が大きく動く場合に滑ると考えられる。

亀裂(b):浜名湖の沖でY字を描きトラフに達する。浜名湖より北は“南海スラブ”“東海スラブ”が完全に分離し(7)、以南はトラフまで断裂しつつ接しているであろう。この断裂が海底まで達したもので、上盤を載せたまま下盤“南海スラブ”全体が動く場合に滑る亀裂。

地震(B)は亀裂(b)が滑り、亀裂(a)が滑るのは地震(A)と(B)の中間的なものと言える。

2004年山中氏が、東端は御前崎まで達する大きくメリハリの着いた1944年東南海地震の震源モデルを提案された。破壊が紀伊半島南東沖から始まり、だんだん陸側の深いほうに行き、その後トラフの方に飛び火して、それがだんだん北東方向にひろがって、最終的には北東方向(志摩半島沖から遠州沖)で大きな断層上のスベリを示した。震源付近が滑ったあとに時間を置いて北側が滑っているということから、紀伊半島沖の真ん中には破壊の進展を止める何かがあった、とのことである。(この項(4)(5)より)

その大きなスベリの領域は亀裂(a),(b)に重なる。1944年の地震は地震(A)だけでなく全てが起こったのかもしれない。山中氏の(プレート間地震の)震源過程を参考として地震(A),(B)亀裂(a),(b)による震源過程を構成してみた。

1.地震(A)が発生、スラブ等高線に沿って北東方向へ伝播した。2.付加体の剥離が南東方向に伝播しトラフに達した。3.その剥離がトラフに沿って、そして亀裂(a)に沿って伝播した。4.(上盤の回転)その剥離が大規模であった結果として亀裂(a)が滑った。5.(下盤の回転)環境が整い亀裂(b)が滑り地震(B)が発生した。トラフ付近にストレスが発生。6.三河地震が4,5の影響を受け発生。7.2004年の地震が発生し5のストレスを吸収した。

この震源過程で期待されるすべり量分布は、山中氏のそれと同様であるとしても矛盾点がない。南海～東海地震はプレート間でなくプレート内地震と横ずれ断層型地震であるとすれば、山中氏の成果は至極妥当なものであると強く感じる。

また、三河地震の際、京都での振幅は説明できないほど小さく岐阜でのそれは全く逆であった(4)。これは亀裂(a),(b)がもたらす地殻構造を原因として指摘できよう。さらに2004年の地震は南海地震の範疇である(2)としたが、その役割がさらに明確にできた。

参考文献

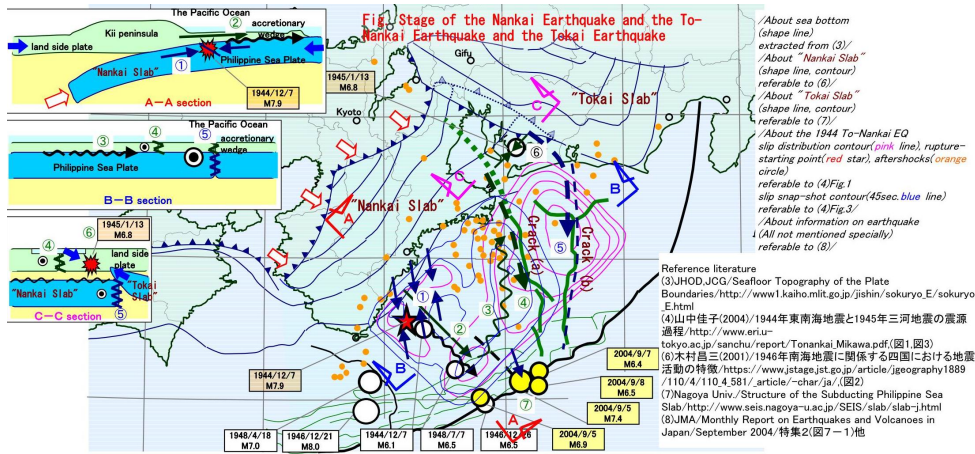
(1)間瀬博文(2009)/プレート内の自壊から始まる南海地震が関係する地域のシステム～沈降できないプレートと単独活動できない東海地震～/地震学会09年秋季大会/P3-64 (2)間瀬博文(2010)/2004年紀伊半島南東沖の地震は「南海地震」、這い上がっていた沈降プレート/地球惑星科学連合2010年合同大会/SSS027-P10 (3)海保海洋情報部/プレート境界域の精密海底地形図 <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/jishin/sokuryo/sokuryo.html> (4)山中佳子(2004)/1944年東南海地震と1945年三河地震の震源過程/東大震研 (5)名大環境学研究科/2007年1月12日「徹底討論一次の東海地震はどこだ」報告書 (7)名大環境学研究科/沈み込むフィリピン海プレートの形状と構造/ <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/SEIS/slab/slab-j.html>



SSS29-P10

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 28 日 18:15-19:30



## 2004年スマトラ地震(Mw9.1)と2005年ニ阿斯地震(Mw8.6)に先行した地震活動度の長期静穏化と活発化 Long-term seismic quiescence and activation anomalies preceding to the 2004 Sumatra and the 2005 Nias earthquakes

勝俣 啓<sup>1\*</sup>  
KATSUMATA, Kei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学研究院附属地震火山研究観測センター  
<sup>1</sup> Inst. Seismology and Volcanology, Hokkaido University

2004年スマトラ地震と2005年ニ阿斯地震に先行して、地震活動度が長期的に静穏化し、同時に活発化していたことが分かった。ISCの震源カタログを用いて、1964年から2004年までに研究領域(80E-110E, 10S-20N)で発生した深さ100km以浅、実体波マグニチュード $5.0 \leq M \leq 6.0$ の地震1153個を解析した。研究領域に東西0.5度×南北0.5度間隔で格子点を置き、ZMAPを使用して地震活動度の変化を詳細に調べた結果、1987年12月から静穏化が開始し、1989年7月から活発化が開始していたことが明らかとなった。静穏化領域と活発化領域は南緯2度から北緯6度の間に位置し、2004年スマトラ地震の震源域南部(破壊開始点付近)、及びその南東側に接する2005年ニ阿斯地震の震源域を覆っている。さらに、double-difference法によりISCの震源を再決定したPesicek *et al.* (2010)の結果及びGlobal CMTの震源メカニズム解を用いて、静穏化領域及び活発化領域の位置関係を調べると、海溝寄りではプレート境界面上の地震が活発化し、陸寄りでは地殻内地震と沈み込むプレート内地震が静穏化していることが分かった。この特徴的な空間パターンは、Kato *et al.* (1997)の数値シミュレーションから予想される海溝型プレート境界地震の本震発生数年から数10年前の状況とよく一致している。すなわち、本震の発生が近づくと、固着域の下端付近のプレート境界面上で前兆滑り(preseismic sliding)が開始し、その範囲が徐々に浅部に向かって広がって行く。それに伴い、プレート境界面上の小さなアスペリティが破壊されて低角逆断層型地震が活発化するが、上盤内(陸側の地殻内)では応力が一部解放されるので静穏化する。さらに、沈み込むプレート内ではdown dip extension型の地震は起きにくくなり、発生数が減少する。

Kato, N., M. Ohtake, and T. Hirasawa (1997), Possible mechanism of precursory seismic quiescence: Regional stress relaxation due to preseismic sliding, *Pure Appl. Geophys.*, 150, 249-267.

Pesicek, J.D., C.H. Thurber, H. Zhang, H.R. DeShon, and E.R. Engdahl (2010), Teleseismic Double-difference Relocation of Earthquakes along the Sumatra-Andaman Subduction Zone using a Three-Dimensional Model, *J. Geophys. Res.*, 115, B10303, doi: 10.1029/2010JB007443.

キーワード: 2004年スマトラ地震, 2005年ニ阿斯地震, 地震活動の静穏化, 地震活動の活発化, ZMAP, ISC

Keywords: The 2004 Sumatra earthquake, The 2005 Nias earthquake, seismic quiescence, seismic activation, ZMAP, ISC

## 北海道南東沖の太平洋プレート面上の摩擦の空間不均質性の検討：中規模地震の応力降下量の解析 Spatial heterogeneity of the frictional property on the Pacific plate off south-east of Hokkaido, Japan

齋藤 悠<sup>1</sup>; 山田 卓司<sup>1\*</sup>; 谷岡 勇市郎<sup>1</sup>  
SAITO, Yu<sup>1</sup>; YAMADA, Takuji<sup>1\*</sup>; TANIOKA, Yuichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北大地震火山センター

<sup>1</sup> ISV, Hokkaido Univ.

### 1. はじめに

地震の応力降下量は、断層面の強度と動摩擦応力の差を表す指標である。本研究では、北海道南東沖の太平洋プレートの沈み込み境界面の強度と動摩擦応力差の不均質性の空間分布を明らかにすることを目的として、北海道南東沖で発生した330個の中規模地震の応力降下量を解析した。解析対象の北海道南東沖では、オホーツクプレートの下に沈み込む太平洋プレート面上でくり返し大地震が発生している。例えば、北海道の南東に位置する十勝沖において、2003年十勝沖地震(Mw8.0, 以下、2003年本震と表記する)が発生した。この地震の大すべり域は、1952年十勝沖地震の大すべり域と重なっている(Yamanaka and Kikuchi, 2003)。また、2003年本震後には、本震でのすべりを囲むような顕著な余効すべりが観測されている(Miyazaki *et al.*, 2004)。このことは、太平洋プレートの沈み込み境界面における強度や応力、摩擦特性に空間的不均質性があることを示唆している。一方、先行研究により、大地震の大すべり域では恒常的に強度と動摩擦応力の差が大きく、小地震の応力降下量の解析により、大すべり域を事前に予測できる可能性が示唆されている(例えば、Allmann and Shearer, 2007, Yamada *et al.*, 2010)。本研究の解析結果にも先行研究で見られるような応力降下量と本震でのすべり域との相関関係が得られることが期待される。

### 2. 解析手法

本研究では、2002年6月から2010年12月までに北海道南東沖(緯度40.5°Nから43.5°N, 経度141.0°Eから146.5°E)で発生した $4.2 \leq M \leq 5.0$ の地震の応力降下量を解析した。具体的な解析は、以下の手順で行った。まず $3.0 \leq M \leq 3.2$ の小地震のうち、解析対象の地震に最も近い地震の波形を経験的グリーン関数(EGF)とする。そして、解析対象の地震とEGFとして用いる地震それぞれについて、S波の伝播時間の2倍の時刻から、1秒ごとにずらして取った3つのタイムウィンドウ(長さ5.11秒)について、Sコーダ波のスペクトルを求めた。そしてこれらのスペクトル比を計算することにより、観測波形に含まれる伝播の効果や観測点の特性をキャンセルし、解析対象の地震とEGFとの震源スペクトル比を得た。次に、震源スペクトルがBoatwright(1978)の $\omega^{-2}$ モデルに従うと仮定してコーナー周波数 $f_c$ を求めた。さらに、Madariaga(1976)の円形クラックモデルを用いて、コーナー周波数から応力降下量を推定した。

### 3. 解析結果と考察

応力降下量は $3.0 \times 10^{-1}$  MPaから $2.0 \times 10^2$  MPaと求められた。図は、応力降下量の空間分布を示している。図から明らかなように、2003年十勝沖地震の余効すべり領域と2004年釧路沖地震の震源域において、中規模地震の応力降下量の値に差が見られた。それぞれの領域の応力降下量の平均値は、1.2 MPaと2.0 MPaであった。この結果は、摩擦特性の空間不均質性を反映していると考えられる。さらに、1973年根室半島沖地震のすべり域の浅部と深部では、応力降下量の値がそれぞれ2.1 MPaおよび1.0 MPaとなり、有意な差があった。これは、1973年根室半島沖地震のすべり域内においても、太平洋プレート面上の強度や動摩擦応力に空間不均質性があることを反映しているのかもしれない。

### 謝辞:

本研究では、Hi-netのデータ(<http://www.hinet.bosai.go.jp/>)とEIC地震学ノート([http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/))で公開されているすべり分布のデータを使わせていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 太平洋プレート, 摩擦, 空間不均質性, 応力降下量

Keywords: Pacific plate, Friction, Spatial heterogeneity, Stress drop

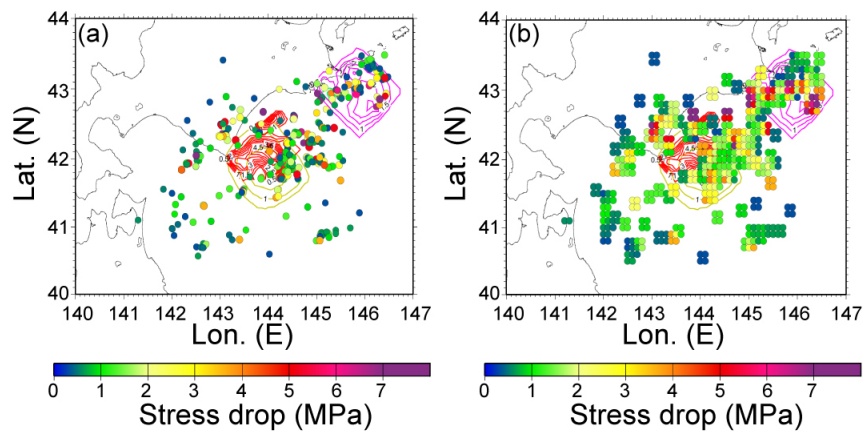


Fig. (a) Estimated stress drops of analyzed 330 middle-size earthquakes ( $4.2 \leq M \leq 5.0$ ). Each circle shows the stress drop for each earthquake. Contours indicate slip distributions of past four large earthquakes off south-east of Hokkaido (EIC seismic note, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/index.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/index.html)). (b) Spatial pattern of the averaged stress drop. Individual circles indicate averaged values of stress drop for every 0.1 degree, which were calculated from the values of earthquakes in areas with  $0.2 \times 0.2$  degrees.



### 3次元強震動・2.5次元遠地理論波形により地震波波形データから推定される東北地方太平洋沖地震の破壊過程 Seismically inferred rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake by using 3D and 2.5D Green's tensor waveforms

岡元 太郎<sup>1\*</sup>; 竹中 博士<sup>2</sup>; 原 辰彦<sup>3</sup>; 中村 武史<sup>4</sup>; 青木 尊之<sup>5</sup>  
OKAMOTO, Taro<sup>1\*</sup>; TAKENAKA, Hiroshi<sup>2</sup>; HARA, Tatsuhiko<sup>3</sup>; NAKAMURA, Takeshi<sup>4</sup>; AOKI, Takayuki<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 岡山大学 地球生命物質科学専攻, <sup>3</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>5</sup> 東京工業大学学術国際情報センター

<sup>1</sup>Dep. Earth Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Dep. Earth System Sci. Okayama University, <sup>3</sup>IIEE, Building Research Institute, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>5</sup>GSIC, Tokyo Institute of Technology

The March 11, 2011 Tohoku-Oki earthquake (GCMT Mw9.1) generated strong ground motions and large tsunamis, and caused devastating damages in the northeastern Japan. The rupture process of this event provides important clues for understanding the geophysical condition of the generation of mega-thrust earthquakes and the mechanism of the excitation of the large tsunamis.

We analyze "seismic" rupture process of this event by using a non-linear full-waveform inversion method. We incorporate the effect of the near-source laterally heterogeneous structure on the synthetic Green's tensor waveforms because the analysis can result in erroneous solutions if the effect is not considered [1]. Also, in order to increase the resolution we use the teleseismic and the strong-motion seismograms jointly: the distribution of strong-motion station is one-sided and analysis with only the strong-motion records may result in reduced resolution near the trench axis [2]. For the teleseismic P-wave synthetics we use a 2.5-dimensional finite-difference method [3]. For the strong-motion synthetics we use a full three-dimensional finite-difference method that incorporates topography, oceanic water layer, three-dimensional heterogeneity and attenuation. Our simulation is accelerated by GPUs used in parallel [4]: we use the TSUBAME GPU supercomputer in Tokyo Institute of Technology.

In the previous study [5] we used only a single structure model (i.e., a single vertical slice of the 3D heterogeneous structure) to generate all the 2.5D Green's functions. In this paper we have updated the 2.5D structure models. That is, we extracted twenty-three vertical slices from the 3D structure model: each slice was (nearly) perpendicular to the trench axis and was taken along the nodes of the grid that formed the fault plane. By using these new models the 2.5D Green's functions and 3D Green's functions are now "consistent" with each other.

We computed Green's tensor synthetic waveforms for 31 teleseismic and 32 strong-motion components. We used 640 GPUs of the TSUBAME supercomputer for the calculation of each strong-motion synthetics. The inferred slip distribution has large slips near the JMA epicenter with the maximum slip of about 32 m. The amount of slips at the areas close to the trench axis is smaller than that of the land-ward area (i.e., near the JMA epicenter). Inversion results similar to these features have been obtained by previous study [2] but it is remarkable that our joint "seismic" inversion using 2.5D-teleseismic and 3D-strong-motion Green's tensor waveforms resulted in the solution with these features (i.e., land-ward large slips and trench-ward small slips). These features have important implications for tsunami studies because large slips near the trench axis are expected for large tsunamis. In order to verify the solution we will inspect the resolution by using simulations of inversion and the effect of the choice of the Green's tensor waveforms on the solutions.

[1] Okamoto and Takenaka, *Earth Planets Space*, 61, e17-e20, 2009.

[2] Yokota et al., *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011GL050098, 2011.

[3] Takenaka and Okamoto, in *Seismic Waves, Research and Analysis*, ed. K. Masaki, Intech, 2012.

[4] Okamoto et al, in *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering*, ed. D.A. Yuen et al., Chapter 24, 375-389, Springer, 2013.

[5] Okamoto et al., *Seismological Society of Japan, 2013 Fall Meeting*, P1-62, Yokohama, Japan, October 7, 2013.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 破壊過程, GPU 計算, 地震波波形

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, rupture process, GPU computing, seismic waveforms

## 2011年東北沖巨大地震域の地震波速度と減衰構造 Seismic velocity and attenuation tomography of the source zone of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0)

趙 大鵬<sup>1\*</sup>; Liu Xin<sup>1</sup>; Huang Zhouchuan<sup>1</sup>  
ZHAO, Dapeng<sup>1\*</sup>; LIU, Xin<sup>1</sup>; HUANG, Zhouchuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理

<sup>1</sup>Tohoku University, Department of Geophysics

Detailed 3-D P and S wave velocity ( $V_p$ ,  $V_s$ ) and attenuation ( $Q_p$  and  $Q_s$ ) tomography of the crust and upper mantle under the entire Northeast Japan arc from the Japan Trench to the Japan Sea coast is determined (Zhao et al., 2011; Huang and Zhao, 2013; Liu et al., 2014). The suboceanic earthquakes under the Pacific Ocean and the Japan Sea are used in this work and they are relocated precisely using sP depth phases.  $V_p$  and  $V_s$  tomography is determined using a large number of high-quality arrival times, whereas the  $Q_p$  and  $Q_s$  tomography is obtained using a large number of  $t^*$ -data measured precisely from P and S wave spectra of local earthquakes. Our results reveal the high-V and high-Q subducting Pacific slab, and significant low-V and low-Q anomalies in the crust and mantle wedge under the volcanic front and the back-arc area. Large megathrust earthquakes ( $M > 6.0$ ) during 1900-2013 including the great 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) sequence are generally located in high-V and high-Q patches which are surrounded by low-V and low-Q anomalies in the megathrust zone. The high-V/high-Q patches in the megathrust zone generally exhibit large coseismic slips of megathrust earthquakes and large slip deficit on the plate interface. We think that these high-V/high-Q patches represent asperities in the megathrust zone, whereas the low-V/low-Q anomalies reflect weakly coupled areas. These results suggest that structural heterogeneities in the megathrust zone control the interplate seismic coupling and the nucleation of megathrust earthquakes.

### References

Huang, Z., D. Zhao (2013) Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and tsunami: Insight from seismic tomography. *J. Asian Earth Sci.* 70, 160-168.

Liu, X., D. Zhao, S. Li (2014) Seismic attenuation tomography of the Northeast Japan arc: Insight into the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) and subduction dynamics. *J. Geophys. Res.* 119, doi:10.1002/2013JB010591.

Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, H. Kanamori (2011) Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.* 38, L17308.

キーワード: 地震, スラブ, 流体

Keywords: earthquakes, slab, fluids

## 稠密海底地震計アレイ観測データを用いた2011年東北沖地震発生前後の震源南限域における地震活動に関する研究 A Study on Seismicity before and after the Tohoku Earthquake around its Southern Boundary Using Dense OBS Array Data

仲谷 幸浩<sup>1\*</sup>; 望月 公廣<sup>1</sup>; 篠原 雅尚<sup>1</sup>; 山田 知朗<sup>1</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 伊藤 喜宏<sup>3</sup>; 村井 芳夫<sup>4</sup>; 佐藤 利典<sup>5</sup>  
NAKATANI, Yukihiro<sup>1\*</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>1</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; ITO, Yoshihiro<sup>3</sup>; MURAI, Yoshio<sup>4</sup>; SATO, Toshinori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所, <sup>4</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>5</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>5</sup>Graduate School of Science, Chiba University

日本海溝域茨城県沖には、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域南限・最大余震域・沈み込む海山やその痕跡が位置しており、それらの相互関係や周辺域の地震活動との関係を理解することは、非常に重要である。しかし、対象域から遠く離れた陸上観測網データだけでは地震活動をよく拘束することはできず、解決すべき問題となっている。そこで重要となるのが、対象直上付近の海底地震観測データである。本研究では、茨城県沖で東北沖地震の発生を含む期間に展開された稠密海底地震計(OBS)アレイデータを用いて、東北沖地震前後における茨城県沖周辺の地震活動を推定した。

観測データには、東北沖地震の発生に伴い膨大な数の地震が記録されており、慣例的に行われているP波/S波走時の手動検測は極めて困難である。さらに海中ノイズや厚い堆積層の影響を受けたS/N比の小さいOBSデータを、東北沖地震後の雑音レベルの高い状況で処理する上で、ノイズに対して安定かつ有効なデータ解析手法が必要である。そこで、波形を足し合せてエネルギー放出領域を求めるバックプロジェクション法(BP法)をOBSデータに適用した。具体的な手法手順は、まず対象領域を小領域に分割し、各観測点までのP波走時を計算した。この際、計算走時の精度向上のために、既存の海域構造探査結果を参照して独自に三次元P波速度構造を構築した。この走時と周波数フィルター処理した観測エンベロープ波形とから、各時刻・各小領域でのセンブランス値を計算し、その最大値から震央を求めた。ここで深さ方向はプレート境界面を仮定している。一連のセンブランス解析に、STA/LTAアルゴリズムを組み合わせることで、計算時間の減少や各イベント認定の向上に成功した。

推定した震央分布の妥当性・精度については、本研究で求めた震央と既知の気象庁一元化震央とのずれ、さらにS/N比および震源深さを変えて理論計算した波形や実際のイベント波形を用いたテストを評価することで、定性的かつ定量的に見積もった。その結果、アレイから数10km以内の範囲では議論が十分可能であることを確認した。

得られた震央分布から、まず地震の個数密度分布のイメージングを行った。その結果、東北沖地震前後で地震活動が非常に活発になった領域と大きな変化の見られない領域とがあることが分かった。活発化した領域は、沈み込む海山の前方に位置し、過去の地震活動解析結果と整合的な空間分布であった。さらに、アレイ南西端に位置する活発な地震活動領域は、東北沖地震の最大余震滑り域周辺に位置していた。一方、本震前から変わらず地震活動が非活発な領域も存在し、これは海域構造探査で明らかとなった地震活動非活発帯とも対応していた。さらに本震直後の地震活動の詳細な時空間推移をセンブランス値から見ると、沈み込んだ海山周辺域では本震発生後から最大余震発生前までに比べ、最大余震発生後にそれらの地震活動が活発化したと考えられ、東北沖地震の震源域南限との関係が示唆される。

キーワード: 稠密海底地震計アレイデータ, 地震活動, 2011年東北沖地震震源南限域

Keywords: dense OBS array data, seismicity, the southern boundary of the 2011 Tohoku earthquake

## プレート境界断層掘削と高速摩擦実験により明らかとなった2011年東北沖地震浅部巨大滑りメカニズム Large shallow slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake: New insights from JFAST and high-velocity friction experiments

氏家 恒太郎<sup>1\*</sup>; 田中 英恵<sup>1</sup>; 斎藤 翼<sup>1</sup>; 堤 昭人<sup>2</sup>; Mori James<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>  
UJIE, Kohtarō<sup>1\*</sup>; TANAKA, Hanae<sup>1</sup>; SAITO, Tsubasa<sup>1</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>2</sup>; MORI, James<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>University of Tsukuba, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Hokkaido University

これまでプレート境界断層浅部は、固着が弱く、歪みをそれほど蓄えず、地震性滑りが起こりにくい領域であると考えられてきた。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では日本海溝近くのプレート境界断層浅部が約50mも滑り、その結果巨大津波を引き起こした。この浅部巨大地震性滑りの成因を明らかにするために、地球深部探査船「ちきゅう」による日本海溝緊急掘削 (Japan Trench Fast Drilling Project: JFAST) が実施された。掘削の結果、震源域のプレート境界断層は遠洋性粘土岩中に局所化して発達しており、断層を特徴づける剪断帯の厚さは僅か5m未満であることが明らかとなった。プレート境界断層の約8割はスメクタイトで構成されており、遠洋性粘土層におけるスメクタイトの濃集がプレート境界断層の局所化した発達をもたらしていると考えられる。プレート境界断層における変形は、鱗片状面構造に沿った分散した剪断と赤茶色と黒茶色粘土境界に沿った局所化した剪断で特徴づけられる。このうち後者に伴って、注入構造や色の異なる粘土鉱物のミキシングなど流動化 (fluidization) に特徴的な変形構造が認められた。プレート境界断層から採取された試料を用いて、高速 (1.3 m/s) 摩擦実験を含水条件下で行ったところ、小さい応力降下量、非常に低い剪断応力、短い滑り弱化解距離が得られた。剪断応力が非常に低い原因として、プレート境界断層物質が低摩擦粘土であるスメクタイトを大量に含むことと、摩擦発熱による間隙流体圧上昇 (Thermal Pressurization: TP) が効果的に起こったことが考えられる。また、定常状態剪断応力は垂直応力依存性を持たず、実験後の試料には流動化に特徴的な変形構造が認められることから、高速滑り時に生じた TP により断層物質が流体のように振る舞ったことが示唆される。本研究により、地震時に日本海溝のようなスメクタイトに富むプレート境界断層において TP が効果的に起これば、断層物質は流体のように振る舞い、ほとんど抵抗なしに深部からの破壊伝播を促進することが明らかとなった。これが東北地震時にプレート境界断層浅部において巨大滑りを引き起こした要因であると考えられる。また、天然の局所化した剪断と実験での高速剪断に伴って形成された変形構造の類似性は、地震時に断層物質が流動化したことを示唆している。



## JFAST コア試料の微量元素・同位体組成から見た日本海溝地震断層帯の地球化学的特徴 Trace element and isotope characteristics of core samples from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)

石川 剛志<sup>1\*</sup>; 松岡 淳<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; Mori James<sup>4</sup>; Chester Frederick<sup>5</sup>  
ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>; MATSUOKA, Jun<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; MORI, James<sup>4</sup>; CHESTER, Frederick<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> マリンワークジャパン, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 京都大学, <sup>5</sup> テキサス A&M 大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Marine Works Japan Ltd., <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>Kyoto University, <sup>5</sup>Texas A&M University

統合国際深海掘削計画 (IODP) 第 343 次研究航海 (JFAST: Japan Trench Fast Drilling Project) では, 2011 年東北地方太平洋沖地震で非常に大きな断層滑りが生じたと考えられる日本海溝付近において掘削調査が行われ, C0019E 孔では主として 650 mbsf~840 mbsf の間で, 計 53.3 m のコア試料が採取された。本研究では, 820 mbsf 付近のプレート境界断層試料を含む, これらのコア試料についての微量元素分・同位体分析の結果について報告する。

C0019E 孔における岩相は, Unit 1~Unit 7 の 7 つに区分される (Chester et al., 2013)。Unit 1~Unit 3 は上盤プレートの堆積物であり, Unit 4 がプレート境界断層, Unit 5~Unit 7 は下盤プレートの堆積物である。これらの岩石について ICP-MS を用いた微量元素分析, TIMS, MC-ICP-MS を用いたストロンチウム・ネオジウム・鉛同位体分析を行った。

プレート境界断層 (Unit 4) の試料は, 肉眼的には黄褐色~暗褐色で非常に粘土鉱物に富む岩石であるが, 微量元素組成から見るとかなり変化に富んでいる。しかしながら, それらはいずれも希土類元素 (REE), HFS 元素, トリウム等に富む顕著な特徴を示し, 他の JFAST コア試料から識別される。下盤プレートの褐色泥質堆積物 (Unit 5) は, 上盤プレートの堆積物 (Unit 1~Unit 3) とおおよそ類似した微量元素組成を示すが, 両者はアルカリ金属やストロンチウム等の濃度がやや異なる。Unit 5 の堆積物の下に存在する色彩変化に富む遠洋性堆積物 (Unit 6) は, 非常に変化に富む微量元素組成を示し, REE パターンには顕著なセリウム異常が見られる場合がある。ストロンチウム・ネオジウム・鉛同位体組成の変化も各 Unit の微量元素組成の特徴と整合的であり, 岩相区分とよく対応する。

JFAST コア試料の岩相と微量元素・同位体組成および微化石年代の間にはよい対応関係があり, 東北地方太平洋沖地震の浅部地震断層帯やフロントルウェッジを構成する岩石の起源を理解するための手がかりを与えてくれる。プレート境界断層試料の微量元素・同位体組成は, 近傍のインプットサイトである DSDP Site 436 下部に見られるスメクタイトに富む堆積物と類似しており, 同様な堆積物を原岩とする可能性が高いと考えられる。プレート境界断層試料の分析値からみた地震時/非地震時の諸過程についても議論を行う。

キーワード: 地震, 断層岩, 微量元素, 同位体, IODP

Keywords: Earthquakes, Fault rocks, Trace elements, Isotopes, IODP

## JFAST 航海で得られた日本海溝プレート境界試料の古地磁気分析 Paleomagnetic analyses of core samples from the plate-boundary thrust obtained during the IODP JFAST

三島 稔明<sup>1\*</sup>; Yang Tao<sup>2</sup>; 氏家 恒太郎<sup>3</sup>; Kirkpatrick James<sup>4</sup>; Chester Frederick<sup>5</sup>; Moore Casey<sup>6</sup>; Rowe Christie<sup>7</sup>; Regalla Christine<sup>8</sup>; Remitti Francesca<sup>9</sup>; 亀田 純<sup>10</sup>; Wolfson Monica<sup>11</sup>; Bose Santanu<sup>12</sup>; 石川 剛志<sup>13</sup>; Toy Virginia<sup>14</sup>  
MISHIMA, Toshiaki<sup>1\*</sup>; YANG, Tao<sup>2</sup>; UJIE, Kohtarō<sup>3</sup>; KIRKPATRICK, James<sup>4</sup>; CHESTER, Frederick<sup>5</sup>; MOORE, Casey<sup>6</sup>  
; ROWE, Christie<sup>7</sup>; REGALLA, Christine<sup>8</sup>; REMITTI, Francesca<sup>9</sup>; KAMEDA, Jun<sup>10</sup>; WOLFSON, Monica<sup>11</sup>; BOSE,  
Santanu<sup>12</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>13</sup>; TOY, Virginia<sup>14</sup>

<sup>1</sup> 大阪市大, <sup>2</sup>China Earthquake Administration, <sup>3</sup> 筑波大, <sup>4</sup>Colorado State University, <sup>5</sup>Texas A&M University, <sup>6</sup>University of California Santa Cruz, <sup>7</sup>McGill University, <sup>8</sup>Pennsylvania State University, <sup>9</sup>Universita di Modena e Reggio Emilia largo, <sup>10</sup> 北大, <sup>11</sup>University of New Hampshire, <sup>12</sup>University of Calcutta, <sup>13</sup>JAMSTEC, <sup>14</sup>University of Otago

<sup>1</sup>Osaka City University, <sup>2</sup>China Earthquake Administration, <sup>3</sup>University of Tsukuba, <sup>4</sup>Colorado State University, <sup>5</sup>Texas A&M University, <sup>6</sup>University of California Santa Cruz, <sup>7</sup>McGill University, <sup>8</sup>Pennsylvania State University, <sup>9</sup>Universita di Modena e Reggio Emilia largo, <sup>10</sup>Hokkaido University, <sup>11</sup>University of New Hampshire, <sup>12</sup>University of Calcutta, <sup>13</sup>JAMSTEC, <sup>14</sup>University of Otago

IODP 第 343 次航海 (Japan Trench Fast Drilling Project, JFAST) では, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震で大きな滑りが生じたと考えられる日本海溝浅部でプレート境界断層を貫く掘削が行われた。プレート境界断層内部での cm スケールの変形を復元するため, コア試料の古地磁気分析を行った。

プレート境界断層コア試料は鱗片状面構造が発達し, 赤茶色・黒茶色の遠洋性粘土がシャープな境界面で接する構造をもつ。この境界面を含むように切り出された 3x3x5 cm<sup>3</sup> の薄片用スラブを用いた。高知大学海洋コア総合研究センターの 2G755 パススルー型超伝導岩石磁力計を利用し, 80 mT までの段階交流消磁と 0.5-1 cm 間隔での磁化測定を組み合わせた。

段階交流消磁測定により, 2つの古地磁気成分を取り出すことができた。そのうち一方 (低保磁力成分) は 20-30 mT で消磁される成分であり, もう一方 (高保磁力成分) は 80 mT での交流消磁でも消磁されなかった。高保磁力成分の方位は, 同一のホールラウンド試料から切り出された複数のスラブではほぼ同一であった。一方, 低保磁力成分は隣接するスラブ間や, 同一スラブ内でも測定位置によって, 異なる方位を示した。

低保磁力成分の磁化方位の不一致は, プレート境界断層スラブ試料中の cm スケールの変形・回転を反映していることが考えられる。一方, 高保磁力成分の磁化方位の整合性は, 変形中または変形後に獲得されたためとすれば説明でき, 変形時に磁性鉱物が生成されたとすればそれが高保磁力成分を担った可能性がある。

## 間隙水圧観測から検出した2011年東北地方太平洋沖地震による透水性変化 Change of permeability caused by 2011 Tohoku earthquake detected from pore pressure monitoring

木下 千裕<sup>1\*</sup>; 加納 靖之<sup>2</sup>; 伊藤 久男<sup>2</sup>  
KINOSHITA, Chihiro<sup>1\*</sup>; KANO, Yasuyuki<sup>2</sup>; ITO, Hisao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>DPRI

地震に伴う地下水変化(水位, 流量, 自噴量, 化学成分など)はコサイスマミックな変化として, あるいは前兆現象として昔から広く観測されている。京都大学防災研究所附属地震予知研究センターでは, 2005年から岐阜県神岡鉱山において間隙水圧と気圧の連続観測を行い, 地震による地下水変化を調べている。間隙水圧の測定には探鉱のために掘られた既存のボアホールのうち湧水のあるものから, 2つのボアホールを選び使用している。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際には震央距離がおよそ523kmであるにもかかわらず, 顕著な間隙水圧の減少が観測された。これは東北地方太平洋沖地震により震源域西側の地殻が伸びたこと, あるいは地震動によって水が間隙中を通りぬけやすくなり, 地下水が流出したことで説明できる。そこで, 本研究は東北地方太平洋沖地震に伴う透水性変化について潮汐応答(潮汐による間隙水圧変化)を用いて明らかにすることを目的とした。間隙水圧は気象や地球潮汐, 地殻変動などの外的要因により日々変化する。気象や地殻変動は一定ではないため, 「地震による地下水変化」のみを検出することは難しい。そこで, 地球潮汐による変形をほぼ一定と見なし, 帯水層内の状態が変化しない限り同じ応答を示すと仮定し, 地震前後の潮汐応答を比較した。間隙水圧データから潮汐応答を抜き出すために, 潮汐解析ソフトBAYTAP-Gを使用した。潮汐解析の中で着目した分潮はM2, O1分潮であり, 半日周期と1日周期をもつ。解析より, M2, O1分潮の振幅は東北地方太平洋沖地震後共に減少し, 位相変化もみられた。この結果は地震後帯水層内の岩盤の状態あるいは物性が変化したことを示唆する。さらに, 線形間隙弾性理論と拡散方程式を用いて地震前後の水理拡散率を見積もった。2本のうち1本のボアホールにおいて, 体積弾性率を一定と仮定した場合, 水理拡散率は地震前8.9 m<sup>2</sup>/sから地震後65.0 m<sup>2</sup>/sに増加したことがわかった。この結果は地震後に間隙水圧が減少したこととよく一致している。また震央距離やマグニチュードの違いによる地震前後の透水性変化の有無について調べるため, 2007年に発生した能登半島地震(M6.9)に対して同様の手法を用いて解析を行った。観測点までの震央距離はおよそ112kmであったが, 地震前後で水理拡散率変化はみられなかった。震度は同程度であるにもかかわらず, 東北地方太平洋沖地震では水理拡散率が増加し, 能登半島地震では変化しなかったのかを調べるため①静的ひずみ変化, ②動的ひずみ変化, ③地震波の卓越周波数, ④方位角の4つの項目について水理拡散率変化との相関について検証した。

キーワード: 水理拡散率, 間隙水圧, 地球潮汐

Keywords: hydraulic diffusivity, pore pressure, Earth tide

## 海洋潮汐に先行する間隙水圧変動の謎：室戸沖南海トラフ付加体先端部の孔内長期観測 11+年の成果 Enigmatic phase lead of pore pressure: 11+ years of ACORK monitoring at the frontal decollement of Nankai Trough

木下 正高<sup>1\*</sup>; 加納 靖之<sup>2</sup>  
KINOSHITA, Masataka<sup>1\*</sup>; KANO, Yasuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>京都大学防災研究所

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Kyoto Univ. DPRI

2001 年来 11 年半にわたって、室戸沖南海トラフ付加体先端部付近のデコルマとその上部の水圧を、孔内で継続観測している。10 インチケーシングの外側の annulus 部分で、海底下 100-900m の 6 か所の水圧をモニターしている。その中に潮汐応答も記録されている。応答の様子が深度によって異なることから、地層中の力学・水理特性を推定することが可能であるが、これまでの分析から annulus 付近の compliance が（設計よりも）大きいため、記録される変動が地層中の潮汐変動から歪んでしまい、地層中の特性を正確に推定することが困難と指摘された。

一方応答特性（振幅と位相）が 11 年間に徐々に変動していることが分かった。振幅比-位相差ダイアグラム上で 808 のほぼすべての圧力が同じカーブ上にのることを発見した。振幅比が 0.3 よりも大きい範囲では、振幅比が減少するとともに位相が徐々に遅れる（最大約 45°）（A）が、振幅比が 0.2 よりも小さい範囲では、振幅比が一定のまま位相が徐々に先行する（最大 40°）（B）。一方 1173 では概して変化が少なく、808 のような顕著な傾向は見られなかった。我々は、808ACORK に記録された潮汐応答には、メカニズムの異なる 2 種類の変動 A と B が含まれると仮定する。変動 A が卓越する状態においては B が隠されていると考えれば説明できそうである。チャンネルによっては、変動 B の領域に入らないものもあるが、これは何等かの原因で A の振幅が大きいままであるためと考えれば説明できるだろう。

A のメカニズムとして、Annulus 部分に徐々に孔が崩落して annulus を埋めることで、ACORK システムに対する地層のコンプライアンス比が減少、または水理拡散率が減少し、地層中の圧力変動が減衰したため、と解釈できる。「スクリーンの回りがパッキンされていく状態」を想定する。

一方 B のメカニズムは謎である。Wang and Davis (1996) の不均質多層構造モデルではこれほど大きな位相先行を生じることにはできない。また固体潮汐の理論値は海洋潮汐と位相がほぼ反転しており、位相先行波形を構築できない。孔底が地層にオープンとなっている 808 孔に特有の現象であることから、孔底からケーシングを通じた流体移動による熱膨張が有望かもしれないが、単純な拡散過程では、見かけ上の位相先行=実は大きな位相遅れ（330°）と振幅比 0.1 を説明することはできない。CSG 内部の複雑な流れ場等により、他の現象との組み合わせで見かけ上の先行が起こっているのかもしれない。

キーワード: Nankai Trough, ACORK, ODP

Keywords: Nankai Trough, ACORK, ODP



## 2004年紀伊半島沖地震に先行したF-net連続波形画像の欠測増加 The increase in missing waveform images of the F-net seismographs preceding the 2004 off Kii peninsula earthquake

末 芳樹<sup>1\*</sup>  
SUE, Yoshiki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 所属なし  
<sup>1</sup> No institution affiliation

### 1. はじめに

広帯域地震観測網 F-net は、地震計 STS-1 および 2 型、73 観測点により構成される観測網である。地震計の固有周期は 120 秒 (STS-2) より長く長周期の振動を捉えることが出来る。F-net のホームページでは連続波形画像が提供されており、画像の容量解析の結果として長周期の振動が報告されている (末, 2010)。

### 2. 解析

連続波形画像の容量が変動を示すのは地表面の状態が変動している事による。そこで F-net の稼動状況を調べた。稼動状況を示す情報は 2 つある。

a. 欠測データ情報: 瞬断から長期までの欠測を示す公式情報であり、欠測の理由も示される。一方、情報の更新は不定期である。

b. 連続波形画像の欠測: 連続波形画像の統括頁に「画像無し」が示される。これは 1 日 (Daily plot) あるいは 1 時間 (Hourly plot) を越す不具合を示すと推測される。欠測の理由は示されないが、更新は毎日および毎時なされる。

このうち「連続波形画像の欠測」に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震前の欠測数の増加に関する報告がなされている (末, 2013)。そこで今回は南海トラフを対象として、2004 年 9 月 5 日に発生した主題地震 (M7.4) の状況を調べた。具体的には、2004 年 6 月 1 日より同年 9 月 10 日までの凡そ 3 ヶ月間の糸魚川-静岡構造線と沖縄島の間 (但し能登半島を除く) に位置する観測点の連続波形画像 (Daily plot) の欠測数を調べた。

### 3. 結果

図 1 に結果を示す。本震の凡そ 1.5 ヶ月以前にあたる 2004 年 6 月-7 月前半の欠測最頻値は 1 でほぼ一定の状態であった。7 月後半以降は欠測数の変動があった。

本震 6 日及び 5 日前の 8 月 30 日および 31 日に大きな増加があり、それぞれ九州南部および東岸で集中した欠測があった。

本震前日の 9 月 4 日には四国から九州にかけて南海トラフに沿った欠測があった (図 2)。

本震後、欠測は漸次減少し消滅した。

欠測の原因は、network trouble および electric power supply trouble が主体であった。

### 4. 議論

本震に先駆けて F-net 連続波形画像の欠測が増える。この時、欠測は震源域に限られず震源域を囲む広い領域に現れる。これらは 2011 年東北地方太平洋沖地震にも見られた現象であり、大地震前に一般的に見られる現象かもしれない。発生が懸念される南海トラフの巨大地震の際には、本報告に示すような F-net 観測点の不調が先行することがあるかもしれない。

全数欠測状態が、本震の凡そ 1.5 ヶ月前の 7 月 23 日-25 日に発生した (図 1)。この現象は 2011 年東北地方太平洋沖地震前にも見られ、F-net 網の不安定さの増大を示すものかもしれない。

大地震前の欠測の増加は、発生した地表面の変動が F-net の許容値を超えた為と推測している。network trouble および electric power supply trouble は、これを示す指標であるかも知れない。高感度地震観測網 Hi-net ではこのような現象は見られないが、これは周波数特性 (固有周期=1 秒) により長周期振動に反応しないためと推測する。

地震・津波観測監視システム DONET において異常が検出される場合には、F-net 連続波形画像にも同時期あるいは先駆けて欠測が発生するかもしれない。

欠測観測点の出現は影響を受ける範囲を示しており、その出現面積は発生地震の規模 (マグニチュード) と相関するかもしれない。

謝辞

防災科学技術研究所の F-net 観測網のデータを使用させて頂きました。記して感謝致します。

文献

末芳樹, 2010, F-netの連続波形画像に観測される長周期振動(その1), 日本地震学会講演予稿集, D31-12.  
 末芳樹, 2013, 2011年東北地方太平洋沖地震に先行したF-net連続波形画像の欠測増加, JpGU2013, S-SS30-P01.

キーワード: F-net, 広帯域, 地震網, 長周期, 連続波形, 南海トラフ

Keywords: F-net, broadband, seismograph network, long period, waveform, Nankai trough

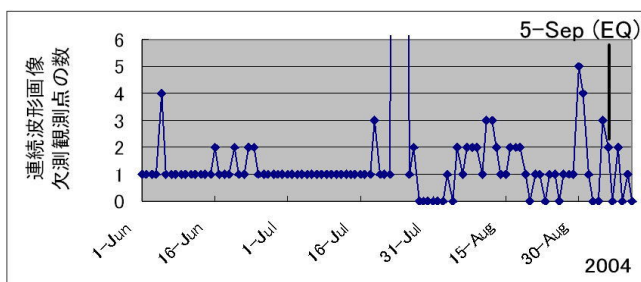


図1. 2004年6月1日より同年9月10日までのF-net連続波形画像欠測観測点の数. 7月23-25日は全数欠測. 日にちはUT.

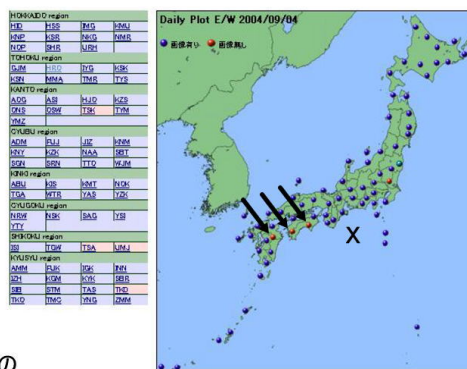


図2. 2004年9月4日の連続波形画像の欠測観測点(矢印)及び震央(X印) (出典: NIED).

## 紀伊半島沖～四国沖南海トラフ底の熱流量分布：四国海盆の地殻構造が温度構造に及ぼす影響 Heat flow distribution along the Nankai Trough: Influence of the structure of the Shikoku Basin oceanic crust

山野 誠<sup>1\*</sup>; 川田 佳史<sup>1</sup>; 後藤 秀作<sup>2</sup>; 濱元 栄起<sup>3</sup>  
YAMANO, Makoto<sup>1\*</sup>; KAWADA, Yoshifumi<sup>1</sup>; GOTO, Shusaku<sup>2</sup>; HAMAMOTO, Hideki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 埼玉県環境科学国際センター  
<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Geol. Surv. Japan, AIST, <sup>3</sup>Center Environ. Sci. Saitama

南海トラフにおいて沈み込むフィリピン海プレート（四国海盆）上層部の温度構造は、プレート境界近傍の温度構造を支配する要素の一つであり、地震発生帯におけるさまざまな物理・化学過程に影響を及ぼす。南海トラフ底で観測される熱流量は、この沈み込むプレートの温度構造を反映すると考えられる。これまでの調査結果は、室戸沖から潮岬南方（東経 135～136 度付近）ではトラフ底における熱流量が海底年齢に比べて異常に高いのに対し、その東方（熊野沖）では年齢にほぼ応じた値であることを示している。熱流量が変化する場所は、1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の震源域境界に近く、また陸側の地震活動が大きく変化する付近であり、地震発生過程と温度構造との関連を示唆している。

このような熱流量分布の東西方向の変化を詳しく調べ、その原因を解明することを目指して、2011～2013 年に紀伊半島沖～四国沖の南海トラフ海域で熱流量測定を実施した。特に重点的な対象としたのは、トラフ底の高熱流量が通常の値に遷移する地域（東経 136 度付近）、過去の測定データが乏しい四国南方のトラフ底である。これにより、南海トラフ底で計 39 点の新たな測定値が得られ、熱流量分布の変化を明瞭に捉えることができた。最も顕著な変化を示すのは東経 136 度付近（潮岬南方）であり、136 度より西では海底年齢に比べて異常に高く、ばらつきが大きい（130～250 mW/m<sup>2</sup>）のに対し、136 度の東ではばらつきが小さく、東に向かって急激に減少する（50 km で約 200 から約 100 mW/m<sup>2</sup> まで変化）。一方、134.5 度付近より西では、全般に値のばらつきが小さい。ここでは海底年齢が西に向かって古くなるが、これに対応した熱流量の減少は見られず、足摺沖（133.5～134 度）では年齢に対して有意に高い値（～130 mW/m<sup>2</sup>）を示す。

このトラフ底の熱流量分布には、沈み込む四国海盆海洋地殻の構造との対応が認められる。東経 134.5～136 度付近（室戸沖～潮岬南方）の高熱流量でばらつきが大きい地域は、四国海盆拡大末期の北東－南西方向の拡大で形成された部分にあたる。その東側及び西側のばらつきが小さいところは、東西方向の拡大で形成された部分である。両者の東側の境界付近（～136 度）では、海洋地殻の厚さや基盤地形も東西に変化することが知られている。一方、室戸沖トラフ底の高熱流量については、沈み込んだ海洋地殻上部の透水層内における間隙流体循環が、深部から熱を効率的に輸送してトラフ底を加熱するというモデルが提唱されている（Spinelli and Wang, 2008）。これらを合わせて考えると、四国海盆の拡大方向変化による構造境界で海洋地殻の透水率構造が変化しており、それが流体循環の強度やパターンの違いを生じ、熱流量分布の差をもたらしていると推測することができる。流体循環による深部からの熱輸送は、プレート境界付近を冷却する働きをするから、トラフ底熱流量の東西方向の変化は、地震発生帯の温度構造の変化と対応すると考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 熱流量, 間隙流体, 海洋地殻, 温度構造, 地震発生帯

Keywords: Nankai Trough, heat flow, pore fluid, oceanic crust, temperature structure, seismogenic zone

南海地震発生帯における巨大分岐断層固着域周辺の現場温度の再評価: NanTroSEIZE Site C0002 長期孔内温度計測データからの制約  
Reevaluation of temperature at the updip limit of locked portion of Nankai megasplay, inferred from IODP Site C0002 tem

杉原 孝充<sup>1\*</sup>; 木下 正高<sup>2</sup>; 荒木 英一郎<sup>3</sup>; 木村 俊則<sup>3</sup>; 許 正憲<sup>1</sup>; 難波 康広<sup>1</sup>; 木戸 ゆかり<sup>1</sup>; 真田 佳典<sup>1</sup>; Moe Kyaw Thu<sup>1</sup>  
SUGIHARA, Takamitsu<sup>1\*</sup>; KINOSHITA, Masataka<sup>2</sup>; ARAKI, Eiichiro<sup>3</sup>; KIMURA, Toshinori<sup>3</sup>; KYO, Masanori<sup>1</sup>; NAMBA, Yasuhiro<sup>1</sup>; KIDO, Yukari<sup>1</sup>; SANADA, Yoshinori<sup>1</sup>; MOE, Kyaw thu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地球深部探査センター, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 高知コア研究所, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

<sup>1</sup>CDEX/JAMSTEC, <sup>2</sup>KCC/JAMSTEC, <sup>3</sup>DONET/JAMSTEC

Temperature near the updip limit of the locked zone still has large uncertainties due to lack of knowledge about thermal and hydrological properties at depth.

In 2010, the first Long-Term Borehole Monitoring System was deployed at ~900 m below sea floor (mbsf) above the updip limit of seismogenic fault zone in the Nankai Trough off Kumano (Site C0002). Four temperature records show that the effect of drilling diminished in less than 2 years and they all reached thermal equilibrium by 2012. From in-situ temperatures and thermal conductivities measured on core samples, the temperature and heat flow at 900 mbsf are determined as 37.9 °C and 56.1 mW/m<sup>2</sup>, respectively. This heat flow value is in excellent agreement with that from shallow borehole temperature corrected for rapid sedimentation in the Kumano Basin. We use these values to constrain the temperature below 900 mbsf to the mega-splay and plate boundary fault zones.

To extrapolate temperature downward, we use LWD bit resistivity data as a proxy for porosity and the thermal conductivity is modeled from this porosity using a geometrical mean model. Upon integration by the 1-D thermal conduction we included the radioactive heat and frictional heat production. Estimated temperature at the megasplay ranges between 132 to 149 °C, depending on thermal conductivities and radioactive heat. It is significantly higher, by up to 40 °C, than previous 2-D numerical model predictions that can account for the heat flow across the deformation front. The discrepancy may be explained either by increasing the effective frictional coefficients along the fault zones or by introducing a lateral fluid flow along the permeable layers somewhere in the sedimentary layer. Revision of 2-D simulation by introducing our new boundary conditions will also be useful. Ultimately, reaching the megasplay fault and in-situ temperature measurement in the drilled hole is required to understand seismogenesis in the Nankai subduction zone.

キーワード: 地震発生帯, 南海トラフ, 巨大分岐断層, 温度構造, 統合国際掘削計画, 南海トラフ地震発生帯掘削計画  
Keywords: Seismogenic zone, Nankai Trough, Megasplay fault, Thermal regime, IODP, NanTroSEIZE



## IODP Expedition 348 南海付加体内部への超深部ライザー掘削：科学結果速報 Preliminary Scientific Results of IODP Expedition 348: Ultra-deep Riser Drilling into the Nankai Accretionary Prism

廣瀬 丈洋<sup>1\*</sup>; Tobin Harold<sup>2</sup>; Saffer Demian<sup>3</sup>; Toczko Sean<sup>1</sup>; 前田 玲奈<sup>1</sup>; 久保 雄介<sup>1</sup>; Expedition 348 乗船研究者<sup>6</sup>  
HIROSE, Takehiro<sup>1\*</sup>; TOBIN, Harold<sup>2</sup>; SAFFER, Demian<sup>3</sup>; TOCZKO, Sean<sup>1</sup>; MAEDA, Lena<sup>1</sup>; KUBO, Yusuke<sup>1</sup>; EXPEDITION 348, Scientists<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup>University of Wisconsin-Madison, <sup>3</sup>Pennsylvania State University, <sup>4</sup> 千葉大学, <sup>5</sup> 東京大学, <sup>6</sup>IODP Expedition 348

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>University of Wisconsin-Madison, <sup>3</sup>Pennsylvania State University, <sup>4</sup>Chiba University, <sup>5</sup>The university of Tokyo, <sup>6</sup>IODP Expedition 348

The Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) is a multi-disciplinary scientific project designed to investigate fault mechanics and seismogenesis along subduction megathrusts through seismic imaging, direct sampling, in situ measurements, and long-term monitoring in conjunction with laboratory and numerical modeling studies. International Ocean Discovery Program (IODP) Expedition 348, the latest advance of the NanTroSEIZE project, started on 13 September 2013 and was completed on 29 January 2014. During Expedition 348, the drilling vessel *Chikyu* advanced the ultra-deep riser hole at Site C0002, located 80 km offshore of the Kii Peninsula, from a depth of 860 meters below sea floor (mbsf) to 3058.5 mbsf, the world record for the deepest scientific ocean drilling, and cased it for future deepening. The drilling operation successfully obtained data on formation physical properties from logging while drilling (LWD) tools, as well as from lithological analyses of cuttings and core from the interior of the active accretionary prism at the Nankai Trough. IODP Site C0002 is the currently only borehole to access the deep interior of an active convergent margin.

Preliminary scientific results of Expedition 348 include:

(1) Fine-grained turbiditic mudstones with coarser silty and sandy interbeds, exhibiting steep dips (between ~60 and 90 degrees) are predominant in the prism down to ~3000 mbsf. The biostratigraphic age of the sediments in the lowermost part of the hole is thought to be 9-11 Ma, with an assumed age of accretion of 3-5 Ma.

(2) Slickenlined surfaces, deformation bands and mineral veins are present throughout the drilled interval, while well-developed scaly clay fabrics are increasingly observed below ~2200 mbsf. A substantial fault zone with well-developed foliation was successfully cored from the deep interior of the prism at ~2205 mbsf.

(3) Porosity generally decreases from ~60% to ~20% from the seafloor to 3000 mbsf. However, physical properties including grain density, electrical conductivity and P-wave velocity suggest fairly homogeneous properties in the interior of the prism between ~2000 and 3000 mbsf.

(4) Drilling mud gas analysis during the riser drilling indicates that a source of hydrocarbon gas shifts from microbial origin to thermogenic at around 1700-2300 mbsf.

Lithological and structural characterizations, the style of deformation, and downhole physical properties all indicate a complex structural evolution and will provide unprecedented insights into the mechanical state and behavior of the prism at depth.

キーワード: IODP, NanTroSEIZE, Nankai Trough, accretionary prism

Keywords: IODP, NanTroSEIZE, Nankai Trough, accretionary prism

## 巨大分岐断層深部 - 浅部における摩擦発熱レベル：炭質物のラマン分光からの推定 Levels of frictional heat along deep to shallow parts of the megasplay fault : a Raman spectroscopic analyses of CM

向吉 秀樹<sup>1\*</sup>; 廣野 哲朗<sup>2</sup>; 増本 広和<sup>2</sup>  
MUKOYOSHI, Hideki<sup>1\*</sup>; HIRONO, Tetsuro<sup>2</sup>; MASUMOTO, Hirokazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 早稲田大学教育・総合科学学術院, <sup>2</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

<sup>1</sup>Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, WASEDA University, <sup>2</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

現在のプレート境界断層および巨大分岐断層において、どのような断層弱化機構 (thermal pressurization, melt lubrication 等) が機能しうるかを理解するためには、化石巨大分岐断層の深部から浅部にいたる摩擦発熱レベルの評価が極めて重要である。そこで、本研究では、海底下 2.5-5.5 km で形成された化石巨大分岐断層 (四国南西部四万十帯久礼アウトオブシーケンススラスト) と海底下 1-4 km で形成された大規模逆断層 (房総半島江見層群) を対象とし、光学顕微鏡による微小変形構造観察に加え、断層に含まれる炭質物のラマン分光分析を実施した。炭質物の分子構造変化は、熱に対して不可逆的に変化するため、温度履歴を敏感に反映するプロキシとなることが期待される。また、温度による炭質物のラマンスペクトルの変化を実験的に評価するため、これらの断層近傍の母岩から採取した炭質物における嫌気環境下における加熱実験を実施した (昇温速度 20 K/min)。

その結果、両断層に含まれる炭質物のラマンスペクトルは、400~600 °Cの加熱実験で得られたスペクトルに類似していることが確認された。これは、両断層がそのような高温を履歴したことを意味するであろう。但し、滑りに伴う剪断歪は炭質物の分子構造変化に影響を与えうることが予想されるため、加熱実験と併せて剪断実験の実施が不可欠であろう。

キーワード: 化石巨大分岐断層, 加熱実験

Keywords: ancient megasplay fault, heating experiment

## 上盤プレートの地質と沈み込み帯地震破壊領域のセグメント形成—南海トラフの例— Upper plate geology controls the rupture area segmentation -A case study of the Nankai Trough

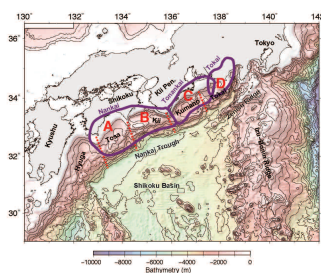
木村 学<sup>1\*</sup>; 橋本 善孝<sup>2</sup>; 北村 有迅<sup>3</sup>; 山口 飛鳥<sup>4</sup>; 浜橋 真理<sup>1</sup>; 高下 裕章<sup>1</sup>; 森田 澄人<sup>5</sup>

KIMURA, Gaku<sup>1\*</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>2</sup>; KITAMURA, Yujin<sup>3</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>4</sup>; HAMAHASHI, Mari<sup>1</sup>; KOGE, Hiroaki<sup>1</sup>; MORITA, Sumito<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 高知大学, <sup>3</sup> 鹿児島大学, <sup>4</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Kochi University, <sup>3</sup>Kagoshima University, <sup>4</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>5</sup>AIST

What controls the earthquake rupture area of megathrust is one of the most fundamental questions in geodynamic research of subduction zone. In the case of the Nankai Trough, Japan, three major controlling factors have proposed so far, surface topography of the subducting plate like seamount, locally strong rigidity of upper plate due to igneous rock composition, and friction property of the plate boundary megathrust including abnormal pore fluid pressure distribution. Such controlling factors are applicable to other subduction zone in general. For example, the topographic high like seamount is proposed to control the location of asperity due to stronger coupling. The topographic-high worked as an asperity contacts with upper plate and rupture could be propagated when the contact breaks. The topographic-high also works as a barrier in the difficult case to be broken. From the geological point of view, plate boundary megathrust in the seismogenic zone must be composed of fault rock in brittle regime because of its temperature range from ~150 °C to ~350 °C, which is cooler than the temperature for the plastic deformation of quartz, feldspar and other rock forming minerals of oceanic crust except for clayey phyllosilicates. In this temperature range, tectonic melange like fault rock with highly pressurized interstitial fluid is expected. Seismic observation showing a reflector with intensive amplitude of negative reflection coefficient suggests a plate boundary fault layer with abnormal fluid pressure. The friction behavior of the fault rock and pore fluid effect is a recent main concern in the subduction zone. The third factor is the mechanical property of the upper plate for the plate boundary megathrust in subduction zone. It is used to treat that the upper plate is a mechanical uniform media saving the elastic energy for theseismic slip along the megathrust. The mechanical property of the upper plate changes for a geological long time scale due to the growth of accretionary prism or tectonic erosion. In addition to such subduction mode of accretion vs erosion, some peculiar tectonic events (e.g. change in convergent direction, some obstacle collision, spreading ridge collision and rapid magmatic accretion etc.) modify the mechanical property of the upper plate and its heterogeneity in space. In the case of the Nankai Trough, a plutonic body is situated beneath the place of epicenter and is suggested to have been functioned as an asperity of 1944 Tonankai and 1946Nankaido Earthquakes. We examined the on-land geology of the Shikoku island and the Kii Peninsula, SW Japan, basement structure and composition beneath the forearcKumano Basin on the basis of recent results of ocean drilling by IODP (Integrated Ocean Drilling Project) and other investigations to infer the geologic composition of the upper plate. As a result we conclude that the key geologic event was middle to late Miocene episodic and rapid growth of forearc crust, mainly due to the magmatic intrusion and extrusion. This event was casued by the eastward migration of the T-T-T triple junction. Such ancient event now controls therupture area of the great earthquake in the subduction zone.



**「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」が目指す連動型巨大地震災害の軽減  
The research project on the extended Nankai seismogenic zones towards disaster mitigation of the mega-thrust earthquakes**

金田 義行<sup>1\*</sup>; 福和 伸夫<sup>2</sup>; 古村 孝志<sup>3</sup>  
KANEDA, Yoshiyuki<sup>1\*</sup>; FUKUWA, Nobuo<sup>2</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 名古屋大学, <sup>3</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Nagoya University, <sup>3</sup>The University of Tokyo

The recurrence of Nankai trough mega thrust earthquakes and tsunamis are the very severe problem to Japan. Therefore, MEXT of Japanese government has implemented the research project during a period from FY2008 to 2012 to evaluate seismic linkage around the Nankai trough mega thrust earthquake seismogenic zones. We have obtained many significant scientific results, such as the extended seismogenic zone, in this previous research project. In the 2013 fiscal year, a new project launched aiming mitigation of disaster caused by the Nankai trough earthquakes in the extended seismogenic zone. This new project is composed of three research fields which are the disaster mitigation research field, observational research field and the simulation research field. According to lessons learned from the 2011 East Japan Earthquake, the disaster mitigation research field are progressing 5 sub-themes which are precise seismic hazard estimation, providing research results to local government/community for disaster measures, investigating recovery and revival methodologies based on social environmental changes, and constructing redundant hazard information database. The observational research field reveals structures of crust and plate, seismicity, and historical tsunami events in the Nankai trough. In the simulation research field, investigations will be conducted for recurrence cycle simulation of mega thrust earthquakes, data assimilation method that improves reliability of the simulation, seismic and tsunami wave simulations for disaster mitigation. We must surely progress each sub-theme at the beginning and finally integrate them for disaster mitigation around the extended Nankai trough seismogenic zones. In this talk, we will introduce the outline of new project and the present progress.

Keywords: Nankai trough seismogenic zone, Seismic linkage, Disaster mitigation



## 小笠原スラブの沈み込みとマントル対流 Ogasawara Bending Slab and Mantle Convection

新妻 信明<sup>1\*</sup>  
NIITSUMA, Nobuaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学地球科学教室

<sup>1</sup>Inst. GeoSciences, Shizuoka Univ.

小笠原海溝から沈み込む小笠原スラブは急に深度を増し、急斜している。しかし、2013年5月14日 M7.3 深度 619km のマリアナ海溝域最深地震、および 1998年2月7日 M6.4 深度 552km の小笠原海溝域地震の震央は海溝側に近付いており、小笠原スラブが同心円状屈曲したまま上部マントル下底まで沈み込んでいることを示している。

東太平洋海膨で拡大形成された太平洋プレートは、日本列島に沿って沈み込み、上部マントル底に達している。プレートの下に接するマントルも含めて考えると、東太平洋海膨域ではプレート拡大のためにマントルが不足し、日本列島域では沈み込んだマントルが過剰になる。マントル量の定常状態を保つためには、過剰な沈み込みマントルを拡大域へ環流させるマントル対流が必要である。

スラブが同心円状屈曲したまま上部マントル底に到達すると、スラブ上面が下部マントル上面に接する。上部マントル内でスラブ上面が最も低温なので、スラブ上面は下部マントルへ相転移できず、下部マントル上面に浮いた状態でプレート運動と逆方向に移動する。この海嶺へ向かうスラブ移動は、最速最大の太平洋プレート運動を支えるマントル対流に重要な役割を担っているであろう。

小笠原スラブの北側の伊豆スラブも同心円状屈曲して沈み込むが、深度 410km 付近で平面化するため、同心円状屈曲のまま沈み込む小笠原スラブとの間にスラブの不連続が存在するはずである。この不連続部で 2013年11月に西之島が噴火した。この不連続部で起こる地震の発震機構は、東日本大震災の前後で変化している。

キーワード: 小笠原スラブ, 同心円状屈曲, マントル対流, 上部マントル下底, 西之島噴火

Keywords: Ogasawara Slab, Concentric Bending, Mantle Convection, Upper Mantle Bottom, Nishinoshima Eruption

## 整流潮汐载荷：微動が明らかにする地震発生メカニズム Rectified tidal loading: Control on earthquakes manifested by deep tremors

井出 哲<sup>1\*</sup>; 田中 愛幸<sup>2</sup>  
IDE, Satoshi<sup>1\*</sup>; TANAKA, Yoshiyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震はプレート運動によっておきるが、何がプレート運動を支配しているのか必ずしも明らかでない。この問題への手掛かりを与えるのが、西日本で発見された深部微動である。ある微動のクラスターの発生レートは観測される潮汐変化に極端に依存している。両者の関係から、プレート境界における速度依存型の応力とすべりの非線形関係が導かれる。この経験的法則と観測潮位によって過去9年間の微動活動はかなり正確に説明できる。振動する潮汐応力変化は非線形摩擦法則によって整流化され、潮汐振幅のわずかな変化が沈み込み帯深部で大きなスロースリップの変化を生み出すことがわかる。この変化はさらに浅部の地震活動に影響するかもしれない。実際に過去50年間の定常地震活動と潮汐の変化は同期しており、さらに過去1000年以上の南海地震の弱い周期性とも関係している可能性が高い。

キーワード: 微動, 潮汐, 整流効果, スロースリップ, 地震活動, 南海地震  
Keywords: tremor, tide, rectification, slow slip, seismicity, Nankai earthquakes

## 沈み込み帯でのプレート境界面破壊に関する構造力学モデル Structural mechanics model of plate-interface fracture at subduction zones

江口 孝雄<sup>1\*</sup>  
EGUCHI, Takao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学校 地球海洋学科  
<sup>1</sup> National Defense Academy, Japan

There are unidentified and unveiled properties concerning the physical process of greater inter-plate earthquakes at subduction zones. We, here, present a stochastic fracture model of the plate-interface with dynamic discrete interaction blocks. The stochastic treatment in this study is mainly based on structural mechanics. Here, in the four-dimensional point of view, regarded as significant long-wavelength components of the mechanical inter-plate coupling, we assign several discrete lattice-like blocks being connected each other on a hypothesized plate boundary system. The representative mechanical interaction vector (or tensor) for each discrete block should be variable on the plate boundary system. The total number of the discrete blocks and their nesting pattern should also vary with time during the long-term subduction process with intermittent greater seismic events.

Hereafter, we treat the inter-plate coupling at discrete blocks, using parameters such as failure probability ( $P_{sf}$ ) and safe probability ( $P_{ss}$ ) of the total system of the plate boundary. Here,  $P_{sf} + P_{ss} = 1$ .

The system fracture for the case of parallel connecting blocks is defined as the breakdown of all parallel blocks. Whereas, for the case of a series connecting block system, the system fracture is defined as the failure of one of the series block, or more. The system failure probability of a simple mechanical system being coupled in parallel  $N$  blocks is given as a product of  $p(i)$  from  $i = 1$  to  $i = N$ . Here,  $p(i)$  is the failure probability of the  $i$ -th block of the system. For the case of a mechanical system connected in series  $N$  blocks, the system safe probability becomes a product of  $\{1-p(i)\}$  from  $i = 1$  to  $i = N$ . For a mechanical system composed of both parallel and series blocks, the system failure probability and system safe probability can be estimated with the above definition. Then, we assume that the inter-plate shear coupling of the plate-interface progresses only at discrete blocks of brittle fracture.

We consider two different configuration models for a two-by-four matrix ( $2 \times 4$ ) system of discrete coupling blocks, consist of four columns in the trench-parallel direction and two rows of deep side and a shallow side in the dip direction, as follows.

Configuration model  $A$  is a series-connected system of both the shallower parallel-connected column blocks and the deeper parallel-connected ones.

Configuration model  $B$  is a parallel-connected system of the four columns of the shallower and deeper rows being directly series-connected in the dip direction.

By setting the failure probability,  $p(i,j)$ , of  $(i,j)$ -th block, we can estimate the system failure probability ( $P_{sf}$ ) and system safe probability ( $P_{ss}$ ) for the configuration models,  $A$  and  $B$ . For the configuration models  $A$  and  $B$ , the system safe probability,  $P_{ss}(A)$  and  $P_{ss}(B)$  can be obtained. In the case of  $p(i,j)$  less than 0.5 for all blocks,  $P_{ss}(A)$  becomes larger than  $P_{ss}(B)$ , indicating that the configuration model  $A$  is safer than the model  $B$ . When the representative pattern of the inter-plate coupling changes from the configuration model  $A$  to  $B$ , or vice versa, we should carefully estimate the system probabilities.

We also demonstrated the detailed hypothetical expression form of  $p(i,j)$  by considering the effect of preceding larger seismic ruptures at blocks and the subsequent healing process, etc.

キーワード: 沈み込み帯, プレート間相互作用, 構造力学, 系の破壊確率, 系の安全確率

Keywords: subduction zone, inter-plate coupling, structural mechanics, system failure probability, system safe probability

## 沈み込み帯における地震発生数と前弧地形の関係 Seismicity rate variations in subduction zones related to forearc topography

西川 友章<sup>1\*</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
NISHIKAWA, Tomoaki<sup>1\*</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

世界の沈み込み帯の地震活動には、地震発生数や最大地震サイズなど様々な点において違いがある。このような地震活動の違いはそれぞれの沈み込み帯のプレート相対速度や、沈み込むプレートの浮力などによって説明されてきた。とくに地震発生数は、Ide (2013) によりプレート相対速度との比例関係が指摘されている。これは地震がプレートの歪みに起因することを考えれば自然な関係である。

その一方、沈み込み帯上盤も地震発生を支配する重要な要素である。これまでの地震観測やテクトニクスの研究では、上盤前弧の地形がプレート境界の固着や間隙流体圧などの摩擦特性と関係することが指摘されている。このことから、世界の沈み込み帯の前弧地形の違いは沈み込み帯ごとの摩擦特性の違いを反映していると考えられる。しかし、このような上盤地形の違いが世界の沈み込み帯の地震活動と具体的にどのように対応しているかは明らかではない。そこで本研究では、Smith and Sandwell (1997) による海底地形データを用いて、世界の沈み込み帯上盤における海溝斜面の傾斜を計算し、それらと ETAS モデル (Ogata, 1988) から計算される沈み込み帯における定常地震発生数 (余震を除いた地震発生数) を比較した。その結果、海溝斜面の傾斜と定常地震発生数に正の相関が見られた。上盤の海溝斜面が急斜面になっている沈み込み帯ほど定常地震発生数が多く、緩斜面では少ない。また、海溝斜面と定常地震発生数の関係は、前述のプレート速度と地震発生数の比例関係 (Ide, 2013) に従わない沈み込み帯 (カスカディア、南チリなど) も説明することができるように思われる。

上盤地形とプレート境界の摩擦の関係を説明する臨界尖形モデル (Davis et al., 1983; Dahlen, 1984) や沈み込み帯のアナログ実験 (Gutscher et al., 1996 など) によれば、海溝斜面が急斜面であることは前弧域のプレート間摩擦が大きいことを意味する。本研究の結果と合わせて考えると、急斜面でプレート境界の摩擦が大きい沈み込み帯では定常地震発生数が多いということになる。このことは浸食・付加作用とプレート境界における凹凸を考えることで理解できる。海溝斜面が急斜面である沈み込み帯は浸食作用が卓越した沈み込み帯と考えられている (Clift and Vanucchi, 2004)。そのような沈み込み帯では堆積物の厚さが薄く海底面の凹凸がそのまま沈み込み、上盤ウェッジ先端部で大きな摩擦を生む。地震発生領域 (サイスマジェニックゾーン) ではそれらの凹凸は無数の小さなアスペリティーとして働き、多くの地震が発生する。逆に緩斜面の沈み込み帯は付加作用の卓越した沈み込み帯である。底面の凹凸は堆積物によって滑らかなになり、上盤ウェッジ先端部での摩擦は小さい。地震発生領域では滑らかなプレート境界は一つの大きなアスペリティーとして働き、結果として地震数が少なくなる。また、このようなアスペリティーの数や大きさの違いは沈み込み帯における巨大地震の発生様式の違いにも関連があると思われる。

本研究は上盤地形と地震活動の対応を明らかにするとともに、地震発生数がプレート相対速度と歪みのような力学的要因のみならず、浸食・付加作用や堆積物、プレート境界の凹凸などの物質的要因にも支配されていることを示すものである。

キーワード: 地震発生数, 沈み込み帯, 前弧地形, 浸食・付加作用, アスペリティー

Keywords: seismicity rate, subduction zone, forearc topography, erosion and accretion, asperity



## 地震発生に先行する断層強度低下の地震波モニタリング可能性の検討 Feasibility of acoustic monitoring of strength drop precursory to earthquake occurrence

亀 伸樹<sup>1\*</sup>; 永田 広平<sup>2</sup>; 中谷 正生<sup>1</sup>; 日下部 哲也<sup>1</sup>  
KAME, Nobuki<sup>1\*</sup>; NAGATA, Kohei<sup>2</sup>; NAKATANI, Masao<sup>1</sup>; KUSAKABE, Tetsuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 文部科学省

<sup>1</sup>Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology

Rate- and state-dependent friction law (RSF), proposed on the basis of laboratory experiments, has been extensively applied to modeling of earthquake stick-slip cycles. A simple spring-slider model obeying RSF predicts a significant decrease of the frictional strength  $\Phi$  (the state of contact) that is localized within a few years preceding the earthquake occurrence. On the other hand, recent laboratory experiments successfully monitored the history of the strength by simultaneously measuring P-wave transmissivity  $|T|$  across the frictional interface using a 1MHz transducer. This suggests a possibility of earthquake forecast by monitoring the strength of a natural fault by acoustic methods.

The present paper explores the feasibility of such monitoring in the field on the basis of the physics of RSF combined with the linear slip model (LSM) employed in the classical acoustic methodology for monitoring an imperfectly welded interface. The characteristic frequency  $f_c$ , around which  $|T|$  (or reflectivity  $|R|$ ) has a good sensitivity to the interface strength, is shown to be proportional to the strength and inversely proportional to the representative scale of real contacts. For natural faults  $f_c$  is estimated to be 1 to 100Hz, which is practicable in the field. The changes of  $|T|$  and  $|R|$  depend on the ratio of the strength drop to the absolute strength level, the latter of which is not constrained by RSF simulations. Expected changes in wave amplitude in the preslip period would be several percent for strong faults and several tens percent for weak faults, which may be detectable by acoustic methods such as seismic reflection surveys.

キーワード: 断層強度, 地震サイクル, 速度・状態依存摩擦則, 地震先行現象, 線形すべりモデル, 地震波モニタリング  
Keywords: fault strength, earthquake cycle, rate- and state-dependent friction, precursor, linear slip model, acoustic monitoring

## 台湾車籠埔断層における古応力状態の変化と半定量化 Semi-quantitative analysis of change in stress state in Chelung-pu Fault, Taiwan

橋本 善孝<sup>1\*</sup>; 戸部 航太<sup>1</sup>; 葉 恩肇<sup>2</sup>  
HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>1\*</sup>; TOBE, Kota<sup>1</sup>; YEH, En-chao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学, <sup>2</sup> 国立台湾師範大学

<sup>1</sup>Kochi University, <sup>2</sup>National Taiwan Normal University

地震ともなう応力の変化を理解することは、地震の規模や性質を理解する上で重要である。台湾チェルンブ断層では1999年に発生した集集地震の詳細な地震波記録がとられ、地震直後に Taiwan Chelung-pu Fault Drilling Project (TCDP) による掘削が行われている。世界でもこのような断層は稀である。本研究の目的は、チェルンブ断層から得られた構造データを用いて、小断層に記録されている過去の応力状態を推定し、地震と応力の関係を時空間的に検討することである。地震後の応力状態は TCDP によって得られているが、地震前あるいは地震時の応力状態は地質学的な情報に保存されていることが期待できる。TCDP による掘削は 40m 間隔を空け 2 箇所で行われており本研究ではホール A のコアを対象としている。得られたコアの範囲は深度 400m から 2000m までである。地震断層は深度およそ 1120m で確認された。コアの観察から、ほぼ全域に渡って小断層やオープンクラック、断層岩等の変形構造が確認された。このうち小断層面上のスリッケンラインのレイクとスリッケンステップからスリップデータを得た。スリップデータの数は 195 個である。また、コアと比較するために地表の露頭から小断層のスリップデータを測定した。調査地点は 2 地点あり、TCDP 掘削地点からおおよそ 2km 程度傾斜方向西方に離れている。岩相は主として灰色の頁岩からなる。スリップデータの数は 146 個である。

小断層解析には多重逆解法 MIM (Yamaji et al., 2000) と k-means clustering (Otsubo et al., 2006) を使用した。小断層解析の結果、コアと地表からそれぞれ 4 つの応力解が得られた。それぞれ、コアの応力を c1-c4、地表の応力を s1-s4 とし、 $\Phi = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$  で表される応力比の小さいものからナンバリングした。解析の結果得られた応力解がどのような応力状態を取るかを推定するため Anderson の断層運動論に従って stress polygon を描き、解析の結果得られた応力解を SHmax、Shmin、SV の 3 成分に分解することで stress polygon に投影した。投影した結果 c1 と c3 は SHmax、Shmin がともに比較的小さい範囲にあり、c1 が正断層型、c3 は全ての断層運動タイプをとり得る範囲を示した。c2 は c1 と c3 に比べて SHmax、Shmin がともに大きい範囲にあり、逆断層型を示した。c4 は stress polygon に投影することができなかった。c1 と c3 は Lin et al. (2007) で示されている地震後の現在の応力状態と調和的な結果となり、c2 は集集地震時にチェルンブ断層が逆断層成分の滑りをしていたことと調和的な結果となった。この応力状態の違いは地震サイクルに伴う応力状態の変化を表している可能性がある。地表の結果では s1 と s3 は SHmax、Shmin がともに比較的小さい範囲にあり、s1 は正断層型、s3 は正断層型と横ずれ断層型の応力状態をとった。s2 は stress polygon に投影することができなかった。s4 は s1、s3 に比べて大きい SHmax、Shmin の範囲にあり、逆断層型であった。地表でも同様に地震サイクルに伴う応力状態の変化と見られる結果が得られた。これらを地震前後の応力とし応力降下量を計算すると、コアでは最大 13.71MPa、地表では 0~0.08MPa 程度となった。Ma et al. (2000) は地震波解析から集集地震北部大変位域の応力降下量を平均 10MPa と報告しており、おおむね一致している。

キーワード: 応力, 小断層解析, 応力解放量, チェルンブ断層

Keywords: stress, micro-fault inversion, stress drop, Chelung-pu fault

## 美濃帯チャートの透水性と続成組織 Fluid transport property and diagenetic microstructure of chert in the Mino Belt

山口 飛鳥<sup>1\*</sup>; 谷川 亘<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; 清水 麻由子<sup>4</sup>; 濱田 洋平<sup>5</sup>; 木村 学<sup>4</sup>  
YAMAGUCHI, Asuka<sup>1\*</sup>; TANIKAWA, Wataru<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; SHIMIZU, Mayuko<sup>4</sup>; HAMADA, Yohei<sup>5</sup>; KIMURA, Gaku<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>4</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>5</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup> JAMSTEC/Kochi, <sup>3</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup> Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo, <sup>5</sup> JAMSTEC/IFREE

Pore fluid pressure along plate boundary megathrust is controlled by both fluid supply and fluid transport property, and it affects on faulting and earthquake mechanics. In the case of subduction zones where relatively old (older than 50 m.y. in age) oceanic plate subducts, oceanic crust is covered with thick pelagic siliceous sediments composed of diatomic and/or radiolarian oozes. In the Japan Trench, Kimura et al. (2012) pointed out that the volume of dehydrated fluid during silica diagenesis from opal-A to quartz through opal-CT is significant compared to that from clay mineral (smectite-illite) transition. However, fluid transport property of siliceous sediments has not been well-understood yet. In this study we conducted both permeability measurement and microstructural/microchemical observation of bedded chert from Inuyama-section in the Mino belt, Jurassic accretionary complex in Japan, as an on-land analog of subduction zone where old oceanic plate subducts.

Initial porosity of chert samples at atmospheric pressure is 0.4 to 2.2 %. Permeability was measured at room temperature under isostatic confining pressures of 5 to 120 MPa, by the steady state flow method with nitrogen gas as a pore fluid. Water permeability was then obtained by using Klinkenberg equation. At effective pressure of 5 MPa converted water permeability is  $10^{-17}$  to  $10^{-19}$  m<sup>2</sup>, decreases with increasing effective pressure down to the ranges of  $10^{-20}$  to  $10^{-21}$  m<sup>2</sup>.

Optical and electron probe microanalyzer (EPMA) analyses show that chert is composed of radiolarian fossils filled with quartz and chalcedony, and red-colored matrix. Red matrix shows ~95 wt.% of SiO<sub>2</sub>, whereas >99 wt.% of SiO<sub>2</sub> are commonly observed from inside part of the radiolarian fossils. Such high concentration of SiO<sub>2</sub> within radiolarian fossils indicates that dissolved silica was precipitated into cavities maintained by radiolarian tests. This process would be related with silica diagenesis, occurring as dissolution-precipitation processes.

Silica mineral precipitation onto pore spaces would contribute to construct characteristic low porosity and permeability of chert. Our result shows that silica diagenesis works as not only a fluid source but also as a process for porosity/permeability reduction in convergent margins characterized by old subducting oceanic plate.

キーワード: 沈み込み帯, 続成作用, 浸透率, チャート

Keywords: subduction zone, diagenesis, permeability, chert

## 南海トラフ付加体浅部堆積物の力学的特性 Mechanical properties of the shallow Nankai Trough accretionary sediments

金川 久一<sup>1\*</sup>; 高橋 美紀<sup>2</sup>; 東 修平<sup>1</sup>; 伊東 英紀<sup>1</sup>; 井上 厚行<sup>1</sup>  
KANAGAWA, Kyuichi<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Miki<sup>2</sup>; AZUMA, Shuhei<sup>1</sup>; ITO, Hidenori<sup>1</sup>; INOUE, Atsuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University, <sup>2</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan

IODP 掘削地点 C0002 および C0009 において南海トラフ付加体浅部(海底下約 1000-1500 m)から採取された、砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩および粘土質泥岩 5 試料について、室温および試料原位置相当の圧力・間隙水圧条件で、三軸圧縮・摩擦実験を行った。

上記の条件で、軸方向変位速度  $10 \mu\text{m/s}$  で三軸圧縮実験を行った結果、破壊強度は砂岩試料が約 300 MPa と非常に大きく、凝灰岩試料が 48 MPa 程度、シルト質泥岩 1 試料が 20 MPa 程度、粘土質泥岩試料が 14 MPa 程度であった。砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩試料の破壊時間は 20 秒以内と比較的短く、一方粘土質泥岩試料は約 40 秒かかってゆっくりと破壊した。シルト質泥岩のもう 1 試料は破壊せず、15 MPa 程度の強度で延性的に変形した。砂岩試料は方解石でセメントされていて非常に硬く固結しているため、破壊強度が非常に大きかったと考えられる。一方、延性的に変形したシルト質泥岩試料は十分に固結していなかったと考えられる。粘土質泥岩試料は粘土鉱物に富む(約 42 wt%) ため強度が小さかったことに加えて、孔隙率が小さく(約 11%) 透水性も低かった(約  $10^{-19} \text{m}^2$ ) ため、圧縮により間隙水圧が上昇して強度がさらに低下し、またゆっくり破壊したと考えられる。このような粘土質泥岩の破壊は、南海トラフ付加体浅部で観測されているスロースリップの発生源となっている可能性がある。

さらに、上記の条件で軸方向変位速度を 0.1, 1,  $10 \mu\text{m/s}$  の間でステップ状に変化させながら三軸摩擦実験を行った結果、これらの試料の摩擦特性が、粘土鉱物の含有量によって系統的に変化することが明らかとなった。5 試料の粘土鉱物の含有量は、砂岩試料が約 6 wt%、凝灰岩試料が約 17 wt%、シルト質泥岩試料が 29-34 wt%、粘土質泥岩試料が約 42 wt% である。変位速度  $1 \mu\text{m/s}$  における定常摩擦係数は、粘土鉱物の含有量の増加に伴って低下し、砂岩試料が 0.87、凝灰岩試料が 0.71、シルト質泥岩試料が 0.53-56、粘土質泥岩試料が 0.25 であった。変位量に依存した摩擦挙動も粘土鉱物含有量の増加に伴って系統的に変化し、粘土鉱物含有量が少ない砂岩試料がすべり硬化を示すのに対し、粘土鉱物含有量の増加に伴ってすべり軟化に転じ、それが明瞭になる傾向が認められた。全試料とも、変位速度の増加に伴って摩擦強度が増加する速度強化の挙動を示すが、定常摩擦強度の変位速度依存性に対する ( $a - b$ ) 値の割合は、粘土鉱物含有量の増加に伴って減少する。これは、粘土鉱物含有量の増加に伴って摩擦成分が低下し、流動成分が増加することを意味している。このように、南海トラフ付加体浅部の断層運動は堆積物中の粘土鉱物含有量によって支配されていると考えられる。

キーワード: 南海トラフ, 付加堆積物, 破壊特性, 摩擦特性

Keywords: Nankai Trough, accretionary sediments, failure properties, frictional properties



## 沈み込み帯浅部における断層の摩擦速度依存性 Velocity weakening behavior observed for friction of the shallow subduction zone fault material

堤 昭人<sup>1\*</sup>; 並木 由香<sup>1</sup>; 中野 龍二<sup>1</sup>; 河合 智章<sup>1</sup>  
TSUTSUMI, Akito<sup>1\*</sup>; NAMIKI, Yuka<sup>1</sup>; NAKANO, Ryuji<sup>1</sup>; KAWAI, Tomoaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Recent observations of slow earthquakes along faults within shallow part of subduction zones, for example the very low frequency earthquakes at the Nankai Trough [Ito and Obara, 2006; Sugioka et al., 2012], has demonstrated that faulting there is slow yet seismic; suggesting that frictional velocity dependence along the fault at the shallow portion must be negative. However, previous experimental results have repeatedly shown that velocity dependence of the expected fault zone material is generally estimated to be positive. Here, we present our recent experimental results showing that velocity dependence of the friction of the shallow subduction zone faults are not necessarily be positive.

We have performed a series of rotary-shear large displacement (>150 mm) friction experiments on the following shallow fault simulating material: clayey fault material from the shallow megasplay fault zone within the Nankai accretionary prism, input pelagic siliceous to calcareous sediments to the Costa Rica subduction zone, and simulated artificial gouge of montmorillonite/quartz mixtures (20-40 wt% of montmorillonite). Experimental results reveal that these material do exhibit velocity weakening behavior at a range of velocities from 0.003-0.3 mm/s. Velocity weakening of these material is mostly characterized by a small degree of the friction velocity dependence (the absolute value of (a-b) is typically <0.005).

The SSEs are often described as conditionally stable sliding of faults [e.g., Shelly et al., 2006]. High pore fluid pressure could alter a velocity-weakening fault with a small value of (a-b) to conditionally stable regions by reducing the effective normal stress [Scholz, 1998]. The presented velocity weakening property with a small value of (a-b) could be responsible for generating shallow slow seismic slip events in subduction zones. Textural observation reveals the importance of studying effects of both the clay content and shear-induced deformation textures on the frictional velocity dependence.

キーワード: 南海トラフ, 沈み込み帯, 摩擦速度依存性, ゆっくり地震

Keywords: Nankai Trough, subduction zone, frictional velocity dependence, slow earthquakes

## 非晶質シリカ及びカルサイトから成る断層模擬物質の摩擦特性 Frictional properties of simulated faults containing amorphous silica/calcite mixtures

並木 由香<sup>1\*</sup>; 堤 昭人<sup>1</sup>  
NAMIKI, Yuka<sup>1\*</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

Various seismic behaviors such as large earthquakes, episodic slow slip events, or silent earthquakes are observed in subduction zones. Knowledge of the frictional properties of input material to subduction zones would help to understand the complicated seismic behaviors. On the Cocos plate, which subducts beneath the Caribbean Plate at Middle America Trench offshore Costa Rica, input sediments containing clay, silty clay sediments and silicic to calcareous ooze were collected during the IODP expedition 334. We have been studying the frictional properties of the collected input material to the Costa Rica subduction zone. In order to better understand frictional processes of a fault in silicic to calcareous ooze, we have performed a series of friction experiments on a simulated fault gouge containing mixtures of amorphous silica and calcite.

Frictional experiments were performed at a constant slip velocity of  $v = 0.28$  mm/s, and also under a velocity-stepping condition. The silicic to calcareous ooze sample showed the following characteristic behavior. The friction coefficients at 0.28 mm/s showed initial peaks at 0.4-0.6 and subsequent little decrease, followed by a gradual increase to attain a constant friction value at 0.6-0.8. The analogue gouge containing 40-80 wt% of calcite reproduced such frictional behavior well. The experimental samples of the input ooze material required only about 40 mm of displacement to attain constant steady-state friction level. However, the calcite/amorphous silica mixtures needed larger displacement to attain steady-state friction. Furthermore, the calcite/amorphous silica mixtures could not reproduce friction velocity dependence observed for the collected ooze samples. The result suggests the importance of studying effects of grain size distribution and the grain morphologies on the frictional properties of the silicic to calcareous ooze material.

キーワード: 沈み込み帯, 摩擦実験, CRISP  
Keywords: subduction zone, frictional experiment, CRISP

## スメクタイト及びイライトの摩擦挙動の温度効果：沈み込み帯での地震発生帯の上限としての可能性 Effect of temperature on frictional behavior of smectite and illite: Implication for the updip limit for seismogenic zone

久保 達郎<sup>1\*</sup>; 片山 郁夫<sup>1</sup>  
KUBO, Tatsuro<sup>1\*</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学地球惑星システム学

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

[はじめに] 浅部の非地震発生領域と地震発生帯との境界は地震発生上限 (updip limit) と呼ばれ、津波発生に関わるなど、何がこの上限を決定しているかは防災の観点などから大変重要である。沈み込み帯における地震発生領域の上限領域は主に温度に強く依存し、150 °Cで起こるとされている。地震発生上限を決めている要因は諸説あるが、その中の一つにスメクタイト-イライト相転移による摩擦特性の違いによるという仮説がある。一方で、Saffer and Marone(2003) ではスメクタイト、イライトの速度依存性の詳細な実験が行われ、スメクタイト、イライトともに安定すべりをすることからスメクタイト-イライト相転移が沈み込み帯における地震発生上限となり得ないと報告した。しかし、Saffer and Marone(2003) の実験はすべて室温で行われたもので、天然の温度環境を再現しながらの実験がなされていないという問題点がある。そこで今回、広島大学理学部にある高温二軸摩擦試験機を用いて高温でのスメクタイトとイライトの摩擦挙動を調べ、スメクタイト-イライト相転移が地震発生上限になりうるかどうかの議論を行うことを目的とした。

[実験手法] 高温二軸摩擦試験機を用いて、粉末状の擬似断層物質を二つのガプロブロックの間にはさみ摩擦実験を行う double-direct shear といわれる手法をとった。垂直応力は油圧式手押しポンプで制御しながら加重をかけていき、鉛直方向(剪断方向)の加重はモーターとギアシステムを用いており、ギアシステムにより様々な速度比で減速された回転運動を、ボールネジを用いて鉛直方向の往復運動に変換することで載荷した。摩擦特性の地震性か非地震性の評価は、速度依存性の式によって行った。速度依存性は次式で与えられ:

$$(a-b)=d \mu / (d \ln V) \text{ (ただし, } a, b \text{ は摩擦パラメータ, } V \text{ は滑り速度)}$$

この、 $a-b$  が正を示せば地震性、負を示せば非地震性となることが知られており、地震性か非地震性かを知る上で重要なパラメータとなっている。摩擦強度と速度依存性を算出し、高温下でスメクタイト及びイライトが安定すべりをするか、不安定すべりをするかの評価を行った。

[結果, 考察] 摩擦係数は室温で行われた先行研究と同様にスメクタイトはイライトよりも低くなる傾向が見られた。温度を上げるとスメクタイトとイライトの摩擦強度の差はわずかになるが、垂直応力が 60MPa の条件下では約 2 倍の差があり、スメクタイトはイライトに比べ歪みエネルギーを溜めにくい特性を持っていると言える。また、速度依存性については、温度の上昇により変化せず、垂直応力が 40MPa 以上の条件下では、すべり強化 ( $a-b > 0$ ) の非地震性の摩擦挙動を示した。これらのことから、スメクタイトは天然の沈み込み帯における温度・圧力条件下においても非地震性の安定すべりをしていると期待される。一方で、イライトはスメクタイトに比べ大きな摩擦係数の値を示した。このことに加え、温度環境が 200 °C、垂直応力が 40MPa 以上の条件下ですべり弱体化(地震性)の摩擦挙動を示した。温度効果によって、天然の沈み込み帯における温度・圧力下で、地震性の不安定すべりをしている可能性があると考えられる。

Saffer and Marone(2003) の先行研究において、室温の温度環境下でイライトがすべり強化(安定すべり)したために、スメクタイト-イライト相転移による鉱物の変化が摩擦特性の変化と結びつかず、地震発生上限になり得ないと報告をした。しかし、本研究において温度を上昇させ天然の地震発生上限領域の温度環境下に近い条件ではイライトがすべり弱体化を示したことで、スメクタイト-イライト相転移が、十分に非地震性-地震性の変化を支配している可能性が有力であると言える。

キーワード: 地震発生帯の上限, スメクタイト-イライト相転移, 温度効果, 速度依存性

Keywords: updip limit, smectite-illite transformation, effect of temperature, velocity dependence

## 玄武岩起源断層物質の摩擦特性と海溝型地震 Frictional properties of basalt-derived fault rocks and implications for subduction earthquakes

斎藤 翼<sup>1\*</sup>; 氏家 恒太郎<sup>1</sup>; 堤 昭人<sup>2</sup>  
SAITO, Tsubasa<sup>1\*</sup>; UJIIIE, Kohtarō<sup>1</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学・生命環境, <sup>2</sup> 京都大学・理学  
<sup>1</sup>Life and Env. Sci., Univ., Tsukuba, <sup>2</sup>Sci., Kyoto Univ.

近年の南海トラフをはじめとする沈み込み帯における反射法地震探査結果は、海溝型地震震源域の大部分が海洋地殻上部の玄武岩にあることを示唆しており (Bangs et al., 2009 など)、海溝型地震の発生過程を理解するうえで、玄武岩は鍵となる物質であると考えられる。しかし、これまで玄武岩の摩擦特性を検討した研究はほとんどない。四国東部に分布する四万十付加体上部白亜系牟岐メランジュでは、底付け付加に伴うデュプレックス構造形成によって、玄武岩とテクトニックメランジュがスラストにより複数回繰り返す (Ikisawa et al., 2005)。スラストは玄武岩中に発達しており、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイトなどで構成され、ウルトラカタクレーサイトからは断層物質の流動化 (fluidization) や摩擦発熱による鉱物変化など地震性すべりの証拠が報告されている (Ujiie et al., 2007; 2008; Kameda et al., 2011 など)。本研究では、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイト、及びそれらの母岩である枕状玄武岩から採取した試料を用いて、含水条件下ですべり速度 0.0028-2.8 mm/s 下での摩擦の速度依存性と高速 (1.3 m/s) 摩擦特性を検討した。実験の結果、摩擦の速度依存性は、枕状玄武岩起源のガウジで速度弱化、ウルトラカタクレーサイト、面状カタクレーサイト起源のガウジで速度強化の挙動を示した。一方、高速摩擦実験ではすべての試料がピーク摩擦から 0.1-0.2 への定常摩擦へと至るすべり弱化的挙動を示すが、ウルトラカタクレーサイト起源のガウジは、応力降下量、すべり弱化的距離、破壊エネルギーが枕状玄武岩や面状カタクレーサイト起源のものに比べて顕著に小さいという結果が得られた。XRD 解析と微細構造観察の結果、速度弱化を示した試料は粘土鉱物に乏しく (21 wt.%)、粉碎に伴う粒子の細粒化が見られた一方、速度強化の挙動を示した試料は粘土鉱物により富んでおり (29-50 wt.%)、せん断帯に沿った粘土鉱物の配列が認められた。これらの結果は、海洋地殻を構成する枕状玄武岩は不安定すべりの発生ポテンシャルを有するが、断層岩形成に伴ってすべりが安定化することを示唆する。これは、断層運動に伴う粘土鉱物の配列や、熱水変質の進行に伴う粘土鉱物の含有量増加に起因しているのかもしれない。高速摩擦実験の結果は、ウルトラカタクレーサイトにおいて、地震破壊が伝播しやすいことを示している。このことは、ウルトラカタクレーサイトにおいて地震性すべりの痕跡が認められることと調和的である。

キーワード: 海溝型地震, 玄武岩, 摩擦速度依存性, 高速摩擦

Keywords: subduction earthquakes, basalt, frictional velocity dependence, high velocity friction



## 粘土鉱物の湿式および乾式粉碎による非晶質化 Amorphization of clay minerals by wet and dry grinding

藤本 光一郎<sup>1\*</sup>; 福地 里菜<sup>2</sup>

FUJIMOTO, Koichiro<sup>1\*</sup>; FUKUCHI, Rina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学, <sup>2</sup> 東京大学理学系研究科

<sup>1</sup>Tokyo Gakugei University, <sup>2</sup>Tokyo University

Nanoparticles in fault zones are recently paid much attention since they give significant influences on the frictional properties (Ma et al., 2006). Nanoparticles are considered to be formed not only by mechanical grinding but also by mechanochemical processes. Amorphous nanoparticles were found in Iida-Matsukawa fault, Central Japan (Ozawa and Takizawa, 2007). It is well known that clay minerals are easily transformed into amorphous phase by mechanochemical processes. We conducted pulverization experiments of some clay minerals under both dry and wet conditions to clarify the characteristics of the pulverized materials and the mechanism of amorphization.

We used kaolinite saponite and sericite as starting materials. Pulverization experiments were conducted using planetary ball mill and characterization of run products were conducted by XRD, FT-IR, TG-DTA and FE-SEM. Three minerals were completely transformed into amorphous materials by dry grinding. XRD peaks were weakened but still remain after one day wet drying as for kaolinite and sericite. On the contrary, as for saponite, XRD peaks do not show remarkable change under wet condition. Probably amorphization rate is reduced because impact energy in the ball mill is decreased in the presence of water. Presence of interlayer water affects on the behavior of saponite.

キーワード: 粘土鉱物, カオリナイト, セリサイト, サポナイト, 非晶質

Keywords: clay minerals, kaolinite, sericite, saponite, amorphous

地震発生帯の流体の化石としての流体包有物, その捕獲メカニズムと断層科学への  
解釈  
Fluid inclusion as fossil fluid in seismogenic zone, trap mechanism and interpretations for  
fault science

坂口 有人<sup>1\*</sup>; 柳澤 和道<sup>2</sup>  
SAKAGUCHI, Arito<sup>1\*</sup>; YANAGISAWA, Kazumichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山口大学大学院・理工学研究科/海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 高知大学・総合科学系  
<sup>1</sup>Yamaguchi Univ./JAMSTEC, <sup>2</sup>Kochi Univ.

A fluid inclusion, fluid-fill capsule within rigid crystal, preserves density and chemical composition of fluid in deep crust. This records pressure, temperature and other information of the fluid when the fluid trapped. Pore fluid pressure drop due to rapid fluid ejection along the fault was discussed in Kodiak accretionary complex (Vrolijk et al., 1988). CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O fluid inclusions are reported at pseudotachylyte bearing Nobeoka Thrust, Shimanto accretionary complex (Kondo et al., 2005). Thermal stretching of fluid inclusions due to seismic frictional heating were found at seismogenic Mugi Melange, Shimanto accretionary complex (Ujiié et al., 2008). Though fluid inclusion tells us fluid condition in deep crust, trapping mechanism within crystal is still uncertain. The fluid inclusion is one of crystallographic defect, but general size from sub-micron meter to several mm is much greater than crystal lattice. A crystal tend to growth without large defect, and it seems irregular process to be formed a fluid inclusion. The trap mechanism is significant to interpret the fluid inclusion data.

We succeeded to make artificial fluid inclusion in calcite during hydrothermal experiment. A calcite crystals are nucleated and grown with temperature decrease in autoclave. Fluid inclusions were never formed in simple cooling procedure, but many large fluid inclusions were found at the overgrowth zone formed by re-heating process. Surface condition of artificial calcite of re-heating and overgrowth process were observed using SEM. Etched pattern covers the surface of re-heated calcite crystal. Some depressions are wide shallow and others are small deep. Many growth steps were found on surface of over-growth calcite. The calcite surface may have been advanced with lateral motion of growth steps. This growth step covers most of the etched depressions except small deep one. These small deep depressions are surrounded by new grown surface and became increasingly deep. Some depressions may make large pore within overgrowth zone in this process.

This observation shows that the fluid inclusion were made during overgrowth after surface etching, and this requires temporary solubility change in crystal growth process. The fluid inclusions may record pore-fluid condition after the event of pressure, temperature and/or chemical change in deep crust.

Keywords: Fluid inclusion, trap mechanism, artificial calcite

## 地震発生深度における新しい流体移動メカニズム New fluid flow mechanism at seismogenic depth in subduction zone

岳 孝太郎<sup>1\*</sup>  
TAKE, Kotaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 山口大学地球圏システム科学科  
<sup>1</sup>Dept. of Geosphere, Yamaguchi Univ.

Since pore fluid pressure may concern with seismogenesis, large amount of articles are published for fluid flow research, and -previous researches have been focused only crack flow in deep crust. In general, a pore between sedimentary grain decreases with depth, and fluid flows only within crack in deep crust. This study shows new fluid flow mechanism that doesn't depend on crack in the rocks. This produces new perspective of fluid flow of seismogenic depth in subduction zone.

The Shimanto accretionary complex at SW-Japan, formed at seismogenic depth suffers pressure solution deformation and generally includes brittle failure of web structure and crack-filled veins. The carbonate matrix is lacked in the sediments due to deposition below CCD.

Some sandstones in the late Cretaceous Nonokawa Formation, includes spotted carbonate deposit. This carbonate deposit occurs limited area less than several meters square within sandy layer without crack-filled vein. Microscopic observation shows following features as below.

The spotted carbonate minerals overprint with embayment structure in pressure-solution deformed sandy grains, and these are cut by web structure and crack-filled veins. The fluid may have dissolved the sandy grains, and carbonate minerals were deposited at latest stage of lithification process between pressure solution deformation and brittle failure. These occurrences suggest that fluid can flow with dissolution of rock-forming grains in rigid crust without crack.

キーワード: 流体移動, 付加体

Keywords: fluid flow, accretionary complex

## 化石巨大分岐断層における高温流体発生の痕跡とその空間的分布 Generation of high-temperature fluid and its spatial distribution in an ancient megasplay fault

増本 広和<sup>1\*</sup>; 廣野 哲朗<sup>1</sup>; 石川 剛志<sup>2</sup>; 谷川 亘<sup>2</sup>; 向吉 秀樹<sup>3</sup>

MASUMOTO, Hirokazu<sup>1\*</sup>; HIRONO, Tetsuro<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>2</sup>; TANIKAWA, Wataru<sup>2</sup>; MUKOYOSHI, Hideki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>3</sup> 早稲田大学教育・総合科学学術院  
<sup>1</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

四万十付加体久礼地域には、かつて海底下 2.5 – 5.5 km で活動したとされる化石巨大分岐断層の露頭が存在し、先行研究によって、シュードタキライトの産出や 350 °C に達する高温流体の発生と摩擦熔融による不適合元素の濃集が報告されている。しかし、これらの結果は局所的な試料採取によるものであり、露頭全体のスケールにおいて、シュードタキライトや高温流体の痕跡がどのように分布しているのかは未だ明らかにされていない。また、現在のプレート境界断層および巨大分岐断層において、地震時に高温流体が一様に発生し、thermal pressurization が大規模に起きうるかどうかを理解するためには、化石巨大分岐断層における高温流体発生の痕跡とその空間的分布の情報が極めて重要である。そこで、本研究では、露頭における変形構造解析、広範囲サンプリングによる試料採取(全 46 試料)、ベトリナイト反射率測定、粉末 X 線回折 - RockJock による鉱物組成定量分析、微量元素分析を実施した。その結果、スリップゾーンの黒色ガウジには高温流体の痕跡が再確認されたが、そこに近接する下盤の砂岩には石英の増加や希土類元素濃度の減少などが明らかになった。これらの変化は、スリップゾーンで発生した高温高圧の流体が、ある程度、周囲の母岩に浸透し、元素移動を生じさせたことを意味するかもしれない。

キーワード: 南海トラフ, 巨大分岐断層, 四万十付加体, 断層岩, 流体岩石相互作用, X 線回折

Keywords: Nankai trough, megasplay fault, Shimanto accretionary complex, fault rocks, fluid-rock interactions, X-ray diffraction



## 沈み込み帯化石分岐断層における multiple damage zone system について Multiple damage zone system of an exhumed subduction zone megasplay fault

浜橋 真理<sup>1\*</sup>; 川崎 令詞<sup>1</sup>; 福地 里菜<sup>1</sup>; 斎藤 実篤<sup>2</sup>; 橋本 善孝<sup>3</sup>; 濱田 洋平<sup>2</sup>; 北村 有迅<sup>4</sup>; 山口 飛鳥<sup>1</sup>; 木村 学<sup>1</sup>  
HAMAHASHI, Mari<sup>1\*</sup>; KAWASAKI, Ryoji<sup>1</sup>; FUKUCHI, Rina<sup>1</sup>; SAITO, Saneatsu<sup>2</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>3</sup>; HAMADA,  
Yohei<sup>2</sup>; KITAMURA, Yujin<sup>4</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>1</sup>; KIMURA, Gaku<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 高知大学, <sup>4</sup> 鹿児島大学

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Kochi University, <sup>4</sup>Kagoshima University

More than 90% of the major earthquakes and tsunamis are known to occur at plate convergent margins, along plate boundary faults and megasplay faults. Investigating the mechanical properties and deformation patterns of these megathrusts are important to understand the generation of earthquakes and the dynamics on the subduction plate interface. Large displacement faults contribute to the reduction of steady-state strength at mid-crustal levels, and cause the frictional-viscous deformation at depth. As the candidate for such weak faults, foliated, phyllosilicate-rich fault rocks have been prevalently recognized in many tectonic settings. However, whether foliated fault rocks behave as weak structures in the longer terms and their roles in the strain localization and fault evolution, are poorly understood.

Exhumed fault zones are helpful to constrain fault strength and deformation process of foliated cataclasites formed at upper-midcrustal depths over geological time. One of the well-studied exhumed major fault zones in subduction settings is the Nobeoka Thrust, a fossilized megasplay fault in Kyushu Shimanto Belt, southwest Japan, which exposes foliated fault rocks that were formed under the temperature range of ~180-350 °C (Kondo et al., 2005). During the Nobeoka Thrust Drilling Project in 2011, core samples were retrieved containing both consolidated fault rocks and less consolidated, brecciated fault rocks, preserved from surface weathering and less likely to be drilling-induced. The core samples are expected to provide a different aspect on fault rock strength from previous geological studies on exposed, consolidated outcrops. In the current study, given the unique opportunity to determine the coexistence of cohesive and less cohesive fault rocks in a single fault system, we conduct macroscopic and microscopic structural observation and physical property measurements on the core samples, synthesizing with geophysical logs obtained from the drilling of the Nobeoka Thrust to characterize the damage zone architecture of the fault rocks formed in the frictional-viscous regime along the megasplay fault.

The hanging wall consists of the shale-dominant intervals of dense development of phyllitic cleavages, the sandstone-dominant intervals of disturbed foliations, and the damage zone above the fault core characterized by cataclastically broken phyllite with thick abundant sandstone blocks. The observed density of brittle fractures, breccias, and mineral veins is increased at the sandstone-dominant intervals and near the fault core, whereas brecciated and less brittle/ductile structures are abundant within the shale dominant intervals. The brittle deformation near the fault core may have caused the wearing away of the shale-rich zones by abrasion, and as a result, the sandstone-rich zones that have relatively larger strength, remained and deformed cataclastically near the fault core. On the other hand, the footwall in the drilled range consists of six sets of fracture zones, all of which include a "brecciated zone" intensively broken in the center, sandwiched by a "surrounding damage zone" with abundant cohesive faults, mineral veins, and sandstone blocks. The surrounding damage zone is characterized by the increase in fault and fractures with distance from the fault core, and interestingly associate with the increase in resistivity, P-wave velocity, and density and decrease in porosity. The deformation in the surrounding damage zone is inferred to occur in a strain-hardening manner, strengthening with distance from the fault core. Shear localization may initiate more easily in the sandstone-rich area later forming the surrounding damage zone, and eventually develop an intensively deformed fault core in the center. These insights would enable to reinterpret the deformation processes and weakening mechanisms that occur in foliated fault rocks along the megathrust in subduction zones.

キーワード: 沈み込み帯, 巨大分岐断層, 岩石物性, 断層帯, 構造観察, 変形破壊

Keywords: subduction zone, megasplay fault, physical property of rock, damage zone, structural observation, rock deformation

## 延宝五年十月九日(1677-XI-7)房総沖地震津波の被災範囲 Damaged coasts of the tsunami of the Enpo Boso-Oki Earthquake of November 7, 1677

矢沼 隆<sup>1\*</sup>; 都司 嘉宣<sup>2</sup>; 平畑 武則<sup>1</sup>; 馬淵 幸雄<sup>3</sup>; 大家 隆行<sup>3</sup>; 岡田 清宏<sup>3</sup>; 今井 健太郎<sup>4</sup>; 岩渕 洋子<sup>5</sup>; 今村 文彦<sup>4</sup>  
 YANUMA, Takashi<sup>1\*</sup>; TSUJI, Yoshinobu<sup>2</sup>; HIRAHATA, Takenori<sup>1</sup>; MABUCHI, Yukio<sup>3</sup>; OOIE, Takayuki<sup>3</sup>; OKADA, Kiyohiro<sup>3</sup>; IMAI, Kentaro<sup>4</sup>; IWABUCHI, Yoko<sup>5</sup>; IMAMURA, Fumihiko<sup>4</sup>

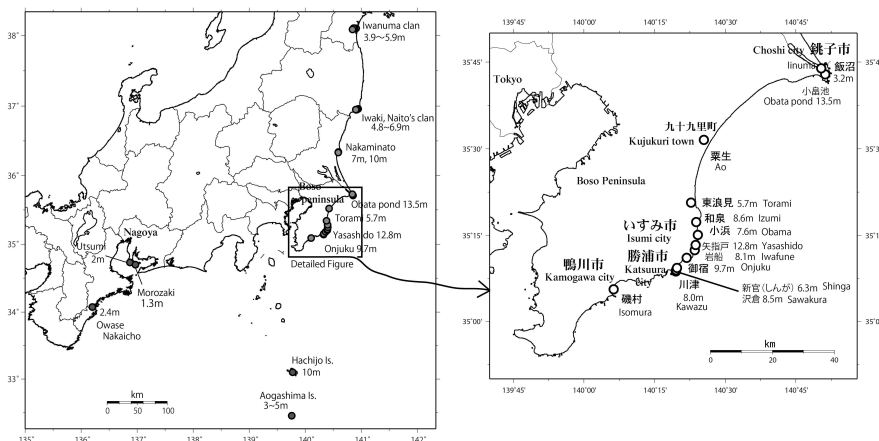
<sup>1</sup>(株)パスコ, <sup>2</sup>深田地質研究所, <sup>3</sup>パシフィックコンサルタンツ(株), <sup>4</sup>東北大学災害科学国際研究所, <sup>5</sup>原子力安全基盤機構

<sup>1</sup>Pasco., <sup>2</sup>Fukada Geolog. Inst., <sup>3</sup>Pacific Consultant, <sup>4</sup>IRIDeS, Tohoku Univ., <sup>5</sup>JNES

江戸時代前半の延宝五年十月九日(1677-XI-7)の夜五ツ時(20時頃)に房総沖海域に発生した地震は、揺れによる被害は起きていない。また有感地震の範囲は、房総半島と江戸に限られる。このように地震の揺れが小さかった割に津波被害が大きかった。この津波による最大被災地となったのは房総半島の勝浦・銚子間であった。江戸時代初期の幕府の根本史料の一つである『玉露叢』に房総半島の津波被害の詳細が記録されている。現在の勝浦市域にある川津村で倒家19軒、死者3人、沢倉村では倒家11軒、死者2人、新宮村では倒家17軒、死者2人の津波被害を生じた。流失家屋が総家屋数の10%かそれ以上生じた場合、その場所の地上冠水厚さは2.0mと推定されることから(羽鳥、1984、越村ら、2009など参照)、この3村での津波浸水高さはそれぞれ8.0m、8.5m、6.3mであった。御宿浦はこれら3村より被害が大きく、倒家30軒で63人もの死者を生じた(津波高9.7m)。現在はいすみ市に属する岩船も津波被害が大きく倒家40軒に対して死者57人を生じた(8.1m)。矢指戸(やさしど)は現在でも総戸数30戸ほどの小集落である。ここで、倒家25軒、溺死13人が記されている。ほぼ、集落全体の全戸消滅に近い(12.8m)。一宮町東浪見(とらみ)は、倒家50軒で97人もの死者を出した最大被災地の一つであるが、この現地文書には「潮は権現堂前まで」とあり、この地点の標高を測定して5.7mの浸水高を得た。銚子市の小島池には外洋から津波によって海水が浸入したとされる。外洋と池を隔てる峠部の標高から13.5mを得た。この津波の特徴は、被害が房総半島からみて遠方にまで及んでいることである。福島県いわき市で4.8~6.9m、宮城県岩沼でも3.9~5.9mの浸水高さがあった。八丈島では島の南西海岸の八戸(やと、現在の八重根港の集落)で居住地の被害を生じており、筆者の一人である今井の現地調査により約10mに達したと推定される。津波は西方にも遠く伊勢湾の知多半島にまで及んでいる。すなわち南知多町内海では『柳營日記』に「内海浦にて漁船廿四、五艘破船つかまつり」と記され、ここで2m程度の水位上昇があったと推定される。さらに知多半島先端の師崎(もろざき)でも、「九日夜尾州知多郡師崎浦江高潮十四五度差引有之」と記され、この「高潮」を天文潮位の満潮の潮位と理解して1.3m(TP)の津波であったと判断される。津波は紀伊半島の尾鷲に及んでいる(『見聞闕疑集』)。この文から尾鷲は居住地に浸水したと判断され、津波浸水標高は2mとする。本研究は、(独)原子力安全基盤機構からの委託業務「平成25年度津波痕跡データベースの高度化ー確率論的津波ハザード評価に係る痕跡記録の調査および波源モデルのデータベース化」(代表:東北大学 今村文彦)の成果の一部として行われたものである。

キーワード: 歴史地震, 歴史津波, 房総沖地震, 首都圏, 伊勢湾, 紀伊半島

Keywords: historical earthquake, historical tsunami, the 1677 Boso-Oki earthquake, metropolotan area, Ise bay, Kii peninsula



## 1703年元禄地震に伴う地盤変動：東京湾沿岸域の隆起・沈降 Crustal movement associated with the 1703 Genroku earthquake

中西 一郎<sup>1\*</sup>  
NAKANISHI, Ichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 理学部 地球物理学教室  
<sup>1</sup>Dept. Geophysics Kyoto University

元禄地震(元禄16年11月23日;1703年12月31日)による東京湾沿岸での地盤変動を推定することを目的として、当時開発された新田及び塩田に関する史料の調査を行った。神奈川県、千葉県については関連史料を得ることができたが、東京都については発見していない。

神奈川県に関しては、東京湾入口から東京湾西岸に開発された4新田又は塩田史料が得られた。史料の概要を南から北に向けて、以下に示す。

- 内川新田(1660年完成)(横須賀市)。元禄地震から9年後に書かれた。  
「乍恐以返答書申上候事」(正徳二年六月)(1712年)(横須賀市蔵)の記述を示す。  
(前略)然所拾ヶ年以前未ノ年大地震より以来右之場所干かたニ罷成候(後略)。  
この地域(浦賀水道西岸)が隆起したことを示している。
- 泥亀新田(1668年完成)(横浜市)。元禄地震の1年後に書かれた。  
「可納申御年貢割付」(宝永元年十月)(1704年)(神奈川県立金沢文庫蔵・永島家文書)の記述を示す。  
(前略)去未地震潮入取米なし(後略)。  
この後に書かれた史料によると、この状態は長期間続いた。
- 吉田新田(1667年完成)(横浜市)。元禄地震から8年後に書かれた。  
「乍恐書付を以御訴訟申上候」(宝永七年二月)(1710年)(吉田家文書)の記述を示す。  
(前略)八年以前未之年地震津浪二吉田新田潮留堤震崩  
(中略)地震以来亡所同前二罷成り候間(後略)
- 大師河原新田・塩田(1695年完成)(川崎市)。地震後50年経って書かれた。  
「一札之事」(宝暦四年二月)(1754年)(川崎市立中原図書館蔵・池上家文書)の記述を示す。  
(前略)先年地震変地仕御運上御免之場所二御座候所(後略)。

千葉県に関しては、東京湾最奥に位置する行徳塩田に関する史料を示す。中世から続く歴史のある塩田であり、江戸幕府に引き継がれた。

- 行徳塩田(? ~1624年)(市川市)。  
書かれた年月は不詳である。記載中の年号に寛延三年があり、元禄地震後約50年後に書かれたものと推定される。  
「行徳領塩浜由来書」(国文学研究資料館蔵)の記述を示す。  
(前略)元禄十六年未年十一月廿三日夜大地震平岡三郎右衛門様御支配之節二而  
地形ゆり下ヶ塩浜海面塩除堤保チ不申荒浜致出来候(後略)。  
地面が下がり、塩浜が海になったと書かれている。

東京都、特に江東区には、元禄地震前に多くの新田が開発されたが、地震に関連する史料はまだ見つからない。また行徳塩田以東の新田・塩田についても調査を続けて行く必要がある。

キーワード: 元禄地震, 東京湾, 地盤変動  
Keywords: 1703 Genroku earthquake, Tokyo Bay, crustal movement



## 宝永地震の津波の再現—東日本大震災を参考に広い海底面隆起域が時間的に変動した場合

### A Reproduction of 1707 Hiei Tsunami with long rupture duration, referring to 2011 East Japan Pacific Ocean Earthquake

松浦 律子<sup>1\*</sup>; 安重 晃<sup>2</sup>; 庄司 正弘<sup>2</sup>  
MATSU'URA, Ritsuko S.<sup>1\*</sup>; ANJU, Akira<sup>2</sup>; SHOJI, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (公財) 地震予知総合研究振興会地震調査研究センター, <sup>2</sup> (株) 構造計画研究所  
<sup>1</sup>ADEP, ERC, <sup>2</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc.

#### 1. 宝永地震について

1707年宝永地震は、伊豆半島以西の太平洋岸で広域に津波被害を与えた江戸時代で最大の地震であった。これまで宝永地震には、安政東海地震と安政南海地震とで破壊した領域が、非常に短時間の間に引き続いて発生したという説 [e.g. 宇佐美 (2003)] や、安政の二地震の領域が一度に破壊した、謂わば“アスペリティ連動地震”という説 [e.g. Ishibashi (2004)] があつたが、安政の二地震から類推できる地震という扱いを受けてきたようである。最近詳細な史料の検討によって明らかになった震度と地殻変動、津波到達時間とからは、宝永地震がその震源域の東端と西端とでは安政の二地震とは重ならず、従来言われてきたような駿河湾内や足摺岬の下は震源域に含まれず、江戸時代の“西日本太平洋沖地震”とも言うべき、別格の超巨大地震であったことが判ってきた [e.g. 松浦 (2012)]。

一方、津波波高から宝永地震を検討すると、相田 (1981) は足摺沖に他より二倍のすべり量を設定し、Furumura et al. (2011) は日向灘まで震源域を拡大して、西日本各地の高い津波を説明するのに苦労している。宝永地震の津波を再現できる波源を追求する際に重要なのは「震源域の設定範囲」や、「すべり量」では無さそうである。これまでの M8 クラス以下の地震の解析と同様に、半無限弾性体中の矩形断層による地表面の地殻変動の理論計算プログラム [e.g. Sato and Matsu'ura (1973)] を用いて、瞬時に波源全域の海底が永久変位の値に変形して津波が発生する、という前提で計算する従来手法を、M9 に近い超巨大地震に適用するために生じる「手法の限界」が影響しているのではないだろうか。矩形の逆断層による理論地殻変動は、震源域の縁が特異点となるので、M9 地震では震源域の端が陸に近くなって計算手法由来のモデル化誤差が当然大きくなる。海溝近くの浅い部分も震源域になれば、弾性定数が大きく異なる深部と物性を変えずに地殻変動を計算することによる「設定モデルの乖離」も加わる。

#### 2. 用いた方法

そこで、我々はまず断層面でのすべりから海底変形を出すことを棚上げして、宝永地震の津波を説明可能な海底の時間変化する変動量分布の例を求めることにした。そのために、宝永地震と同じように広範囲に大津波をもたらした東日本大震災の場合で、手法の妥当性を吟味した。参考として、Saito et al. (2011) が求めた東日本大震災の海底面変動量を、最終変動値として、既知の震源から破壊が伝播し、GPS 観測で捉えられた 20 秒の変動停滞の後に、再び破壊が広がるモデルを計算した。「地震発生の物理」を考慮して、変動は破壊フロントが到達した時点から、変形域の縁に破壊が到達するまで、全ての点が動き続ける設定とした。このような計算によっても、大きい隆起域と岩手沖に角のように飛び出た部分に隆起をおけば、GPS ブイなど沿岸から離れた津波観測波形を再現できることが確認できた。

#### 3. 宝永地震の津波計算結果

そこで、松浦ら (2011) の宝永地震の震源域モデルの範囲を隆起域として、同様に破壊に要する時間を考慮した津波計算を行った。計算には、現在の海底地形から、例えば大阪付近の計算には、関西空港や天保山のような明らかに宝永以降の埋め立て地や、大和川が運んだ堺沖の堆積物の埋積部分等を取り除く、など当時の地形に近づける工夫をした。破壊開始点を、銭洲近くと、熊野灘付近とに変えてみたが、津波の傾向に大きい変化は見られず、歴史地震の津波高という、大まかなデータから破壊開始点を特定することは、少なくとも宝永地震に関しては無理なようである。今回のような概略モデルによっても、十分大阪市中の堀川への浸水や、大分県間越への浸水などが再現できた。巨大津波をシミュレーションする際には、現在津波計算に標準で利用されている 40 年も前の「半無限弾性体中の矩形断層による地殻変動の理論式」ではなく、現在手軽に高機能な計算機が使える状況を活かした方式に、そろそろ切り替えるべきではないだろうか。

キーワード: 1707 年宝永地震, 2011 年東北太平洋沖地震, 矩形断層モデル, 超巨大地震の津波計算, 歴史地震

Keywords: Hiei Earthquake in 1707, East Japan Pacific Ocean Earthquake in 2011, rectangular source fault model, huge tsunami, historical earthquakes



宮城沖では大中小地震が東進し一部が 3.11 震源に達していた、ならば岩手北部沖から十勝沖も同じか～岩手中部沖は津波装置？～  
Close examination of universality of matter off Miyagi that earthquakes advanced toward the east

間瀬 博文<sup>1\*</sup>  
MASE, Hirofumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 所属なし  
<sup>1</sup> none

プレート境界面では低温のプレートの両側に、高温部が形成され互いに引き寄せ合うことで境界面近辺は常に圧縮されている。ウェッジは西進する沈み込みプレートに乗り、海岸線以西の部分から東向きの力を受けている (1)。簡単な実験で宮城沖を再現した。プレート境界の割れが深部より始まり、坂下ですべりを発生させながら割れ前線が浅部へ向けて時間を費やしゆっくりと進んだ。終には浅部の相当範囲の先端部が一気にはがれ、それをきっかけに超巨大地震に比すべき全域の「一斉すべり」が発生し一連のイベントが終了した。これを 1 サイクル一千年と考えた (2)。宮城沖の地震は震源の位置が次第にプレート境界を登坂していた。2005 年の地震の前後では、小地震発生範囲の先頭がじわじわと東進し、2010 年 11 月に 3.11 の震源を越えていた (3)。

したがって宮城沖のモデルは以下の様なもので、実験でほぼ再現された。M7 クラスの地震が震源を東に移動させながら数十年に一度発生し、その度に地震の後方が深部まですべりを起こす。先行する小地震が割れ前線を形成する。割れ前線がしかるべき位置に達すれば一斉すべりが起きる。このモデルの特徴は以下の三つの大問題、a. 特定の範囲内で繰り返し発生するものと一般に思われていること b. その度に大すべりを起こす歪の原因が不明であること c. 行き着くところは浅部の一気破壊だったこと、に対し解答を一度に与えられることである。

宮城沖 (MY)(Fig.1)を参考とし岩手中部沖 (IC), 岩手北部沖 (IH), 青森東方沖 (AT), 十勝沖 (TK) を考えたい。(IH)(AT)では 1968 年十勝沖地震、1994 年三陸はるか沖地震が発生している。(4) のすべり量分布図は興味深い。破壊開始点 (震源) と主破壊域が坂上坂下の関係は理解できるが相当離れているのは特徴で解明する必要があるが。主破壊域は最も海溝寄りのすべりのピークと解釈する。1968 年地震は大すべり範囲が南北二箇所あり、南側の主破壊域は 1994 年地震の主破壊域の坂下に位置し注目される。1968 年地震は、1994 年地震の一つ前の地震を同伴したようである。付近で過去に発生した地震 (5) は 1968 年地震か、1994 年地震の一つ前の地震の坂下に主破壊域があった可能性がある。だから (IH)(AT) は (MY) と同様の道を行っていると考える。浅部はすべれないのではなく、タイミングを待っているだけであろう。

(TK) では 1952 年十勝沖地震、2003 年十勝沖地震が発生した。震源は 1952 年地震が坂上である。しかし (6)(7)(8) のコンターによれば、主破壊域は 2003 年地震が坂上であった可能性が大きい。ここでも地震が登坂していると考えておいた方がよい。

(IC) は少々事情が異なる。北緯 39～40 度, 東経 143～144 度の範囲は 1923 年以降、中小地震の多発地帯であり、プレート内地震が多いことを伺わせる (12)。下盤が地震により常時潰れて物質が上にはみ出し付加体を作っていることになる。下盤が短くなるから上盤は相対的に長くなり、膨らんで表面付近は伸張場になろう。そして海溝に押し寄せるので急な崖を形成し崩落する。これは (9) で示される (IC) の地形を理由とともに説明していることになる。表面付近の伸張場は横ずれ断層型の発生 (10) の理由となろう。崩落が容易な崖の構造は、周辺の地震に敏感に反応する上に効率的な津波発生装置になっている可能性がある。(11) の成果に調和的である。

参考文献:(1) 間瀬/JpGU2012/SCG67-P06 (2) 間瀬/SSJ2012/P2-75 (3) 間瀬/JpGU2013/SSS28-P09 (4) 永井ら (2000)/三陸における再来大地震の震源過程の比較研究/東大震研/http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/11seikahoukoku/koukai/r11.5fig1.JPG

(5) Wikipedia「三陸沖北部地震」(6) 佐竹ら (2004)/1952 年・2003 年十勝沖地震の津波波源の比較－1952 年津波の再検討に基づいて－/産総研/SSJ2004 年大会

(7) 八木 (2004)/2003 年 9 月 26 日十勝沖地震 (Mjma 8.0) の破壊伝搬の様子 EPS 分/建築研 (8) 山中・菊地 (2003)/遠地実体波解析 9 月 26 日十勝沖地震 (Mj8.0)/東大震研/EIC 地震学ノート No.139 (9) 泉ら (2012)/150m グリッド DEM から作成した日本海溝付近の 3D 海底地形/海保海洋情報部/研究報告第 48 号 (10) 中島 (1974)/1968 年十勝沖地震の前後における発震機構の変化/北大/地球物理学研究報告 (11) 市原ら (2013)/東日本大震災で発生した津波が巨大化した原因となった場所を特定/JAMSTEC/2013 年 10 月 8 日 (12) 気象庁/地震・火山月報 (防災編)/平成 16 年 6 月/6 月 12 日岩手県沖の地震/震央分布図、断面図

SSS30-P01

会場:3階ポスター会場

時間:4月29日 18:15-19:30

参考文献

(1) Hirofumi MASE(2012)/The power to form and maintain oceanic basin and island arc / JpGU2012/SCG67-P06 <http://www2.jpgu.org/meeting/2012/html5/session/S-CG67.html>  
 (2) Hirofumi MASE(2012)/Materialization and Experiment of Model of Miyagi Prefecture offing on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake/SSU2012/P2-75 [http://globalist.jp/detail.php?GLOBAL\\_ID=2012022271822634851](http://globalist.jp/detail.php?GLOBAL_ID=2012022271822634851)  
 (3) Hirofumi MASE(2013)/Model that harmonizes with the rupture process of (Ide et al.2011) ~Relation between 3.11 and off-Miyagi-earthquakes~/JpGU2013/SSS28-P09 <http://www2.jpgu.org/meeting/2013/session/S-SS28.html>  
 (4) 永井理子・菊地正幸・山中佳子(2000)/三陸における再来大地震の震源過程の比較研究 / 東大震研/JpGU2000/Sa-005 Riko NAGAI, et al.(2000)/Comparative study on the asperities of large earthquakes in Sanriku region/ERI Univ. of Tokyo <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/11seikahoukoku/koukai/r11.5fig1.JPG>  
 (5) ウィキペディア (Wikipedia) [三陸沖北部地震/繰り返し発生する地震以外の地震] <http://ja.wikipedia.org/wiki/三陸沖北部地震>  
 (6) 佐竹健治・平田賢治・谷岡勇市郎・山本 滋(2004)/1952年・2003年十勝沖地震の津波波源の比較 - 1952年津波の再検討に基づいて - /産総研/SSU/2004年大会 <http://unt.aist.go.jp/act/fault-eq/seika/meeting/jishin2004/satake.html>  
 (7) 八木勇治(2004)/2003年9月26日十勝沖地震(Miwa 8.0)の破壊伝搬の様子EPS分/建築研 <http://isee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Japan20030926/Japan20030926-j.html>  
 (8) 山中・菊地(2003)/遠地実体波解析9月26日十勝沖地震(Mj8.0)/東大震研/EIC地震学ノートNo.139 [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo\\_Note/030926.html](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/030926.html)  
 (9) 泉純明・堀内大嗣・西澤あずさ・木戸ゆかり・中田高・後藤秀明・森辺清久・鈴木康弘(2012)/150mグリッドDEMから作成した日本海溝付近の3D海底地形/海峽海洋情報/研究報告第48号 Noriaki IZUMI, et al.(2012)/3D bathymetric image along the Japan Trench based on 150 meter grid DEM/JHOD/JCG <http://www.1.kaiho.mlit.go.jp/GJUTSUKOKUSAI/KENKYU/report/rhr48/rhr48-tr10.pdf>  
 (10) 中島徹(1974)/1968年十勝沖地震の前後における発震機構の変化/北大/地球物理学研究報告 Tohoru NAKAJIMA(1974)/Spacial and Sequential Distribution of Focal Mechanisms before and after the Tokachi-Oki Earthquake of May/Hokkaido U. <http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/14044>  
 (11) 市原寛・浜野洋三・馬場聖三・笠谷貴史(2013)/東日本大地震で発生した津波が巨大化した原因となった場所を特定/海洋研究開発機構/2013年10月8日 Hiroshi ICHIHARA, et al.(2013)/Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer/JAMSTEC [http://www.jamstec.go.jp/about/press\\_release/20131008\\_2/](http://www.jamstec.go.jp/about/press_release/20131008_2/)  
 (12) 気象庁/地震・火山月報(防災編)/平成16年6月/6月12日岩手県沖の地震/震央分布図、断面図 JMA/Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan/June 2004/6月12日岩手県沖の地震 <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaiko/index.html#monthly> (13) 気象庁/地震・火山月報(防災編)/平成15年10月/特集1/図1-4、平成17年8月/特集1/図8-1,等 <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaiko/index.html#monthly>

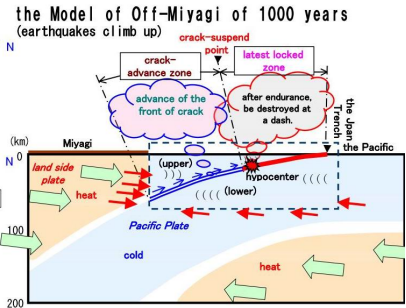
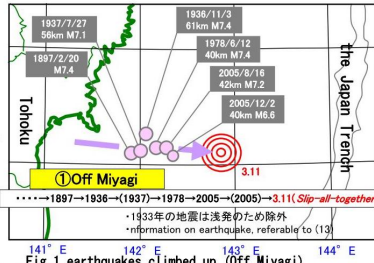


Fig.2 Model cross section intersecting squarely in the Trench and crossing over Miyagi

Explanatory notes		
	Power work by temperature structure of heat-cold-heat	
	Range corresponding to clay lump in the experiment	
	The distribution of power to work by $\alpha$ within $\beta$	

## アウターライズ地震の多様性：2013 年 10 月 26 日福島沖地震を例にして Diversity of outer-rise earthquakes: As an example of the Off-Fukushima earthquake on 26 October 2013

蓬田 清<sup>1\*</sup>  
YOMOGIDA, Kiyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院  
<sup>1</sup> Graduate School of Sciences, Hokkaido University

アウターライズ地震は、沈み込むプレートが折れ曲がる、あるいは自重によってプレート内部で起こる断層運動によって発生すると考えられている。約 50km より深いプレート下部での沈み込む方向に圧縮軸を持つ逆断層の地震もあるが、M7 を超える大地震を含む多くは浅い部分での正断層の地震であり、その発生様式は沈み込むプレート年代や近傍のプレート境界での大地震の発生パターンと深く関係すると、考えられてきた。プレート内地震であることが震源過程の本質的な特徴であり、既存の断層面(弱面)がない領域での地震なので、通常の沈み込むに伴う地震に比べて高周波成分が卓越することが常識と考えられてきた。

2013 年 10 月 26 日に、2011 年東北沖地震の影響によると思われるアウターライズの大地震の一つとして、福島沖で JMA で M7.1 の地震が発生した。この地震では緊急地震速報が正常に機能しなかった。その判定に使われる 1Hz あたりの地震動はるか沖の遠方という要素を考慮しても、小さかった可能性を示唆する。本研究では、F-net などの広帯域地震観測記録(とりわけ上下成分での P 波初動部分)を用いて、この地震の高周波数成分も含めた地震波の励起の周波数特性・波形の特徴を検証した。

日本海溝の外側の他のアウターライズ地震の波形記録を、沈み込み境界の地震のそれと同じ観測点で比較すれば、途中の伝搬のパス特性やサイト特性はほとんど影響しない。1Hz 以上の高周波成分はアウターライズ地震の方が明らかに卓越している。しかし上述の福島沖地震では、高周波数成分は太平洋沿岸のどの観測点でも目立たず、むしろ周期数秒程度のパルスが 5 回程度、明確に認められる観測点がいくつか存在した。この地震の直後にほぼ同じ震源位置で発生し、余震と思われる小さな複数の地震では、どの観測点でも高周波数成分だけが卓越しており、この福島沖地震の震源過程だけが異なることが確認された。つまり、この地震はアウターライズのプレート内地震ではあるが、破壊された断層面には 10 キロ程度の強度の大きな不均質性が複数あり、この地震の断層運動でそれらが最終的に破壊につながった極めて特異な震源過程が示唆される。リソスフェアの微細不均質性のサイズ分布はフラクタル的な von Karman 型などでよく表現できることがわかっているが、この断層面近傍は上述のスケールの複数の不均質性が際立っていたはずである。

福島沖に沈み込む太平洋プレートには海山列がいくつか認められており、今回のアウターライズ地震の特徴的な地震波励起を生じた不均質性の原因かもしれない。いずれにしても、アウターライズ地震は高周波成分によって早期判定ができるというこの概念は再考する必要がある、多様な発生様式がありうることを提案する。日本近海で発生したいくつかのアウターライズ地震の波形記録を調べると、2012 年 3 月 14 日に千島・日本海溝のコーナーで発生した M7.0 の地震だけは、高周波数成分にやや富んでいるが、周期数秒のパルス状の波形も重なっており、福島沖地震と似た特性を持っている。沈み込むプレートの不均質や折れ曲がってかかる応力状態などで、多様な破壊過程が生じる可能性があることも考えられる。

キーワード: アウターライズ地震, プレート内地震, 高周波数成分, 断層破壊, 海洋リソスフェアの不均質性  
Keywords: outer-rise earthquake, intra-plate earthquake, high frequency seismic waves, fault rupture, heterogeneity of oceanic lithosphere

## 日本海溝北部における高分解能反射法探査 High resolution seismic profiling in the northern Japan Trench axis area

中村 恭之<sup>1\*</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 三浦 誠一<sup>1</sup>; 山下 幹也<sup>1</sup>; 藤江 剛<sup>1</sup>; 下村 典生<sup>1</sup>; 井和丸 光<sup>1</sup>  
NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1\*</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; MIURA, Seiichi<sup>1</sup>; YAMASHITA, Mikiya<sup>1</sup>; FUJIE, Gou<sup>1</sup>; SHIMOMURA,  
Norio<sup>1</sup>; IWAMARU, Hikaru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Marine geological and geophysical surveys and analysis of their results have revealed that the ruptured area of the 2011 Tohoku earthquake extended up to the vicinity of the trench axis along the plate boundary fault. To investigate the geological structure, especially the faults and the deformation of the sediments, we have conducted reflection seismic surveys in the trench axis area of the Japan Trench off Miyagi and Iwate prefectures. Three seismic cruises have been carried out in 2011 and 2013 along 81 E-W (dip) lines and 17 N-S (strike) lines. We have used 320 or 380 inch<sup>3</sup> cluster air guns and a 1200 m long streamer cable to obtain high resolution seismic data. Surveyed area covers the trench axis area along the trench strike from seaward of the hypocenter of the Tohoku earthquake around 38 N at south, to ~40 N at north. Seismic profiles around 38 N show that the trench axis is located on a graben with sediments which have been deformed by reverse faulting. Similar deformation structure is observed around 40 N, but the trench axis is located on a horst not a graben there. The thickness of the incoming sediments on the Pacific plate typically ranges ~0.3 ? 0.5 s in two way time, however it is reduced down to <0.2 s around 39.5 N where the basement of the oceanic crust shows higher relief and trench inner wall is significantly steep. The thickness variation of the incoming sediments can be traced seaward and corresponded with along strike variation of the structure in the outer rise. These high resolutions seismic data served for the site selection of the JFAST drilling project by IODP and also contributes to the JTRACK proposal for future drilling in the Japan Trench following success of the JFAST.



## 東北地方太平洋沖地震震源域における地震探査 Seismic surveys in the ruptured area of the 2011 Tohoku earthquake

中村 恭之<sup>1\*</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 海宝 由佳<sup>1</sup>; 野 徹雄<sup>1</sup>; 藤江 剛<sup>1</sup>; 佐藤 壮<sup>1</sup>; 山本 揚二郎<sup>1</sup>; 笠谷 貴史<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 三浦 誠一<sup>1</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>

NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1\*</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KAIHO, Yuka<sup>1</sup>; NO, Tetsuo<sup>1</sup>; FUJIE, Gou<sup>1</sup>; SATO, Takeshi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Yojiro<sup>1</sup>; KASAYA, Takafumi<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; MIURA, Seiichi<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We have conducted seismic surveys in the ruptured area of the 2011 Tohoku earthquake off Miyagi prefecture in 2011 and 2013 using JAMSTEC's R/V Kairei. Three multi-channel reflection seismic (MCS) surveys were conducted in 2011 with R/V Kairei's 7800 inch<sup>3</sup> tuned air gun array and ~6 km long streamer cable. The MCS profiles along 14 E-W (dip) lines and two N-S (strike) lines were acquired during these surveys. Another seismic survey was carried out in 2013 around the JFAST drill site along one dip line and two strike lines. Time migrated sections demonstrated characteristic structure in the Japan Trench subduction zone; the Pacific plate deformed by normal faults (horst and graben structure), frontal prism with seismically transparent or chaotic feature, strong landward dipping reflections corresponding to the backstop interface, "deep sea terrace" in the upper landward trench slope covered with younger sediments mainly deformed with normal faults. Our survey area covers ~150 km in the trench strike direction around the epicenter area, which is rather small compared with the entire rupture zone (400 ? 500 km in the strike direction) of the Tohoku earthquake, however the structure is considerably variable from south to north. We have selected 6 dip lines, including the JFAST dip line, to apply pre-stack depth migration (PSDM). The PSDM sections provide higher quality profiles and interval velocity models in depth domain which are suitable for understanding the structural framework of the Japan Trench subduction zone. In 2013 survey, we also used four ocean bottom seismographs (OBSs) in addition to the MCS system. The P to S converted wave was clearly observed in the horizontal component seismograms, and the V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> in the sediment layer around the JFAST drill site was estimated at >4.5.

## 東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) における熱物性測定 Determination of Three Thermal Properties in Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)

林 為人<sup>1\*</sup>; 多田井 修<sup>2</sup>; Fulton Patrick<sup>3</sup>; Harris Robert<sup>4</sup>; 谷川 亘<sup>1</sup>; 木下 正高<sup>1</sup>

LIN, Weiren<sup>1\*</sup>; TADAI, Osamu<sup>2</sup>; FULTON, Patrick<sup>3</sup>; HARRIS, Robert<sup>4</sup>; TANIKAWA, Wataru<sup>1</sup>; KINOSHITA, Masataka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 高知コア研究所, <sup>2</sup> 株式会社マリン・ワーク・ジャパン, <sup>3</sup> University of California, Santa Cruz, USA, <sup>4</sup> Oregon State University, USA

<sup>1</sup> Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup> Marin Works Japan LTD, <sup>3</sup> University of California, Santa Cruz, USA, <sup>4</sup> Oregon State University, USA

東北日本太平洋沖 Mw9.0 巨大地震の発生をうけて、統合国際深海掘削計画 (Integrated Ocean Drilling Program、略称 IODP) は、かつてにない迅速な検討を行い、掘削船「ちきゅう」による緊急掘削調査プロジェクト「東北地方太平洋沖地震調査掘削; Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST)」の実施を決定した。この緊急掘削調査は、平成 24 年 4 月 1 日~5 月 24 日と平成 24 年 7 月 5 日~7 月 19 日の 2 回に分けて実施され、震源域における断層掘削を行った。掘削地点 (北緯 37 度 56 分東経 143 度 55 分) は宮城県牡鹿半島東方沖約 220km 沖合の海域で、日本海溝までの距離は約 6km であった。水深が約 6890 m の海底から、深度約 820m のプレート境界断層を貫通して、850m まで掘削して、チャート層に達した。東日本大震災の大津波をもたらした、滑り量が 50m にも及ぶ震源断層を掘り抜き、温度測定と試料の採取に成功した。

JFAST のもっとも重要な科学目標の一つは、東北地震時の断層滑りに伴う摩擦熱の検出であり、その摩擦熱の残熱として現れる温度深度分布の異常を定量的特定して、地震時の動的せん断応力を決定することである。掘削孔内の温度プロフィールから、温度異常の決定ならびに温度異常値から、地震時の摩擦熱量、さらに動的せん断応力を算出するためには、地層の三熱物性 (熱伝導率、熱拡散率と比熱) を知ることが必要不可欠である。本研究では、非定常面熱源法 (通称ホットディスク法) により、4 つのホールラウンドコア試料 (それぞれの採取深度が 177, 697, 802, 828 mbsf) の三熱物性値を測定した。また、非定常熱線法による船上測定では 45 個のハーフコアの熱伝導率が得られたとともに、定常法である分割棒法による粒状試料 (38 個) の熱伝導率測定が行われた。この 3 種類の熱伝導率測定法による結果は互いに整合し、C0019E 孔では概ね  $0.9\text{-}1.5\text{Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$  の範囲内に分布することが判明した。また、ホットディスク法による測定から、熱伝導率と熱拡散率の異方性を評価した結果、顕著な異方性がないことが確認された。

謝辞: 本研究で用いたコア試料は IODP の提供によるものである。第 343 と 343T 次 IODP 研究航海の乗船研究者、ラボテクニシャン、掘削チーム、運航チームのご協力に感謝の意を表す。

キーワード: 熱物性, JFAST, 熱伝導率, 熱拡散率, 比熱

Keywords: Thermal Property, JFAST, Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Specific heat

## 東北沖浅部断層の低～高速摩擦特性を考慮したスロースリップと地震性すべりのモデル化 Modeling slow and seismic slips off Tohoku considering low to high speed friction behavior of the shallow plate boundary

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>; Ikari Matt<sup>2</sup>; 野田 博之<sup>3</sup>  
SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>1\*</sup>; IKARI, Matt<sup>2</sup>; NODA, Hiroyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>2</sup>Marum, Center for Marine Environmental Sciences, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>2</sup>Marum, Center for Marine Environmental Sciences, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Ikari et al. (2013) examined low to high speed frictional properties of fault zone material from the shallow plate boundary in the Tohoku region obtained by the IODP Expedition 343 (JFAST). They found velocity-weakening frictional behavior at slip velocities slower than  $10^{-6}$  m/s and velocity-strengthening at higher slip velocities. This frictional property is considered to be a mechanism that causes slow slip events and stress accumulation during the period between slow slip events. We investigate the effects of this frictional property on generation of slow slip events and megathrust events.

We use a rate- and state-dependent friction law with cut-off velocity to an evolution effect to represent this frictional behavior. Based on the experimental results (Ikari et al., 2013), we set the cut-off velocity at  $10^{-6}$  m/s. We also consider dynamic weakening due to thermal pressurization at high slip velocity. We perform three-dimensional quasi-dynamic modeling of slip processes. Numerical results show the occurrence of slow slip events at intervals of several ten years at the shallow plate boundary. During the period between slow slip events, stress accumulation proceeds. When an earthquake nucleates at the deeper region, coseismic slip propagates into this region, which results in larger slip compared to the case where a simple velocity-strengthening friction law is considered.

Ito et al. (2012) detected slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Shallow very low frequency earthquakes off Tohoku were detected by Matsuzawa et al. (2012). In addition, along the shallow plate boundary off Tokachi, sequential activity of very low frequency earthquakes occurs at intervals of several years (Asano et al., 2008). These observations suggest that the transitional friction behavior investigated by Ikari et al. (2013) occurs along the shallow plate boundary off Tohoku.

キーワード: 東北沖, 浅部プレート境界, 低～高速摩擦特性, スロースリップ, 地震性すべり  
Keywords: off Tohoku, shallow plate boundary, low to high speed friction behavior, slow slip, seismic slip

## 地形を用いた日本海溝における沈み込みプレート境界浅部を支配する摩擦特性の解析 Friction properties beneath the frontal wedge near the Japan Trench: deduction from topographic variation

高下 裕章<sup>1\*</sup>; 小平 秀一<sup>2</sup>; 富士原 敏也<sup>2</sup>; 佐々木 智之<sup>3</sup>; 亀田 純<sup>7</sup>; 北村 有迅<sup>6</sup>; 浜橋 真理<sup>1</sup>; 濱田 洋平<sup>4</sup>; 山口 飛鳥<sup>5</sup>; 芦 寿一郎<sup>5</sup>; 木村 学<sup>1</sup>

KOGE, Hiroaki<sup>1\*</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>2</sup>; FUJIWARA, Toshiya<sup>2</sup>; SASAKI, Tomoyuki<sup>3</sup>; KAMEDA, Jun<sup>7</sup>; KITAMURA, Yujin<sup>6</sup>; HAMAHASHI, Mari<sup>1</sup>; HAMADA, Yohei<sup>4</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>5</sup>; ASHI, Juichiro<sup>5</sup>; KIMURA, Gaku<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, <sup>3</sup> 海洋技術開発株式会社, <sup>4</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>6</sup> 鹿児島大学, <sup>7</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Ocean Engineering & Development Corporation, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>5</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>6</sup>Kagoshima University, <sup>7</sup>Hokkaido University

The 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) produced a fault rupture, extending to the Japan Trench. Deformation and frictional properties beneath the forearc are the keys to elucidate this unusual event.

In this study, to obtain frictional properties ( $\mu_b'$ ; the coefficient of effective basal friction), we extracted shape-related parameters from the cross sections of the frontal wedge which are obtained from surveys across the trench that span sporadically along the axis of the Japan Trench. The following two methods were adopted for this study; Critical Taper Theory (CT) and Critical State Theory (CS). Both of the theories are based  $\mu_b'$  From the Critical Taper Theory. Near latitude 36.1, the taper angles (slope angle + decollement dip angle) has been developed. A possible seamount subduction may differentiate this area. However, near the latitude 38.15 where the largest slip was reported with the 2011 earthquake, the taper angle has also been large without any seamounts. The calculated [or estimated] value of  $\mu_b'$  in this area is larger than that of the other area, suggesting that the larger strain energy was accumulated in comparison with the other wedges.

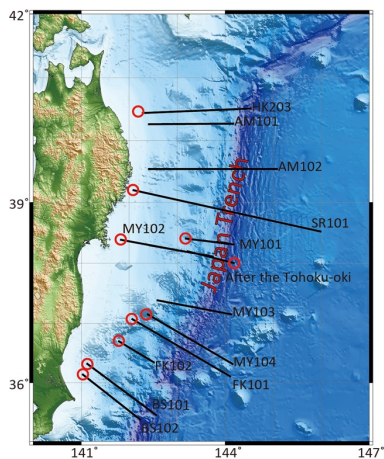
From the Critical State Theory, the value of  $\omega$  (angle between the basal decollement and backstop interface) becomes smaller toward the north. The results of CS show the increase of the  $\omega$  associate with the increase of the  $\mu_b'$ , suggesting that strain energy is more stored toward the North.

Both results show that the  $\mu_b'$  has decreased after the earthquake. The change in  $\mu_b'$  may be due to the earthquake.

It is possible to know friction properties of before the earthquake and that of after the earthquake with bathymetry.

キーワード: 日本海溝, 臨界尖形理論

Keywords: Japan Trench, Critical Taper Theory





## 段丘地形・沖積平野地下地質の特徴に基づいた三陸海岸南部・陸前高田の長期地殻変動 Long-term crustal movement in the Rikuzentakata area, southern Sanriku coast, based on geomorphological/geological featu

丹羽 雄一<sup>1\*</sup>; 遠田 晋次<sup>1</sup>  
NIWA, Yuichi<sup>1\*</sup>; TODA, Shinji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所

<sup>1</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

東北日本弧では地質学的に求めた地殻変動速度と測地的に求めた地殻変動速度の不一致が指摘されている(池田, 1996)。三陸海岸地域では、海成段丘の存在から、10 万年スケールでは 0.1 mm/yr オーダーでの隆起が示唆されている(小池・町田, 2001)が、測地観測記録からは過去 100 年間最大で 10mm/yr の速度で沈降している(西村, 2012)。このような時間スケールによって相反する地殻変動傾向に対し、未知の巨大地震による隆起が推定された(池田, 1996)ものの、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、プレート境界浅部の急激なすべりに伴う陸側プレートの変形によって、三陸海岸一帯で広域的な沈降が生じた(Ozawa et al., 2011)。海溝型巨大地震の繰り返しメカニズムに迫るためには長期地殻変動と 2011 年の地震のような超巨大地震時の地殻変動との関連性を理解することが重要であるが、そのためには、地形地質学的データに基づいて長期的な地殻変動を明らかにしていく必要がある。前述のように、三陸海岸では長期的な隆起が推定されているが、地震時の沈降が著しかった南部三陸海岸に着目すると、海成段丘の分布は限定的かつ、明確な編年データにも欠けており、長期的地殻変動自体が不明のままといえる。

このような背景のもと、発表者らは三陸海岸南部を中心に空中写真判読・露頭調査・ボーリング調査・既存ボーリングデータの収集・解析を行った。本発表では、予察的ではあるが、三陸海岸南部のうち、陸前高田における長期地殻変動を検討する。

空中写真判読を行った結果、本地域には標高 20~70 m ほどに定高性のある平坦面が認められたが、これらは著しく開析を受け丘陵状になっており、分布が断片的かつ連続性に乏しい。いくつかの露頭で層厚 5 m 以上の風化の進んだ礫層が認められたが、この礫層が段丘構成層なのか、あるいは開析を受けた段丘の基盤をなすのか判断はできなかった。ごく一部の露頭では風化の進んでいない海成礫と思われる層厚 3 m 以上の垂円礫層を観察できたが、上位を背後の古い段丘(あるいは丘陵)からの崩壊物と思われる風化礫に覆われ、編年可能なテフラなどの試料は見られなかった。地形判読の結果から、本地域では段丘地形から長期地殻変動を捉えることが難しいと言える。

沖積平野では、3 本のボーリングコアの記載・粒度分析・電気伝導度(EC)測定、<sup>14</sup>C 年代測定を行った。本地域の地下は、下位から花崗岩からなる基盤岩、網状河川堆積物、河口~潮間帯堆積物、内湾~デルタ堆積物、氾濫原堆積物から構成される。最も上流側のコアで 8000~8500 cal BP の堆積年代を示す潮間帯堆積物と思われる極細粒砂とシルトのリズミカルな互層が現標高-11.21~-16.26 m に認められた。この堆積物がハイドロアイソスタシーを考慮した本地域の当時の海面高度(Nakada et al., 1991)と同程度の標高に分布することから、本地域の地殻変動を完新世の平均的な傾向で見ると概ね安定傾向と考えられ、顕著な隆起傾向および、測地的データから推定される 1 mm/yr オーダーの沈降傾向にはないと考えられる。発表時にはコアデータを増やし、より詳細に議論を行う予定である。

キーワード: 海成段丘, 三陸海岸南部, 長期地殻変動, 沖積平野

Keywords: marine terrace, southern Sanriku coast, long-term crustal movement, alluvial plain

## 高詳細モデルを用いた地震時・地震後地殻変動の大規模有限要素シミュレーション Large-scale simulation of coseismic and postseismic crustal deformation using a high-fidelity finite element model

縣亮一郎<sup>1\*</sup>; 市村強<sup>1</sup>; 平原和朗<sup>2</sup>; 兵藤守<sup>3</sup>; 堀高峰<sup>3</sup>; 堀宗朗<sup>1</sup>

AGATA, Ryoichiro<sup>1\*</sup>; ICHIMURA, Tsuyoshi<sup>1</sup>; HIRAHARA, Kazuro<sup>2</sup>; HYODO, Mamoru<sup>3</sup>; HORI, Takane<sup>3</sup>; HORI, Muneo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

海溝型巨大地震の地震後地殻変動は、アセノスフェアの粘弾性的な振る舞いに大きく影響を受ける。解析的なモデルや三次元有限要素法などを使って粘弾性を考慮し、地震後地殻変動のシミュレーションを行った研究例はいくつか存在する。一方地殻形状や物性のデータは蓄積されてきているものの、現実に近い地殻モデルを用いてこれらのシミュレーションを行うことは、計算コストの観点から難しいとされてきた。本研究では、ハイパフォーマンスコンピューティングの技術に基づき、地殻データを詳細に再現した地殻の三次元有限要素モデル（以下高詳細モデル）を用いて、地震後地殻変動の大規模解析を試みる。これまでに日本列島全域を含む、東西方向 1700 km、南北方向 2600 km、鉛直方向 400 km の領域に対し、1km 分解能の高詳細モデルを生成した。地表面形状のモデルとしては日本水路協会発刊の日本近海 30 秒 (900m) グリッド分解能の水深データ (JTOPO30, 2003) を用い、プレート間境界の形状には CAMP スタンダードモデル (Hashimoto et al. 2004) を用いた。ユーラシアプレート及び北アメリカプレートの厚さ 30km の弾性層の下に、粘弾性マントルウェッジを置き、そこにフィリピン海プレートおよび太平洋プレートが沈み込む有限要素モデルを構築した。モデル化対象領域が大きいと、地表面の曲率も考慮した。高詳細モデルは多自由度となるため、計算には京コンピュータを用いた。

セッション当日には、高詳細モデルを用いた海溝型地震後 200 年間の地震後地殻変動のシミュレーション結果を示す予定である。それに加え、メッシュサイズや時間分解能などを変えた計算結果を比較することにより、本手法により計算された解が数値的に収束していることも示す。

キーワード: 地震後地殻変動, 高詳細な三次元地殻構造モデル, 大規模シミュレーション

Keywords: postseismic crustal deformation, high-fidelity finite element model of crustal structure, large-scale simulation

## 南海トラフ沿いで想定された最大クラスの巨大地震による西太平洋・東シナ海の津波伝播シミュレーション Tsunami simulation in the Western Pacific Ocean and East China Sea from the hypothetical M9 Nankai earthquake models

原田 智也<sup>1\*</sup>; 佐竹 健治<sup>2</sup>; 古村 孝志<sup>1</sup>  
HARADA, Tomoya<sup>1\*</sup>; SATAKE, Kenji<sup>2</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大総合防災情報研究セ/地震研究所, <sup>2</sup> 東大地震研究所  
<sup>1</sup>CIDIR/ERI, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

本研究では、内閣府（2012）が南海トラフ沿いにおいて想定した最大クラスの巨大地震の 11 パターンの断層モデル (Mw9.1) による西太平洋・東シナ海の津波の伝播シミュレーションを行った。その結果、ニューギニア島沿岸、フィリピン諸島沿岸、上海付近沿岸において計算された最大津波高は、それぞれ、1.0~5.0 m, 1.0~7.0 m, 0.5~2.0 m であった。これらの値は、南海トラフにおける既往最大地震である 1707 年宝永地震の種々の断層モデルによって計算されたものよりも 2 倍近く高くなる。各沿岸での最大津波高は、四国沖～日向灘沖に大すべり域が存在するモデルで大きくなる傾向があった。しかし、駿河湾・紀伊半島沖に大すべり域を仮定したモデルも宝永地震モデルの 1.5 倍程度大きくなることが分かった。

内閣府に設置された「南海トラフの巨大地震モデル検討会」は、南海トラフ沿いにおける最大クラスのプレート間巨大地震を想定し、日本沿岸における津内高を計算し、それによる人的及び経済的な被害想定を行った（内閣府、2012）。その結果、津波高 10m 以上の巨大津波が 13 都県にわたって襲来することが想定された。内閣府の想定した M9 クラスの南海地震による大津波は、西太平洋あるいは東シナ海の沿岸を襲うと考えられる。Harada and Satake (2012, AOGS; 2013, "Tsunami Events and Lessons Learned", Springer) は、過去の南海トラフ沿いの巨大地震について提出されている複数の断層モデル (Ando, 1975, 1982; 相田, 1981a, 1981b; 安中・他, 2003) による西太平洋・東シナ海の津波の伝播シミュレーションを行っている。

本研究では、想定された最大クラス巨大地震の 11 パターンの断層モデルによる同様の津波伝播シミュレーションを行った。津波の伝播計算は、コリオリ力を含む極座標系の非線形長波式 (Satake, 1995) を用いた。津波の初期値は、内閣府 (2012) による平面直交座標系 (JGD2000) における値を極座標系における値に変換して使用した。海底地形は GEBCO の 30 秒グリッドデータを用いた。計算領域は東経 115° - 155°, 南緯 8° - 北緯 40° で、時間ステップは 1 秒、海底摩擦はマニングの粗度係数を  $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$  として与えた。海岸では津波の全反射を仮定し、計算領域の境界では流出境界を用いた。以上の条件で、地震発生から 24 時間分の津波シミュレーションを行った。

これらのシミュレーション結果は、当該海域における津波は、主に南海トラフの南西域（南海地震の震源域）のプレート間の破壊に依存し、沿岸での津波高はそのすべり量の大きさによることを示した。

本研究では、内閣府により提供していただいた最大クラスの巨大地震による津波の初期値を使用した。記して感謝致します。本研究は、文部科学省委託研究「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」により行われた。

キーワード: 津波シミュレーション, 西太平洋, 東シナ海, 最大津波高, 最大クラスの南海巨大地震

Keywords: tsunami numerical simulation, Western Pacific Ocean, East China Sea, maximum tsunami heights, hypothetical M9 Nankai earthquake

## 南海トラフに C0002 掘削孔内の応力集中 Stress concentration in the C0002 borehole of the NanTroSEIZE Project, Nankai Trough

呉 泓昱<sup>1\*</sup>; 木下 正高<sup>1</sup>; 斎藤 実篤<sup>1</sup>; 林 為人<sup>1</sup>; 真田 佳典<sup>1</sup>

WU, Hungyu<sup>1\*</sup>; KINOSHITA, Masataka<sup>1</sup>; SAITO, Saneatsu<sup>1</sup>; LIN, Weiren<sup>1</sup>; SANADA, Yoshinori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Wellbore instability is a major challenge for the engineer evaluating borehole and formation conditions. Instability is especially important to understand in areas with high stress variations, significant structure anisotropy, or pre-existing fracture systems. Borehole (in)stability is influenced by rock strength, structural properties, and near-field principal stresses. During drilling, the borehole conditions also impact borehole integrity. Factors that we can measure in the borehole during with logging while drilling (LWD) to understand these conditions include Mud Weight, mud loss, ROP (Rate of Penetration), RPM (Rotation Per Minute), WOB (Weight on Bit), and TORQ (Power swivel torque value). By observation the resistivity images, we can utilities the significant features under the interactions of effective stresses and formation.

We conducted stress analysis for Site C0002F of the Nankai Trough transect based on riser and riserless drilling data during IODP Expedition 338. Rock strength and basic physical properties, including velocity, density and porosity are obtained from core samples. The borehole shape, determined from LWD resistivity images, indicates that most of drilling occurred in stable environments, however, in a few instances the bottom hole assembly became stuck. We used our stress profile model to evaluate the mud weight required to drill a stable borehole for the measured rock strength and physical properties. Based on our analysis, we constrained the stress magnitude and possible orientation during IODP Expedition 338 by the drilling parameters. The enlargement and collapse in the borehole indicated that mud weight plays the essential role in the drilling.

Keywords: NanTroSEIZE, LWD, Breakout, Drilling, Borehole Instability



## IODP 第348次航海：南海トラフ地震発生帯掘削試料の岩相と堆積物組成分析の速報 Preliminary results of lithology examined during IODP Expedition 348 in the accretionary wedge of the Nankai Trough

福地 里菜<sup>1\*</sup>; Schleicher Anja<sup>2</sup>; Maia Ana<sup>3</sup>; Song Chen<sup>4</sup>; Yang Kihō<sup>5</sup>; Expedition 348 scientists<sup>6</sup>  
FUKUCHI, Rina<sup>1\*</sup>; SCHLEICHER, Anja<sup>2</sup>; MAIA, Ana<sup>3</sup>; SONG, Chen<sup>4</sup>; YANG, Kihō<sup>5</sup>; EXPEDITION 348, Scientists<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> ミシガン大学, <sup>3</sup> カーディフ大学, <sup>4</sup> ミズーリ大学 コロンビア校, <sup>5</sup> 延世大学校, <sup>6</sup> IODP Expedition 348  
<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>University of Michigan, <sup>3</sup>Cardiff University, <sup>4</sup>University of Missouri-Columbia, <sup>5</sup>Yonsei University,  
<sup>6</sup>IODP Expedition 348

International Ocean Discovery Program (IODP) Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) Expedition 348 took place from 13 September 2013 to 29 January 2014. This expedition was primarily designed to extend riser Hole C0002N to 3600 mbsf (in the event, C0002N sidetrack Hole C0002P was drilled to 3058.5 mbsf). We collected cuttings, core samples, mud gas, and logging data. Here we report the preliminary shipboard lithological results of IODP Expedition 348.

Four lithologic units were identified at Site C0002 based on geological and geochemical characteristics of core and cuttings samples: Unit II (475-512.5 mbsf in Hole C0002M), Unit III (875.5-975.5 mbsf in Hole C0002N), Unit IV (975.5-1665.5 mbsf in Hole C0002N), and Unit V (1665.5-2325.5 mbsf in Hole C0002N, and 1965.5-3058.5 mbsf in Hole C0002P).

Lithologic Unit II is dominated by fine-grained turbiditic deposits. Silty claystone is the main lithology, with subordinate fine-grained sandstone and sandy siltstone. Lithologic Unit III is dominated by silty claystone with trace amounts of very fine loose sand, containing common glauconite grains. Those units are interpreted to be the Kumano forearc basin sediments. Lithologic Unit IV is dominated by silty claystone, with sandstone as a minor lithology. Sandstone cuttings in this unit are generally very weakly consolidated, and occur as disaggregated loose sand. Lithologic Unit IV is divided into five subunits based on sand content and interpreted as the upper accretionary prism sediment. Lithologic Unit V is dominated by silty claystone. Fine-grained and moderately cemented sandstone was a minor component. In Hole C0002P, clay-size content in the silty claystone increases at the depth up to 2625.5 mbsf. The fine silty claystone becomes the dominant lithology from 2625.5 mbsf. This unit is possibly interpreted to be the trench or Shikoku Basin hemipelagic deposits.

キーワード: IODP Expedition 338, 南海トラフ地震発生帯掘削計画, Site C0002

Keywords: IODP Expedition 338, NanTroSEIZE, Site C0002

## IODP 第348次航海C0002サイト南海付加体における物理特性 Physical properties of Nankai accretionary prism sediments at Site C0002, IODP Expedition 348

北村 真奈美<sup>1\*</sup>; 北島 弘子<sup>2</sup>; Henry Pierre<sup>3</sup>; Valdez Robert<sup>4</sup>; Josh Matthew<sup>5</sup>; Expedition 348 Scientists<sup>6</sup>  
KITAMURA, Manami<sup>1\*</sup>; KITAJIMA, Hiroko<sup>2</sup>; HENRY, Pierre<sup>3</sup>; VALDEZ, Robert<sup>4</sup>; JOSH, Matthew<sup>5</sup>; EXPEDITION 348, Scientists<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> Aix-Marseille University, <sup>4</sup> Pennsylvania State University, <sup>5</sup> The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, <sup>6</sup> IODP Expedition 348

<sup>1</sup> Hiroshima University, <sup>2</sup> Geological Survey of Japan National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup> Aix-Marseille University, <sup>4</sup> Pennsylvania State University, <sup>5</sup> The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, <sup>6</sup> IODP Expedition 348

Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) Expedition 348 focused on deepening the existing riser hole at Site C0002 to ~3000 meters below seafloor (mbsf) to access the deep interior of the Miocene inner accretionary prism. This unique tectonic environment, which has never before been sampled in situ by ocean drilling, was characterized through riser drilling, logging while drilling (LWD), mud gas monitoring and sampling, and cuttings and core analysis. Shipboard physical properties measurements including moisture and density (MAD), electrical conductivity, P-wave, natural gamma ray, and magnetic susceptibility measurements were performed mainly on cuttings samples from 870.5 to 3058.5 mbsf, but also on core samples from 2163 and 2204 mbsf.

MAD measurements were conducted on seawater-washed cuttings ("bulk cuttings") in two size fractions of >4 mm and 1-4 mm from 870.5 to 3058.5 mbsf, and hand-picked intact cuttings from the >4 mm size fractions within 1222.5-3058.5 mbsf interval. The bulk cuttings show grain density of 2.68 g/cm<sup>3</sup> and 2.72 g/cm<sup>3</sup>, bulk density of 1.9 g/cm<sup>3</sup> to 2.2 g/cm<sup>3</sup>, and porosity of 50% to 32%. Compared to the values on bulk cuttings, the intact cuttings show almost the same grain density (2.66-2.70 g/cm<sup>3</sup>), but higher bulk density (2.05-2.41 g/cm<sup>3</sup>) and lower porosity (37-18%), respectively. The grain density agreement suggests that the measurements on both bulk cuttings and intact cuttings are of good quality, and the differences in porosity and density are real, but the values from the bulk cuttings are affected strongly by artifacts of the drilling process. Thus, the bulk density and porosity data on handpicked cuttings are better representative of formation properties. Combined with the MAD measurements on hand-picked intact cuttings and discrete core samples from previous expeditions, porosity generally decreases from ~60% to ~20% from the seafloor to 3000 mbsf at Site C0002.

Electrical conductivity and P-wave velocity on discrete samples, which were prepared from both cuttings and core samples in the depth interval of 1745.5-3058.5 mbsf, range 0.15-0.9 S/m and 1.7-4.5 km/s, respectively. The electrical resistivity (a reciprocal of conductivity) on discrete samples is generally higher than the LWD resistivity data but the overall depth trends are similar. On the other hand, the P-wave velocity on discrete samples is lower than the LWD P-wave velocity between 2200 mbsf and 2600 mbsf, while the P-wave velocity on discrete samples and LWD P-wave velocity are in a closer agreement below 2600 mbsf. The electrical conductivity and P-wave velocity on discrete samples corrected for in-situ pressure and temperature will be presented.

The shipboard physical properties measurements on cuttings are very limited but can be useful with careful treatment and observation.

Keywords: IODP Expedition 348, NanTroSEIZE, accretionary prism

## 摩擦発熱と粉碎作用がビトリナイト反射率増加に与える効果：南海トラフ巨大分岐 断層ガウジと摩擦実験試料の比較 Effects of frictional heating and comminution on coal maturation

古市 裕之<sup>1\*</sup>; 氏家 恒太郎<sup>1</sup>; 斎藤 翼<sup>1</sup>; 坂口 有人<sup>2</sup>; 堤 昭人<sup>3</sup>  
FURUICHI, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; UJIIE, Kohtarō<sup>1</sup>; SAITO, Tsubasa<sup>1</sup>; SAKAGUCHI, Arito<sup>2</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学・生命環境, <sup>2</sup> 山口大学・理学, <sup>3</sup> 京都大学・理学  
<sup>1</sup>Life and Env., Sci., Univ. Tsukuba, <sup>2</sup>Sci., Yamaguchi Univ., <sup>3</sup>Sci., Kyoto Univ.

The detection of friction heating on faults is crucial to estimate frictional heat during earthquakes. Recently, vitrinite reflectance (Ro) has been used to detect friction heating along faults. However, the factors controlling increase in Ro on faults remain poorly understood. Moreover, the application of the commonly used kinetic model to the estimation of temperature rise during short-lived thermal events such as frictional heating on faults has not been convinced. Here, we conducted friction experiments on a mixture of 95 wt% clay-rich material from the host rock of the megasplay fault gouge and 5 wt% coal grains from the forearc basin in the Nankai subduction zone at slip rates of 0.15 mm/s-1.3 m/s under dry (room humidity) and wet (water-saturated) conditions. After the experiments, we examined microstructures, Ro and size of coal grains and then compared with those obtained from in and around the megasplay fault gouge. The results show that Ro does not increase by rapid heating alone; grain-size reduction due to comminution is required for increase in Ro. The combination of comminution and heating is the most effective for increase in Ro, possibly due to enhanced mechanochemical reaction associated with an increase in surface area of coal grains. The application of the results to the Nankai megasplay fault gouge is that increased Ro in the fault gouge results from frictional heating and comminution, while that in adjacent to the gouge are mainly derived from comminution. The Ro calculated from the chemical kinetic model is higher than that measured after the experiments. Ro is an useful tool to detect past frictional heating on faults, but the estimation of temperature rise from Ro is problematic; the new kinetics model considering the effects of frictional heating and comminution is necessary to estimate amount of frictional heat.

キーワード: ビトリナイト反射率, 摩擦発熱, 粉碎, 南海トラフ  
Keywords: vitrinite reflectance, frictional heating, comminution, Nankai Trough

海底地震計データによるレシーバー関数解析 —紀伊半島沖に沈み込むフィリピン海プレートの3次元モデル構築を目指して—  
Receiver function analysis using OBS data: modeling 3-D structure of the Philippine Sea plate off the Kii Peninsula

悪原 岳<sup>1\*</sup>; 望月 公廣<sup>1</sup>  
AKUHARA, Takeshi<sup>1\*</sup>; MOCHIZUKI, Kimihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Megathrust earthquakes have repeatedly occurred beneath the southwestern Japan, on the subducting Philippine Sea plate, in cycles of 100-150 years [Ando, 1975]. The rupture boundary of the latest two megathrust earthquakes, the 1944 Tonankai and 1946 Nankai earthquakes, is located at the south of the Kii Peninsula. Although some structural heterogeneity was proposed as factors of the rupture boundary [Mochizuki et al., 1998; Kodaira et al., 2006], the question of why rupture propagation stops there is still open in light of our little knowledge about 3-D geometry of the subducting Philippine Sea plate at offshore region.

In this study, we aim to construct 3-D structure model of the subducting Philippine Sea plate by receiver function (RF) analysis, using data of ocean-bottom seismometers (OBSs) deployed from 2003 to 2007 off the Kii Peninsula [Mochizuki et al., 2010; Akuhara et al., 2013]. These OBSs have three-component velocity sensors with natural frequency of 1 Hz, and their orientations were determined in this study from particle motion of regional P-wave. The difficulty of our RF analysis using OBS data is summarized by the following two factors. The first is that noise is dominant within a low-frequency band ( $1 < \text{Hz}$ ), the most stable band for estimating RFs. The second is that the number of teleseismic events is limited because of short observation periods and low S/N ratio.

To overcome these problems, we calculated RFs with the aid of multi-taper correlation (MTC) method [Park and Levin, 2000]. The method is resistant to spectral leakage and able to estimate frequency-dependent uncertainties for RF, which is suitable for noisy OBS data and for high-frequency analysis. We binned resultant RFs by back azimuths, and computed time-domain uncertainties of the RFs from the frequency-dependent uncertainties estimated by the MTC method, using jackknife resampling within each back azimuth bin [Leahy and Collins, 2009]. This uncertainty estimation makes the following phase identification more reliable, even though the number of teleseismic events is limited.

Our preliminary results show some coherent peaks throughout all back azimuth bins, whose amplitude is larger than one-sigma uncertainties. Some of them have moveout, implying existence of dipping layers, and have arrival times roughly corresponding to the depth of the slab mantle. Although more detailed identification process for these peaks is largely left for our future work, these peaks might be converted phases from the slab mantle.

キーワード: 海底地震計, レシーバー関数, 沈み込み帯

Keywords: ocean-bottom seismometer, receiver function, subduction zone



## 構造研究に基づく南海トラフ地震発生帯の3次元速度構造モデル Three-dimensional velocity model for the Nankai Trough seismogenic zone based on structural studies

仲西 理子<sup>1\*</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 山本 揚二郎<sup>1</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
NAKANISHI, Ayako<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Yojiro<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

Coseismic rupture area of the great interplate earthquake concerned about its occurrence along the Nankai Trough presumed by government of Japan is now wider to the west, north and south than the former assumption. Although the new estimation is based on seafloor topography, source area of the past largest megathrust event, present seismic activity and so on, structural information has not always been enough reflected yet. In order to estimate precise coseismic rupture area of the Nankai megathrust earthquake, it is necessary to improve a physical model of the Nankai Trough seismogenic zone based on the geometry of the subducting plate and velocity structure model.

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology had conducted the large-scale high-resolution wide-angle and reflection seismic survey and long-term observation from off Kyushu to Tokai between 2008 and 2012. Layered velocity structure models are now obtained along grid two-dimensional seismic profiles from the Hyuga-nada to the Kii channel area. A three-dimensional seismic tomography using active and passive seismic data observed both land and ocean bottom stations had been also performed for the western Nankai Trough.

In this study, we constructed a three-dimensional velocity model of the Nankai Trough with the procedure as follows;

- 1) Sampling the velocity structural information along each seismic profile with interval of ~1km in horizontal, and ~100m in vertical directions
- 2) Preparing the geometry model of each interface included in layered models, e.g., basement, plate boundary, Moho, etc.
- 3) Setting minimum and maximum velocities of each layer based on the velocity models along two-dimensional seismic profiles
- 4) Interpolating sampled velocity information considering layered structure (Landmark DecisionSpaceDesktop is used for constructing 3-D modeling)

Previously published layered models are also used to make up for insufficient structural information for the eastern Nankai Trough.

Reliability of the three-dimensional model was confirmed by comparing calculated travel-times with observed travel-times along each seismic profile. We will also try to evaluate the reliability of the model by comparing the hypocenter distribution using three-dimensional velocity model obtained in this study with that determined by three-dimensional seismic tomography using active and passive source data. We will plan to revise our 3D model with additional structural information and construct more precise and detailed model for the entire Nankai Trough area so that the model can be applied to more realistic numerical simulation.

This study is part of 'Research concerning Interaction Between the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes (FY2008-2012)' funded by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.

## 紀伊半島沖における自然地震観測 Seismic observations off Kii Peninsula

山本 揚二郎<sup>1\*</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 海宝 由佳<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 仲西 理子<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
YAMAMOTO, Yojiro<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; KAIHO, Yuka<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; NAKANISHI, Ayako<sup>1</sup>; KODAIRA,  
Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

In the Nankai Trough subduction zone, megathrust earthquakes of M 8 class occur repeatedly. There are three main seismogenic segments (Tokai, Tonankai and Nankai earthquake regions), and these segments have ruptured sometimes simultaneously and sometimes individually. To understand the control factor of the seismic linkage among these segments and Hyuga-nada segments, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology has been carried out a series of wide-angle active source surveys and local seismic observations from 2008 to 2012, as a part of Research concerning Interaction Between the Tokai, Tonankai and Nankai Earthquakes' funded by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. In this study, we show the results of two local seismic observations off Kii peninsula, the one is in the Kii channel and the other is in the Kumano-nada. The boundary of the Tonankai and Nankai segments is located in this region (Baba and Cummins, 2005), and the existence of the high velocity plutonic rock in the landward plate just beneath Shionomisaki is considered as the control factor of historical rupture variation (Kodaira et al., 2006). Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue also indicates the spatial relationship between the seismic activity and seismogenic segments; shallow microseismicity seems to be more active in the Nankai region than in Tonankai region.

The observation in the Kii channel has been performed in FY2010 and was composed of 155 short-term (about 1.5 months) ocean bottom seismographs (OBSs) and 19 long-term (about 10 months) OBSs. First, we relocated the JMA catalogue earthquakes by using three-dimensional velocity model obtained by active source surveys and adding the first arrival time data at OBSs. As a result, the earthquakes near the trough axis were generally relocated 10-20 km shallower than JMA location. Then, we attempt to detect the earthquakes by using long-term OBS records and found the active intraslab seismicity, especially in the up-dip part of the subducted seamount (Kodaira et al., 2000). The observation in the Kumano-nada has been performed in FY2011 and was composed of 150 short-term (about 2.5 months) OBSs and 14 long-term (about 8 months) OBSs. Now we perform the first arrival picking of these data with the seismograph data of Dense oceanfloor network system for earthquakes and Tsunamis (DONET), according to the JMA catalogue earthquake list. We will show the preliminary results of hypocenter distribution in the Kumano-nada at the presentation.

キーワード: 南海トラフ, 海底地震観測, 地震活動

Keywords: Nankai Trough, ocean bottom seismographic observation, seismicity

## 宮古・八重山諸島周辺における構造探査および自然地震観測 Seismic observation and active-source seismic surveys on southern Ryukyu arc

高橋 努<sup>1\*</sup>; 海宝 由佳<sup>1</sup>; 石原 靖<sup>1</sup>; 山本 揚二郎<sup>1</sup>; 仲西 理子<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1\*</sup>; KAIHO, Yuka<sup>1</sup>; ISHIHARA, Yasushi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Yojiro<sup>1</sup>; NAKANISHI, Ayako<sup>1</sup>; OBANA,  
Koichiro<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

琉球弧はユーラシアプレートの南東部に位置する島弧で、琉球海溝でフィリピン海プレートが北西方向に沈み込んでいる。この地域では 1911 年の奄美大島近海の地震 (M8) など M7-8 クラスの地震が多発し、1771 年の八重山地震 (M7.4) や 1938 年の宮古島北方の地震 (M7.2) など津波を伴う地震も多く発生している。しかしこれらの大地震の震源断層などについては未解明な点も多く、また地震観測点が島嶼に限られているため定常的な地震活動や地下構造なども十分には解明されていない。独立行政法人海洋研究開発機構では文部科学省の受託研究「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の一環として、琉球弧全域における地震活動や地下構造を解明するための構造探査および自然地震観測を 2013 年度から実施している。2013 年度は南部琉球弧の宮古・八重山諸島周辺において、屈折法地震探査および反射法探査、海底地震計と島嶼に展開した臨時観測点による自然地震観測を実施した。

屈折法地震探査は、石垣島東方において琉球海溝南方から沖縄トラフまでの約 480km の測線に 60 台の短周期海底地震計 (OBS) を設置して行った。また反射法探査は、屈折法探査と同じ測線および西表島北西沖における約 100km の測線で実施した。これらの探査には (独) 海洋研究開発機構の調査船「かいらい」の大容量チューンドエアガン (7800 cu. in.) を用いた。屈折法探査で得られた記録ではフィリピン海プレート内を伝播する波群や島弧を横断する波群が明瞭に観測され、また反射法探査では沖縄トラフ内の正断層などが明瞭に観測された。

自然地震観測では、30 台の短周期 OBS を南部琉球弧前弧側および沖縄トラフ南縁に設置し、宮古島・多良間島・石垣島・西表島・黒島・波照間島に広帯域地震計や短周期地震計からなる観測点を展開した。観測された地震波形は、S 波の散乱や減衰の影響が経路によって大きく異なり、島弧周辺におけるランダム不均質や減衰の空間変化を示唆する。例えば沖縄トラフ内に設置した OBS では、ほとんどの地震について S 波が観測されないが、与那国島や西表島の北部で発生する一部の地震において S 波コーダ波が卓越し非常に長い継続時間を示す波形が観測された。これは沖縄トラフの浅部は強い不均質性もち、深部は不均質性や内部減衰が強いことを示していると考えられる。本発表ではこれらの観測の概要と観測記録の特徴などについて報告する。

## 海底活断層を考慮したプレート境界地震モデル A plate boundary earthquake model with consideration on submarine active faults

中田 高<sup>1\*</sup>; 渡辺 満久<sup>2</sup>  
NAKATA, Takashi<sup>1\*</sup>; WATANABE, Mitsuhiisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学 名誉教授, <sup>2</sup> 東洋大学

<sup>1</sup>Hiroshima University Professor Emeritus, <sup>2</sup>Toyo University

一般に、地震はプレート内部で起きるプレート内地震と、プレート境界でおきるプレート間地震に分けられている。後者は、海溝の陸側での逆断層型の浅い地震で、2011年東北地方太平洋沖地震がこれにあたることに對して異論を挟む研究者は皆無に近い。

筆者らは、南海トラフや日本海溝周辺に分布する長大な活断層の位置・形状を明らかにし、海底活断層の位置と歴史地震の震源域が良く対応することを示してきた。これに對し、アスペリティモデル(Lay and Kanamori, 1980)を重視する多くの研究者は、このような海底活断層の地震発生源としての重要性に理解を示しているとは言えない。海底地形データ(変動地形)と地下の断層の状況は異なると考える研究者は少なくない。しかしながら、海底の変動地形は海底活断層による累積的断層変位の具体的な物証であり、モデル設定において無視されてはならない情報である。

アスペリティモデルとは、プレート表面に定常的にすべる領域に囲まれて摩擦抵抗の大きな部分(アスペリティ)が複数存在するというものである(松澤, 2009)。日本海溝でも適用され、個々のアスペリティが破壊するとM7~8クラスの地震を起こすというものであり、複数のアスペリティが連動するとM9クラスの超巨大地震となるといわれている。

2011年東北地方太平洋沖地震では、このような複数のアスペリティが破壊し、50mを超える断層変位が海溝軸に達し、巨大津波が発生したとの説が広く受け入れられている。しかしながら、50mを超える断層変位の根拠となった地震前後の海底地形や地下構造の変化の原因は、断層運動によるものではなく地すべりの可能性が極めて強い。また、この地震の震源域に對する海溝軸付近には、逆断層運動の累積性を示すような大規模な断層変位地形は存在しない。これに對して、三陸中部沖から茨城県沖にかけての海溝陸側斜面には、2011年地震の震源域と對する範囲に逆断層変位を示す長大な変動崖が発達しており、この長大な海底活断層が超巨大地震の起震断層であると考えられることができる。西暦869年に発生した貞観地震時にも同じような津波が発生しており、この長大な海底活断層は約1,000年ごとに、固有の活動としてマグニチュード9クラスの地震を繰り返し発生している可能性が高い。長大な逆断層の上盤側にはバルジ状の高まりが発達し、その上には多数の開口亀裂が認められる。地震後の潜水調査でもバルジ周辺で新たな亀裂の発生が認められ、この逆断層が活動したことを暗示している。

2つのモデルは、大地震はあらかじめ決まった場所で起こるとしている点では共通している。大きな相違点は、アスペリティモデルは一枚のプレート境界面から地震が発生すると考えているのに對して、活断層モデルは、定常的なすべりを伴う狭義のプレート境界(海洋プレートと島弧地殻の境界面)の上盤にトランプが重なるように規模の異なる複数の逆断層が発達し、それぞれの活断層が固有の地震を繰り返し発生させるという点である。

大きな地震を発生させるアスペリティが定常的なすべり領域に囲まれた強度の大きな部分とすることに對しても疑念がある。海底活断層は、陸域の活断層と同じように末端では変位がゼロとなる断層運動が累積しており、周囲より強度の弱いすべりやすい面(断层面)が繰り返し活動し地震を発生させていると考えた方が合理的である。したがって、狭義のプレート境界地震を除けば、プレート境界地震とされる巨大地震の多くは、地殻内の断層運動が原因となるプレート内地震にあたる可能性が高い。すなわち、日本海溝や南海トラフのプレート境界で発生する大地震の多くは、狭義のプレート境界での定常的なすべりでは解消されない歪が、上盤の島弧地殻内に蓄積され、海底活断層の運動によって解放されることによって発生すると考えるが、定常的なすべりと活断層変位の量的な關係については今後検討したい。

キーワード: プレート境界地震, アスペリティ地震モデル, 活断層地震モデル

Keywords: plate boundary earthquake, asperity model, active fault model



## 土佐湾湾奥部蟹ヶ池の堆積物中に見られる過去 6000 年間の津波履歴 The last 6000 years record of tsunami events in the Kaniga-ike pond along the Nankai Trough

松岡 裕美<sup>1\*</sup>  
MATSUOKA, Hiromi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 高知大学理学部  
<sup>1</sup> Kochi Univ.

過去の南海トラフ地震の履歴を明らかにするために、土佐湾の湾奥に位置する高知県土佐市の蟹ヶ池において津波堆積物の研究を行ってきた。2006 年から 2011 年にかけて 34 本のバイプロコア試料を採取し、堆積物の対比を行うとともに、約 150 試料について放射性炭素年代測定を行った。その結果、過去 2000 年間に 6 回の津波記録が明らかになっている。このうち 4 回は歴史上の南海地震に対比することができ、上位から西暦 1854 年安政地震、1707 年宝永地震、1361 年正平もしくは 1099 年康和地震、684 年天武地震、歴史記録よりも古いイベントは、AD300~600 年、約 2000 年前の紀元前後のものである。この中で、特に約 2000 年前のイベントは下位の堆積物を大きく削り込み、厚く粗粒な津波堆積物を堆積させており、大規模であったと考えられることがこれまでに分かっている。

さらに古い過去数千年の履歴を明らかにするために、2012 年から 2013 年にかけて 12 本のより深い深度まで達する試料を採取し、堆積物の対比を行うとともに、約 60 試料について放射性炭素年代測定を行った。その結果約 2000 年前のイベントよりも下位である約 2500 年前~約 6000 年前の 3500 年間に、少なくとも 11 回のイベントがあることが明らかになった。これら 11 回のイベントは 300 年程度の周期をもって規則的に大規模な削剥もしくは堆積間隙を伴わず堆積しており、この間比較的安定した堆積環境が継続していたことを示している。

蟹ヶ池の湖底堆積物から、過去 6000 年間の津波履歴を明らかにした。その結果、当然のことながら、過去 6000 年間にわたって規則的に津波が襲来していることが分かった。さらに約 2000 年前のイベントは、過去 6000 年間では唯一最大のイベントであると言える。このイベントが具体的にどのような津波で、どのような地震によって引き起こされたのかは明らかではないが、南海トラフ沿いの他の湖沼においてもこの年代で大規模な津波痕跡がいくつも見つかっており、今後その具体像を探ってゆきたい。

キーワード: 南海トラフ, 津波堆積物  
Keywords: Nankai Trough, Tsunami sediment

## 弾性波速度測定によるクラックの接触状態の推定 Estimate of the contact state of microcrack from the elastic wave velocity measurement

玉井 速汰<sup>1\*</sup>; 武藤 潤<sup>1</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>; 石川 正弘<sup>2</sup>  
TAMAI, Hayata<sup>1\*</sup>; MUTO, Jun<sup>1</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院

<sup>1</sup>Department of Geology, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Geological institute, Graduate School of Environment and Information Science, Yokohama National Univ

Birch (1960) studied about the relationship between the confining pressure and the elastic wave velocity. It was indicated that the elastic wave velocity increases with the increasing confining pressure because the microcrack is closed at high pressure. The velocity includes the effect of microcracks at low pressure. We must the elastic wave velocity without the effect of microcrack to know the elastic constants of a rock. To do that, it is necessary to know the process of closing microcracks and the contact state of microcrack.

The power-law relation between the elastic wave velocity and confining pressure is expressed with pressure exponent of  $\mu$  (Kobayashi and Kozumi, 1976). They assume that the microcrack has single contact in this model. It is necessary to take account in multiple contacts because the microcracks of a rock have multiple contacts. We applied the single contact model to multiple contacts model with the previous study (Archard, 1953). The microcrack has the point contact, ball contact and plane contact when  $\mu$  is  $2/3$ ,  $3/5$  and  $1/2$  respectively. The microcrack contacts plastically if  $\mu$  is  $<1/2$ . We measured the elastic velocity of rocks with gas medium high pressure apparatus to discuss the effect of the confining pressure.

We measure the velocity with the pulse transmission technique. We set the assembly, composed of a sample between two metal jig pasted piezoelectric transducers, in the pressure vessel. The sample height is about 15-40 mm and diameter is 20 mm. The frequency of transmission wave is 2 MHz. We recorded it  $10^{-9}$ s rate. We measured  $V_p$  and  $V_s$  of the gabbro and granite during pressurization and depressurization to a maximum confining pressure of 200 MPa. The velocity increased drastically with the increase in the confining pressure up to 100 MPa. When confining pressure is lower than about 100 MPa,  $\mu$  of the gabbro and granite is about  $2/3$ , indicating that the contact state of microcrack is point contact. However, under pressure higher than 100 MPa,  $\mu$  becomes under  $1/2$ , indicating that all microcracks are closed plastically in the experiment with gas medium high pressure apparatus. So the velocity at pressure higher than 100 MPa does not include the effect of microcracks. Furthermore, we estimated  $\mu$  of several rocks from previous studies (Birch, 1960, Zimmer et al., 2002). Although  $\mu$  depends on rock type at low pressure, it converges to values smaller than  $1/2$  at high pressure. This indicates that all microcracks are completely closed at high pressure and this result conforms to our experiment. If fluid exists in rocks, the value of  $\mu$  is less than  $1/2$  even at low pressure. Therefore the microcrack with fluid acts as having plastic contact. We revealed the process of closing microcracks with the increasing confining pressure from the elastic wave velocity measurement.

## 南海トラフ付加体浅部堆積物の摩擦特性 Frictional properties of the shallow Nankai Trough accretionary sediments

星野 紘輝<sup>1\*</sup>; 大橋 聖和<sup>2</sup>; 金川 久一<sup>2</sup>  
HOSHINO, Koki<sup>1\*</sup>; OOHASHI, Kiyokazu<sup>2</sup>; KANAGAWA, Kyuichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学理学部, <sup>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Faculty of Science, Chiba University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Chiba University

千葉大学に設置されたガス圧高温高圧三軸試験機を使用して、南海トラフ付加体浅部堆積物 4 試料（粘土質泥岩、シルト質泥岩、砂岩および凝灰岩）について、IODP 掘削地点 C0002 の海底下 1 km の想定温度（42 °C）・圧力（37 MPa）・間隙水圧（29 MPa）条件で、軸方向の変位速度 1 μm/s の摩擦実験を行った。その結果、これらの試料の摩擦特性は、粘土鉱物、特にスメクタイトの含有量によって系統的に変化することが明らかとなった。4 試料の粘土鉱物の含有量は、砂岩試料が 6.0 wt%、凝灰岩試料が 17.2 wt%、シルト質泥岩試料が 34.1 wt%、粘土質泥岩試料が 42.0 wt% である。砂岩試料にはスメクタイトが含まれていないが、それ以外の試料に含まれるスメクタイトは粘土鉱物全体の 68-76 wt% を占めている。

定常すべり時の摩擦係数は、粘土鉱物の含有量の増加に伴って低下し、砂岩試料が 0.83、凝灰岩試料が 0.74、シルト質泥岩試料が 0.34、粘土質泥岩試料が 0.27 であった。変位量に依存した摩擦挙動も粘土鉱物含有量の増加に伴って系統的に変化し、粘土鉱物含有量が少ない砂岩試料がすべり硬化を示すのに対し、粘土鉱物含有量の増加に伴ってすべり軟化に転じ、それが明瞭になる傾向が認められた。

同一温度・圧力・間隙水圧条件におけるこれらの試料の摩擦強度の変位速度依存性、およびより深部の条件においてこれらの試料の摩擦特性がどのように変化するかについても、報告する予定である。

キーワード: 南海トラフ, 付加体堆積物, 摩擦特性  
Keywords: Nankai Trough, accretionary sediments, frictional properties

## モンモリロナイト—石英ガウジの摩擦挙動に及ぼす剪断変位と断層組織変化の影響 Effects of shear displacement and fault zone structure on the frictional behavior of montmorillonite-quartz gouge

河合 智章<sup>1\*</sup>; 堤 昭人<sup>1</sup>

KAWAI, Tomoaki<sup>1\*</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

Recent observation of the low frequency earthquakes in the shallow part of the Nankai subduction zone has demonstrated that faulting there is slow yet seismic; suggesting that frictional velocity dependence along the fault would be negative. However, in a widely accepted model, sediments there is expected to exhibit velocity-strengthening frictional behavior. We have reported that the fault material along the megasplay fault in the Nankai Trough exhibited both velocity-strengthening and velocity-weakening frictional behavior [Tsutsumi et al., 2011]. Fault zone structures may be important to understand why the samples exhibited different velocity dependence. In this study, we have conducted frictional experiments on artificial gouges composed of montmorillonite and quartz mixtures, in order to understand the relationship between the fault zone structures and velocity dependent frictional behavior.

We examined frictional behavior and fault zone structure of the artificial gouge samples composed of montmorillonite/quartz mixtures. All of the experiments were conducted under water-saturated conditions at 1 to 5MPa of normal stress, with shear displacement of 30 mm to 14 m, using a rotary-shear friction testing machine. Velocity step tests were conducted in a range of velocities from 0.003mm/s to 30 mm/s, in order to examine velocity dependent frictional behavior.

Results of these experiments reveal influences of normal stress and displacements on frictional behavior. Velocity weakening behavior was observed for the mixtures of montmorillonite/quartz = 20/80 and 40/60 wt%, respectively, at large displacement. In velocity-weakening samples, montmorillonite becomes to be finer-grained and is well mixed with quartz in the gouge layer after long shear displacements and at high normal stresses. These observation demonstrates that frictional behavior of the montmorillonite/quartz gouge changes with the development of the deformation structures. It is suggested that fault zone structure is one of the important factors of describing the frictional behavior along faults at the Nankai Trough.

キーワード: モンモリロナイト, 摩擦実験, 断層組織

Keywords: montmorillonite, frictional experiment, fault zone structure



回転式摩擦実験により推定した沈み込み帯浅部物質の摩擦特性  
Friction constitutive properties of shallow subduction zone material as estimated from rotary shear friction experiments

中野 龍二<sup>1\*</sup>; 並木 由香<sup>1</sup>; 堤 昭人<sup>1</sup>  
NAKANO, Ryuji<sup>1\*</sup>; NAMIKI, Yuka<sup>1</sup>; TSUTSUMI, Akito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

In order to understand the dependence of constitutive parameters,  $a$ ,  $b$ , and  $D_c$ , on slip velocity,  $V$ , we conducted experiments by using a rotary shear high velocity friction apparatus. Samples used in this work were collected from the Nankai accretionary prism, offshore from Kii Peninsula, Japan, at Site C0004 during Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 316 [Expedition 316 Scientists, 2009; Tsutsumi *et al.*, 2011], and from the Costa Rica subduction zone, Cocos Ridge, at Site U1381 during IODP Expedition 334 [Expedition 334 Scientists, 2012]. All of the samples from the Nankai accretionary prism are clayey silt, whereas those from Costa Rica can be divided into 2 groups with respect to their composition: one is clayey silt (hereinafter referred to as "Costa Rica Unit I"), the other is silicic to calcareous ooze ("Costa Rica Unit II"). All experiments were carried out at 5 MPa normal stress and 0.0028-2.8 mm/sec slip velocity under wet condition (0.5 g samples with 0.5-0.9 ml distilled water). Moreover, we created a simulation program, which can estimate the values of constitutive parameters and system stiffness,  $k$ , with Levenberg-Marquardt method, supposing the spring-block model.

The results are summarized as the following: (1)  $a$ ,  $b$  and/or  $D_c$  increase with slip velocity; (2) the values are the highest at  $V = 0.028-0.28$  mm/sec; (3) the values are the lowest at  $V = 0.028-0.28$  mm/sec. The reason is not clarified yet, but it is remarkable that, despite the composition, the result of the clayey megasplay fault material from the Nankai accretionary prism resembles the result of Costa Rica Unit II. This implies that, as expected, constitutive parameters depend on not only material but also other conditions. Another remarkable point to be noted is that the values of system stiffness of Costa Rica Unit I decrease by a factor of 10 when compared with the measured apparatus stiffness value. This implies that the mechanical property of the material of Costa Rica Unit I may be more flow-dominated than others. This implies that the mechanical property of the material of Costa Rica Unit I may be more flow-dominated than others. Considering that the samples of the Nankai accretionary prism and Costa Rica contain 20-30 wt%, 60-70 wt% clay, respectively, it is possible that total clay content reflects the gouge behaviour.

キーワード: 摩擦, 沈み込み帯, 速度・状態依存摩擦構成則, 南海トラフ, コスタリカ

Keywords: friction, subduction zone, rate- and state- friction constitutive law, Nankai Trough, Costa Rica

## IODP Expedition 344 コスタリカ沖沈み込み帯 reference site および frontal prism の堆積物物性 Physical properties of sediments in reference sites and Frontal prism off Costa Rica: IODP Expedition 344

佐伯 綾香<sup>1\*</sup>; 橋本 善孝<sup>1</sup>  
SAIKI, Ayaka<sup>1\*</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 高知大学  
<sup>1</sup>Kochi University

沈み込みプレート境界地震発生帯における堆積物の物性変化を明らかにすることは岩石強度の変化や脱水プロセスを理解することに繋がり、地震発生機序のメカニズムを理解する上で重要である。本研究の目的は、コスタリカ沖における reference site (RF サイト) から frontal prism (FP サイト) までの海底堆積物の物性を明らかにすることである。これは将来のデコルマを推定し、地震発生帯の物質を決定する基礎的なデータとなる。対象とする試料は Integrated Ocean Drilling Program (IODP) 第 344 次航海の RF サイト U1381, U1414 と FP サイト U1412 から得た。本研究では船上データから物性変化を検証し、その結果を踏まえて U1381 と U1414 の弾性波速度と間隙率を有効圧を変化させて測定した。

物性を測定した試料は U1381 と U1414 から 2 個ずつ計 4 個である。500kHz のトランスデューサーを 2 個使用し、透過法で波形データを取得した。流体圧を 1MPa に維持し、サンプル採取深度における静水圧を仮定した有効圧まで 5step、さらにその 10 倍の有効圧まで 5step 程度の測定を行った。

実験の結果、測定試料の間隙率はおよそ 53 - 77 % に変化し、P 波速度はおよそ 1.4 - 1.6km/s であった。この、P 波速度と間隙率の関係は、船上データ、実験データともによく一致し、世界的な経験則の範囲内であった。また、U1381 Unit II 除いて同様の傾向を示すことから、間隙率と有効圧は実験結果を用いて変換可能と言える。この関係を用いて、船上で得られた間隙率を有効圧に変換し、深度から間隙流体圧を推定した。

U1381 Unit I では誤差範囲が大きいため流体圧の規制が困難であったが、期待される静水圧の範囲を含む結果を得た。一方、U1414 では、Unit I からしばらくは静水圧が、Unit II の上部で 10 m 程度の幅で静水圧以下の流体圧 (過圧密状態) が推定され、下位で再び流体圧が静水圧的となった。このギャップがデコルマを将来の規定する可能性がある。加圧密状態が推定される層は、粒子密度が一定で間隙率が急速に減少しており、推定された結果と調和的である。その下位では間隙率が増加するが、同時に粒子密度の減少も見られ、結果として静水圧的となった。異なる物性を持つ可能性があり、今後実験を続けていく必要がある。また、U1412 では、プリズム上部がすでに過圧密状態にある結果が得られ、先端付加作用によって脱水が進行している様子が確認できた。

キーワード: IODP, 沈み込み帯, 堆積物物性, 弾性波速度, 間隙圧

Keywords: IODP, subduction zone, physical property of sediment, elastic wave velocity, pore pressure

## 四国西部四万十帯トラバース A structural traverse across the Shimanto belt in western Shikoku, Japan

大橋 聖和<sup>1\*</sup>; 金川 久一<sup>1</sup>  
OOHASHI, Kiyokazu<sup>1\*</sup>; KANAGAWA, Kyuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University

関東地方から九州にかけて帯状分布する四万十帯は、海洋プレートの沈み込みに伴い形成された付加コンプレックスを主体としている(平ほか, 1980)。九州東部や四国中東部では、混在岩(メランジュ)帯やシュードタキライトを伴う脆性断層などの強変形帯の存在が知られており(例えば Mukoyoshi et al., 2006)、沈み込み境界での長期的・短期的な変形現象を記録していると考えられている。四国中部に分布するメランジュ帯は、四国西部にかけて延長して分布することが Taira et al. (1988) によって示唆されているが、当地域における地質構造の報告は乏しく、その詳細は不明である。また、埋没深度の指標となる最高被熱温度に関する研究が行われていないため、断層による熱構造ギャップの有無を議論することができない。そこで、発表者らは宇和島北方の仏像構造線以南から足摺岬までの四国西部沿岸域において四万十帯の岩相・変形マッピング、構造測定、断層記載、およびビトリナイト試料のサンプリングを行った。発表では、調査で明らかとなったメランジュ帯・脆性断層の分布と特徴、ビトリナイト反射率に基づいた最高被熱温度を示し、四国西部での広域的な構造発達史を議論する。また、高温の被熱温度を示す九州東部と、比較的低温を示す四国中部-東部との関係性についても議論する。

### [引用文献]

Mukoyoshi, H., Sakaguchi, A., Otsuki, K., Hirono, T., and Soh, W., 2006, Co-seismic frictional melting along an out-of-sequence thrust in the Shimanto accretionary complex. Implications on the tsunamigenic potential of splay faults in modern subduction zones, *Earth and Planet. Sci. Lett.* 245, 330-343.

Taira, A., Katto, J., Tashiro, M., Okamura, M. and Kodama, K., 1988, The Shimanto Belt in Shikoku, Japan -Evolution of Cretaceous to Miocene accretionary prism. *Modern Geology*, 12, 5-46.

平 朝彦・田代正之・岡村 眞・甲藤次郎, 1980, 高知県四万十帯の地質とその起源. 平 朝彦・田代正之編, 四万十帯の地質学と古生物学-甲藤次郎教授還暦記念論文集, 林野弘済会出版, 319-389.

キーワード: 四万十付加体, 層序外断層, メランジュ, ビトリナイト反射率, 断層岩

Keywords: Shimanto accretionary complex, Out of sequence thrust, Melange, Vitrinite reflectance, Fault rocks

## 四万十帯久礼 OSTs の応力評価 Stress estimation of Kure OSTs, Shimanto accretionary complex

米谷 優佑<sup>1\*</sup>  
KOMETANI, Yusuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 山口大学  
<sup>1</sup>yamaguchiuniversity

Stress must be concentrated at front of seismogenic fault during rupture propagation. The level of this stress concentration depends on rupture propagation velocity, fault length, thickness of process zone and strength of host rock. However, few quantitative analysis was reported in natural fault due to difficulty of stress estimation. The calcite-twin piezometer, enables stress estimation from elastic rebounded rock, was proposed based on discrete element method simulation and tri-axial rock experiments (Sakaguchi et al., 2011).

The Shimanto accretionary complex is ancient subduction zone and some fossil seismogenic faults were reported.

Among them, pseudotachylyte bearing Kure OSTs cuts Cretaceous Shimotsui, Nonokawa Formation and Kure Melange. This Kure OSTs is composed of echelon formed small faults with thin damaged zone, and burial depth of the host rock is estimated as below 3 km in depth. We obtained three rock samples, applicable for calcite-twin piezometer. The highest value of estimated stress was approximately 420MPa. This is much higher value than the other seismogenic fault in Shimanto accretionary. The Okitsu Fault, formed deeper depth of approximately 4 km, have suffered lower stress of 350 MPa at fault center (Sakaguchi et al., 2011). This indicates that much higher stress was concentrated at shallow Kure OST than deep Okitsu Fault. We propose two models to make high stress at shallow portion. Long crack length from deep to surface causes high stress concentration at shallow portion. Other model causes high stress due to narrower fault zone than the Okitsu Fault. Stress may tend to concentrate at narrower process zone of Kure OSTs than wide process zone of Okitsu Fault.

キーワード: 付加体, 古地震, 方解石, 双晶密度  
Keywords: subduction zone, ancient seismogenic, calcite, twin density



## プレート沈み込み帯分岐断層の古応力解析：延岡衝上断層の例 Paleostress analysis of a subduction zone megasplay fault - An example from the Nobeoka Thrust, Japan

川崎 令詞<sup>1\*</sup>; 浜橋 真理<sup>1</sup>; 福地 里菜<sup>1</sup>; 橋本 善孝<sup>2</sup>; 山口 飛鳥<sup>3</sup>; 亀田 純<sup>4</sup>; 濱田 洋平<sup>5</sup>; 北村 有迅<sup>6</sup>; 大坪 誠<sup>7</sup>; 木村 学<sup>1</sup>  
KAWASAKI, Ryoji<sup>1\*</sup>; HAMAHASHI, Mari<sup>1</sup>; FUKUCHI, Rina<sup>1</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>2</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>3</sup>; KAMEDA, Jun<sup>4</sup>; HAMADA, Yohei<sup>5</sup>; KITAMURA, Yujin<sup>6</sup>; OTSUBO, Makoto<sup>7</sup>; KIMURA, Gaku<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planet. Sci., Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Kochi Univ., <sup>3</sup>Atmosph. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>4</sup>Hokkaido Univ., <sup>5</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>6</sup>Kagoshima Univ., <sup>7</sup>AIST, Geological Survey of Japan, Inst. Geology and Geoinformation

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planet. Sci., Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Kochi Univ., <sup>3</sup>Atmosph. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>4</sup>Hokkaido Univ., <sup>5</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>6</sup>Kagoshima Univ., <sup>7</sup>AIST, Geological Survey of Japan, Inst. Geology and Geoinformation

The megasplay faults in subduction zones, branching from plate boundary thrusts, are thought to have a potential to generate earthquakes and accompanying tsunamis. It is therefore important to understand the fault mechanism of megasplay faults for earthquakes and tsunamis occurring in subduction zones. Paleo-splay faults exposed on land often preserve clear deformation features of the seismogenic zone and provide information on the fault mechanisms at depth. One of the important informations that can be obtained from exhumed faults is paleo-stress field. Here we investigated the Nobeoka Thrust, a fossilized megasplay fault in the Shimanto Belt in Kyushu. The hanging wall is Eocene Kitagawa Group, composed of phyllitic shales. The footwall is Eocene to early Oligocene Hyuga Group, composed of foliated cataclasite originated from sandstone-shale melanges. The thrust has been active during the period of 48-40 Ma [Hara and Kimura, 2008]. The hanging- and the footwall have experienced maximum burial temperatures of approximately 320 °C and 250 °C, respectively [Kondo et al., 2005]. The existence of klippe apart from the Nobeoka Thrust shows that the Nobeoka Thrust is nearly horizontal in regional scale [Murata, 1991, 1995]. Kondo et al. (2005) described two orientations of slickensides from the outcrop, suggesting the existence of flexural gentle fold in kilometer scale. In addition to the previous studies focusing on outcrops, scientific drilling has performed in 2011 penetrated through the Nobeoka Thrust, and core samples and geophysical logging data are obtained. The cores provide important information for investigating geological features under the ground and have an advantage without surface weathering.

In this study, we analyzed paleo-stress from slip vectors on small faults observed in the cores. Small faults are expected to be less-reactivated. The number of small faults is much larger than that of large faults, accordingly, high statistical reliability is expected. Multiple inverse method (MIM; Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006) was applied to the small faults. K-means clustering (Otsubo et al., 2006) was applied to stress tensors detected by the MIM for estimating optimal solutions. Preliminary results indicate the presence of solutions with three maximum horizontal stress axes: N85.24°E, N30.07°W and N65.47°E. We examined the formation process of the Nobeoka Thrust based on the results and slickensides on the outcrop. Our results would provide potential insights to the fault evolution of a megasplay fault in subduction zone.

キーワード: Nobeoka Thrust Drilling Project, Subduction zone, Shimanto Belt, paleo-stress, Multiple inverse method  
Keywords: Nobeoka Thrust Drilling Project, Subduction zone, Shimanto Belt, paleo-stress, Multiple inverse method

## シュードタキライトの3次元微細構造解析 3D micro structural observation of pseudotachylyte

濱田 洋平<sup>1\*</sup>; 木村 学<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; 山口 飛鳥<sup>4</sup>; 浜橋 真理<sup>2</sup>; 北村 有迅<sup>5</sup>; 福地 里菜<sup>2</sup>; 川崎 令詞<sup>2</sup>  
HAMADA, Yohei<sup>1\*</sup>; KIMURA, Gaku<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>4</sup>; HAMAHASHI, Mari<sup>2</sup>; KITAMURA,  
Yujin<sup>5</sup>; FUKUCHI, Rina<sup>2</sup>; KAWASAKI, Ryoji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 高知コアセンター, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>4</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>5</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻

<sup>1</sup>Kochi institute for Core Sample Research, JAMSTEC, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Earth and Planetary System Science Department of Natural History Science, <sup>4</sup>Atomosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>5</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering Kagoshima

Pseudotachylyte, molten fault rock due to dynamic frictional heating, is a strong evidence of seismic fault slip [Sibson 1975]. Recent research reveals pseudotachylytes can be related with dynamic weakening mechanism such as melt lubrication [DiToro et al., 2006]. However, observations of internal structure of pseudotachylyte have been confined to 2D observations with optical-electron microscope. Here we performed X-ray 3D structural observation of natural pseudotachylyte developed close to the Nobeoka thrust which is a major Out of sequence thrust in fossil accretionary prism (Shimanto-belt).

The Nobeoka thrust located in Kyusyu Island, south west Japan, bounding northern and southern Shimanto belt of Cretaceous-Tertiary accretionary complex. The thrust is considered to have been active during 40-48Ma at seismogenic depth of ~11kmsf, experienced maximum temperature of which is 320 C in the hanging wall and 250 C in the footwall. Thus, the Nobeoka thrust is examined that it was major OST in seismogenic zone of accretionary prism (Kondo et al., 2005; Hara and Kimura, 2008; Raimbourg et al., 2009). The pseudotachylyte bearing fault develops in the hanging wall of the Nobeoka thrust with 1 mm of width. Okamoto et al. (2007) reported that carbonate-matrix implosion breccia fill tensile cracks and inner periphery of the fault, interposing pseudotachylyte, based on optical microscopic observation. Though pseudotachylyte cut the implosion breccia, the fault jog consists only of the carbonate-matrix breccia. It may show the fault experienced dynamic pore water pressurizing accompanied by pseudotachylyte generation at its first frictional slip. Therefore, the fault is appropriate to structural investigation of dynamic fault weakening mechanism.

We performed structural observation of this pseudotachylyte with scanning electron-microscope and 3D X-ray microscope. In the electron microscopic observation, we found that fragments of host rock unevenly distributed in the pseudotachylyte. The number of fragments is larger at lower part (footwall-side) than within the center of the pseudotachylyte. We also found open cracks along the fragments arrangement. It is considered to be cooling crack generated due to rapid cooling of molten rock. The 3D x-ray microscopic observation was performed with cylinder sample of 8 mm diameter. The spatial resolution of the x-ray microscope is 1 micro meter, and detailed 3D fault structure was imaged. We focused four planes, A: lower plane of lower fault filling vein, A': lower plane of pseudotachylyte, B: upper plane of upper vein, B': upper plane of pseudotachylyte. The surfaces configurations were extracted and its roughness was evaluated as calculated average roughness, Ra (theta), in each direction. We found that Ra has minimum value in the same direction in each plane, and the lineation strongly develops at the lower planes (A, A').

From the above results, we discussed the faulting process as:

- 1) Start faulting. strain concentrated in the footwall side and pore pressure was raised at the part.
- 2) Hydraulic fracturing by high pore pressure, tensile cracks formation and fluid migration.
- 3) Strength (friction) recovery by draining and formation of pseudotachylyte.

キーワード: シュードタキライト, 三次元微細構造, 表面粗さ

Keywords: pseudotachylyte, 3D micro structure, surface roughness

## MDRS 法によって明らかになった東京都下の基盤構造 Basement structure beneath the Tokyo metropolitan area as revealed with the MDRS method

堀川 晴央<sup>1\*</sup>; 阿部 信太郎<sup>1</sup>; 山口 和雄<sup>1</sup>; 野田 克也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>  
HORIKAWA, Haruo<sup>1\*</sup>; ABE, Shintaro<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Kazuo<sup>1</sup>; NODA, Katsuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(独)産業技術総合研究所, <sup>2</sup>地球科学総合研究所  
<sup>1</sup>AIST/GSJ, <sup>2</sup>JGI

### はじめに

関東地域は、東北日本と西南日本の境界にあたり、地質構造が複雑であることがこれまでの研究で明らかになっている(例えば、日本地質学会編, 2008)。その一方で、我が国随一の人口を擁し、人間活動が活発であるため、地下構造の調査は大きな制約を受け、しかも、過去に調査できた箇所でも再度調査が行えるとは限らない。したがって、過去に取得されたデータからできるだけ地下構造に関する情報を引き出すことが、都市域の地下構造に関する研究ではきわめて重要である。

最近開発された MDRS 法 (Multi-Dip Reflection Surfaces 法; Aoki et al., 2010) は、CRS 法 (Common Reflection Surface Stacking 法; 例えば、Jager et al., 2001) に準じて高い SN 比で反射イベントを抽出し、それらを重ね合わせてイメージングする手法である。通常の CMP 法による解析と比べて、MDRS 法は複雑な地質構造による反射面を明瞭にイメージングできることが報告されている(例えば、山口ほか, 2012)。したがって、関東平野での記録にでも本手法による鮮明なイメージングが可能ならば、関東地域の地質構造の解明に大きく貢献することが期待される。本講演では、東京都で取得された反射法地震探査の記録に本手法を試みたところ、先新第三系の基盤上面付近の構造を明瞭にイメージングできたことを報告する。

### データ

解析したデータは東京都が平成 15 年度に取得したもの(東京都, 2003)で、測線は東京都北部(一部は埼玉県南部)を東西に横断し、西端は立川断層の西側にあたる昭島市、東端は和光市で、総測線長は 26.9 km である。発振点間隔および受振点間隔はそれぞれ 150 m, 25 m である。大型バイプロサイズを複数台使用した大規模な発振は限られ、大型バイプロサイズあるいはミニバイプロサイズを 1 台のみ用いた発振箇所が過半数である。

通常の CMP 法による処理結果(東京都, 2003)では、測線の西部に位置する立川断層によって、先新第三系の基盤岩上面に大きな落差が認められる。その他、その東側では基盤岩の上面が凹凸に富んでいることを示唆する結果が得られているが、基盤岩の上面の具体的な形状は不明瞭であった。本研究では、この基盤岩上面付近の構造を明瞭にイメージングすることを目指した。

### 結果

MDRS 法による再処理結果を、通常の CMP 法による結果と比較すると、先新第三系と考えられる基盤岩の上面付近の構造がより明瞭にイメージングされている。測線の中央付近では、深さ 2.5 km から 4 km にかけて、東に向かって傾斜する長さが約 4-6 km ほどの反射面が複数認められる。また、これらの反射面の上方には、西側に尖滅する形の楔状で反射が強い領域が深さ 2 km 程度まで分布する。この領域内の反射面は水平ないし東に緩傾斜だが、下位のもののほど傾斜がきつくなる放射状をなしている。

上述のイメージング結果は、複数の正断層によりブロック化された基盤が、正断層の活動により傾きながら堆積層がたまっていくことにより生じた構造と解釈される。関東地方西部では、中新世の日本海の拡大により形成された(ハーフ) グラーベン構造が確認されている(高橋ほか, 2006)が、本研究で明らかとなった構造も同時期に形成された構造なのかもしれない。

地表で立川断層があるとされる付近に着目すると、基板上面に対応すると考えられる反射面のうち西側のものが、従来の解析結果よりもさらに西に伸びて地表の立川断層の直下付近に達して不明瞭になる。そのすぐ西側には、1.5 km ほど浅くなって対応する反射面が認められる。以上から、少なくとも深さ 3 km 程度までは、立川断層は高角であると考えられる。

### 謝辞

本研究で使用したデータは東京都土木技術支援・人材育成センターより提供いただいた。記して感謝いたします。

### 文献

Aoki, N., S. Narahara, A. Takahashi and T. Nishiki, 2010, Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection

SSS31-01

会場:502

時間:4月30日 14:15-14:30

surfaces method, SEG Extended Abstracts, 3604-3608.

Jager, R., J. Mann, G. Hocht and P. Hubral, 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes, *Geophysics*, 66, 97-109.

日本地質学会編, 2008, 関東地方, 日本地方地質誌 3, 朝倉書店, 570 pp.

高橋雅紀・林 広樹・笠原敬司・木村尚紀, 2006, 関東平野西縁の反射法地震探査記録の地質学的解釈?とくに吉見変成岩の露出と利根川構造線の西方延長?, *地質学雑誌*, 112, 33-52.

東京都, 2003, 平成 15 年度 地震関係基礎調査交付金 関東平野地下構造調査 (北多摩地区弾性波探査) .

山口和雄・阿部 進・横倉隆信・岡田真介, 2012, MDRS 法による苫小牧 86 測線反射法データの再解析, *地質調査総合センター速報 (平成 23 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告)*, 59, 75-87.

キーワード: MDRS 法, 基盤構造, 反射法地震探査, CRS 法

Keywords: multi-dip reflection surfaces method, basement structure, seismic reflection survey, common reflection surface stacking



## 稠密地震観測による奥羽脊梁山脈の地震波速度構造 — 断層破壊の地殻構造的な規制要因 — Seismic velocity structure in Ou backbone range by using a dense seismic array

青柳 恭平<sup>1\*</sup>; 木村 治夫<sup>1</sup>  
AOYAGI, Yasuhira<sup>1\*</sup>; KIMURA, Haruo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所  
<sup>1</sup> Central Research Institute of Electric Power Industry

### 背景と目的

奥羽脊梁山脈は東北日本弧の中軸をなす東西圧縮の歪み集中帯であり、我が国でも有数の逆断層型地震の多発地帯である。1896年陸羽地震(M7.2)や2008年岩手宮城内陸地震(M7.2)など、最近100年余りでも、被害地震が数多く発生している。横手盆地東縁断層帯で発生した1896年陸羽地震では、断層帯北部のみに地表地震断層を生じた。本研究の目的は、逆断層帯の破壊に関わる地殻構造的な規制要因を見出すことである。本発表では、奥羽脊梁山脈における稠密微小地震観測に基づく地震波トモグラフィ解析から、速度構造と既往の被害地震の破壊域端部との関係を検討する。

### 稠密微小地震観測

稠密微小地震観測は、2012年11月から2013年11月までの約1年間、北上低地と横手盆地に挟まれた東西約40km、秋田県仙北市から宮城県栗原市にわたる南北約100kmの範囲で実施した。定常観測点の疎な領域を中心に30か所の臨時観測点を配置し、全体として約10km間隔で対象地域をカバーするようにした。各観測点には、クローバテック製 DAT-4 レコーダーと Lennartz 製 LE-3Dlite 地震計の組み合わせ(計20点)、もしくは近計システム製 EDR-X7000 レコーダーと KVS-300 地震計の組み合わせ(計10点)のいずれかを設置した。3成分、250Hz サンプリングで連続収録を行い、前者は約2ヵ月間毎、後者は約6ヵ月間毎にデータ回収とバッテリー交換を行った。積雪期には、前者のうち約半数がアクセス不通に伴う約3ヶ月間の欠測がある。

### 走時データ

観測期間中、奥羽脊梁山脈周辺で発生した2700個余りの地震について、気象庁一元化震源カタログに基づいて、各地点の収録データからイベント波形を編集した。地震毎の統合波形データに対して、winシステム(ト部・東田, 1991)を用いて、暫定的にP波とS波到着時刻の自動検測を行った。この検測データに同一イベントに対する気象庁一元化震源観測点の検測値を統合して、トモグラフィ解析用の絶対走時データとした。

また、より広域的に波線カバレッジを高めるため、観測期間外の定常観測網データも用いた。2004年~2011年に東経140度~141.5度、北緯38.5度~40度、深さ0~180kmに発生したM1以上の地震のうち、水平方向0.05度、深さ方向1kmの領域毎に最も多くの観測点で検測値が得られている地震2259個を抽出した。

### トモグラフィ解析の暫定結果

上記で得られた絶対走時を統合して、tomoDD(Zhang and Thurber, 2003)によりトモグラフィ解析を行った。解析対象(暫定)は、焼石岳北方を中心にした南北160km×東西128km、深さ0~180kmの範囲である。グリッド間隔は、水平方向8km、深さ方向5kmである。20回程程度のイタレーションにより、以下の暫定結果が得られた。

岩手宮城内陸地震の震源域北端部は、地殻内地震の地震発生層(深さ5~10km付近)における北西-南東方向の速度急変部に対応している。震源域側では高 $V_p$ であるのに対し、その北側では低 $V_p$ である。北上低地西縁断層帯はこの速度急変部の北側に分布している。この速度境界部は、重力異常の急変(北東側が低、南西側が高)とも調和的である。

この北西-南東方向の速度急変部は秋田県側まで連続して認められる。その位置は、1896年陸羽地震の震源域(川舟断層、あるいは横手盆地東縁断層帯北部)の南端にもほぼ一致している。この速度急変部の地表には、衣川、成瀬川など、同方向の谷地形が発達しており、地質分布もその南北で異なる。これらのことから、この速度急変部は東北日本弧でしばしば見られる北西-南東方向の胴切り断層を見ている可能性がある。

今後、トモグラフィ解析の分解能と地質構造を十分に精査した上で、こうした地殻構造の急変部が断層破壊の停止に関わっている可能性について検討したい。

キーワード: 奥羽脊梁山脈, 地震波速度構造, 破壊停止, 微小地震観測, 走時トモグラフィ

Keywords: Ou backbone range, Seismic velocity structure, Rupture termination, Micro-earthquake observation, Seismic tomography

## 箱根火山周辺の比抵抗構造と東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動の関係 Relation between the resistivity structure around Hakone volcano and seismicity induced by the 2011 Tohoku Earthquake

吉村 令慧<sup>1\*</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 行竹 洋平<sup>3</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 小森 省吾<sup>4</sup>; 後藤 忠徳<sup>5</sup>; 本多 亮<sup>3</sup>; 原田 昌武<sup>3</sup>; 山崎 友也<sup>1</sup>; 加茂 正人<sup>1</sup>; 安田 陽二郎<sup>6</sup>; 谷 昌憲<sup>5</sup>  
YOSHIMURA, Ryokei<sup>1\*</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; YUKUTAKE, Yohei<sup>3</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; KOMORI, Shogo<sup>4</sup>; GOTO, Tadanori<sup>5</sup>; HONDA, Ryou<sup>3</sup>; HARADA, Masatake<sup>3</sup>; YAMAZAKI, Tomoya<sup>1</sup>; KAMO, Masato<sup>1</sup>; YASUDA, Yojiro<sup>6</sup>; TANI, Masanori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>4</sup> 中央研究院地球科学研究所, <sup>5</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>6</sup> 鳥取大学大学院工学研究科

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>4</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, <sup>5</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>6</sup>Graduate School of Engineering, Tottori University

Seismicity around the Hakone volcano was activated just after the arrival of surface waves caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Most of these triggered earthquakes had similar distribution to prior occasional swarm activities. In order to image electrical properties around such seismic events, we carried out audio-frequency magnetotelluric (AMT) measurements at 39 sites in December 2011 (Yoshimura et al., 2012). In this study, we conducted 3D modeling of dense AMT (Yoshimura et al., 2012) and MT (Ogawa et al., 2012) data, to figure out electrical characteristics around the triggered seismicity. In spite of careful treatments for noise reduction, the effects of noise were still seen on the longer parts of the responses (<1 Hz) at the several measurement sites. Thus we determined to have use of the frequency range from 320 Hz to 1.02 Hz. The full components the impedance tensors at 51 sites in total were inverted using the code developed by Siripunvaraporn et al. [2005]. The model space consists of 64(x-)×46(y-)×36(z-direction; including 7 air layers) blocks. The minimum horizontal size of blocks was 400m×400m. Significant characteristics of the obtained three-dimensional resistivity model are: (1) the most of the triggered earthquakes, which occurred shallower than a depth of 4km, seem to align along edges or areas just inside the relatively resistive block; (2) surface conductive blocks, in which there were very few earthquakes, were observed beneath not only fumarolic areas but geothermal non-active regions.

キーワード: MT 法探査, 3次元比抵抗構造, 箱根火山, 誘発地震

Keywords: magnetotellurics, three-dimensional resistivity structure, Hakone volcano, triggered earthquake

## 濃尾平野周辺の三次元地震波速度構造 Three-dimensional seismic velocity structure around the Neodani fault

中島 淳一<sup>1\*</sup>; 加藤 愛太郎<sup>2</sup>; 岩崎 貴哉<sup>2</sup>; 濃尾地震断層域 合同地震観測グループ<sup>3</sup>

NAKAJIMA, Junichi<sup>1\*</sup>; KATO, Aitaro<sup>2</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>2</sup>; THE JAPANESE UNIVERSITY GROUP OF THE, Joint seismic observations at the are<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 地震研究所, <sup>3</sup> 濃尾地震断層域合同地震観測グループ

<sup>1</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at the Area of Nobi Earthquake

1891年に発生した国内最大の内陸地震である濃尾地震(M8.0)の震源断層と考えられている根尾谷断層帯周辺において、不均質構造や断層への応力蓄積機構の解明を目的に、2009年から5ヶ年の計画で全国の大学及び研究機関による合同観測(自然地震観測, 電磁気的観測, GPS観測, 制御震源探査など)が行われた。自然地震観測では、定常観測点の隙間を埋めるように73点の臨時地震観測点が設置され、定常観測網も含めると平均観測点間隔約10kmという非常に稠密な地震観測網が構築された。連続波形データは気象庁一元化震源をもとに切り出され、周囲の定常点も含めた約200km四方の領域でP波・S波の到着時刻の読み取りが行われた。

本研究では、根尾谷断層帯周辺の詳細な三次元地震波速度構造を推定するために、合同観測点で得られた読み取り値と気象庁一元化の読み取り値を統合し、Zhao et al. (1992)の手法を用いて地震波速度トモグラフィーを行った。使用した地震は2002年1月から2013年1月までに発生した3027個であり、2009年11月から2013年1月までのデータには臨時観測点が含まれている。解析に使用したP波、S波の到着時刻データは、それぞれ248,354, 215,034であった。解析領域は34°37'N, 135°13'E, 0°300kmとし、根尾谷断層帯周辺では水平方向に0.1度間隔、鉛直方向は5°30km間隔でグリッドを配置した。

解析で得られた主な結果は以下の通りである。

1. 濃尾平野下の下部地殻はP波、S波とも周囲に比べ低速度である。
2. フィリピン海プレートから濃尾地震の震源直下の地殻中部にかけて、連続的な低速度域がみられる。
3. 濃尾地震のすべり量が大きかった温見断層直下の下部地殻は特に速度が遅い
4. 濃尾地震の震源よりも南東側の下部地殻の速度は平均程度であり、震源域付近を境に下部地殻の速度が大きく変化する。

これらの結果は、根尾谷断層帯周辺では地震波速度の不均質が大きく、その不均質により上部地殻に応力が集中し、濃尾地震が発生したことを示唆している。地震発生層下の不均質構造は国内外の大地震の震源域周辺でも報告されていることから、内陸地震の応力蓄積過程を理解するためには、最上部マントルや下部地殻の不均質構造を高精度で推定し、その影響を評価することが不可欠である。

キーワード: 濃尾地震, 下部地殻, 流体, フィリピン海スラブ

## 濃尾断層帯における応力インバージョン解析 Stress tensor inversion in the Nobi fault area, Central Honshu, Japan

勝俣 啓<sup>1\*</sup>; 小菅 正裕<sup>2</sup>; 片尾 浩<sup>3</sup>; 山田 卓司<sup>1</sup>; 加藤 愛太郎<sup>4</sup>; 濃尾地震断層帯 合同地震観測グループ<sup>4</sup>  
KATSUMATA, Kei<sup>1\*</sup>; KOSUGA, Masahiro<sup>2</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>3</sup>; YAMADA, Takuji<sup>1</sup>; KATO, Aitaro<sup>4</sup>; THE JAPANESE  
UNIVERSITY GROUP, The joint seismic observations<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター, <sup>2</sup> 弘前大学理工学研究科附属地震火山観測所, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所地震予知研究センター, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Inst. Seismo & Volcano, Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Earthquake and Volcano Observatory, Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, <sup>3</sup>Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」に基づき、1891年濃尾地震(M8.0)の震源域となった濃尾断層周辺において、2009年から2013年まで合同微小地震観測が行われた。定常観測点に加え、70点の臨時観測点が設置され、平均観測点間隔約10kmという稠密な地震観測網が構築された。本研究では期間中に観測された地震の震源メカニズム解を決定し、それらを用いて応力テンソルインバージョン解析を行った。

研究領域(北緯35.3~36.1度, 東経136.0~137.0度)内で2009年5月1日から2013年5月31日までに発生したM1.0以上、深さ30km以浅の地震を選択し、手動で読み取りを行った。P波初動の押し引きをデータとして、Hardebeck and Shearer (2002)が開発したHASHというソフトウェアを用いて震源メカニズム解702個を決定した。得られた解の多くは左横ずれタイプであり、P軸はほぼ東西を向き、この地域の広域応力場と一致している。

さらに、得られた702個の震源メカニズム解を用いて応力テンソルインバージョン解析を行った。最初に、震源メカニズム解を震源の深さによって、2~7km, 5~10km および 8~13kmの3グループに分ける。研究領域内に東西0.1度×南北0.1度間隔で格子点を設定し、各格子点から半径15kmの円内に震央が入るメカニズム解を各グループで選択する。各グループ別々に、Hardebeck and Michael (2006)が開発したSATSIを用いて、応力テンソルインバージョンを行った。得られた結果は、各グループ共によく似ていて、最大主応力軸はほぼ東西・水平方向を向いているが、多少、空間的な変化があるようだ。濃尾断層帯では1891年濃尾地震で地表変位が出現した範囲では、ほぼ東西方向であるが、それより北側および南側では、時計回りに数10度の回転が見られる。

キーワード: 濃尾断層, 合同地震観測, 震源メカニズム解, 応力テンソルインバージョン, 内陸地震, 活断層

Keywords: Nobi fault, joint seismic observations, focal mechanism, stress tensor inversion, inland earthquake, active fault



## 山陰地方のGNSSデータに認められるひずみ集中帯 Strain concentration zone recognized from GNSS data in the San-in region

西村 卓也<sup>1\*</sup>  
NISHIMURA, Takuya<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

### はじめに

山陰地方においては、1943年鳥取地震(M7.2)や2000年鳥取県西部地震(M7.3)などの地殻浅部を震源とする大地震が数多く発生している。また微小地震分布には海岸線にほぼ平行な帯状の地震活動域が見られることが知られている。一方、国土地理院のGEONETによって明らかになった日本列島の地殻変動分布では、山陰地方を含む中国地方は、ひずみ速度の小さい領域として認識されてきた(例えば、Sagiya *et al.*, 2000)。しかし、GNSSデータを用いた日本列島の定常的な地殻変動分布に関する研究は、GEONETの観測開始から間もない時期に行われた研究が多く、2002年の観測網増強後のデータについて十分検討されていない。そこで、本研究では、GEONETデータを用いて、山陰地方の地殻変動を概観し、特に地震活動域周辺の変動について報告する。

### 解析方法

解析には、国土地理院から公開されているGEONET日座標値(F3解)を用いた。観測点950462(長崎県福江)を基準とする座標時系列に対し、経年変化成分、年周成分、半年周成分を持つ曲線を最小二乗法によりフィッティングし、経年変化成分を各観測点での変動速度とした。この速度ベクトルを、山陰地方の地震帯に直交する断面上に投影し、速度分布の特徴を調べた。また、速度ベクトルから、観測点を頂点とする三角形でのひずみ分布、平滑化したグリッド上でのひずみ分布(Shen *et al.*, 1996)を計算し、微小地震分布との比較を行った。

### 結果

この地域で大きな地震が発生していない2005年4月から2009年12月までの平均速度分布からは、山陰地方の東部(島根県東部から鳥取県)において、海岸線に平行な微小地震活動域に対応する変形集中域を確認することができた。面積ひずみ速度分布では、収縮のひずみが太平洋側から日本海側に向かって漸減し、微小地震活動に対応するような変化は見られない。しかし、最大剪断ひずみ速度分布では、中国地方東部の内陸部が日本列島でも最小クラスの低ひずみ速度( $10^{-8}$ のオーダー)なのに対し、日本海沿岸では $10^{-7}$ 程度の大きなひずみ速度が帯状に広がっていることが確認された。また、2000年鳥取県西部地震の震源域周辺では、周辺より大きなひずみ速度が観測されており、余効変動が継続していることを示唆するが、山陰地方の西部ではひずみ速度の大きな領域が空間的に連続するような分布は見られなかった。

山陰地方東部の地震帯に直交する断面での速度分布は、地震帯に平行な(N80°E)方向の速度において、地震帯を挟んで速度が約2mm/年ほど急変しており、ひずみ集中帯であると認められる。ひずみ集中帯の幅は、北側が日本海になるため特定することが難しいが、地震帯の南側の山陽地方の変形は小さく、地震帯から北側10kmの範囲で主に変形しているように見える。地殻変動速度の方向より、この変動帯では右横ずれ運動をしていることが示唆され、この領域の地震のメカニズム解とも調和的である。また、東北地方太平洋沖地震以降の2012年1月から2013年12月までの速度分布には、東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響が顕著に見られた。山陰地方のひずみ速度は倍増しており、地震帯を挟む速度の差もほぼ倍増している。

観測されたひずみ集中帯の変動は、地震帯を挟む南北が別のブロックであるとした場合の右横ずれのブロック運動によって説明できると考えられるが、浅部の固着域の深さなどのパラメータを推定するためにはデータが不足しており、ひずみ集中域における稠密地殻変動分布を観測する必要がある。

### まとめ

GEONETデータの解析から、山陰地方の東部において、海岸線に平行な地震帯に沿ってひずみ集中帯が存在することが明らかになった。このひずみ集中帯では、幅10km程度で2mm/年の右横ずれ運動を示唆する変形が卓越しており、地震のメカニズム解とも調和的な運動方向を示す。東北地方太平洋沖地震以降は、変動速度が倍増した。ひずみ集中帯の変動メカニズムを明らかにするためには、さらに詳細な地殻変動分布を得ることが重要であり、観測とモデル計算の両面から解析をすすめる必要がある。

### 参考文献

Sagiya *et al.*, PAGEOPH, 147, 2303-2322, 2000  
Shen *et al.*, JGR, 101(B12), 27957-27980, 1996

キーワード: 地殻変動, ひずみ集中帯, GNSS, 山陰地方

---

SSS31-06

会場:502

時間:4月30日 15:30-15:45

Keywords: Crustal deformation, Strain concentration zone, GNSS, the San-in region

## 龍門山断層ガウジの含水条件下の高速摩擦強度と WFSD 掘削孔における温度異常との比較 HV frictional strength of wet Longmenshan fault gouge and its comparison with the temperature anomaly in WFSD drill hole

東郷 徹宏<sup>1\*</sup>; 嶋本 利彦<sup>1</sup>; 馬 勝利<sup>1</sup>; 姚 路<sup>1</sup>  
TOGO, Tetsuhiro<sup>1\*</sup>; SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>1</sup>; MA, Shengli<sup>1</sup>; YAO, Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所  
<sup>1</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration

最近日本海溝における J-FAST プロジェクトでも試みられたように、大地震後の断層沿いの温度異常から摩擦の強度を見積もる研究が世界的にも注目を集めている。2008年5月12日に中国の四川省で発生したウェンチャン地震 (Mw=7.9、四川大地震とも呼ばれる) では、龍門山断層系の主要断層のひとつである映秀-北川断層沿いに 250 km を越える地表断層が認められ、この断層の西部の都江堰市郊外の虹口露頭付近において、Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD) と呼ばれるプロジェクトで 2 本の断層帯がおこなわれた。WFSD-1 孔は地震後 1 年以内という非常に迅速に掘られた掘削孔であり、WFSD でも掘削孔における温度測定はプロジェクトの重要項目になっている。掘削では深度約 580~760 m の間に見事な断層帯が認められた (約 10 m のカタクレサイト、多数の薄い断層ガウジ帯と断層角礫からなる; Li et al., 2013, Tectonophysics)。また孔内の温度計測の結果、深さ約 590 m において 0.15 °C 程度の非常に小さな異常しか認められず、これから推定された断層の摩擦係数は 0.03 またはそれ以下である可能性が高いと報告されている (Mori et al., 2010, AGU)。この摩擦係数は過去約 20 年間にわたって行われてきた乾燥条件下での高速摩擦実験の結果よりもさらに小さい値である。

そこで我々は、掘削孔に近い虹口露頭の断層ガウジを含水条件下で測定して (含水量は 25wt %)、無水条件下における実験結果と比較検討した。実験時のすべり速度は 1.3 m/s、垂直応力は 1.0~4.8 MPa であった。実験試料は掘削地点から数 100 m 離れた虹口断層露頭から採取した面状断層ガウジを用いた。実験の結果、含水ガウジのピーク摩擦係数は 0.1-0.36 と低い値を示し、さらに定常摩擦係数は 0.03~0.14 という極めて低い値に達することが明らかになった。また、ピーク摩擦係数、定常摩擦係数ともに垂直応力の増加と共にべき乗に減少していくことが明らかになった。WFSD-1 孔内では co-seismic な断層変位は 600~750 m で、断層面の傾斜角はおおよそ 65° (Li et al. 2013, Tectonophysics) とされているので、岩石密度を 2.5 と仮定して断層面にかかる垂直応力を計算するとおおよそ 6.3 から 7.9 MPa と求められる。我々の摩擦実験の定常摩擦係数をこの垂直応力へ外挿してやると、定常摩擦係数は 0.028~0.023 となり、Mori らが温度以上から復元した摩擦係数 (0.03 以下) と非常に整合的な結果が得られる。

さらに、FE-SEM を用いてマイクロストラクチャーの観察を行った所、無水ガウジはナノ粒子まで粉碎されたスリップゾーンと変形が弱いゾーンから構成されるのに対して、含水ガウジではガウジの上部がやや細粒化しているものの、ガウジ粒子細かく粉碎された痕跡や明瞭なスリップゾーンは認められなかった。これは thermal pressurization や、ガウジの圧密にともなう間隙水圧の上昇によって、粒子間の接触による粉碎が抑制されたためだと考えられる。

キーワード: 高速摩擦実験, 龍門山断層, ウェンチャン地震, 摩擦発熱, 孔内温度測定

Keywords: High-velocity friction experiment, Longmenshan fault, Wenchuan earthquake, Frictional heating, Bore hole temperature measurement

## 横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生の数値シミュレーション Numerical simulation of shear bands formation in ground due to strike-slip fault

野田 利弘<sup>1\*</sup>; 山田 正太郎<sup>1</sup>; 浅岡 顕<sup>2</sup>; 澤田 義博<sup>2</sup>; 川合 裕太<sup>1</sup>

NODA, Toshihiro<sup>1\*</sup>; YAMADA, Shotaro<sup>1</sup>; ASAOKA, Akira<sup>2</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>2</sup>; KAWAI, Yuta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>(公財)地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction

横ずれ断層発生時には、断層上部の地盤内部で深部から地表に向かって枝分れしたフラワー構造（花卉状構造）や地表面でリーデルせん断（雁行状せん断）構造などが付随発生することが知られている。上田<sup>1</sup>は、横ずれ断層模型実験を実施し、X線CTスキャンを用いて地盤内部でのせん断帯の発達過程を調べるとともに、澤田・上田<sup>2</sup>は、構成式にモール・クーロン破壊規準に基づく弾完全塑性体を用いて幾何学的非線形性を考慮した大変形解析を実施し、リーデルせん断等の形成過程をシミュレートしている。

本研究では、澤田・上田<sup>2</sup>の研究を参考に、土骨格の構成式にSYSカムクレイモデル<sup>3</sup>を登載した水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA<sup>4</sup>を用いて、横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生過程を調べた。本解析コードは速度型の運動方程式を忠実に時間積分して運動を求める動的問題にも対応可能なため、せん断帯発生に伴う波動生成や波動伝播も再現可能である<sup>5,6</sup>。使用した構成式は広範な土材料を同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式である。以下では、水と連成させない一相系材料とした場合の計算事例を示す。

はじめに、断層の走向方向（y方向）に1有限要素を配置した3次元メッシュを用いて実施した（図1）。中央下端の3要素を断層部分とみなし右横ずれ断層を想定した。境界条件として、y方向の向かい合う垂直な面（x-z面）のうち、断層直上部分には周期境界を、それ以外には一様なy方向の強制変位（速度 $10^{-6}$ m/s）を、断層部分を挟んで左右に逆向きに与えるとともに、x-z面およびy-z面は摩擦なしの条件とした。この結果、せん断帯は地盤下端の断層部分から複数発生し、ずれの増大に伴い、上部に向かう上に凸な対数螺旋形状（フラワー構造）を示した。このフラワー構造の発生には土要素の塑性膨張挙動が必要であった。

次に、y方向に40要素を配置しx-z面に周期境界を設定した3次元メッシュを用いて、せん断帯発生過程と地盤の不均質性（初期不整）の有無の影響を調べた。ここでは下端節点において、断層部分を挟んで一様なy方向の強制変位（速度 $10^{-6}$ m/s）を逆向きに与えるとともに、下端の断層部分の土要素について材料定数を僅かに変更して初期不整を設定した。この結果、初期不整がある場合は、地盤内部でフラワー構造が複数発生後、地表面まで到達し、雁行状のリーデルせん断構造が現れた（図2）。リーデルせん断部はその周辺よりも隆起を示した。なお、材料定数の違いに応じてリーデルせん断と走向方向のなす角が変化した。（「内部摩擦角」 $\phi'$ が小さい場合このなす角は小さくなった。図は省略。）また、材料によってはフラワー構造ではなく、内部に一つの平板状のせん断帯のみが形成され、波動生成が顕著に見られる場合もあった。

1) 上田圭一 (2003): 横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程, 電力中央研究所 研究報告:U03021

2) 澤田昌孝, 上田圭一 (2009): 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション, 電力中央研究所研究報告:N08028

3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790.

4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.

5) Noda, T., Xu, B. and Asaoka, A. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based on dynamic soil-water coupled finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, 53(5), 653-670.

6) 浅岡顕, 山田正太郎, 野田利弘 (2013): 地表面載荷による地盤の破壊現象と破壊に伴う振動の発生に関する数値解析, 日本地球惑星科学連合大会 2013年大会.

キーワード: 横ずれ断層, せん断帯, リーデルせん断, フラワー構造, 数値解析

Keywords: strike-slip fault, shear bands, Riedel shear, flower structure, numerical analysis



SSS31-08

会場:502

時間:4月30日 16:30-16:45

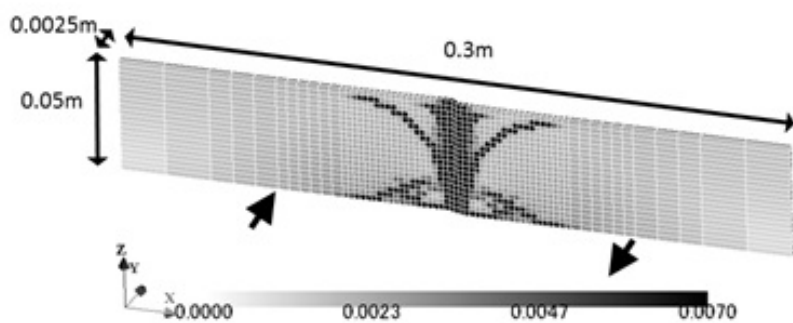


図1 フラワー構造の出現

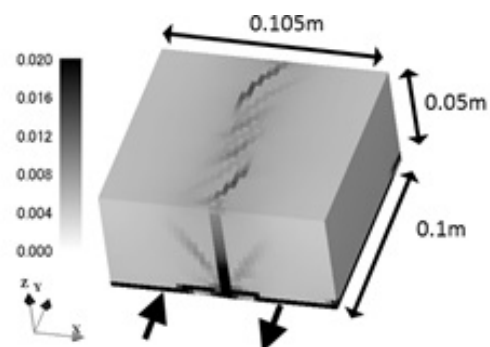


図2 フラワー構造後の  
リーデルせん断の出現  
(初期不整がある場合)

2011年福島県浜通りの地震震源域の応力場：静的応力変化に起因すると推定される  
顕著な空間不均質  
Spatially inhomogeneous stress field in the source area of the 2011 Fukushima Hamadori  
earthquake sequence

吉田 圭佑<sup>1\*</sup>; 長谷川 昭<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Keisuke<sup>1\*</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

<sup>1</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

After the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, many earthquakes occurred near Iwaki, Fukushima Prefecture, including Mw6.8 event of April 11. This 2011 Fukushima Hamadori earthquake sequence is characterized by normal faulting, with T-axis oriented in the NW-SE, E-W and NE-SW directions for events in the northern, central and southern parts of the source area, respectively.

In order to understand the cause of such a remarkable spatial variation of focal mechanisms, we investigated the stress field in the source area of this earthquake sequence. First, we relocated hypocenters of events that occurred during the period from 1997 to 2012 by the double-difference location method. Relocated hypocenters show that events near the 3/19 Mw 5.8 earthquake in the southern area, those near the 3/23 Mw 5.7 earthquake in northern area and those near the 4/11 Mw 5.9 earthquake in central area are aligned along planes dipping westwards corresponding to one of nodal planes, respectively.

Then, we estimated the stress field in the source area of the sequence by a stress tensor inversion of focal mechanisms reported by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention and Japan Meteorological Agency. Results show that the stress field is very heterogeneous in space with normal fault stress regime after the occurrences of the main-shock of each part of the source area. In the northern, central, southern and east parts of the source area, the minimum principal stress ( $\sigma_3$ ) axes are oriented in the NW-SE, E-W, NE-SW and NNE-SSW directions, respectively. As a whole,  $\sigma_3$  axis shows the concentric circle-like distribution. In contrast, before the occurrence of the main-shock of each part,  $\sigma_3$  axis is oriented homogeneously in space in the E-W direction.

This observation suggests the possibility that the remarkable heterogeneity in stress field is caused by the static stress change of large earthquakes. We estimated the static stress changes caused by the 2011 Fukushima Hamadori earthquake sequence. A slip model estimated by Hikima (2012) using strong motion waveforms was used for the Mw6.8 earthquake. Furthermore, we made fault models of the 3/19 Mw 5.7, 3/23 Mw 5.8 and 4/12 Mw 5.7 events using hypocenter locations and the scaling relation between moment magnitude, fault length, width and slip amount for estimating their static stress changes.

Spatial distribution of  $\sigma_3$  axis direction of the static stress change is approximately the same as that of the observed stress field after the occurrences of the main-shock of each part of the source area. This strongly suggests that  $\sigma_3$  axis rotated after the 2011 Fukushima Hamadori sequence and the stress magnitude in the focal area before the sequence was smaller than the static stress change ( $< \sim$ several MPa). We estimated the differential stress magnitude assuming that the difference in the stress tensor before and after the earthquakes is equal to the static stress change associated with the large earthquakes. Estimated magnitude of the differential stress was  $< 20$  MPa.

キーワード: 内陸地震, 地殻応力, メカニズム解, 摩擦強度

Keywords: crustal stress, focal mechanism, weak fault

岩石は変形の進行とともにどこまで軟らかくなれるのか? : 破壊—溶解反応—物質移動—沈殿クリープ  
To what degree can rocks become weak during deformation?: Fracturing-dissolution-mass transfer-precipitation creep

竹下 徹<sup>1\*</sup>; 岡本 あゆみ<sup>1</sup>  
TAKESHITA, Toru<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Ayumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学  
<sup>1</sup> Hokkaido University

地震後に1000年に一度生じることが判明したM9クラスの地震である東日本太平洋沖地震が生じた結果、日本列島の地殻ダイナミクスについて新たな事実が明らかとなって来た。その一つは、地殻の差応力問題に重要な示唆がもたらされたことである。東日本太平洋沖地震後には、普段地震が生じない場所で、従来とは型の異なる地震が生じた。その典型例がいわき市付近で生じた正断層型の大地震（福島県浜通り地震）であるが、この地域では巨大地震前には弱い東西圧縮の場にあったが、地震後には東西伸張の応力場に変化した。Yoshida et al. (2012)らは東日本太平洋沖地震による応力変化を推定し、地震前後の応力場を説明する差応力の最適値を計算した。その結果、地震前後で地殻中の差応力値はともに1MPa程度であることが推定された。

本講演では、この極めて低い差応力値が妥当であるとした場合、日本列島の地殻ダイナミクスについて浮上する新たな問題点、および岩石はこのような極低応力で変形出来るのか議論する。もし地殻中の差応力値が1MPaであるとする、地殻岩石の弾性定数は $10^{11}$  Paであるので、東北日本地殻中で発生する弾性歪は $10^{-5}$ 程度である。一方、Sagiya et al. (2000)によるGPS測定により東北日本の歪速度は $10^{-7}$ /yr程度と求められているので、活断層の再来周期として1000-10000年を採用すると、地震間に活断層近辺で $10^{-4}$ - $10^{-3}$ の歪が生じていることになる。ここで、上記の弾性歪の値が妥当であると仮定すると、地震間の全歪の内、弾性歪の割合は1-10%にすぎず、全歪のほとんどは塑性歪として生じていることになる。したがって、岩石のレオロジーの問題として、岩石は1MPaの差応力のもとで、 $10^{-7}$ /yr ( $10^{-15}$ /s)オーダーの歪速度を発生出来るほど十分軟らかいかが大きな問題として浮上する。

我々は、地殻上部の差応力を支配していると考えられる脆性塑性転移点付近の変形過程・機構を隆起・剝削により露出した天然の変形岩・断層岩中の微細構造解析を通じて研究している。脆性塑性転移点付近の岩石の変形挙動は、地殻の深いレベルで形成され、上昇してきた変成岩に良く見て取れる。なぜなら、変成岩は上昇過程で塑性領域から脆性領域へ脆性塑性転移点を通して上昇するからである。例えば、白亜紀に形成された三波川変成岩の石英片岩では、岩石が脆性塑性転移点で変形したことが準脆性的な微小断層の形成として記録されている。ここでは、石英層は断層で切れているにも拘わらず、極微細な動的再結晶粒子が断層に沿って形成されており、変形が塑性変形の成分も持つことを示す。動的再結晶粒子間には微細な白雲母粒子も形成されていて、流体が断層に沿って浸透したことを示唆する。変形量が増加すると、断層密度が高くなるほか、微細粒動的再結晶石英粒子と白雲母粒子からなる微細せん断帯の幅が増加し、レンズ状に残される非変形部分の体積分率が減少していく。おそらく、せん断帯の部分では圧力溶解沈殿クリープが極めて低応力で生じており、非変形レンズ部に応力集中が生じて新たな微細断層が生じると推察される。微細せん断帯の体積分率の増加に伴って、岩石は一方的に歪軟化すると考えられる。

やはり、同様の白亜紀の高圧変成岩である北海道神居古潭変成岩の脆性塑性転移点付近の条件で変形した変砂岩試料中では、伸張割目が形成され、破砕片が隔離した石英碎屑粒子が観察される。破砕片間では、石英のファイバー状粒子の成長（沈殿）が空隙を埋めるために生じているが、これはあたかも破砕された石英粒子を修復する作用のように見える。一方で、石英粒子と白雲母粒子境界では、石英粒子側に湾入が見られ、顕著な石英の溶解が両粒子境界で生じている。さらに、白亜紀に脆性塑性転移点付近の条件で形成された中央構造線カクレーサイトでも、破砕片の間は流体から沈殿した鉱物で埋められている。また、破砕作用の程度の増加とともに、流体を介した著しい元素移動が生じていることが判明してきた。結局のところ、脆性塑性転移点付近の変形は破壊—反応—物質移動—沈殿により生じており、この変形様式により著しい強度低下が生じると予想される。

キーワード: 地殻上部の差応力, 歪軟化, 微小破壊, 溶解反応, 物質移動, 鉱物の沈殿

Keywords: differential stress in the upper part of crust, strain softening, micro-fracturing, dissolution, mass transfer, precipitation of minerals

## 発震機構解から求めた2013年淡路島地震 (M6.3) 断層周辺の応力状態検出 Detecting the stress condition at a fault from focal mechanism: application to the 2013 Awaji Island earthquake (M6.3)

松本 聡<sup>1\*</sup>; 片尾 浩<sup>2</sup>; 飯尾 能久<sup>2</sup>

MATSUMOTO, Satoshi<sup>1\*</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>2</sup>; IIO, Yoshihisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山センター, <sup>2</sup>京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.

内陸地震発生域においては地震発生のポテンシャルを評価することが大変重要であるが現状では難しく、その方法を開発する必要が求められている。断層において地震が発生する条件として、せん断応力が断層の強度を超える必要がある。実際の断層においては、断層を含む領域全体が高応力で断層の強度が下がることにより発生する場合と、断層に応力が集中することで発生する場合が考えられる。この両者は地震前後の応力場変化から区別できると考えられる。本研究では領域の応力場を外部から載荷される応力と、断層における地震前の応力集中もしくは地震後の応力低下と等価なモーメントテンソルで表現し、地震前後の応力場変化から応力集中と差応力の絶対値を求めることを試みた。この方法を2013年4月に発生した淡路島での地震 (M6.3) の発震機構解データに適応した結果、地震前に応力が断層周辺に集中していることを示す解が最適になった。また、差応力としては約51MPaとなり、淡路島が現在も比較的応力の高い状態である可能性が求められた。本研究の方法を内陸地震断層周辺の地震活動データに適応することにより、地震発生のポテンシャルを求めるひとつの指標が得られるものと期待できる。

キーワード: 応力場, 地震断層, 発震機構解

Keywords: stress field, earthquake fault, focal mechanism



## 摩擦—流動構成則とその地震発生サイクルの2次元解析への応用 A friction to flow constitutive law and its application to a two-dimensional modeling of earthquake cycles

嶋本 利彦<sup>1\*</sup>; 野田 博之<sup>2</sup>

SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>1\*</sup>; NODA, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration, <sup>2</sup>JAMSTEC

摩擦から高温塑性変形をつなぐ構成則を確立することは、地震の発生、プレートの相互作用などをモデリングする上でも長い間大きな課題であった。摩擦法則と流動則を線形につなぐ構成則が提唱されているが、摩擦から流動への変化を再現した岩塩の実験データと全く合わない。我々は双曲線正接関数 (hyperbolic tangent) を使った簡単な式で、新しいパラメタを導入することなく、摩擦から高温塑性流動への変化が記述できることを示した (Shimamoto, 2004, JpGU; Shimamoto and Noda, 2010, AGU). Noda and Shimamoto (2012, JSG) はこの式を使って断層の安定性を解析している。講演ではこの構成則の特徴と実験データの比較をし、この構成則を用いて、リソスフェアを横切る断層の地震サイクル挙動についての解析結果を報告する。また、モデリングの結果に基づいて新しい断層モデルを提唱する。主な結果は以下の通りである。

(1) 摩擦—流動構成則は、岩塩剪断帯の摩擦領域、脆性—延性遷移領域、完全塑性領域の剪断変形実験結果 (Kawamoto and Shimamoto, 1997, Proc. IGC Beijing) と非常によい一致を示す。全ての実験データに構成則をフィットさせて、摩擦と流動パラメタをかなりよく再現することができた。

(2) 過去約 30 年間、リソスフェアの性質を記述するために 2 つの方法が使われてきた。ひとつは、摩擦強度と流動則をつないだ強度断面である (クリスマス・ツリーとも呼ばれる)。一方、地震発生のモデリングでは浅部の速度弱화가地震発生域の下部で速度強化に変わるモデルが使われてきた。前者には摩擦の速度依存が入っていないので地震発生のモデリングには使えないし、脆性—延性遷移領域の性質を記述することはできない。後者には、リソスフェア下部における流動の性質が組みこまれていない。摩擦—流動構成則は、統一した視点から両者を融合することができる。

(3) 摩擦—流動構成則を用いて地震発生サイクルの解析が可能であることを 2 次元解析でしめた。解析には境界要素を用いて、地震間の断層のゆっくりしたすべりと地震時の断層の動的挙動を解析している。流動則としては石英の流動則を用いた。摩擦—流動則は浅部では摩擦法則と変わらないので、地震発生時の断層の挙動はこれまでの速度依存性を変えたモデルの解析結果とよく似ている。遷移領域・流動領域の断層挙動は流動特性を反映しているので、今後地殻変動のデータとの比較が望まれる。

(4) すべり速度 (流動領域では歪速度) を仮定すると、摩擦—流動構成則を使って摩擦・遷移・流動領域における強度断面を描くことができる。この 3 分モデルを、地震発生サイクルにおける断層の挙動の全体像と対比することは可能である。しかし最大の問題は、地震発生領域においてはすべり速度が 10 桁以上も変わり、それに応じて強度断面のみならず、摩擦・遷移・流動領域の境界も地震サイクル中に変わってくることである。リソスフェアの強度断面は一定速度を仮定して決まるのではなく、リソスフェアを横切る断層の挙動に応じて自発的に決まることを示す。

(5) モデリングの結果では、地震時の断層運動は遷移領域における速度強化の性質をもつ領域に深く及んでいる。地震の後、震源域の下部約 3 分の 1 の領域では、断層クリープが深部から浅部に向かって広がって次の地震に至る。この領域では、地震性断層運動に断層クリープが重複しておこる。遷移領域の変形組織はマイロナイトの組織によく似ている。従って、このような断層運動は、世界のかなりの場所で報告されている「マイロナイト化したシュードタキライト」の産状をよく説明する。地震発生モデリングの結果に基づいて、中央構造線のような内陸大断層の構造と断層岩を見直す面白い。

(6) 石英・長石のような重要な鉱物を用いて摩擦から流動に至る剪断変形実験をおこなうことは容易ではない。摩擦—流動構成則は摩擦と流動則パラメタがあれば両者をつなぐ性質を予測できるので、実験条件を想定する上で実用価値がある。

キーワード: 摩擦—流動構成則, 地震発生サイクルのモデリング, 断層モデル, リソスフェア・レオロジー, マイロナイト, シュードタキライト

Keywords: Friction to flow constitutive law, Earthquake cycle modeling, Fault model, Lithosphere rheology, Mylonite, Pseudotachylite

## 内陸逆断層地震震源域の地震前の応力場の計算法についての考察 A consideration about computation of tectonic stress field for inland thrust earthquake

宮武 隆<sup>1\*</sup>  
 MIYATAKE, Takashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学・地震研究所  
<sup>1</sup>ERI, The Univ. of Tokyo

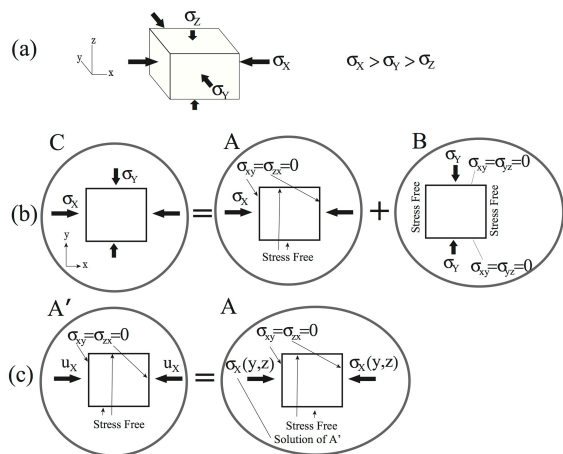
逆断層地震を駆動する応力システムを図 1a に示す。これは領域の協会に加わる応力系、従って領域解法での境界条件と考えることも出来る。ここで  $\sigma_z$  は静岩圧  $\sigma_v (= \rho gz)$  と仮定することもできる。これらから静岩圧を引き去ったものをあらためて図 1 a の応力  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  とする。その場合に  $\sigma_z$  はゼロになるが、実際には造構応力の z 成分もあるはずなので若干は残り、負になる可能性も有る。さて、図 1 で示すこの応力システムは、2つのシステム (図 1b) のように B と C に分解することができる。ただし  $\sigma_x$  と  $\sigma_y$  の深さ分布などはよくわかっていない。もし  $\sigma_x$  だけを加えて他の成分はゼロとするシステム A で  $\sigma_x$  が深さに対し一様であると仮定すると、断層面上の剪断応力と垂直応力は、深さによらず、ほとんど均一になる。この断層垂直応力に静岩圧  $\sigma_v (= \rho gz)$  が加えて、静摩擦係数、動摩擦係数をそれぞれ乗じると、断層強度 (ピークのストレス) と動的摩擦応力が推定できるのだが、自由表面で大きな応力降下、Strength Excess は地表で最小、深さと共に増加することになってしまう。すると、地震破壊は必ず地表から開始されることになる。もちろんこのことは必ずしも成立しないので誤った結論であり  $\sigma_x$  は深さによらず一定という仮定が正しくないことになる。もし  $\sigma_x$  が深さとともに増加するならば、上記の誤りは避けることができる。この深さ依存性は、弾性定数が深さと共に増加すると仮定し、境界に変位一定の境界条件を課すと生じることは明らかである。日本の内陸については、ストレス・フィールドは、主にプレート運動に起因しているはずで、境界条件としては変位条件が適当であると思われる (図 1c の A')。ここで  $\sigma_{xx}$  以外の応力成分はゼロである。上記の変位境界条件を課して (A') 静的弾性方程式を解き、結果として生じた境界面でのストレス構成要素を新たな境界条件として (今度は変位条件で無く応力条件として) 課して (図 1c の A) 静的弾性方程式を解くと、先の問題 (A') の解と同じになる。

実際に計算する場合に A で与える応力のみならず B で与える応力も既知ではない。しかし B のシステムが断層に及ぼす影響は非常に小さいと予想される。もし構造が一様ならば、B が作る断層面上の起震応力は、完全にゼロになるからである。構造が不均質の場合には完全にはゼロで無いが、実際に計算してみると A の作る応力のたかだか数%程度であることがわかった。従って B の影響は無視してよい。

結論として、図 1 a の逆断層地震の起震応力を計算する際に、A' の境界条件で計算してよさそうであることがわかった。

キーワード: 内陸地震, 応力

Keywords: inland earthquake, stress field



## 2011 年東北沖地震による 2008 年岩手・宮城内陸地震余震域への静的応力降下と地震活動の低下 Aftershock activity of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake suppressed by stress shadow of the 2011 Tohoku earthquake

鈴木 悠平<sup>1\*</sup>; 遠田 晋次<sup>2</sup>; 吉田 圭佑<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>3</sup>  
SUZUKI, Yuhei<sup>1\*</sup>; TODA, Shinji<sup>2</sup>; YOSHIDA, Keisuke<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 東北大学地震・噴火予知研究観測センター  
<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate school of Science, Tohoku university, <sup>2</sup>International Research Institute for Disaster Science, Tohoku university, <sup>3</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku university

東北地方太平洋沖地震(以下, 東北沖地震)によって, 東日本の各地で誘発地震活動が活発化した。それらは静的応力変化(例えば, Toda et al., GRL, 2011)や動的応力変化(Miyazawa et al., GRL, 2011), 間隙流体圧の変化(Terakawa et al., EPSL, 2013)などによって説明されている。一方で, 東北沖地震によって地震活動が静穏化したとされる地域はきわめて限られる。東北沖震源付近(Kato & Igarashi, GRL, 2012)と2004年中越地震余震域(廣瀬・遠田, 地震学会秋季大会, 2011), 2008年岩手・宮城内陸地震余震域(Suzuki & Toda, AGU fall meeting, 2013)のみである。そのうち, Suzuki & Toda (2013)は岩手・宮城内陸地震の余震活動の低下の原因を東北沖地震による静的クーロン応力(CFF)の低下に求めた。しかし, 余震域の断層(以下, レシーバ断層)の情報が少なく, 静穏化が応力低下によるものとの確認に至っていない。

そこで, 本研究では岩手・宮城余震域において既存データの約40倍となる4106個の発震機構データを求め, より詳細な応力/地震応答の時空間解析とモデル化を行った。メカニズム解は, 2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ・原子力安全基盤機構(JNES)による臨時観測データ, 東北大学・気象庁・防災科学技術研究所(Hi-net, F-net)の定常観測データを用いてHardebeck & Shearer (BSSA, 2002)の手法にしたがって求めた。気象庁初動解と精度の良いF-netモーメントテンソル(VR?80%)も併用した。得られたメカニズム解のほとんどは逆断層型と横ずれ断層型を示す。この2つの断層タイプの比率は空間的に不均質で, 余震クラスターごとに特徴がある。これらのクラスター別の静穏化を調べたところ, 余震域南部で逆断層, 横ずれ断層がそれぞれ卓越する2つのクラスターにおいて, 東北沖地震後の地震活動の低下が顕著であった。また, 得られた全てのメカニズム解節面を同余震域に潜在するレシーバ断層とし, Iinuma et al. (JGR, 2012)の東北沖地震の震源断層モデルを用いて $\Delta$  CFFを計算した。媒質は半無限均質弾性体(Okada, BSSA, 1992)を仮定し, 見かけの摩擦係数0.0, 0.4, 0.8の場合をそれぞれ計算した。その結果, 0.0の場合で80%以上, 0.8の場合では50%以上の節面で $\Delta$  CFFが負となった。また前述の2つのクラスターでは,  $\Delta$  CFFが負となる節面が卓越していたことがわかった。

$\Delta$  CFFによる地震応答は, 速度・状態依存摩擦構成則をもとにDieterich (JGR, 1994)によって定式化されている。ある時刻に応力がステップ状に増加した場合, 地震活動の急増の後ベキ乗則に従って時間減衰する(大森公式)ことが物理的に説明されている。このDieterichモデルによる地震活動の時系列計算には複数のパラメータが必要である。ここでは, 上記で得られた $\Delta$  CFFの他に, 2000年から岩手・宮城本震までの震源データから推定された常時地震活動レート, 東北沖地震までの余震活動から最尤法で推定された応力蓄積速度, 構成パラメータと法線応力の積 $A\sigma$ , 岩手・宮城本震に伴う $\Delta$  CFFをパラメータ値として採用した。これらの条件のもと, 上記の大量のレシーバ断層への $\Delta$  CFFを使った地震応答をすべて計算し, その平均値の時系列と観測された地震活動の時系列を比較した。その結果, モデルでは東北沖地震時に地震発生のステップ的な増加が起こり, 観測値とは整合しなかった。このモデルと観測との不一致の原因として, 1) 東北沖地震後の地震検知率低下による余震データの欠損, 2) 余効変動による応力蓄積速度の変化, 3) 流体による摩擦の低下(摩擦係数が0.0で差が最も小さい), などが考えられる。

謝辞: 本研究では, 2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ, 科学研究費補助金・新学術領域「地殻流体」および原子力安全基盤機構(JNES)による観測データを使用して推定したメカニズム解, 気象庁一元化処理震源, 気象庁初動解, F-netモーメントテンソルを使用しました。

キーワード: 誘発地震, 静的クーロン応力変化, 速度・状態依存摩擦則, 地震活動静穏化

Keywords: induced earthquake, static Coulomb failure stress change, rate-and state-dependent friction law, seismic quiescence



## 熱流体解析に基づくガス圧式高温高压岩石変形試験機の改良案の創出 Improvement of gas medium triaxial apparatus derived from thermal fluid analysis

竿本 英貴<sup>1\*</sup>; 重松 紀生<sup>1</sup>  
SAOMOTO, Hidetaka<sup>1\*</sup>; SHIGEMATSU, Norio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

装置の改良は、安全面に留意しながら所望の性能が発揮できるように行わなければならない。一般に、この過程では、試作、評価、改善、再試作と試行錯誤のループを何度も辿るため、多大な時間と費用がかかる。近年の装置設計と改良では、可能なかぎり試行錯誤にかかるコストを低減するため、数値計算によりこのループを代替させることが主流となりつつある。

高温・高压下での岩石の力学特性の高精度決定には、ガス圧式高温高压岩石変形試験機が用いられる。しかし国内の同装置は、熱設計が十分とは言えず高温での使用には限界があった。ここでは、試行錯誤のループを有限要素法に基づく熱流体解析によって代替させ、安価かつ安全に有用な装置改良案を創出することを目指す。

実験装置に対する熱流体解析で用いる支配方程式は、熱伝導方程式、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、気体の状態方程式の4つであり、これらを連立させて解くことで、装置部材内の温度場や封入ガスの流れ場を定量的に把握することができる。

熱流体解析を実施した結果、(1) 固体部材の温度場に対する封入ガスの影響は大きくないこと、(2) 熱源近くの断熱材の温度は、材料の耐熱温度以下となること、(3) 樹脂製 O-リング周辺での温度勾配が著しく大きいこと、などの情報を定量的に把握することができた。これらの知見に基づいて、樹脂製 O-リングに接する部材の材質変更、断熱材の材質変更、治具の輻射率の改善など、いくつかの有用な改良指針を得ることができた。

キーワード: 熱, 流体, ナビエ・ストークス, 状態方程式, ガス圧式高温高压岩石変形試験機

Keywords: heat, fluid, Navier-Stokes, equation of state, gas medium triaxial apparatus



## 反射法地震探査による北美濃地域の地下構造の推定 The crustal structure beneath northern Mino region, central Japan revealed by seismic reflection survey

江元 智子<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>1</sup>; 藤原 明<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 小嶋 智<sup>3</sup>; 狩野 謙一<sup>4</sup>; 小村 健太郎<sup>5</sup>; 武田 哲也<sup>5</sup>; 浅野 陽一<sup>5</sup>; 小原 一成<sup>6</sup>; 伊藤 谷生<sup>7</sup>

EMOTO, Tomoko<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>1</sup>; FUJIWARA, Akira<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; KOJIMA, Satoru<sup>3</sup>; KANO, Ken-ichi<sup>4</sup>; OMURA, Kentaro<sup>5</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>5</sup>; ASANO, Youichi<sup>5</sup>; OBARA, Kazushige<sup>6</sup>; ITO, Tanio<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>(株)地球科学総合研究所, <sup>3</sup> 岐阜大学工学部, <sup>4</sup> 静岡大学防災総合センター, <sup>5</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所, <sup>6</sup> 東京大学地震研究所, <sup>7</sup> 帝京平成大学

<sup>1</sup>Chiba University, <sup>2</sup>JGI, Inc., <sup>3</sup>Gifu University, <sup>4</sup>Shizuoka University, <sup>5</sup>NIED, <sup>6</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>7</sup>Teikyo-Heisei University

中部日本の北西部に位置する北美濃地域では1891年に日本国内最大級の内陸地震である濃尾地震が発生した。本地域の活断層の走向やメガキンク褶曲(狩野・他, 1990)の軸の方向は、概ね南東-北西方向を示し、この地域に沈み込むフィリピン海プレート(PSP)もまた南東-北西方向の軸を持つ尾根状の形状をしている。しかし、沈み込むプレートが地質の変形に与える影響を議論するための、地殻~上部マントルについての詳細な地震学的構造はまだ解明されていない。

本地域の地殻構造を明らかにするため、2009年10月に反射法地震探査が行われた(駒田・他, 2010)。測線は根尾谷断層帯と高角に交わっている。この探査のショット記録に反射法解析を適用し地殻~上部マントルまでの反射断面を作成した。

得られた反射断面からは往復走時10秒付近に約2秒継続する反射波群が見られた。反射波群は対象地域の南西側では9~11秒、北東側では10~12秒で見られた。深度変換をすると南西側でおよそ28~37km、北東側で約32~39kmに反射波群が分布していた。反射波群の上端・下端は根尾谷断層帯の北東側に比べ南西側の方が深い位置にあることが分かった。特に南西から北東への深度の変化は根尾谷断層帯の下で見られる。これらの反射波群の深度の特徴は本地域での速度解析の結果(江元・他, 2012)と一致する。

往復走時10秒付近の反射波群は既存の反射断面を比較することで下部地殻ラミネーションと解釈している。この下部地殻ラミネーションの形状の特徴は、根尾谷断層帯の濃尾地震時の変位方向(松田, 1974)と調和的である。このことから、反射波群の南西側と北東側での深度の差は、根尾谷断層帯の変位によって生じたもので、根尾谷断層帯の変位が下部地殻にまで及んでいる可能性が示唆された。また先行研究で推定されているPSPの上面深度と下部地殻ラミネーション下端の深度を比較すると、根尾谷断層帯の南西側は深度おおむね一致する。従って、北美濃地域の南西側ではフィリピン海プレートの上面と陸側の下部地殻が接触している可能性がある。

キーワード: 下部地殻, 根尾谷断層, 反射法地震探査, フィリピン海プレート, 北美濃

Keywords: lower crust, Neodani fault, reflection seismic survey, Philippine Sea Plate, northern Mino region

## 市販 IC レコーダを用いた茨城県北部における臨時微小地震観測について Temporary observation of micro earthquakes in the northern Ibaraki prefecture by using commercially-supplied IC recorder

齊藤 佳佑<sup>1\*</sup>

SAITO, Keisuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 齊藤 佳佑, <sup>2</sup> 勝俣 啓

<sup>1</sup> KEISUKE SAITO, <sup>2</sup> KEI KATSUMATA

P 波初動極性を用いて震源メカニズム解を推定する場合、その精度を高めるためには、高密度な地震観測網が必要であり、その実現のためには、できるだけ安価な地震観測システムを開発する必要がある。そこで、本研究では、初動極性の読み取りに特化した、機能を必要最低限に抑えた地震観測システムを提案する。用いた地震計は約 1 万円の上下動地震計で、市販されている約 1 万円の IC レコーダをデータロガーとして用いた。IC レコーダの仕様書によると、IC レコーダの記録可能周波数は 60~3400 [Hz] であるが、防災科学技術研究所 Hi-net の観測点と IC レコーダを用いた観測点で記録した地震波の周波数特性を比較した結果、20~30 [Hz] 程度の波も記録できることがわかった。

本研究では、正断層型の微小地震が多発している茨城県北部において 2012 年 8 月から約 1 か月間、臨時微小地震観測を行い、本研究で考案した地震観測システムの有効性を検討した。設置した臨時観測点数は全 29 点である。観測点設置の際は、実際の群発地震を想定し、全観測点を 1 本の道路沿いに設置することで、観測点設置に要する時間の短縮を図った。観測点設置から約 1 か月後に回収作業を行った後、P 波初動極性の読み取りを行い、震源メカニズム解の推定を行った。震源メカニズム解の計算は HASH プログラム [Hardebeck and Shearer (2002)] を用いて行い、推定した震源メカニズム解の個数は 87 個である。

また、推定した震源メカニズム解の精度を検証するため、東京大学地震研究所の臨時観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解との比較を行った。比較に当たっては、防災科学技術研究所 Hi-net の観測点も併せて、東京大学地震研究所の臨時観測点と Hi-net の観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解 (以下、この観測点の組み合わせを①とする) と、IC レコーダを用いた臨時観測点と Hi-net の観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解 (以下、この観測点の組み合わせを②とする) との比較を行った。また、①と②に対して、推定した 87 個の震源メカニズム解の P 軸と T 軸を比較した結果、震源球上のほぼ同じ位置に分布していたことから、両者の推定精度に対して有意な差はないと言える。したがって、IC レコーダの観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解は、従来通りの 3 成分地震計のデータを用いて推定した震源メカニズム解とほぼ同程度の精度を有していると言える。

## 2011年東北沖地震後の東北日本弧の粘弾性変形過程のモデル化 Modeling the viscoelastic deformation of the NE Japan arc after the 2011 Tohoku-oki earthquake

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>; 中井 仁彦<sup>1</sup>; 武藤 潤<sup>2</sup>; 飯沼 卓史<sup>3</sup>

SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>1\*</sup>; NAKAI, Yoshihiko<sup>1</sup>; MUTO, Jun<sup>2</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>3</sup> 東北大学災害科学国際研究所

<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University, <sup>3</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

The rheological structure of the Northeastern Japan arc crust and the upper mantle is heterogeneous along and transverse to the arc. Shibazaki et al. (2014) developed a model of the stress state of the Northeastern Japan island-arc crust using a finite element method with viscoelasticity and elastoplasticity. They reproduced several elongated low-stress regions transverse to the arc with viscous deformation that corresponds to hot fingers (high-temperature regions in the mantle wedge). The viscous relaxation process after the 2011 Tohoku-oki earthquake could be affected by the existence of low-viscosity regions caused by hot fingers. A three-dimensional (3D) finite element model was developed to investigate the viscoelastic deformation processes with heterogeneous viscosity distribution after the 2011 Tohoku-oki earthquake. The model considers the realistic crustal and mantle structures, viscoelasticity (Maxwell or Burgers rheology), and coseismic fault slip distribution obtained by Iinuma et al. (2012). For simplicity, only the elastic crust and viscoelastic mantle structure were considered. The westward movement near the trench and eastward movement in the inland region due to viscoelastic relaxation were reproduced, which are consistent with the observations. We also consider the local low viscosity region in the Northeastern Japan arc crust. In this case, extensional viscous strain concentrates on this region. We report the numerical results that take into account the realistic 3D heterogeneous viscosity distribution in the crust and the upper mantle beneath the Northeastern Japan island arc.

キーワード: 2011年東北沖地震, 東北日本弧, 粘弾性変形

Keywords: 2011Tohoku-oki earthquake, NE Japan arc, Viscoelastic deformation

## 2011年東北地方太平洋沖地震の表面波による南アフリカ金鉱山における断層の挙動 Rheological phenomena of Zebra fault in South Africa goldmine by the 2011 Tohoku earthquake's surface waves

大久保 慎人<sup>1\*</sup>; 小笠原 宏<sup>2</sup>; 中尾 茂<sup>3</sup>; 村上 理<sup>2</sup>; 石井 紘<sup>1</sup>

OKUBO, Makoto<sup>1\*</sup>; OGASAWARA, Hiroshi<sup>2</sup>; NAKAO, Shigeru<sup>3</sup>; MURAKAMI, Osamu<sup>2</sup>; ISHII, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科研, <sup>2</sup> 立命館大, <sup>3</sup> 鹿児島大

<sup>1</sup> TRIES, <sup>2</sup> Ritsumeikan Univ., <sup>3</sup> Kagoshima Univ.

2011年東北地方太平洋沖地震では日本各地に大きな被害が生じた。主破壊に伴い約100 km離れた地殻変動観測点において $10^{-5}$  オーダーの動的ひずみが観測され、1 m オーダーの地表変位が観測されていることから震源近傍の変動の巨大さ(=マグニチュード)が容易に想像できる。一方、震源地から14,000 km離れ、ほぼ地球の裏側に位置する南アフリカにおいても東北地方太平洋沖地震の影響を見ることができる。立命館大学が主導する「科研費基盤研究S:南アフリカ金鉱山におけるM2震源域での地震の準備と発生過程の総合観測(2009-2013)」および「SATREPS:鉱山での地震被害低減のための観測研究(2010.8-2015.8)」プロジェクトでは、地下数kmまで実際に行き、観察し、観測計器を設置できる金鉱山の利点を生かし、多くの南アフリカ金鉱山で微小地震(AE)活動観測やひずみ観測等が精力的におこなわれている。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に南アフリカ金鉱山内に設置されたひずみ計で観測されたひずみ地震動記録を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震に伴うひずみ地震動主要動および表面波の解析を行った。南アフリカ共和国首都ヨハネスブルクの南西約30 kmに位置するCooke<sup>4</sup> 鉱山(プロジェクト開始時はEzulwini 鉱山とよばれていた)の地下1 kmの地点では坑道内にZebra Faultと呼ばれる、活動的ではないと考えられる断層を見ることができた。SATREPSプロジェクトによって、この断層を挟むように石井式ボアホールひずみ計が設置され、現在も観測が継続されている。

ひずみ地震動記録の精査の結果、震源から14,000 km離れた南アフリカにおいても、おおよそ $10^{-7}$ の振幅をもつひずみ地震動(SS; 地表で1度反射するS波、表面波一ラプ波やレイリー波)が明瞭に観測されていた。また、記録から断層を取り囲むひずみ場の時間変動を推定したところ、地震波動の通過に対応して、断層幅が膨張する、もしくはずれひずみの増大するようなひずみ場の変動がみられた。本発表では、南アフリカにおける観測の状況や断層観察を交えながら、2011年東北地方太平洋沖地震によって生じた南アフリカ金鉱山内の断層挙動について発表を行う。

キーワード: 表面波, Zebra 断層, ひずみ地震動, SATREPS

Keywords: Surface waves, Zebra fault, Dynamic strain, SATREPS



## Relationship between ESR signal intensity and grain size distribution in shear zones within the Atotsugawa fault system Relationship between ESR signal intensity and grain size distribution in shear zones within the Atotsugawa fault system

Fantong Emilia Bi<sup>1\*</sup>; 竹内 章<sup>1</sup>; KAMISHIMA Toshio<sup>1</sup>; 道家 涼介<sup>2</sup>  
FANTONG, Emilia bi<sup>1\*</sup>; TAKEUCHI, Akira<sup>1</sup>; KAMISHIMA, Toshio<sup>1</sup>; DOKE, Ryosuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555., <sup>2</sup>Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture, 568 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555., <sup>2</sup>Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture, 568 Iriuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Shear zones are zones of strong deformation within active faults and constitute significant sources of information on the seismogenic behavior of faults. The Atotsugawa fault system, which is in the Northern margin of the Hida Highland lies within a complex tectonic zone consisting of the Pacific plate, the Philippine Sea plate, the Amurian plate and the Okhotsk plate. This system consists of the Ushikubi fault, the Atotsugawa fault and the Mozumi-Sukenobe fault. The study of deformational fabrics and features within these shear zones can give more clarification on geodynamics of faults. Moreover, seismogenic behavior of a fault depends greatly on fault zone internal structure and fault rock constitutive properties. Although there are many studies on shear zone descriptions and deformational mechanisms, only few relate the description of cataclastic rocks (fault gouge) with Electron spin resonance (ESR) signals, which is based on the detection of paramagnetic defects in minerals produced by natural radiation that have accumulated for a long time and produces a characteristic signal detectable with an ESR spectrometer. By measuring the intensity of these trapped electrons, the rate of comminution and displacement of a fault can be clarified or envisaged. This study therefore focuses on the relationship between grain size distribution (sieve method) and ESR analysis, and rate of deformation with proximity to a slip plane.

Three shear zones from both the Atotsugawa and the Ushikubi fault were investigated. Sieve analysis and photomicrographs from thin sections revealed that grain size becomes coarser away from the slip plane (e.g. Fig.1a and Fig.2) indicating that the effect of displacement is more close to the slip plane. However, an irregular pattern in the grain size distribution was equally observed in some of the shear zones. This could be due to multiple phases of deformation. ESR analysis showed a decreasing trend in the intensity of signals toward the fault plane (Fig. 1b and Fig. 2) indicating that the rate of comminution was more intense towards the slip plane. However, the decreasing trend in ESR signal intensity with proximity to the slip plane was not observed in some of the shear zones probably due to multiple phase of deformation as indicated by the anatomizing faults in the shear zone II of the Ushikubi fault.

Results from ESR analysis suggest that samples closest to a slip plane will have low signal intensity than those further away while grain size distribution analyses indicates that samples closest to a slip plane become finer due to intensive crushing that is always associated with large displacement during fault activities.

キーワード: Active fault, Shear zones, ESR signal intensity, Grain size distribution, Atotsugawa fault system  
Keywords: Active fault, Shear zones, ESR signal intensity, Grain size distribution, Atotsugawa fault system

SSS32-02

会場:315

時間:5月1日 09:15-09:30

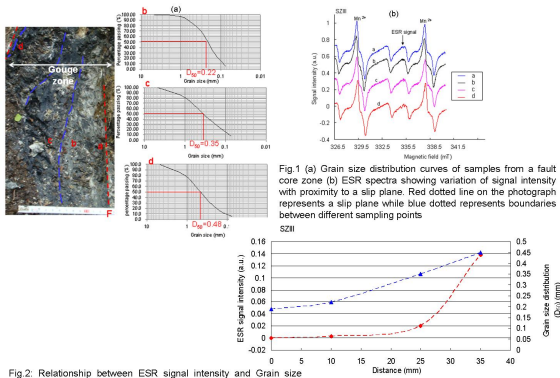


Fig 2: Relationship between ESR signal intensity and Grain size distribution. The intensity of ESR signal increases with proximity to the slip plane. By plotting the  $D_{50}$  of samples taken with proximity to the slip plane, it can be seen that grain size becomes coarser away from the slip plane.

## 1999年台湾集集地震時におけるスリップゾーンでの物理-化学-メカニカルプロセス Physico-chemo-mechanical processes in a slip zone during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake

廣野 哲朗<sup>1\*</sup>; 亀田 純<sup>2</sup>; 神田 大樹<sup>1</sup>; 谷川 亘<sup>3</sup>; 石川 剛志<sup>3</sup>

HIRONO, Tetsuro<sup>1\*</sup>; KAMEDA, Jun<sup>2</sup>; KANDA, Hiroki<sup>1</sup>; TANIKAWA, Wataru<sup>3</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 北海道大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Osaka Univ., <sup>2</sup>Hokkaido Univ., <sup>3</sup>JAMSTEC

To investigate the physicochemical processes of minerals during and after slip of the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake, we analyzed the mineral assemblages in the Chelungpu fault by using quantitative X-ray diffraction together with scanning and transmission electron microscope observations. In the primary slip zone, we found markedly low contents of quartz and clay minerals and large amounts of amorphous particles ranging in size from submicrometer to several tens of nanometers. Milling and heating experiments with host-rock samples indicated that these mineralogical changes are due to comminution and frictional heat during slip. Moreover, the changes may affect slip behavior through a mechanism such as thermal pressurization assisted by clay-mineral dehydration. In addition, preservation of a high amount of amorphous fine particles can potentially be used to identify the slip zone of the latest earthquake on not only the Chelungpu fault but also on other faults.

キーワード: メカノケミカル, アモルファス

Keywords: mechanochemical, amorphous

## 台湾チェルンプ断層における炭質物の分光分析による熱履歴解析 Characterization of carbonaceous materials in the Taiwan Chelungpu fault by micro FTIR- Raman spectroscopies

前川 由佳<sup>1</sup>; 廣野 哲朗<sup>1\*</sup>; 藪田 ひかる<sup>1</sup>  
MAEKAWA, Yuka<sup>1</sup>; HIRONO, Tetsuro<sup>1\*</sup>; YABUTA, Hikaru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

<sup>1</sup> Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地震時の断層面での摩擦発熱履歴の評価は、地震の滑り挙動およびメカニズムの理解において極めて重要である。1999年台湾集集地震で活動したチェルンプ断層では、地震時の滑り面である黒色ガウジ帯において、摩擦発熱に起因すると考えられる無機炭素量の減少、帯磁率の増加、粘土鉱物の減少、微量元素組成および Sr 同位体比の異常が報告され、地震時に 400 °C 以上の発熱を経験したと示唆されている。しかし、正確な最高温度は未だ十分に解明されていない。そこで、熱に対して不可逆的に変化し温度履歴を敏感に反映する炭質物に着目し、地震による断層中の炭質物の分子化学構造の変化に基づく最高温度の評価について検討した。

本研究では、試料としてチェルンプ断層の PSZ (primary slip zone: 主滑り帯) を含む掘削試料中の炭質物を対象とし、赤外分光分析およびラマン分光分析を実施した。また、地震時の瞬間的な摩擦発熱を考慮した温度評価を行うため、摩擦発熱を模擬した母岩の炭質物の加熱実験 (昇温速度: 10, 500 K/min., 到達温度: 100-900 °C) および中-高速摩擦実験 (滑り速度: 0.01-1 m/s, 到達温度: 40-310 °C) を行い、断層試料と同様に赤外分光分析およびラマン分光分析を実施した。

その結果、剪断が集中した PSZ では上下の未変形な岩石の層と比較して、地震時の摩擦発熱を反映すると考えられる炭質物の部分的な分解を示唆する変化が認められた。さらに、その炭質物の分解の程度より最高到達温度は 700 °C 未満であると示唆され、先行研究の結果を考慮すると、PSZ における集集地震時の摩擦発熱温度は 400 °C 以上 700 °C 未満であると推定される。

キーワード: 台湾集集地震, 炭質物, 赤外分光分析, ラマン分光分析

Keywords: Taiwan Chi-Chi earthquake, carbonaceous materials, FTIR spectroscopy, Raman spectroscopy



## ドレライト粉砕ガウジの低～高速摩擦特性 Frictional properties of ground dolerite gouges at low to high slip velocities

和田 純一<sup>1</sup>; 北島 弘子<sup>2</sup>; 高橋 美紀<sup>2</sup>; 大橋 聖和<sup>1</sup>; 井上 厚行<sup>1</sup>; 金川 久一<sup>1\*</sup>  
WADA, Jun-ichi<sup>1</sup>; KITAJIMA, Hiroko<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Miki<sup>2</sup>; OOHASHI, Kiyokazu<sup>1</sup>; INOUE, Atsuyuki<sup>1</sup>; KANAGAWA, Kyuichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University, <sup>2</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan

鉄乳鉢で粉砕した粒径 500  $\mu\text{m}$  以下のドレライト試料を、自動瑪瑙乳鉢を使用して 10 分から 60 時間までさらに粉砕し、粉砕時間による摩擦特性の変化を検討した。粉末 X 線回折分析の結果、粉砕時間 10 分間の試料には非晶質物質は含まれず、粉砕時間の増加に伴って非晶質物質含有量が約 40 wt% まで増加した。また、6 時間以上粉砕した試料には、非晶質微粒子から成る球状粒子が多く含まれることが明らかとなった。この球状粒子は、火山豆石のように、非晶質微粒子が帯電と水分の吸着により凝着して形成されたものと考えられる。実際、熱重量分析により、粉砕時間が長く非晶質物質を多く含む試料ほど水分を多く含む (最大約 14 wt %) ことが明らかとなった。

上記ドレライト粉砕ガウジ試料について、室温、垂直応力 2 MPa、変位速度 20  $\mu\text{m/s}$  - 1.3 m/s の範囲で回転剪断実験を行った。1.3 cm/s 以下の低変位速度ではすべり面の温度は 70 °C 以下、定常摩擦係数は 0.59-0.75 で、同一変位速度では粉砕時間の長い試料ほど定常摩擦係数が大きくなる傾向が認められた。変位速度 4 cm/s ではすべり面の温度が 100 °C 以上に達し、定常摩擦係数は 0.60-0.66 で、粉砕時間による定常摩擦係数の差が小さくなった。変位速度 13 cm/s 以上ではすべり面の温度が 180 °C 以上に達し、変位速度の増加に伴って定常摩擦係数が大きく低下し、同一変位速度における定常摩擦係数は粉砕時間の長い試料ほど小さくなる傾向が認められた。

このような粉砕時間によるドレライト粉砕ガウジの摩擦強度の違いは、非晶質ガウジに吸着した水分量の差に起因すると考えられる。1.3 cm/s 以下の低変位速度では、すべり面の温度が 100 °C 未満のため非晶質ガウジに吸着した水分が保持され、水分を多く吸着した粉砕時間の長い試料ほど非晶質粒子間の毛管凝縮によって凝着力が高まり、摩擦強度が大きくなったと考えられる。一方、変位速度 4 cm/s では、摩擦発熱によりすべり面の温度が 100 °C 以上に達し、非晶質ガウジが脱水して非晶質ガウジ粒子間の凝着が失われたため、粉砕時間による摩擦強度の違いが小さくなったと考えられる。さらに、13 cm/s 以上の高変位速度では、非晶質ガウジからの脱水による水蒸気の発生速度がそのリーク速度より大きくなって、水蒸気がガウジ層内に保持されたため間隙圧が上昇し、その結果、水分を多く吸着していた粉砕時間の長い試料ほど間隙圧が大きく上昇して、定常摩擦強度が小さくなったと考えられる。

キーワード: ドレライト, 粉砕ガウジ, 摩擦特性, 非晶質ガウジ, 水分吸着

Keywords: dolerite, ground gouge, frictional properties, amorphous gouge, moisture adsorption

## 海陸地殻変動観測に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動モデル Modelling of the postseismic deformation of the 2011 Tohoku Earthquake based on land and seafloor geodetic observations

飯沼 卓史<sup>1\*</sup>; 日野 亮太<sup>1</sup>; 木戸 元之<sup>1</sup>; Sun Tianhaozhe<sup>2</sup>; Wang Kelin<sup>3</sup>; 太田 雄策<sup>4</sup>; 長田 幸仁<sup>1</sup>; 藤本 博己<sup>1</sup>; 稲津 大祐<sup>5</sup>

IINUMA, Takeshi<sup>1\*</sup>; HINO, Ryota<sup>1</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>; SUN, Tianhaozhe<sup>2</sup>; WANG, Kelin<sup>3</sup>; OHTA, Yusaku<sup>4</sup>; OSADA, Yukihito<sup>1</sup>; FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>; INAZU, Daisuke<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> ヴィクトリア大学, <sup>3</sup> カナダ地質調査所, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>5</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Victoria University, <sup>3</sup>Geological Survey of Canada,

<sup>4</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>5</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

### はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う余効変動は、本震発生から3年近くが経過した現在においても、陸上及び海底での地殻変動観測により、有意な大きさの変動として捉え続けられている。飯沼・他(2013, 地震学会秋季大会)は、GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測及び圧力計を用いた海底水圧観測によって推定された海底地殻変動データと、陸上GPS観測により得られた変位時系列データを共に説明するためには、余効すべりやプレート間の固着の回復といった、沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートとの境界で生じる摩擦・すべり現象に起因する弾性変形だけでなく、粘性緩和等の非弾性的な要因による変形のモデル化が不可欠であることを示した。これを踏まえ、より現実的な余効変動のモデルの構築のため、有限要素法を用いて、沈み込むスラブの形状や海洋性及び大陸性それぞれのマンツルの粘性の違いを考慮したモデルを作成し、これを用いて粘性緩和による変位を推定することとした。また、地殻変動観測により得られた変位時系列データから、有限要素モデルにより計算された粘性緩和による変位を差し引いたものが余効すべりによる変位であるとの仮定のもとに逆解析を行って、余効すべり分布の時空間発展の推定を行った。本講演では、これらの結果を紹介し、また、粘性構造の仮定の違いが余効すべり分布の推定に与える影響について議論を行う。

### データおよび解析手法

GPS/音響測距結合方式の海底地殻変動観測データ、自己浮上式の海底圧力計で記録された水圧データから推定される海底上下変位データ、並びに陸上のGPS連続観測点での変位時系列データを用いる。海底水圧データについて一次的な解析を行ったところ、取得されている期間については、すべての圧力観測点に関して共通の緩和時間を持つ対数関数を用いて観測データを近似できることが分かったので、各観測点での振幅を推定し得られた対数関数を用いて圧力計揚収後の水圧データを外挿的に補完した。解析期間中に発生した地震に伴う変位については、気象庁のCMTカタログを用いて期待される変位量を計算し、測地学的観測から求められた変位時系列データからこれを差し引くことで補正を行った。

粘性緩和による変位の見積りには有限要素法を用いた。沈み込むスラブの形状、海洋性プレートと大陸性プレートそれぞれのマンツルの粘性の違い等を反映させて、また、マンツルウェッジ部分には高粘性領域を設定した。海底地殻変動データを用いて推定されたIinuma et al. (2012)の地震時すべりモデルを初期値として与えて粘性流動を駆動させることによって、粘性緩和から期待される変位時系列を作成した。

これらを観測された変位時系列から差し引いて、余効すべりによると思われる成分のみを、Yagi and Kikuchi (2003)に基づく時間依存逆解析手法を用いて解析し、余効すべりの時空間発展を推定した。

### 結果

有限要素法による計算の結果を見ると、西向きの変位を示していた海底観測点の動きは粘性緩和によって十分説明可能である一方、岩手県南部から茨城県北部にかけての陸上GPS観測点においては、観測された値よりも大きな東向きの変位が計算されている。そのため、今度は陸域における西向きの変位を余効すべりによって説明する必要が生じてしまっている。この変位時系列を逆解析すると正断層型のすべりが分布する領域が現れる。正断層型のすべりが推定されること自体は、水平成層構造を仮定して粘性緩和による変位を見積もった場合と同じであるが、その位置は大きく異なる。水平成層構造を仮定した場合に地震時すべりが大きかった領域内に推定されていたのに対し、不均質構造を仮定して有限要素法を用いて計算した場合には、宮城県沖の沖合、地震時すべりが大きかった領域よりもやや深いところに正断層型のすべりが分布する。正断層型のすべりが推定されていることは、プレート間の固着がそこで生じていると考えることができるため、その位置及びすべりレートを精度よく見積もることはプレート境界の摩擦特性を考えるに非常に重要である。ゆえに、その推定が粘性緩和の見積りに大きく依存してしまうのは避けるべき問題であり、今後、より尤もらしい粘性緩和による変位を推定するため、モデルを現実の構造に即して高度化していく必要がある。当日の講演において

SSS32-06

会場:315

時間:5月1日 10:15-10:30

は、最新のモデルを用いた解析結果を紹介する予定である。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 粘性緩和, 余効すべり, GPS, 海底地殻変動

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Postseismic deformation, Viscoelastic relaxation, Postseismic slip, GPS, Seafloor crustal deformation

## 大型二軸摩擦実験によって示された岩石摩擦のスケール依存性 Scale dependency of rock friction strength revealed by large scale biaxial friction experiment

山下 太<sup>1\*</sup>; 福山 英一<sup>1</sup>; 溝口 一生<sup>2</sup>; 滝沢 茂<sup>3</sup>; 川方 裕則<sup>4</sup>

YAMASHITA, Futoshi<sup>1\*</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>2</sup>; TAKIZAWA, Shigeru<sup>3</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 電力中央研究所, <sup>3</sup> 筑波大学, <sup>4</sup> 立命館大学

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>CRIEPI, <sup>3</sup>Tsukuba Univ., <sup>4</sup>Ritsumeikan Univ.

我々は自然地震のスケール ( $\sim 10^3$  m) と室内実験のスケール ( $\sim 10^{-2}$  m) の間のギャップを埋める目的で、メートルサイズの岩石試料を用いた大型二軸摩擦実験を実施した。岩石試料として1組の直方形インド産ギャブロを用い、その接触面積(模擬断層面積)は  $1.5 \times 0.1 \text{ m}^2$  であった。実験は 1.3, 2.7 および 6.7 MPa の垂直応力下において  $10^{-4}$  から  $3 \times 10^{-2}$  m/s の載荷速度でおこなわれた。垂直およびせん断荷重はロードセルを用いて測定した。以後、測定したせん断荷重を垂直荷重で除した値を摩擦係数と呼ぶ。回転せん断摩擦試験機を用いた室内実験により、岩石の摩擦係数は高いすべり速度領域においてすべり速度依存性を持つことが示されている(例えば Di Toro *et al.*, 2011, Nature)。我々は本実験においてメートルサイズの岩石試料が同様の摩擦特性を持つことを確認した。すなわち、摩擦係数は低い載荷速度 ( $10^{-4}$  から  $10^{-3}$  m/s) においては 0.75 でほぼ一定であるがおよそ  $10^{-2}$  m/s を越えると急激に低下することを確認した。メートルサイズの岩石試料を用いた実験でこのような速度弱化特性が確認されたことは世界で初めてである。ただし、メートルサイズ試料の摩擦係数は垂直応力に対しても弱い依存性を示すことが確認された。このことはすべり速度が摩擦特性を支配する唯一の要素ではないことを意味している。そこで、垂直応力の寄与も含む、仕事率に対する依存性を調べた。これまでの室内実験では、摩擦係数は低い仕事率ではほぼ一定であるが自然地震の条件に近づくにつれて低下することが示されている(例えば、Di Toro *et al.*, 2011; Mizoguchi and Fukuyama, 2010, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.)。メートルサイズ試料での摩擦係数と仕事率の関係を調べたところ、摩擦係数が  $10^{-2}$  MJ/m<sup>2</sup>s 以上の仕事率において急激かつ明瞭な減少を示すことが明らかとなった。この明瞭な依存性は、摩擦特性がすべり速度ではなくむしろ仕事率に依存していることを示している。Di Toro *et al.* (2011) は、仕事率と断層面上の温度上昇率は比例関係にあり、摩擦仕事によってつくられた摩擦熱が岩石鉱物の物理化学的遷移とそれによる弱化を引き起こしていると主張している。本実験においても同様のメカニズムが働き摩擦強度を下げていていると考えられるが、メートルサイズの摩擦係数は小さな試料を使って推定された摩擦係数に比べ1桁小さな仕事率から低下が始まっている。我々は、この差異が断層面上のせん断応力不均質に起因していると予測し、大型二軸摩擦試験機によって断層面上に作り出される不均質な応力分布と、その応力条件下での仕事率に依存する巨視的な摩擦弱化特性を推定した。さらに我々は、さらなる応力不均質が存在する場合の弱化特性の推定もおこなった。これらの推定から、応力不均質が強いほど小さな仕事率で巨視的な摩擦係数が低下することを確認した。一般にスケールが大きくなるにつれて空間的不均質性が強くなる傾向にあることを考慮すると、岩石の摩擦特性はスケール依存性を持つ可能性があると考えられる。

キーワード: 岩石摩擦, 二軸摩擦実験, スケール依存性, 仕事率

Keywords: Rock friction, Biaxial friction experiment, Scale dependency, Work rate



変堆積岩中のグラファイトを含むシュードタキライト: グラファイトの酸化による  
CO<sub>2</sub>脱離の示唆  
Graphite-bearing pseudotachylytes in metasediment: Implication for CO<sub>2</sub> degassing by  
oxidation of graphite

中村 佳博<sup>1\*</sup>; Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>2</sup>; 豊島 剛志<sup>2</sup>  
NAKAMURA, Yoshihiro<sup>1\*</sup>; MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>2</sup>; TOYOSHIMA, Tsuyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新潟大学 自然科学研究科, <sup>2</sup>新潟大学 理学部地質科学科

<sup>1</sup>Graduate School of Science & Technology, Niigata University, <sup>2</sup>Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

Graphite in fault rocks has important role in controlling the redox states in COH fluid, and many researchers have pointed out that the behavior of fluid in pore water or hydrous minerals dramatically change the physical and chemical property of fault rocks. Recently, the CO<sub>2</sub> degassing, form possible biogenic sources, along the faults is monitored in various active faults (e.g. Lewickie and Brantley, 2000). It is expected that the behavior of graphite in fault rocks play a key role about the fluid composition and the physicochemical properties. Here we present a detailed analysis of graphite found in pseudotachylyte and discuss the relationship between graphite and fluid during earthquake activity.

Graphite-bearing pseudotachylyte in Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan was examined using SEM, EMPA, and XRD. In pseudotachylyte-bearing cataclasite, melt-induced textures such as biotite microlites, shell textures of Fe-oxide, flow textures, spherulites and vesicles in Fe-oxide are observed. On the basis of microtextures, mineral assemblages of melted and survived minerals, pseudotachylytes are divided into two types; Pst I and Pst II. The matrix of Pst I is composed of sanidine, hematite and vesicles in Fe-oxide, and plagioclase and quartz are remained. These observations suggest that they are solidified from silicate melts by dehydration of biotite at around 700 - 1150 degree Celsius based on the experimental data. In addition, we can also deduce the stability of biotite and graphite in silicate melts of Pst I from the reaction of biotite equilibria on the T-fO<sub>2</sub> plane at 200MPa based on the experimental data of graphite and biotite. Mineral assemblages of sanidine, hematite and volatile in vesicles are stable only in high fO<sub>2</sub> fields, suggesting fO<sub>2</sub> in the range of over 10<sup>-11</sup> at around 700 degree Celsius by frictional melting of Pst I phase. In this phase, graphite in Pst I is unstable and will be converted to COH fluid in silicate pseudotachylyte melts. On the other hand, in Pst II matrix, these phyllosilicates but also quartz, plagioclase and apatite are found to be melted or have formed embayment textures, whereas only zircon has survived. These data indicate that the Pst II has formed at a peak temperature of around 1200 - 1400 degree Celsius by the breakdown of plagioclase, sulfide and apatite. The graphite content in Pst II decrease from 1.5 wt.% to 0.9 wt.% with increasing degree of frictional melting and alter the δ<sup>13</sup>C values, which shows wide range of δ<sup>13</sup>C values between -20.9 and -33.1 permil, when compared with the δ<sup>13</sup>C values of graphite from associated fault rocks and host metamorphic rocks (-24.8 +/- 0.67 permil). These data suggest that the host graphite has been converted to the COH fluids and then a part of fluid deposited graphite are re-precipitated from COH fluid during isobaric cooling and other carbon expelled as COH fluid due to the oversaturated melt.

Thus it is evident that frictional melting and dehydration of sheet silicates during coseismic slip generates CO<sub>2</sub> gas by the oxidation of carbonaceous materials. During the transformation of cataclasite to pseudotachylyte the total carbon content has decreased by about 0.5 wt.%. Assuming a rock density of 2.7g / cm<sup>3</sup>, the fusion of 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> (i.e. 1mm thickness × 1m<sup>2</sup> fault plane) of cataclasite into Pst II releases 50g of excess CO<sub>2</sub>. The estimation of CO<sub>2</sub> degassing in this study is comparable to those reported by Famin et al. (2008). Thus, not only carbonates but also organic matters, including graphite and carbonaceous materials in crustal rocks, are potential to be a source of CO<sub>2</sub> by frictional melting, and the release of CO<sub>2</sub> into fault planes may drastically change the dynamic properties of flash fluid pressure and frictional properties of fault planes during seismic activity.

Reference: Famin. et al., 2008. EPSL, 265, 487-497. Lewicki. & Brantley., 2000. GRL, 27(1), 578.

Keywords: Graphite, Pseudotachylyte, Carbon isotopes, Frictional melting, CO<sub>2</sub> degassing

## 断層面上のナノ粒子と炭素質薄膜：沈み込みプレート境界巨大分岐断層の例 Nanograins and carbonaceous film on a fault surface: an example from a fossil megasplay fault in the subduction zone

北村 有迅<sup>1\*</sup>; 木村 学<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>4</sup>; 瀬藤 佑衣<sup>5</sup>; 山口 飛鳥<sup>6</sup>; 鍵 裕之<sup>5</sup>; 浜橋 真理<sup>2</sup>; 福地 里菜<sup>2</sup>; 濱田 洋平<sup>3</sup>; 藤本 光一郎<sup>7</sup>; 橋本 善孝<sup>8</sup>; 斎藤 実篤<sup>3</sup>; 川崎 令詞<sup>2</sup>; 高下 裕章<sup>2</sup>; 清水 麻由子<sup>2</sup>; 藤井 岳直<sup>9</sup>  
KITAMURA, Yujin<sup>1\*</sup>; KIMURA, Gaku<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>4</sup>; KOUKETSU, Yui<sup>5</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>6</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>5</sup>; HAMAHASHI, Mari<sup>2</sup>; FUKUCHI, Rina<sup>2</sup>; HAMADA, Yohei<sup>3</sup>; FUJIMOTO, Koichiro<sup>7</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>8</sup>; SAITO, Saneatsu<sup>3</sup>; KAWASAKI, Ryoji<sup>2</sup>; KOGE, Hiroaki<sup>2</sup>; SHIMIZU, Mayuko<sup>2</sup>; FUJII, Takenao<sup>9</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>4</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>5</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, <sup>6</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>7</sup> 東京学芸大学, <sup>8</sup> 高知大学, <sup>9</sup> 株式会社島津製作所

<sup>1</sup>Dept. Earth and Environmental Sci., Kagoshima University, <sup>2</sup>Dept. Earth and Planet. Sci., University of Tokyo, <sup>3</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>4</sup>Dept. Nat. Hist. Sci., Grad. Sch. Sci., Hokkaido University, <sup>5</sup>Geochem. Research Center, University of Tokyo, <sup>6</sup>Atmosph. Ocean Research Institute, University of Tokyo, <sup>7</sup>Tokyo Gakugei University, <sup>8</sup>Kochi University, <sup>9</sup>SHIMADZU Corp.

断層面の摩擦特性は地震性滑りの挙動を左右する重要な要素である。近年では摩擦過程はスケール依存性を持つことも示唆されている [Li and Kim, 2008]。このため断層表面の様々なスケールにおける構造観察は極めて重要になる。断層面のラフネスはキロメートル?マイクロメートルのスケールでフラクタル性を持つと考えられていたが [e.g. Candela et al., 2009], 例えば鏡肌を持つ断層面の例ではナノメートルスケールではフラクタル性が成立しない [Siman-Tov et al., 2013]。このような断層面では数十ナノメートルの粒子が表面を覆っており、可視光の波長以下の凹凸となるために光沢を生じると考えられている。そこで本発表では、延岡衝上断層掘削計画 (NOBELL) で回収されたコア中の主断層近傍の条線のついた一断層面の表面を詳細に観察した結果を報告する。

NOBELL は 2011 年 7/9 月に宮崎県延岡市内において深度 255 m までのコアを回収した。約 41 m の深度で延岡衝上断層を貫通し、コアの記載や物理検層データから上下盤の特徴的な差異が明らかになった [Hamahashi et al., in revision]。本研究では主断層直下の条線が発達し光沢を持つ断層面の表面を、走査型レーザー顕微鏡・走査型プローブ顕微鏡の複合機 (SHIMADZU SFT-3500) を用いて観察した。また同試料表面をラマン分光法によって分析した。

プローブ顕微鏡像では断層表面に直径が数十ナノメートルの粒子状物質が観察された。この表面は 10 マイクロメートル四方の撮影領域でわずか 80 ナノメートルの起伏しかない極めて平滑な面であった。レーザー顕微鏡の XZ 計測から表面下約 1 マイクロメートル付近に界面が観察され、また暗色部の縁部に干渉縞が観察された。これらのことから暗色部は約 1 マイクロメートル程度の薄膜様物質に覆われていることが示唆される。ラマン分光分析の結果より非晶質炭素の存在が示唆され、断層表面から得た粉末試料の有機元素分析によっても炭素の存在が確かめられた。オージェ電子分光法による分析によって最表面への炭素の濃集が確認された。

以上の結果から、本試料は断層面の摩擦過程の進行により表面がサブマイクロメートルスケールまで平滑に琢磨され、その表面を炭素質薄膜物質が覆っている構造を取っていると考えられる。断層面の形状や表面のナノスケール微細構造、化学組成を詳細に明らかにすることで、断層の動的弱化過程の理解を深めることに貢献できる。

キーワード: 延岡衝上断層掘削計画 (NOBELL), 沈み込み帯, 付加体, 四万十帯, 断層弱化, 断層鏡面

Keywords: Nobeoka Thrust Drilling Project, subduction zone, accretionary prism, Shimanto belt, fault weakening, fault mirror

## Dynamic backthrust branching: role of barriers, and implications Dynamic backthrust branching: role of barriers, and implications

XU, Shiqing<sup>1\*</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>; BEN-ZION, Yehuda<sup>2</sup>; AMPUERO, Jean-paul<sup>3</sup>  
XU, Shiqing<sup>1\*</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>; BEN-ZION, Yehuda<sup>2</sup>; AMPUERO, Jean-paul<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>University of Southern California, <sup>3</sup>California Institute of Technology  
<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>University of Southern California, <sup>3</sup>California Institute of Technology

Increasing evidence indicates that backthrusts may become active during or after megathrust ruptures in subduction zones, such as in Chile and Sumatra (Melnick et al., 2012; Singh et al., 2011). Previous studies of relevant mechanisms mainly focused on the interaction between forethrusts and the megathrust. Here we investigate through dynamic rupture simulations how backthrusts may be activated by megathrust ruptures in subduction zone environments. Assuming a single backthrust branch that is backward inclined to the compressional side of a continuous main fault, our results show that (1) fast speed and long propagation distance of the main rupture favor the activation of backthrust; (2) the outward propagation of the activated branch rupture interacts with the main fault mainly in the backward direction, while the tapered slip towards the branch end at the junction affects the main rupture behavior around the junction. We further assume an effective barrier for the main fault at the junction, motivated by the previous studies that barriers of various types (e.g. sharp fault bend, fault end, and transition region with increased basal friction) can also generate backthrusts during the long-term quasi-static process. Compared to the case without barrier, one prominent effect of the barrier is to arrest or delay the forward propagation of the main rupture, such that a resultant backward stress lobe as discussed in Xu and Ben-Zion (2013) can load the backthrust branch over a considerable time. This is particularly important for rupture activation along relatively immature backthrusts within sediments, where the nucleation time leading to the spontaneous propagation phase could be long, due to the large effective  $D_c$ , low frictional strength drop, or surface roughness. Indeed, our additional results confirm that the barrier model, although not always necessary, is more favorable for the activation of backthrusts with increased dynamic friction.

Our study has several implications: (i) it agrees with the quasi-static model based on the critical taper theory and limit analysis (Cubas et al., 2013) that an increase of basal friction towards the toe may statistically favor the activation of backthrusts near the up-dip limit of megathrust ruptures; (ii) there are also possibilities that backthrusts can still be activated by a propagating rupture, therefore the dynamic critical taper theory developed by Wang and Hu (2006) needs to be improved. In fact, not only the region near the up-dip limit of the seismogenic zone can be pushed into a critical state, successive region around the propagating rupture front within the seismogenic zone can also be temporarily stressed to failure and may even sustain a failure propagation along preexisting branches; (iii) it provides a specific example of compressional-side antithetic branching that can support the early speculation of fault behavior at junctions (King, 1986; Andrews, 1989).

キーワード: earthquake branching, friction of fault zones, fault barrier  
Keywords: earthquake branching, friction of fault zones, fault barrier

## 炭質物断層温度計の可能性- 1 : 反射率 A possibility of a CM fault thermometer Part 1: Reflectances

岡本 汐理<sup>1</sup>; 星野 健一<sup>2\*</sup>

OKAMOTO, Shiori<sup>1</sup>; HOSHINO, Kenichi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 広島大学理学部, <sup>2</sup> 広島大学理学研究科

<sup>1</sup>Fac. Sci., Hiroshima Univ., <sup>2</sup>Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

炭質物の熟成(石炭化)のカイネティクスは Burnham らの一連の研究で詳細に解析されている(例えば, Braun and Burnham, 1987). Burnham and Sweeney (1989) と Sweeney and Burnham (1990) は, 石炭化の脱水・脱ガス反応の速度則に活性化エネルギー分布モデルを導入し, この速度則から導いた反応進行度(F)と炭質物の油浸反射率(%Ro, パーセント表記)との相関を示した。彼らはまた, この速度則が実験(1C/週), 火成岩の貫入(1C/日), 地熱系(10C/百年)および埋没続成作用(1C/千万年)の昇温率に適用出来ると述べている。

一方で, Huang (1996) は, 炭質物の%Ro は数日-数十日間の加熱実験でも上昇することを示し, 実験結果から t (秒) のべき数が 0.078 であるべき速度則を導いた。また, Muirhead et al. (2012) は, 熱分解装置によるマーチソン隕石中の炭質物の数秒-数十秒間の加熱によるラマンスペクトルの R1 の変化から, t のべき数が温度に依存するべき速度則を提唱した。しかしながら, これらのべき速度則は, 岩石や隕石から抽出した裸の炭質物の加熱実験に基づいている。筆者らの加熱実験によれば, 加熱後の岩石の表面にある炭質物の R1 と岩石中の炭質物の R1 の変化は著しく異なることが明らかとなったため(詳細は次講演(-2)), 上記のべき速度則は地質試料の温度履歴解析には適用出来ないであろう。そこで筆者らは次の実験を行ない, 炭質物による断層温度計の可能性を検討した。

四万十帯から採取した泥岩の岩片をアルゴン雰囲気のカプセルに入れ, 300, 350, 450, 550, 600 及び 700 °C で, 2, 5, 13 および 34 分間, 加熱炉で加熱した。使用した加熱炉は, 設定温度に上昇するまで 10 分程度かかり, また室温までの冷却に数分かかるため, これらの加熱時間は, 上記温度の継続時間を示している。

これらの加熱試料の表面を削り取った後に研磨した岩片を用いて, 反射率および次講演(-2)のラマンスペクトルの測定を行なった。空気中での反射率(Ra, 非パーセント表記)は, 反射顕微鏡像の RGB 解析による G の階調を標準試料(SiC, GGG, YAG など)の階調と比較する事により求めた。

加熱前の 2 つの岩片中の炭質物の Ra の平均は 0.093 と 0.106 で, 前者の%Ro は 1.99 であった。上記の Sweeney and Burnham (1990) の相関によれば, これに対応する F は 0.618 である。450 °C 以下の加熱試料では, Ra はほとんど変化しない。この結果は, 300 °C, 350 °C および 450 °C で 34 分間の加熱 T-t 経路に沿ってシミュレートした F がそれぞれ 0.618, 0.618 および 0.622 であり, ほとんど進行しないことと調和的である。

一方で, 550 °C, 600 °C および 750 °C で 34 分間加熱した試料の Ra は, それぞれ 0.121, 0.127 および 0.151 と上昇した。これらの T-t 経路から求めた F は, それぞれ 0.742, 0.811 および 0.850 である。また, 750 °C の 2, 5 および 13 分間の加熱試料の Ra は, それぞれ 0.147, 0.150 および 0.150 で, 上記の同温での 34 分間の加熱後の Ra とほとんど変わらない。このことはまた, これら 750 °C の加熱 T-t 経路から求めた全ての F が 0.850 であり, 彼らの速度則の上限の反応進行度であることと調和的である。

様々な熟成度の CM を含む岩石のさらなる加熱実験が必要であるが, 上記の結果は, 炭質物の熟成度に基づく地震温度計の高い可能性を示している。

本加熱実験による炭質物の熟成のラマン分光分析結果については, 次講演(-2)で報告する。

キーワード: 炭質物, 温度計, 断層, 反射率

Keywords: carbonaceous matter, thermometer, fault, reflectance



## 炭質物断層温度計の可能性-2 : ラマンスペクトル A possibility of a CM fault thermometer Part2: Raman spectra

岡本 汐理<sup>1\*</sup>; 瀬藤 佑衣<sup>2</sup>; 清水 以知子<sup>3</sup>; 星野 健一<sup>4</sup>  
OKAMOTO, Shiori<sup>1\*</sup>; KOUKETSU, Yui<sup>2</sup>; SHIMIZU, Ichiko<sup>3</sup>; HOSHINO, Kenichi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 広島大学理学部, <sup>2</sup> 東京大院 理, <sup>3</sup> 東京大院 理, <sup>4</sup> 広島大学理学研究科  
<sup>1</sup>Fac. Sci., Hiroshima Univ., <sup>2</sup>Univ. Tokyo, Grad. Sch. Sci., <sup>3</sup>Univ. Tokyo, Grad. Sch. Sci., <sup>4</sup>Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

炭質物のラマンスペクトルから得られるいくつかのパラメータは、地質温度計として広く使われてきた(例えば, Beyssac et al., 2002)。一方で, Huang (1996) と Muirhead et al. (2012) は、岩石から抽出した炭質物の加熱実験から、それぞれ炭質物の熱成熟度を示す油浸反射率とラマンスペクトルの R1 比の変化について、加熱温度・時間に関するべき速度則を提唱している。

そこで本研究では、ラマンスペクトルにより示される炭質物の熱成熟度に基づく断層温度計の可能性を探るため、ビトリナイト反射率の測定により続成温度が 180 °C と見積もられている四万十帯安芸層群(北村ほか, 2014) から採取した泥岩試料の加熱実験を行なった。試料は、300, 350, 450, 550, 600 および 700 °C で、それぞれ 2, 5, 13 および 34 分間加熱した(詳細は前講の-1 参照)。加熱試料の表面の炭質物と試料内部の炭質物のラマンスペクトルの対比から、前者の熟成は後者より早く進行していることが確認された。したがって、炭質物の熟成度を断層温度計として用いるためには、試料内部の炭質物を分析しなければならない。

ところで、最高温度・最長時間の加熱後の炭質物の micro-XRD 分析では、石墨のピークが確認されなかった。したがって、本加熱実験による炭質物の変化は、石墨化ではなく石炭化であると考えられる。

炭質物のラマンスペクトルには、いわゆる G と D の二つのバンドのピークが現れる。加熱試料のラマン分光分析から、これらのバンドから得られるいくつかのインデックスが、低温(300-450 °C)の加熱実験後でも顕著な変化を示すことが認められた。一方で、これらの試料中の炭質物の反射率は、加熱前とほぼ同様に変化はみられない(前講演の-1 参照)。

G バンドと D バンドのピーク位置は、すべての実験温度において、加熱時間が長くなるにつれ、より高波数側にシフトする。しかしながら、これらの位置は温度の上昇に伴い単調にシフトはせず、450 °C までは高波数側にシフトし、550 °C で低波数側に、更に高温では再び高波数側にシフトする。

両バンドのピーク位置の波数差も、加熱温度・時間に対応して変化する。最長時間(34 分)の加熱試料では、この差は高温ほど小さくなるが、同様の傾向は他の加熱時間の試料では認められない。

G バンドのピークの強度と半値幅の比(Gif)と D バンドのピークのそれ(Dif)はそれぞれ、300 °C-450 °C までと 550 °C-750 °C の間では高温ほど減少する傾向を示すが、450 °C-550 °C 間では増加する。

以上述べたように、加熱温度と時間に対応して単調に変化するインデックスは未だ見出されていないが、これらのインデックスの加熱温度・時間に対する敏感さは、スペクトルにより示される炭質物の熱成熟度が断層温度計として利用できる可能性を十分に示していると思われる。また、上記のインデックス変化の粒径依存性や、粗粒な炭質物のリムと細粒な炭質物の類似性は、粒径に依存する温度計、即ち、加熱温度と時間を同時に推定出来る温度-時間計の可能性も示している。

キーワード: 炭質物, 温度計, 断層, ラマンスペクトル  
Keywords: carbonaceous matter, thermometer, fault, Raman spectra

## 日本海溝プレート境界断層の鉱物学的特徴と発達過程 Mineral characteristics of the plate-boundary fault at the Japan Trench

亀田 純<sup>1\*</sup>; 清水 麻由子<sup>2</sup>; 氏家 恒太郎<sup>3</sup>; 廣瀬 丈洋<sup>4</sup>; イカリ マット<sup>5</sup>; レミッティ フランチェスカ<sup>6</sup>; モリ ジム<sup>7</sup>; チェスター フレッド<sup>8</sup>; 木村 学<sup>2</sup>

KAMEDA, Jun<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Mayuko<sup>2</sup>; UJIIE, Kohtaro<sup>3</sup>; HIROSE, Takehiro<sup>4</sup>; IKARI, Matt<sup>5</sup>; REMITTI, Francesca<sup>6</sup>; MORI, James<sup>7</sup>; CHESTER, Frederick<sup>8</sup>; KIMURA, Gaku<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>筑波大学, <sup>4</sup>海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>5</sup>ブレーメン大学, <sup>6</sup>モデナ大学, <sup>7</sup>京都大学防災研究所, <sup>8</sup>テキサス A&M 大学

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>University of Tokyo, <sup>3</sup>Tsukuba University, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>University of Bremen, <sup>6</sup>Universita di Modena, <sup>7</sup>kyoto University, <sup>8</sup>Texas A&M University

The rupture and slip of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) propagated along the plate-boundary megathrust and caused a huge tsunami. In order to elucidate the physical mechanisms responsible for such unexpectedly large slip of the fault, the IODP Exp. 343, the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) was carried out one year after the earthquake. It succeeded in recovery of material from the plate boundary shear zone. We have examined how mineralogical properties vary through a depth-section including the plate boundary fault rock.

At the drill site (C0019E) where the large fault slip (>50m) occurred, a plate boundary shear zone was identified around 820 mbsf. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that abundance of smectite is markedly higher within the fault (60-80 wt.%) than in the surrounding host rocks, suggesting the shear zone material had a low intrinsic friction coefficient. Laboratory experiments on these materials demonstrated very low frictional state under various sliding conditions (Ujiie et al., 2013; Ikari et al., submitted)

In comparison, we also examined the mineralogy of reference material recovered on the outer rise of the Japan Trench (Site 436) during DSDP Leg 56. XRD analyses on the continuous series of cores found a marked anomaly in smectite abundance in the topmost ~5m section in the pelagic clay layer. Such a mineralogical feature compares well to that observed in the JFAST cores, and the smectite-rich horizon in the incoming sediments is inferred to be the localized deformation zone (decoulement) when it arrives at the Japan Trench.

キーワード: 日本海溝, スメクタイト, 遠洋性粘土, 東北沖地震

Keywords: Japan Trench, smectite, pelagic clay, Tohoku-oki earthquake

## オリビンの衝撃圧縮実験 -その3: 摩擦溶融に先んじて粉砕が起こった! Shock compression experiment of olivine- Part 3: pulverization occurred before frictional melting

小畑 正明<sup>1\*</sup>; 真下 茂<sup>2</sup>; 陳 黎亮<sup>2</sup>; 安東 淳一<sup>3</sup>; 山本 貴史<sup>3</sup>; 上田 匡将<sup>1</sup>  
OBATA, Masaaki<sup>1\*</sup>; MASHIMO, Tsutomu<sup>2</sup>; CHEN, Liliang<sup>2</sup>; ANDO, Jun-ichi<sup>3</sup>; YAMAMOTO, Takashi<sup>3</sup>; UEDA, Tadamasa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 熊本大学パルスパワー科学研究所, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Institute of Pulsed Power Science, Kumamoto University, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Hiroshima University

地震波は地下深部で発生した破断面 (shear fracture, 断層) の急速拡大先端部付近での急速な剪断応力低下と急速滑りによって発生する。先端部での急速な滑り弱体化は物質のいかなる状態変化に対応するのかということは地震学の物質科学的な側面として重要な研究課題である。この滑り弱体化についてはこれまで、(1) frictional melting and lubrication, (2) thermal pressurization, (3) flash heating and melting, (4) powder lubrication, 及びそれらの組み合わせが提案されてきた。これまで断層の剪断摩擦特性の実験的研究は高速回転摩擦試験器を用いた研究が主流であったが、この方法では、「断層面」はあらかじめ用意されているので、破断面の形成過程 (shear fracturing) そのものは再現され得ない。またサンプルにかけられる封圧が高々数十 MPa に限られるという技術的制約もあった。

これを補完する方法として、我々は、特に中・深部地震を念頭において、衝撃圧縮により、サンプルに瞬間的に一軸圧縮をかけることで剪断面をあらたに作り出しサンプルを回収して微細構造を観察するという実験を行ってきた。用いた装置は熊本大学衝撃・極限環境研究センターの一段式火薬銃である。この装置では飛翔体の素材とサイズ、飛翔体のスピード (1~2km/s) をコントロールすることで鉄カプセルに封入したサンプルに瞬間的に 10~30GPa の高圧をかけることが可能である。実験には天然のオリビン単結晶 (Fo94) を用いた。本実験の衝突時の衝撃波速度は約 7km/s, 粒子速度は約 1km/s, 圧縮時間は 0.5 マイクロ秒程度である。なおこの圧力範囲では断熱圧縮による温度上昇は限られており (せいぜい数百度)、断熱圧縮のみによってはオリビンの溶融は起こらない。圧縮実験後回収したサンプルの微細構造を光学顕微鏡, SEM, TEM によって観察したところ衝突方向に斜交してかんらん石結晶内に多数の剪断面が発達していることが認められた。圧縮を受けたオリビンには広域的に波動消光が発達すると共に局所的に粉砕が顕著である。破碎粒子は鋭角的で角張っており粒子同士は大きくはずれていないことから破碎箇所では顕著な剪断運動は起こっていないと判断できる。これに対して、マクロな剪断面 (断層面) はシャープで最大 0.5 mm の滑り変位が認められる。剪断面の壁にも亀裂は発達しているが、それに加えて局所的に多数の粒子からなるスポンジ状の物質が付着しているところが見つかった。このスポンジ状部分を、FIB で切り出し TEM 観察を行ったところ、断層面壁は次のような累帯構造をしていることが確認出来た。一番内側のオリビン単結晶部は [001] ラせん転位が密に発達し、複雑に絡み合った構造をいている。この転位構造が上記波動消光の原因となっていると考えられる。断層面から内側の 25 ミクロン幅のゾーンでは細粒多結晶化しており (粒子サイズ 200-300 nm), 最外縁部 2 ミクロン幅ゾーンで数百ナノメートルのやや丸みを帯びたオリビン粒子が多数発達し、粒間をオリビン組成のガラスが充填している。また細粒オリビンの縁がガラス化に伴って大きく内側に湾曲している場所も確認できる。これらガラスの存在は、オリビンが部分的にかつ局所的に溶融したことを示す。これらのオリビン微粒子にも単結晶部、多結晶部で見られたと同種の転位構造が残っていることから、このオリビン微粒子はメルトから晶出したものではないと結論できる。多結晶部と溶融部が断層面に沿っていることから多結晶化と溶融が剪断運動によって出来たことは間違いないが、ここで重要なことは溶融に先立って転位構造の発達と粉砕が起こったことである。しかもこれらの全プロセスは時間にして 0.5 マイクロ秒という極超短時間に起こったことである。これらの現象は衝突によって発生した衝撃波がサンプルを通過に伴って形成していった剪断面 (最前線) 先端部付近で起こった現象と考えられ、ここに Reches and Dewers (2005) の考察と計算結果が適用できると我々は考える。

本実験では剪断面形成が衝撃波通過によるものであるという点で天然の地震の状況とは異なるが、その他の状況は相似的であると言える。この結果はシュードタキライトの形成プロセスの再考も促すものである。

文献: Reches and Dewers (2005) Gouge formation by dynamic pulverization during earthquake rupture. EPSL 235, 361-374.

キーワード: 衝撃圧縮実験, かんらん石, 摩擦溶融, 粉砕, 断層, 地震

Keywords: shock compression experiment, olivine, frictional melting, pulverization, fault, earthquake



## 間隙水圧下におけるドレライトの高速摩擦挙動 High-velocity frictional behaviors of dolerite under controlled pore-water pressure

東郷 徹宏<sup>1\*</sup>; 嶋本 利彦<sup>1</sup>; 馬 勝利<sup>1</sup>; 姚 路<sup>1</sup>  
TOGO, Tetsuhiro<sup>1\*</sup>; SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>1</sup>; MA, Shenli<sup>1</sup>; YAO, Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所

<sup>1</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration

地震時の断層の摩擦挙動を測定するために、過去 20 年間にわたって岩石の摩擦やガウジを用いた高速摩擦実験が多数行われ、高速領域では顕著な弱化が起こることが示されている (例えば Di Toro et al., 2011, *Nature*)。また、近年では含水条件下での高速摩擦実験が行われ (例えば Ujiie and Tsutsumi, 2010, *GRL*; Faulkner et al., 2011, *GRL*)、室内の乾燥条件での摩擦実験とは大きく異なる挙動が示されているものの、これらの含水条件下での実験は流体圧のシールが行われていない排水条件での実験である。そのため、沈み込み帯などの流体が豊富に存在する条件下での摩擦挙動は解明されておらず、流体圧をコントロールした摩擦試験機の開発と摩擦挙動の測定が求められている。

そこで、発表者らは中国地質研究所の低速・高速摩擦試験機 (株式会社丸井製、MIS-233-1-76) に圧力容器を設置し、間隙水圧下で低速～高速摩擦実験を試みている。試験機のキャパシティーとしては、内径 15 mm、外径 40 mm の円筒形試料を使用した場合、流体圧は 35 MPa までコントロールでき、有効垂直応力は最高で 9 MPa、変位速度は 60 mm/年から 2 m/秒までが可能である。また、軸力装置を現在使用している 10 kN ベローシリンダー (空気圧アクチュエーター) から 100 kN 油圧シリンダーへ変更すれば 10 倍の有効垂直応力を載荷することが可能である。

本発表の実験では中国山西省産の石英ドレライトを使用し、岩石表面どうしの摩擦挙動の測定を行った。実験条件は有効垂直応力を 0.13～1.07 MPa、変位速度を 1 mm/s、1 cm/s、10 cm/s、1 m/s に変えてそれぞれ実験を行った。また、流体には水と窒素を用いた場合の二通りの実験を行い摩擦挙動の比較を行った。窒素を用いた実験では軸力をおよそ 1 kN に設定し、窒素ガスの圧力を 0 MPa から 5 MPa にまで変えることによって有効垂直応力を変えて実験を行った。水を用いた実験では、岩石を純水の中に浸した状態で設置し、高圧窒素ガスを圧力容器内に導入することによって流体圧を加えた。この窒素ガスは流体圧の圧媒体として働くだけでなく、実験中の流体圧変化に対するバッファーとしても機能する。

実験の結果、水を流体として用いた場合には、低速領域 (<10 cm/s) では定常摩擦係数は 0.4～0.8 の間になるのに対して、速度の増加とともに緩やかに摩擦係数が低下し 1 m/s では摩擦係数は 0.3～0.5 に低下することが明らかになった。しかしながら、Di Toro et al. (2011, *Nature*) の乾燥条件の結果と比較すると、高速領域 (1 m/s) では摩擦係数が高く、水の存在によって速度弱化が抑制される事が明らかとなった。また、窒素の雰囲気下の実験では Reches and Lockner (2010, *Nature*) で認められた sub-seismic な速度領域 (10～100 mm/s) での速度強化と同様の挙動が顕著に認められる。しかしながら、一方の含水条件下の実験では sub-seismic 領域での摩擦強化は認められず、これまでの乾燥条件での摩擦挙動とは大きく異なる結果が得られた。このことは、間隙水圧下では摩擦の性質は無水条件下と比べて全く異なる可能性があり、今後は実験をより高温・高圧の熱水条件下での摩擦実験へと拡張していく必要がある。

キーワード: 高速摩擦実験, 間隙水圧

Keywords: High-velocity friction experiment, Pore-water pressure



## 南海トラフ巨大分岐断層の暗灰色ガウジ試料における摩擦発熱履歴の再検討 Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of a megasplay fault at the Nankai Trough

増本 広和<sup>1\*</sup>; 廣野 哲朗<sup>1</sup>; 石川 剛志<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; 藪田 ひかる<sup>1</sup>; 向吉 秀樹<sup>4</sup>

MASUMOTO, Hirokazu<sup>1\*</sup>; HIRONO, Tetsuro<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; YABUTA, Hikaru<sup>1</sup>; MUKOYOSHI, Hideki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>4</sup> 早稲田大学教育・総合科学学術院

<sup>1</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup>Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University

南海トラフ地震発生帯掘削によって、1944年東南海地震時に活動したと推定される巨大分岐断層の試料が採取された。この試料には、局所化した剪断帯(暗灰色ガウジ)を含み、先行研究によって、そこでの高いビトリナイト反射率(390℃の摩擦発熱に相当)とイライト-スメクタイト混合層におけるイライト含有量の増加が報告されている。一方で、微量元素・Sr同位体比分析では、同ガウジにおいて300℃を超える有意な高温異常が検出されていない。これらの先行研究間の矛盾を解決するために、本研究では、暗灰色ガウジを含む8試料において、粉末X線回折-RockJock解析を用いた鉱物の定量分析、微量元素・Sr同位体比データにおける高温流体-岩石相互作用のモデル計算、および炭質物の赤外分光分析を行った。その結果、暗灰色ガウジでは250℃を超える発熱を履歴してないことが明らかになった。さらに、スメクタイト-イライト反応が地震時に起きえるかどうかを検証するために、速度論的解析を実施した結果、約400℃のピーク温度をもつ発熱パルスでは、イライト化はほとんど進行しないことが確認できた。また、ビトリナイト反射率の変化については、温度のみならず、剪断による変化も別の先行研究によって明らかにされつつある。以上、すべての情報を総合的に判断する限り、暗灰色ガウジの履歴温度は250℃未満であると結論づけることが妥当であろう。この250℃未満の発熱履歴は、0.01-1 m/sの滑り速度を仮定した場合、最大で80 mの滑り距離に相当する。更なる正確な温度の見積もりが極めて重要であるが、現時点では、100-200℃の温度領域における有効な温度プロキシが存在しないため、難しい。これは今後の大きな課題と言える。

キーワード: 南海トラフ地震発生帯掘削, 東南海地震, 流体岩石相互作用, 微量元素, X線回折, 赤外分光分析

Keywords: NanTroSEIZE, Tonankai earthquake, fluid-rock interactions, trace elements, X-ray diffraction, infrared spectroscopy

## ナノからミリスケールにおける断層面の形状特性 Roughness of fault surfaces over a length-scale range from nano- to millimeters.

岸田 実紀<sup>1\*</sup>; 溝口 一生<sup>2</sup>; 高橋 美紀<sup>3</sup>; 廣瀬 丈洋<sup>4</sup>

KISHIDA, Minori<sup>1\*</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Miki<sup>3</sup>; HIROSE, Takehiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 広島大学院・理学研究科, <sup>2</sup> 財団法人 電力中央研究所, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, <sup>4</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所

<sup>1</sup>Hiroshima University, <sup>2</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>4</sup>Kochi, JAMSTEC

断層表面の形状は断層の力学と地震の発生に非常に大きな影響をおよぼす。よって、断層の形状特性を理解することは、地震発生の過程を解明していく上で非常に重要である。そこで本研究では、断層表面の形状特性と断層の力学挙動の対応関係を明らかにすることを最終目的として、まず天然および実験の断層面のナノからミリスケールまでの形状特性を定量的に記述するための手法の確立を試みた。形状特性解析には、(1) サンフランシスコのカストロ地域に位置する Corona Heights 断層、(2) 東北地方太平洋沖地震後に内陸側での正断層運動によって地表に現れた井戸沢断層の2つの試料を用いた。試料(1)は、先行研究によって断層表面の構成鉱物や微細組織が詳しく調べられており、素性がはっきりわかっている試料である。試料(2)は、地震発生直後に採取されたものであり、地震時の断層面の形状情報がよく保存されていると考えられる。どちらの試料にも、光沢のある断層表面に様々な幅と長さの条線が観察された。

本研究では、これまで連続的に解析されてこなかった1 nm から 3000  $\mu\text{m}$  のスケールでの断層面の形状を、共焦点顕微鏡(計測スケール: 0.15 ~ 3000  $\mu\text{m}$ )と走査型プローブ顕微鏡(1 ~ 50000 nm)を組み合わせることで計測した。形状計測は条線に平行と直交する方向でおこなった。また形状特性の解析には、パワースペクトル密度法を用い、ハースト指数 $H$ という指標によって形状特性を定量的に解析した。その結果、Corona Heights 断層からは条線に直交方向で $H_N = 0.73 \pm 0.010$ 、平行方向で $H_P = 0.81 \pm 0.012$ 、井戸沢断層からは $H_N = 0.87 \pm 0.013$ 、 $H_P = 0.94 \pm 0.014$  という結果がえられた。一般に、条線に平行な方向の方が直交する方向より小さな $H$ を示すことが知られている(e.g., Sagy et al., 2007)。これは断層変位が大きくなるにつれて、線構造に平行な方が表面の凸凹がなめらかになることによることに起因する。本研究で形状特性を解析した Corona Heights 断層や井戸沢断層は、 $H_N$ と $H_P$ がほぼ同じ値を示すことから、これまで形状特性が解析されてきた断層と比較すると、断層の変位がまだ大きくない未成熟な断層である、もしくは先行研究では解析されてこなかった1 nm から 3000  $\mu\text{m}$  のスケールでは、すべりが進行しても $H_N$ と $H_P$ におおきな差が生じないといえるかもしれない。Candela et al., (2012)は、天然の13箇所の断層から、50  $\mu\text{m}$  ~ 50 km までのスケールにおける断層面形状を解析し、このスケールで断層面形状特性はフラクタルであり、ほぼ同じ次元をとること示している。この結果に本研究で解析したデータをコンパイルすると、異なる断層でありかつ観察スケールが異なるにもかかわらずよい一致を見せた。このことから、天然の断層面の形状特性は nm から km スケールまでフラクタル特性を有することが明らかとなった。

キーワード: 断層面, 粗さ, フラクタル, ハースト指数

Keywords: fault surface, roughness, fractal, Hurst exponent

## 続成作用にともなう玄武岩の透水性の変化：四万十付加体物質を用いた考察 Evolution of fluid transport property by diagenesis in basaltic rocks from the Shimanto belt, Southern Shikoku

谷川 亘<sup>1\*</sup>; 山口 飛鳥<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; 多田井 修<sup>4</sup>; 畠田 健太郎<sup>4</sup>; 北村 真奈美<sup>5</sup>  
TANIKAWA, Wataru<sup>1\*</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; TADAI, Osamu<sup>4</sup>; HATAKEDA, Kentaro<sup>4</sup>; KITAMURA, Manami<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>4</sup> 株式会社マリン・ワーク・ジャパン, <sup>5</sup> 広島大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC/Kochi, <sup>2</sup>Atomosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup>Marine Works Japan Ltd., <sup>5</sup>Hiroshima University

2011年の東北地方太平洋沖地震では、プレート境界断層浅部で断層が50mにもわたる大きな変位を伴うすべりが生じたことにより大きな津波災害を引き起こされたと考えられている。大変位を引き起こした原因として、(1)地震時のプレート境界断層の動的弱化機構、(2)プレート境界深部における間隙水圧の増加に伴う強度の低下が挙げられる。(2)の間隙水圧を上昇させるメカニズムとして、沈み込みに伴うプレート境界近傍の物質の脱水反応と続成作用に伴う孔隙体積および透水性の変化が挙げられる。そこで、本研究では南海トラフ地震断層のプレート境界下部の海洋プレート物質を対象として、続成作用にともなう水理特性の変化と間隙水圧発達の関係について考察した。

本研究では高知県の四万十帯付加体中の続成状態が異なると考えられる興津小鶴津と久礼の玄武岩を用いた。興津と久礼の間隙率、およびP波速度はそれぞれ1.4%と6.4 km/s および2.1%と5.9 km/sを示し、また、S波速度の違いは認められなかった。水銀圧入法により間隙径分布を測定した結果、0.01 μm以下の非常に低い間隙構造を持っていることが確認された。透水係数の測定は、室温下で封圧1~160 MPaまで変化させて行った。間隙流体として窒素ガスを用いて、ガス流量法からにより値を算出した。

同じ封圧下で間隙差圧を変化させてガス浸透係数を測定すると、間隙圧の増加に対して透水係数が減少し Klinkenberg効果が認められた。そこで、測定した「ガス浸透係数」は間隙圧依存性を基に Klinkenberg の式を用いて「透水係数」に補正した。補正した「透水係数」は「ガス浸透係数」と比較して約1/2~1/4低い値を示した。有効圧1MPa時の透水係数は試料ごとの違いは認められず、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{m}^2$ の値を示した。透水係数は圧力増加に伴い減少し、有効圧100MPaにおいて $10^{-18} \sim 10^{-21} \text{m}^2$ を示し、試料の違いによる透水性の違いが顕著に現れた。また、久礼の玄武岩試料が一番低い透水係数を示し、100MPaで $10^{-21} \text{m}^2$ を示した。一方興津の玄武岩試料は100MPaで $3 \times 10^{-19} \text{m}^2$ で一番高い透水係数を示した。高い透水係数の試料以外はおおむね透水係数の有効圧変化はべき乗曲線で近似できて、係数は-2~-3を示した。一方、高い透水性を示した試料は、Gangi (1978) が紹介しているヘルツの接触理論を基にした理論式で近似できる。高い透水性を示す試料は割れ目が発達していることから、有効圧増加に対する透水係数の減少は間隙の変化よりも割れ目の凹凸形状の変化が大きく影響しているものと考えられる。

本研究で測定した玄武岩の透水係数は Kato et al. (2004) で報告されている興津の断層帯内部の玄武岩よりも低い値を示した。また、Juan de Fuca と Tonga-Kermadec の玄武岩 (Christensen and Ramanantsoa, 1988) と比較してもやや低い透水性を示した。

現時点では、続成作用に伴う玄武岩の透水性およびその他の物性の変化について系統的な傾向は得られていない。ただし、いずれの玄武岩試料も非常に低い透水係数を示したことから、地下深部もしくは脱水反応に伴う流体の供給による間隙水圧が発生する可能性は十分に考えられる。

キーワード: 透水係数, 流体圧, 続成作用, 沈み込み帯, 南海トラフ地震, 玄武岩

Keywords: permeability, fluid pressure, diagenesis, subduction zone, Nankai Trough earthquake, basalt



## 玄武岩、斑レイ岩および花崗岩の弾性波速度およびポアソン比への熱クラッキングの影響 Effects of thermal cracking on elastic wave velocities and Poisson's ratio of basalt, gabbro and granite

西村 佳也<sup>1\*</sup>; 上原 真一<sup>1</sup>; 溝口 一生<sup>2</sup>  
NISHIMURA, Kaya<sup>1\*</sup>; UEHARA, Shin-ichi<sup>1</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学理学部, <sup>2</sup> 財団法人 電力中央研究所  
<sup>1</sup>Faculty of science, Toho University, <sup>2</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry

地震波を用いた物理探査により、沈み込み帯の海洋地殻中にポアソン比の高い領域 ( $> 0.35$ ) が存在することが知られている。Christensen (1984) は海洋地殻を主に構成する岩石である玄武岩について、高封圧・高間隙圧条件下で弾性波速度およびポアソン比を測定した室内実験を行い、この高ポアソン比は高間隙圧 (低有効圧) で説明できることを示した。このような高間隙圧の分布は、沈み込み帯のプレート境界断層の運動にも影響を与えられ、注目を浴びている。Christensen (1984) の実験では無垢な岩石試料が用いられた。しかしながら、天然の岩石、特に断層周辺では一般的に亀裂等が含まれることが考えられる。こういった内部構造を持つ岩石の弾性波速度 (P 波、S 波速度、それぞれ  $V_p$ 、 $V_s$ ) およびポアソン比  $\sigma$  について評価することは、地震波速度から地下の間隙圧分布を推定する上で重要である。これを検証するには、 $V_p$ 、 $V_s$  と高間隙圧との関係を実験により検証する必要がある。そこで本研究では、沈み込み境界の速度異常を説明する物理モデルの構築を将来的な目標として見据え、その第一歩として海洋地殻を構成する主要な岩石である斑レイ岩、玄武岩、および大陸地殻を構成する代表的な岩石である花崗岩について、加熱して (100 °C、300 °C、500 °C、700 °C) 内部に亀裂を生成させた (熱クラッキング) 岩石試料の大気圧下での弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度への熱クラッキングの影響について検証した。このとき、試料は乾燥している。また、700 °C で加熱した各々の岩石を水で飽和させ、弾性波速度測定実験を行い、弾性波速度の間隙流体依存性についての検討も試みた。

実験の結果、各岩石について高温で加熱するにつれて  $V_p$ 、 $V_s$  が遅くなるということが分かった。また、密度も高温で加熱するにつれてごくわずかであるが小さくなり、特に 500 °C から 700 °C への密度の変化が顕著であることが分かった。これより、高温で加熱するにつれて岩石の内部の亀裂密度が増加し空隙が増え、この空隙の増加が弾性波速度を減少した原因であると考えられる。また、ポアソン比の値は 0.05~0.25 程度の値を示し、観測された高ポアソン比領域の指していた値よりも小さい結果が得られた。また、岩石試料を水で飽和させた実験では、全体的に速度が速くなる傾向は見られたが、出力波形の立ち上がりが読み取りにくく、実験システムおよび波形読み取り方法の改良が必要だと考えられる。

キーワード: ポアソン比, 弾性波速度, 高間隙圧, 玄武岩, 斑レイ岩, 花崗岩  
Keywords: Poisson's ratio, Elastic wave, High pore pressure, Basalt, Gabbro, Granite



## 伊豆-ボニン-マリアナ弧を構成する岩石の高温高压摩擦特性 Frictional property of rocks in the Izu-Bonin-Mariana Forearc under high temperature and pressure conditions

兵東 玄威<sup>1\*</sup>; 高橋 美紀<sup>2</sup>; 斎藤 実篤<sup>3</sup>; 廣瀬 文洋<sup>4</sup>

HYODO, Geni<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Miki<sup>2</sup>; SAITO, Saneatsu<sup>3</sup>; HIROSE, Takehiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 独立行政法人 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, <sup>3</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構 高知コア研究所 地震断層研究グループ

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan-Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup>Japan Agency Marine-Earth Science and Technology, <sup>4</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency Marine-Earth Science and Technology

関東平野の位置する北米プレートの下には、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込んでいる。特に東北日本弧や西南日本弧の沈み込み帯と違い、関東にはフィリピン海プレートに太平洋プレートが沈み込むことによって形成された伊豆・ボニン・マリアナ島弧 (IBM) が衝突・沈み込んでいるのが大きな特徴である。これら3つのプレート境界およびプレート内部では、関東大震災を引き起こした巨大地震から房総半島沖でのスロー地震まで、多様な地震活動が確認されている。スロー地震は、巨大地震震源域の浅部及び深部の沈み込むプレート境界に沿った比較的幅の狭い領域で発生するが、関東周辺ではこのような地震性と非地震性のすべり挙動が比較的近い場所のほぼ同じ深度 (等温等圧条件) で発生している可能性がある。地震の発生には、間隙水圧や断層面の形状などの様々な要因が寄与しているが、本研究では関東に沈み込む IBM 弧を構成する様々な岩石の摩擦特性に着目し、その違いによって関東で発生する多様な地震発生機構を解明することを目指している。

そこで本研究では、ODP (Ocean Drilling Program) Leg125 (Site784, 786) で採取された IBM 弧を構成する主要な5種類の岩石 (marl, boninite, andesite, sheared serpentinite and serpentized dunite) を  $10\sim 50\ \mu\text{m}$  の粒径になるように粉砕し、その摩擦特性を産業技術総合研究所に設置されている高温高压ガス圧式三軸試験機をもちいて調べた。実験条件は、温度  $300\text{ }^\circ\text{C}$ 、封圧  $156\text{MPa}$ 、間隙水圧  $60\text{MPa}$ 、軸変位速度  $0.1$  および  $1\ \mu\text{m/s}$  である。摩擦実験の結果、sheared serpentinite と serpentized dunite は定常摩擦係数がそれぞれ  $0.55$  と  $0.35\sim 0.41$  であり、摩擦の速度依存性は正であることがわかった。粉末 X 線回折とラマン分光分析によって同定した主含有鉱物が、sheared serpentinite は antigorite, serpentized dunite は chrysotile と iowaite であることから、これらの摩擦特性は serpentinite に関する既存の実験結果とよく一致することがわかった。一方、marl, boninite, andesite は、すべり速度  $1\ \mu\text{m/s}$  においてスティック・スリップが現れることがわかった。ただし、これらスティック・スリップは常温で見られる挙動とは異なり、平均ライズタイムがそれぞれ  $3.9, 9.3, 10.8\ \text{sec}$  と非常に長く、スロースティック・スリップとよぶことができるようなすべり挙動である。このようなスロースティック・スリップは、これまで岩塩や蛇紋岩の高温下における摩擦実験で確認されているが、本研究のような堆積岩や火成岩で確認されたのははじめてである。実験条件が限られているため、本実験結果にのみ基づいて関東で発生する地震の多様性を議論するのは難しいが、今後このような特徴的なすべり挙動がどのような条件、特に温度条件によって現れるかを明らかにすることによって、関東で発生する地震の発生機構を物質学的に探っていきたい。

キーワード: 摩擦, 伊豆-ボニン-マリアナ弧, スロー地震, スティック・スリップ, 地震

Keywords: Friction, Izu-Bonin-Mariana Forearc (IBM), slow earthquake, stick-slip, earthquake

## 窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度変化と摩耗物質中の非晶質物質含有量との関係 Temperature-dependent frictional strength of dolerite in a nitrogen atmosphere and its relation to amorphous material

田中 伸明<sup>1\*</sup>; 和田 純一<sup>1</sup>; 金川 久一<sup>1</sup>  
TANAKA, Nobuaki<sup>1\*</sup>; WADA, Jun-ichi<sup>1</sup>; KANAGAWA, Kyuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Chiba University

Noda et al. (2011, JGR) による背景温度を制御したドレライト試料の回転剪断実験（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）では、摩耗物質中の非晶質物質含有量と含鉄鉱物の高温酸化がドレライトの摩擦強度の複雑な温度変化と相関のあることが判明した。しかし、地下の断層は大気中にはないため、実験で観察されたような含鉄鉱物の高温酸化は現実的ではない。

そこで、Noda et al. (2011) と同じドレライト試料を、同じ条件（垂直応力 1 MPa、変位速度 1 cm/s、室温～1000 °C）、窒素雰囲気下（酸素濃度 0.1% 程度）で回転剪断実験を行い、Noda et al. (2011) の結果と比較した。実験では試料面が定常状態になるまで 100 m 程度変位させた後に 20 m 程度変位させ、後者の力学データを取得した。また、実験で得られた摩耗物質を 250 μm のふるいにかけて後、X 線回折プロファイルのピーク強度を用いて鉱物組成の定量分析を行った。

定常状態における摩擦係数は、室温および 200 °C では約 0.47、400 °C および 600 °C では約 0.7、800 °C では試料の破壊が著しく定常状態が得られず、1000 °C では約 0.9 であった。摩耗物質中の非晶質物質含有量は、室温で約 65 wt%、200 °C で約 70 wt%、400 °C で約 60 wt%、600 °C で約 45 wt%、800 °C で約 15 wt%、1000 °C で 0 wt% で、Noda et al. (2011) と同様な温度変化が得られた。一方、摩耗物質中の鉄酸化物含有量には温度による有意な変化は認められなかった。

Noda et al. (2011) の大気中の実験では、800 °C 以下の温度で摩擦強度と非晶質物質含有量との間に負の相関が認められたが、今回の実験でも温度上昇に伴って摩擦強度が増大し、非晶質物質含有量が減少する傾向が認められた。しかしながら、非晶質物質含有量が約 5 wt% しか変わらない室温と 400 °C で摩擦係数に 0.2 以上の差が認められ、また摩擦係数がほぼ同じ 400 °C と 600 °C との間で非晶質物質含有量に 15 wt% 程度の差が認められた。従って、ドレライトの摩擦強度と非晶質物質含有量の間には直接的な関係はないと考えられる。摩擦強度の温度変化が実際には何に起因しているのかについては、現在検討中である。

キーワード: ドレライト, 摩擦強度, 摩耗物質, 窒素雰囲気, 回転剪断試験

Keywords: Dolerite, Frictional strength, Wear material, Nitrogen atmosphere, Rotary shear experiment

## 大型二軸摩擦実験におけるスティック・スリップ・イベントの二次元的破壊伝播 Observation of 2-D rupture propagation for stick-slip events during large-scale biaxial frictional experiments

土田 琴世<sup>1\*</sup>; 川方 裕則<sup>1</sup>; 福山 英一<sup>2</sup>; 山下 太<sup>2</sup>; 溝口 一生<sup>3</sup>

TSUCHIDA, Kotoyo<sup>1\*</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>1</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>2</sup>; YAMASHITA, Futoshi<sup>2</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>防災科学技術研究所, <sup>3</sup>電力中央研究所

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>3</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry

地震発生過程のモデルとして期待される一つに Ohnaka and Kuwahara(1990) によって提案されたプレスリップモデルがある。このモデルでは、破壊伝播速度が亀裂(破壊)の成長に伴い加速することが示されている。しかし、観測からは地震に先行するプレスリップ現象は明瞭には捉えられていない。Ohnaka and Kuwahara(1990)は、試料端(表面)で計測した歪の記録を用いて、破壊伝播速度を一次元的に調べた。一次元の破壊伝播速度は、空間的広がりを考えた際に見かけの破壊伝播速度を示す。さらに、試料表面における計測であるため、表面が存在することによって与える破壊への影響は無視できない。したがって、破壊を二次元的に捉えることで、なぜプレスリップが地震に対して捉えられていないのかを再検討する必要がある。

福山ほか(2012, 2013, 地震学会)は、メートルスケールの大型岩石試料を用いたせん断すべり実験を行った。本研究では、特に、破壊を二次元的に捉えるため、AEセンサー及び歪ゲージを試料内部に面状に配置させるという新たな試みをした第二期の実験(福山ほか, 2013, 地震学会)のうち、最も低速(0.025 m/s)で実施された実験(LB03-008)で計測された微小破壊による弾性波及び歪の記録を扱い、繰り返し発生するスティック・スリップ・イベントの二次元的な破壊伝播を検討するとともに、イベントの特徴について調べた。

実験は、防災科学技術研究所所有の大型振動台を用いて、上側に  $1.5W \times 0.5D \times 0.5H \text{ m}^3$ 、下側に  $2.0W \times 0.5D \times 0.5H \text{ m}^3$  のインド産ギャプロ試料を配置し、せん断方向に滑らせた(福山ほか, 2013, 地震学会)。計測には、AEセンサーと歪ゲージを用いた。AEセンサーは、下側試料の内部に長さ(W)方向 150 mm 間隔で 8ヶ所、奥行き(D)方向 125 mm 間隔で 3列の計 24ヶ所に埋め込まれ、両側の側面 8ヶ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、歪ゲージは AEセンサー同様に下側試料の内部 24ヶ所に埋め込まれ、両側の側面 12ヶ所ずつに 75 mm 間隔で貼り付けられた。また、同時にロードセルを用いてバルクの法線応力とせん断応力も計測された。

土田ほか(2013, 地震学会)は、弾性波の記録から S波速度よりも遅い速度で伝播する波を確認した。この波がイベントによって放射されたものであると考え、実験を行った全時間帯の記録を眺めた。イベント群は、法線応力に対するせん断応力の比がもっとも低下したイベントを境に、前半と後半で、数 10 ms 程度の時間間隔で数回認められる場合と、20 ms 程度以内に密集して 1つだけ存在する場合に大別されることが分かった。

そこで本研究では、イベントのある時間帯に着目し、その際の歪変化について検討した。まず、全時間帯、全 ch の歪変化の概要を把握するため、1024[sp] で平均することでノイズを低減させ、各 ch 毎の時間変化を調べた。どの ch においても、バルクの値から求めた摩擦係数の変化と同様に、イベントのタイミングに著しい歪低下が見られた。また、幅 100 mm の試料において確認された(福山ほか, 2013 地震学会; 溝口ほか, 2013 地震学会)のと同様に、その直前に弾性波を伴わないゆっくりとした歪の低下も確認出来た。一方、バルクのせん断応力に変化が見られないイベントに関しては、歪ゲージの記録でも顕著な変化は見られず、弾性波でしか捉えられないような極めて小さな破壊があったことが推察される。また、実験後半においては slip 直前の摩擦係数の最大値がほぼ一定となるのに対し、実験後半の歪の蓄積量はほぼ一定となる場合、増加し続ける場合、減少する場合と様々で、蓄積量の大きさ自体も位置によって異なることが分かった。

次に、イベント付近の歪変化を詳しく見るため、イベントを含む 1秒間の歪変化を見た。顕著な歪変化が見られない時間帯の歪の記録に対して自己相関関数を調べたところ、およそ 4~8[sp] で相関値が上がるのがわかり、これをノイズの卓越周期であると判断し、平均をとるデータ数を 300[sp] まで絞った。イベントごとに各 ch の変化を比べたところ、弾性波を用いて大別された 2パターンのイベントの内、前半のあるイベントにおいて、緩やかにせん断歪が低下する(およそ  $1\sim 3\mu\text{strain}$ ) イベントが試料前面付近から奥行き方向へとゆっくりと伝播しているのが見られた。このタイプのゆっくりとしたイベントを繰り返し、最終的には伝播が加速し、高速なせん断歪の低下、すなわち、動的なイベントに達している。弾性波の観測される時間は、この高速なせん断歪の低下の際及びその後の不安定な歪変化に対応している。今後、この加速の開始点、及び、加速する方向と試料表面の亀裂(破壊)の成長、弾性波との関係について検討する。

本研究は、防災科学技術研究所プロジェクト研究「地殻活動の観測予測技術開発」、科学研究費補助金基盤研究(B) 23340131 の助成を受けた。

キーワード: スティック・スリップ・イベント, 破壊伝播, 大型二軸試験

Keywords: stick-slip event, rupture propagation, large-scale biaxial frictional experiment



## エネルギー比の観点からみた摩擦不安定性に関する実験的研究 The experimental study about frictional instability of fault gouges in terms of Rowe's energy ratio

平田 萌々子<sup>1\*</sup>; 武藤 潤<sup>1</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>  
HIRATA, Momoko<sup>1\*</sup>; MUTO, Jun<sup>1</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・地学

<sup>1</sup>Dept. Earth Science, Tohoku University

### 1. Introduction

The stress-dilatancy relationship for granular materials in a dense packing state was introduced by Rowe (1962). He used the energy ratio (K), which was the ratio of rate of energy dissipation in the direction of minimum principal stress to energy supply in that of maximum principal stress. According to the concept, K shall be a minimum and constant value (Rowe, 1962). However, there are many questions about the physical meaning of K. Therefore, the Rowe's law has not been applied much for fault mechanics until now. Nevertheless the stress-dilatancy relation is related to the onset of frictional instability, it has not been clear yet. So, we conducted friction experiments using simulated fault gouges in order to confirm whether Rowe's law can be applied to fault situation or not.

### 2. Methods

The friction experiments using simulated fault gouges were conducted in a gas-medium apparatus. The confining pressure was ranging from 140 to 180 MPa. We used a cylindrical gabbroic forcing blocks (20 mm in a diameter, 40 mm in a length, and cut by a 50 degree from their cylindrical axis) and quartz gouges were sandwiched by them. The sample sustained loading initially and holding at several values of axial stresses at 190, 450, 640 and 800 MPa. The strain rate was  $10^{-3}$  /s. In order to measure strain, three strain gauges were glued onto a gouge layer through the Teflon jacket. Another one was placed to a forcing block in a vertical direction and far from a gouge layer. Data were recorded at 2 MHz.

### 3. Results and Discussion

From our friction experiments, we obtained K of gouges at different confining pressures. K is given by the ratio of rate of energy dissipation in  $\sigma_3$  direction to energy supply in  $\sigma_1$  direction, so it can be represented by the ratio of output energy to input one. We obtained strain of  $\sigma_3$  direction from three strain gauges glued onto a gouge layer. Similarly,  $\sigma_1$  and strain of  $\sigma_1$  direction were obtained from another gauge.  $\sigma_3$  was the confining pressure. Our results showed that the output energy was the linear function of input one. K increased with confining pressure and showed a certain constant value at each loading and holding stage. Moreover, the change in K was remarkable at the final loading stage. In other words, the output energy increased suddenly because gouge particles began to slip. So, the change in K is large under high stress, including just before unstable slip. It matched shear localization (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998).

Because K is represented by a function of internal friction angle, we suggest that the change reflects the process of microstructural development. It implied that the statistical particle arrangements of gouges changed at each stress level. After gouges become a closest packing state at the peak stress, the grain size reduction (GSR) of gouges occurs leading to the development of shear structure. Under GSR occurrence, K became a new state. From previous study, it is known that the microstructural development has a close relation with frictional instability (e.g. Logan et al., 1992; Marone, 1998; Onuma et al., 2011). During progressive shear, the angle of R1-shear developed in gouges decreases with cumulative slip (Gu and Wong, 1994). Hence, the change in K, that is to say the change in internal friction angle must be connected with not only microstructural development but also frictional instability.

### 4. Summary

From our experiments using simulated fault gouges, we obtained relationships among microstructural development, frictional instability and energy ratio of it. We confirmed that the Rowe's law could be applied to simulated fault gouges. Therefore, we can assess frictional instability in terms of the energy ratio based on Rowe's law. Systematic laboratory observation provides better understanding on energetical or microstructural consideration on the shear localization and seismogenic process.

Keywords: frictional instability, simulated fault gouge, Rowe's minimum constant energy ratio, friction experiments



繰り返すスリップイベントの発生確率の時間発展 -房総半島沖・八重山諸島沖スローイベントを例として-  
Temporal evolution of slip event probability -Case study of slow slip off the Boso Peninsula and the Yaeyama Islands

三井 雄太<sup>1\*</sup>  
MITSUI, Yuta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科  
<sup>1</sup>Grad. Sci., Shizuoka Univ.

特にプレート境界において、空間的に孤立して発生するすべりイベント (地震・スロースリップ) は、準周期的に発生する場合があると知られている (e.g., Nadeau and McEvilly [1997], Matsuzawa et al. [2002], Rogers et al. [2003])。これは、プレート境界に蓄積されたひずみがある程度溜まると解放される、という単純な弾性反発の概念が近似的に成り立っていることを示している。

もちろん、イベントの繰り返し間隔に数学的な意味で厳密な周期性があるわけではない。天然の現象である以上、まったく同じ様式のすべりイベントが二度起きることはないためと考えられる。特に動的な断層破壊を伴う地震の場合にこの傾向は強いはずであり、実際に、過去の繰り返し履歴から推定されていた発生時期から大きく外れて地震が起こったという事例も存在する (Bakun et al. [2005])。また、普段は孤立して活動しているように見えるイベントでも、周辺地域の巨大地震に大きく影響を受けるといことが起こり得るので (e.g., Uchida and Matsuzawa [2013])、決定論的物理モデルに基づいてイベントの繰り返し間隔を定量的に議論するのは極めて困難である。このことから、イベントの繰り返し間隔を評価するために確率分布が用いられてきた。

イベント繰り返しを確率分布で評価する際に、実際にイベントが発生したとき発生確率はどうかであったか、という点が重要であろう。この点については、従来あまり活発な議論はされてこなかった。本研究ではこれに取り組む。対象として、繰り返し間隔が短いスロースリップイベントを選ぶこととした。具体的には、2014 年に入ってから発生した房総半島沖のスロースリップイベント (Hirose et al. [2012]) と八重山諸島沖のスロースリップイベント (Heki and Kataoka [2008]) を選んだ。確率分布として、ひとまず簡単なポアソン分布を仮定し、イベント回数が 0 である累積確率を 100% から引く、という形で発生確率を評価することとした。さらに、1 回イベントが起こるごとに累積確率は 100% に戻るとした。ポアソン分布のパラメータである平均繰り返し間隔は、前回までのイベント繰り返しの標本平均の値を使うこととした。以上の設定から、房総半島沖と八重山諸島沖におけるスロースリップイベント発生確率の時間発展を追うことができるようになった。これを実際のイベント発生と照らし合わせることで、**結果を検証可能**である。

まず、数の多い八重山諸島沖の結果を考察する。八重山諸島沖では、計 26 回のうち、発生確率が 50% に満たない段階で発生したイベントは 5 回であった。例外的イベントは存在するものの、全体の約 8 割は発生確率が 50% を超えてから発生したことになる。一方、房総半島沖では、計 5 回のうち 2 回のイベントが、発生確率が 50% に満たない段階で発生した。この 2 回ともが 2011 年東北地震の後に発生したイベントである。このことは、Hirose et al. [2012] が指摘したように、東北地震による擾乱の影響と解釈できる。以上のことをまとめると、上記のポアソン分布に基づく発生確率評価では、確率が 50% を超えない段階でイベントが実際に起きることは少ない、ということがわかった。また、八重山諸島沖イベントに関しては、イベント発生時点での発生確率が徐々に増大している傾向があることが見出された。

キーワード: 繰り返すスロースリップイベント, 発生確率, 統計的アプローチ, 房総半島沖, 八重山諸島沖  
Keywords: Repeating slow slip event, Event probability, Statistical approach, Off Boso Peninsula, Off Yaeyama Islands

## 浅部超低周波地震と長期的スロースリップイベントの同期発生の数値モデリング Numerical modeling of concurrent occurrence of shallow very low frequency earthquakes and long-term slow slip events

松澤 孝紀<sup>1\*</sup>; 芝崎 文一郎<sup>2</sup>; 小原 一成<sup>3</sup>; 廣瀬 仁<sup>4</sup>

MATSUZAWA, Takanori<sup>1\*</sup>; SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>2</sup>; OBARA, Kazushige<sup>3</sup>; HIROSE, Hitoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 建築研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 神戸大学都市安全研究センター

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Building Research Institute, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>4</sup>Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

豊後水道で発生する長期的スロースリップイベント (SSE) と、足摺岬沖で発生する浅部超低周波地震の活発化が過去 3 回にわたって同期していることが、Hirose et al. (2010, Science) によって報告されている。この領域は、予想されるプレート間大地震のすべり域の西端部に位置しており、歪み蓄積過程と大地震の関係を理解する上でも重要である。我々はこれまで、短期的 SSE と長期的 SSE の数値モデルに取り組んできたが (例えば、Matsuzawa et al., 2013, GRL)、ここでは浅部超低周波地震と長期的 SSE の同期した発生を、数値的に再現することを目指した。

数値モデリングにあたっては、Matsuzawa et al. (2010, JGR) と同様に、半無限弾性媒質中に置かれた平板の沈み込みプレート仮定し、境界の摩擦力としてはカットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を用いた。長期的 SSE を再現するために、このモデルにおいても、周囲より有効法線応力が低く、 $10^{-6.5}$  m/s のカットオフ速度をもつ長期的 SSE 領域を 10 km 以深に設定した。一方、浅部超低周波地震の発生域については、岩石実験から低速側ですべり速度弱体化、高速側ですべり速度強化を示す摩擦則が得られている (Saito et al., 2013, GRL)。また、Ito and Obara (2006, GRL) は地震波の解析から、超低周波地震の半径を 5-10 km と推定している。これらに基づき、深さ 10 km 以浅の領域に、周囲よりも低い有効法線応力をもつ半径 6 km の円形の浅部超低周波地震領域を設定し、この領域内では、 $10^{-4}$  m/s のカットオフ速度を仮定した。さらに、足摺岬沖の西側の日向灘の領域では、浅部超低周波地震の活動が活発となっており、長期的 SSE の観測されていない時期においても断続的に活発化している。このことは、この付近のプレート境界が足摺岬沖の領域よりも連続的にすべっていることを示唆するため、長期的 SSE 領域の隣に、安定すべり領域を持つモデルを検討した。以上のように設定したモデルを以下 Model 1 と呼ぶ。また、日向灘の安定すべり領域を仮定しない場合についても検討した (Model 2)。さらに、長期的 SSE 領域の上端の深さによる影響を検討するため、上端が深さ 18 km となる場合についても検討した (Model 3)。

数値計算の結果、Model 1,2,3 のいずれにおいても、長期的 SSE および超低周波地震領域でのイベント発生がそれぞれ再現された。Model 1 および 2 では、長期的 SSE の発生時に、超低周波地震領域での同期したすべりがみられたものの、Model 3 では明瞭なすべりの同期はみられなかった。また、Model 2 では、長期的 SSE 以外の時期にも超低周波地震領域で大きなすべりが発生している一方、Model 1 では顕著なすべりイベントは長期的 SSE 時にほぼ限られた。これらの結果は、長期的 SSE のすべり域が、浅部超低周波地震域付近まで到達している場合や、近傍における安定すべり域の存在によってより定常的なローディング状態にある場合の方が、観測事実を再現しやすいことを示唆する。

キーワード: 超低周波地震, スロースリップイベント, 数値シミュレーション, 豊後水道

Keywords: very low frequency earthquake, slow slip event, numerical simulation, Bungo Channel

## 粘弾性応答を考慮した2011年東北沖地震の余効すべりの時空間分布 Spatio-temporal afterslip distribution of the 2011 Tohoku-Oki earthquake considering viscoelastic response

鈴木 翔太<sup>1</sup>; 伊藤 武男<sup>1\*</sup>; 里 嘉千茂<sup>2</sup>; 兵藤 守<sup>3</sup>  
SUZUKI, Syota<sup>1</sup>; ITO, Takeo<sup>1\*</sup>; SATO, Kachishige<sup>2</sup>; HYODO, Mamoru<sup>3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup>東京学芸大学教育学部, <sup>3</sup>海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域  
<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Faculty of Education, Tokyo Gakugei University, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

### 1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)が発生した。この地震による地殻変動がGEONETや海底地殻変動観測点により観測されており、地震時には日本列島が東向きに変動した。地震後の変動は陸上の観測点では東向きの変動であるが、「宮城沖1」などの海底地殻変動観測点では西向きの変動を示している。地震後の地殻変動の主な原因としては、余効すべりと粘弾性応答があげられる。余効すべりは地震時に破壊した領域の周辺で応力が集中し、その応力集中を緩和するために発生するゆっくりとしたすべりであり、主に地震時と同じ方向の地殻変動が地表では観測される。また、粘弾性応答は地震時のすべりによりアセノスフェアに再分配された応力の緩和現象にともなう地殻変動であり、変動パターンは複雑である。本研究では、これらの2つの現象を考慮し、GEONETと海底地殻変動観測のデータをインバージョン解析することで、2011年東北沖地震の地震時、地震後のすべりの時空間分布を見積もる。

### 2. 解析手法

断層面上のすべりと地表面での変位の関係を表すグリーン関数は有限要素法を用いて計算した。有限要素法を用いることで、3次元的なプレートの沈み込みの形状や地殻・マントルなどの物性値を考慮した上で弾性的・粘弾性的な地殻変動を計算できる。本研究では東日本の2600×1500×400kmの領域をモデル化した。上部マントルの粘性率はOhzono et al. (2012)を参考に $4.0 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$ を採用した。地殻変動データはGEONETと海底地殻変動観測点から得られたものを用いた。観測されたデータには年周変化が含まれているため、最小二乗法によりそれらを取り除いた。インバージョン解析には、すべりがなめらかになるような先験情報を導入した。このすべりのなめらかさの強さを決めるハイパーパラメータは、ノイズリダクションや地震時のMwから最適と思われる値を選択した。

### 3. 結果・考察

地震時のすべりは宮城沖の海溝付近に位置しており、最大すべりは海溝付近で約60mとなった。また、余効すべりの領域は地震時の破壊領域とは相補的な関係があり、過去のプレート境界での大地震の破壊領域とも相補的な関係があった。余効すべりの大きさは粘弾性を考慮した解析の場合は地震後2.5年間で最大で2mに達し、粘弾性を考慮しない場合では最大で4mに達した。余効すべりによるモーメントマグニチュードは地震後2.5年間で8.06に達しており、余効すべりは今後も発展すると思われる。また、余効すべりの分布は粘弾性を考慮しない場合に比べ、福島沖の余効すべりは顕著に小さくなっており、海底地殻変動観測によって観測された、「宮城沖1」の西向きの変動も粘弾性応答で説明可能であった。このことから上部マントルの粘弾性応答に起因する地殻変動の影響は大きく、逆解析にて考慮する必要がある。

キーワード: 余効すべり, 粘弾性応答, 有限要素法  
Keywords: Afterslip, Visco-elastic response, FEM



## 水準測量より明らかにした東北地方太平洋沖地震による鳴子地域の上下地殻変動 Vertical displacement in Naruko Volcano area following the 2011 Tohoku earthquake deduced from precise leveling survey

塚本 雄也<sup>1\*</sup>; 杉山 賢一<sup>1</sup>; 藤田 和果奈<sup>1</sup>; 渡辺 慶太郎<sup>1</sup>; 渡邊 虹水<sup>2</sup>; 高畑 明拓<sup>2</sup>; 松岡 萌<sup>2</sup>; 後藤 章夫<sup>3</sup>; 太田 雄策<sup>2</sup>  
TSUKAMOTO, Yuya<sup>1\*</sup>; SUGIYAMA, Kenichi<sup>1</sup>; FUJITA, Wakana<sup>1</sup>; WATANABE, Keitaro<sup>1</sup>; WATANABE, Kosui<sup>2</sup>; TAKAHATA, Akihiro<sup>2</sup>; MATSUOKA, Moe<sup>2</sup>; GOTO, Akio<sup>3</sup>; OHTA, Yusaku<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学部, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 東北大学東北アジア研究センター

<sup>1</sup>Fac. Sci., Tohoku University, <sup>2</sup>Grad. School Sci., Tohoku University, <sup>3</sup>CNEAS, Tohoku University

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い、太平洋沿岸で大きな沈降が起きた。沈降量は、内陸（西側）に行くに従って小さくなっていることが、GPSの広域観測で示されている (<http://www.gsi.go.jp/common/000059956.pdf>)。我々は、この変動を捉えるべく、東北大学理学部地球惑星物質科学科の野外実習の一環として宮城県鳴子地域をほぼ東西に走る国道47号線に沿った二等水準路線の約10km区間（水準点番号047-064から047-074；以下、BM64, BM74などと表記）の水準測量を行った。測量は2011年8月23日から28日までと2013年8月19日から25日までの2回行い、いずれにも標尺はライカGPCL3、水準儀はライカDNA03を用いた。2009年の国土地理院の測量成果と比較することで、最も東側のBM64に対するほかの水準点の比高変化を求めた。いずれの水準点間も往復測量を行い、往復残差が一等水準測量を満たさないものは再測を行った。但し、実習期間の制約から、2011年のBM66-BM68間、2013年のBM72-BM74間は、片道測量しか行われていない。

測量前の予想に反し、この区間では、西に行くほどBM64に対して沈降していることがわかった。地震の5か月後に行われた2011年8月の測量では、BM66からBM74はそれぞれ、13.0mm (BM66), 21.4mm (BM68), 81.7mm (BM70), 91.1mm (BM72), 113.9mm (BM74) 沈降し、10kmの基線にも関わらず大きな地震時変位とそれに引き続く余効変動が観測された。さらに2013年8月の測量の結果を2011年8月と比べると、8.5mm (BM66), 16.2mm (BM68), 23.7mm (BM70), 41.9mm (BM72), 46.2mm (BM74), それぞれ沈降していた。2011-2013年で得られた変位の空間パターンは2009-2011年で得られた結果とほぼ同一である。

Ozawa and Fujita (2013), Takada and Fukushima (2013) は In-SAR および GPS データの解析から、東北地方では主な火山地域で沈降が見られることを明らかにした。この沈降は、火山帯の地下にある軟らかな高温岩体が東西方向に引き伸ばされたことで起きたとされている。今回の調査区間はこの地域に含まれ、我々の測量結果はこれと調和的である。一方でこれらの先行研究は地震に伴う変動のみに着目しているが、我々の結果は地震後も鳴子周辺域では継続して沈降が継続していることを示唆する結果となった。特に、鳴子カルデラの縁にかかると見られるMB68とBM70の間で、沈降量が急増するのは注目に値する。

### 謝辞

2011年の水準測量に参加された小林諒平さんと原永美さんに感謝いたします。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 鳴子カルデラ, 水準測量, 沈降

Keywords: Great East Japan Earthquake, Naruko caldera, precise leveling survey, subsidence



## 超伝導重力計による 2011 年東北地方太平洋沖地震後の重力変化 Postseismic gravity changes after the 2011 Tohoku earthquake recorded by superconducting gravimeters

今西 祐一<sup>1\*</sup>; 田村 良明<sup>2</sup>; 名和 一成<sup>3</sup>; 池田 博<sup>4</sup>

IMANISHI, Yuichi<sup>1\*</sup>; TAMURA, Yoshiaki<sup>2</sup>; NAWA, Kazunari<sup>3</sup>; IKEDA, Hiroshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所, <sup>4</sup> 筑波大学

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>NAOJ, <sup>3</sup>AIST, <sup>4</sup>University of Tsukuba

2011 年東北地方太平洋沖地震は、広い範囲で大規模な地殻変動を引き起こしたが、地表における重力にも大きな影響を与えていることが、松代（長野県）および神岡（岐阜県）の超伝導重力計の記録から明らかになってきた。いずれの観測点においても、地震以前には重力はほぼ一定だったが、地震発生後はほぼ同じレート（およそ 10 マイクロガル/年）で重力が減少し、現在もその傾向が続いている。これらの観測点は、震源域からはある程度離れており（震央距離はそれぞれ約 420km および約 490km）、GEONET のデータによれば余効変動は比較的小さい。したがってこの重力減少は観測点の隆起では説明できず、地下の物質の粘弾性的な流動による密度分布の変化を反映していると考えられる。発表の際は、本州にあるもう一つの観測点である水沢（岩手県）の記録もあわせて紹介する。

キーワード: 超伝導重力計, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 粘弾性

Keywords: superconducting gravimeter, 2011 Tohoku earthquake, postseismic gravity changes, viscoelasticity

## 2013年樽前山近傍の地震活動に先行した地殻変動の圧力源モデル (詳報) Pressure Source Model Inferred from Crustal Deformation Preceding Seismic Swarm in 2013 beneath Tarumae Volcano

小四郎丸 拓馬<sup>1</sup>; 村上 亮<sup>1\*</sup>  
KOSHIROMARU, Takuma<sup>1</sup>; MURAKAMI, Makoto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院地震火山研究観測センター  
<sup>1</sup> ISV, Hokkaido University

樽前山は北海道の南西部に位置する標高 1,041m の活火山である。歴史時代には、1667 年と 1739 年に大規模なプリニー式噴火が発生した。また、1909 年噴火では、山頂に溶岩ドームを形成する噴火を起こしており、本格的なマグマ噴火を頻繁に繰り返している。

しかし、近年の火山活動は、噴気や浅部の火山性地震活動に限られていて、概ね低調である。気象庁などの GPS 繰り返し観測では、溶岩ドーム付近で変動が見いだされているが、力源は比較的浅部に推定されている。一方、国土地理院や気象庁が実施しているやや広域の GPS 連続観測では、深部の火山活動によると考えられる地殻変動は認められていない。これまで、樽前山深部の流体活動を示唆する地殻変動は捉えられてこなかった。

2013 年 7 月上旬頃から、従来は顕著な地震活動が無かった山頂ドームの西方 2km の深さ約 3-5km の領域において、活発な地震活動が始まったが、それに先立ち地殻変動が進行していたことが、傾斜及び歪変化が樽前山周辺の複数の連続地殻変動観測点の記録から確認された。変化の大きさは、およそ  $1 \mu \text{ rad}/\mu \text{ strain}$  レベルであった。複数の観測点に同期して現れており、その出現期間は、降雨及び遠地震の影響の可能性が低いことから、地下の力源の何らかの活動に起因する可能性が高い。地殻変動は 7 月中旬までに集中して発生しており、それ以降は、2014 年 2 月時点に至るまで、認められていない。

地殻変動は球状圧力源及びシルを仮定して、グリッドサーチを試みた。山頂ドームの北北西方向の深さ 4.2km (海拔) に体積変化量  $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3$  の膨張性球状圧力源が最も良く観測値を説明する。力源の位置は、2013 年 7 月頃より増加した地震活動の震源域のやや東方である。

力源の位置や活動時期が地震活動のそれらと近接しているため地殻変動と地震活動の間には何らかの関連性があると考えられる。講演では、示唆される両者の関係についても議論する。

キーワード: 地殻変動, 活火山, 群発地震活動, 樽前山

Keywords: Crustal Deformation, Active Volcano, Swarm Earthquake, Tarumae Volcano

## 繰り返し GPS 観測による雌阿寒岳及び十勝岳の火山性地殻変動の検出 Campaign GPS for detection of the volcanic deformation on and around Mt.Meakan and Mt.Tokachi

和田 さやか<sup>1\*</sup>; 森 済<sup>1</sup>; 奥山 哲<sup>1</sup>

WADA, Sayaka<sup>1\*</sup>; MORI, Hitoshi, Y.<sup>1</sup>; OKUYAMA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学院理学院地震火山研究観測センター

<sup>1</sup> Hokkaido University, Institute of Seismology and Volcanology

雌阿寒岳は北海道の東部に位置し、1996年、1998年、2006年および2008年には水蒸気噴火が発生しており、数年おきに水蒸気噴火を起こしている。また、十勝岳は北海道の中央部に位置し、道内でも有数の活動的火山である。最近の活動は活発で、ここ100年間では、1926年、1962年および1988~89年には大規模なマグマ噴火が発生している。本発表では、雌阿寒岳および十勝岳における広域繰り返しGPS観測の結果について議論する。

雌阿寒岳においては2006年から、十勝岳では2007年から繰り返しGPS観測を行っている。観測点は、雌阿寒岳では8点、十勝岳では12点を設置し、毎年数日~数週間の繰り返しGPS観測を行っている。本発表では、これらの毎年の観測データのうち、十勝岳では2007年以降、雌阿寒岳では2008年噴火以降の観測データを用いた。さらに、これらの繰り返しGPS観測と同期間の気象庁の観測点における観測データを同時に用いて、各火山における地殻変動の時系列変化を推定した。データ解析には、解析ソフトウェアRTKLIB(高須ほか、2007)を用い、観測データから各火山における地殻変動の時系列変化を推定した。これらの時系列変化のデータには、火山性と思われる地殻変動だけでなく、地域的なテクトニックな変動や、2011年3月11日の東北沖太平洋地震による変動が含まれている。これらの変動の補正を行うために、各火山周辺の国土地理院の電子基準点(GEONET)における連続観測データを用いた。2007年から2013年までのGEONETのデータを用いて、各火山地域におけるテクトニックな変動と東北沖太平洋地震に伴った変動を空間的に線形近似して推定した。また、より詳細に変動を推定するためには、季節変化による影響をも考慮に入れる必要があると考えられる。地域的なテクトニックな変動や、地震による変動、そして季節変化の補正を行うことで、推定された火山性地殻変動について、詳細な議論を行う。

謝辞

本研究においては、気象庁札幌管区气象台にGPS観測データを提供していただきました。感謝致します。また、国土地理院の電子基準点GPS連続観測データを使用させていただきました。

キーワード: 繰り返しGPS観測, 火山性地殻変動, 十勝岳, 雌阿寒岳

Keywords: campaign GPS observation, volcanic crustal deformation, Mt. Tokachi, Mt. Meakan

## 蔵王山の火山活動に伴う地殻変動 Crustal deformation associated with the unrest of Zao Volcano

三浦 哲<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>1</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 山本 希<sup>1</sup>; 出町 知嗣<sup>1</sup>; 立花 憲司<sup>1</sup>; 近江 克也<sup>2</sup>; 篠原 英一郎<sup>2</sup>  
MIURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>1</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Mare<sup>1</sup>; DEMACHI, Tomotsugu<sup>1</sup>; TACHIBANA,  
Kenji<sup>1</sup>; OHMI, Katsuya<sup>2</sup>; SHINOHARA, Eiichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科, <sup>2</sup> 仙台管区気象台

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup> Sendai District Meteorological Observatory

### はじめに

宮城県と山形県の県境に位置する蔵王山では、2013年1月に初めて火山性微動が観測されて以降、その後も月に1回程度の頻度で繰り返し観測されている(気象庁, 2013)。蔵王山は2011年東北地方太平洋沖地震の震源域に最も近い火山でもあり、今後の活動の推移が注目される。

東北大学では、蔵王山周辺の火山活動をより詳細に把握するため、2013年新たに地震計4点、傾斜計1点、GPS連続観測5点、全磁力2点等の観測網を展開した。本報告では、これまでの観測により得られている蔵王山周辺の火山活動に伴う地殻変動について報告する。

### GPS 連続観測網

これまで、蔵王山周辺のGPS連続観測網は、国土地理院によるGEONETに加えて気象庁の坊平観測点(J310)のみであったが、2013年4月末に本学蔵王観測所に設置したのをはじめ、9月末までに白石スキー場、セントメリースキー場、宮城県営山頂レストハウス、蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅への設置を行った。

新設観測点においては、GPSアンテナは既存の建物や構造物の外壁、屋上等に固定した金属製ポールに取り付けた。データは携帯通信端末によりインターネットに接続し、毎日定時に自動で収集している(出町・他, 2011)。

データ解析には、GIPSY-OASIS II ver. 6.2の精密単独測位法(Precise Point Positioning, PPP)を用いた。衛星の軌道情報はITRF2008に準拠したIGS08を、中性大気中の水蒸気に対する補正にはGMF(Boehm et al., 2006)を用いた。

### 傾斜観測

蔵王山周辺では、本学蔵王火山観測所及び気象庁坊平観測点においてボアホール型傾斜計による観測が行われていたが、いずれも火口湖である御釜からそれぞれ約3 km, 5 kmの距離に位置している。本学では蔵王山の火山活動活発化に対応して、超長周期地震(VLP)の震央となっている御釜の南西約500mの位置(馬の背)に深度約10mのボーリング坑を掘削し、Pinacle社の傾斜計を設置した。

### 結果

東北地方においては、2011年東北地方太平洋沖地震後の顕著な余効変動が今なお継続しており、蔵王山の火山活動に関連する地殻変動を抽出するためには、余効変動成分を除去する必要がある。余効滑りや粘性緩和などを考慮した余効変動の時間発展を精確に再現する物理モデルが構築されれば、それに基づいて余効変動成分を取り除くことも可能であるが、現段階ではそれ自体が重要な研究課題であることから、本研究では余効変動が広域で長期間継続していることを利用してフィルタリングによる除去を試みた。

蔵王山を含む約100 km四方の範囲にあるGPS連続観測点において2013年5月から11月までの7ヶ月間のデータから得られた変位場に対して、余効変動を緯度経度の3次関数により近似して除去したところ、蔵王山周辺の観測点ではいずれも数mm程度以下の残差変位場を抽出できたが、全体的に東方向への変位が卓越する傾向が見られた。仮定した次数が不十分である可能性があり、今後さらなる検討が必要である。

一方、すべり速度/状態依存摩擦法則によれば、大地震の余効滑りは時間に対する対数関数で近似できるとされている(例えばMarone et al., 1991)。PPP法による解析結果にはプレート運動による剛体回転成分も含まれることを考慮して、さらに1次関数も加えて東北地方太平洋沖地震後の各観測点の変位時系列を近似したところ、残差は非常に小さくなり観測結果をよく説明できることがわかった。残差時系列に基づいた2013年10月から12月までの蔵王山周辺の地殻変動をみると、数mm程度ではあるが山体の膨張傾向を示しているものの、まだノイズレベル以下の変動であり、今後の傾向を注意深く見ていく必要がある。

傾斜計による観測データについては、一般に降雨や季節変動等の影響もあって、数ヶ月程度以上の時定数をもつわずかな現象を捉えることは困難であり、蔵王山周辺の傾斜計でも、今回の火山活動に関連すると思われる長期的変化は現在のところ見られない。一方、2013年1月以降に発生している大きめのVLPに伴った変化が傾斜計でも捉えられており、周期数秒程度の傾動変化は広帯域地震計による粒子軌跡と同様に震源方向を向いている。さらに、これらの短周期変動に先行して約5分前からramp関数的な変動が見られる場合もあり、VLPの発生機構を考える上で重要と考えられる。

### 参考文献

Boehm et al. (2006), GRL, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.

出町・他 (2011), 2011年JpGU大会.



SSS33-06

会場:315

時間:4月30日 10:15-10:30

気象庁 (2013), [http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/127/127\\_no06\\_2.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/127/127_no06_2.pdf)  
Marone et al. (1991), JGR, 96, 8441-8452.

キーワード: GPS, 傾斜変動, 火山性地殻変動, 火山活動

Keywords: GPS, Ground Tilt, Volcanic deformation, Volcanic activity

## The acceleration episode of the back-arc rifting in the Izu-Bonin Arc possibly triggered by a remote earthquake in 2004

### The acceleration episode of the back-arc rifting in the Izu-Bonin Arc possibly triggered by a remote earthquake in 2004

ARISA, Deasy<sup>1\*</sup>; HEKI, Kosuke<sup>1</sup>  
ARISA, Deasy<sup>1\*</sup>; HEKI, Kosuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

The Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana Island arc lies along the convergent boundary between the subducting Pacific plate (PA) and the overriding Philippine Sea plate (PH) in the western Pacific. Nishimura (2011) found that the back-arc rifting goes on behind the Izu arc by studying the horizontal velocities of GNSS stations on the Izu Islands. Here we show that this rifting has accelerated in 2004 using GNSS data at stations such as Aogashima, Hachijojima, Mikurajima, Shikinejima, and Nijima (we excluded stations in the Miyake Island because of the volcanic deformation).

The back-arc rifting behind the Izu islands can be seen as the increasing distance between stations in the Izu Islands (they are located to the east of the rifting axis) and stations located in the stable part of PH, e.g. Minami- and Kita-Daito islands. We found that their movement showed clear acceleration around the third quarter of 2004. Such an accelerated eastward movement could be interpreted not only as the acceleration of the back-arc rifting, but also as the trenchward movement of the arc due to a slow slip episode at the PH-PA boundary.

We first rule out the second possibility by constraining the onset time of the acceleration episode, and by correlating it with other inter-plate earthquakes in the PH-PA boundary. There was an inter-plate earthquake occurred on May 29, 2004 (M6.5) at the PA-PH boundary just to the south of the Boso-oki triple junction. However, the time series clearly lacked the jump which should mark the onset of the eastward slow movement. Moreover, the additional velocity vectors do not converge to the epicenter, and the onset time that minimizes the post-fit residual is significantly later than May. We therefore conclude that the accelerated eastward movement started in 2004 was not due to the afterslip of the interplate earthquake in May.

We found that the onset time coincides with the occurrence of the September 5, 2004, Kii-Hanto-oki, September 5, 2004, earthquake (M7.4), which occurred in the PH slab subducting at the Nankai Trough off the Kii Peninsula. We found that the accelerated movement vectors of these islands are almost parallel with each other, and perpendicular to the rift axis. We hypothesize that the seismic wave radiated from the epicenter of this earthquake dynamically triggered the acceleration of the back arc opening in the Izu Arc.

キーワード: GPS, GNSS, Izu-Bonin Arc, time series, back-arc opening, acceleration

Keywords: GPS, GNSS, Izu-Bonin Arc, time series, back-arc opening, acceleration

## GPS 変位速度場から推定した中央構造線の深部構造と運動様式 Subsurface structure and slip pattern of the Median Tectonic Line, SW Japan inferred from GPS displacement rate field

枝川 乃舞子<sup>1</sup>; 田部井 隆雄<sup>1\*</sup>; 一谷 祥瑞<sup>2</sup>; 中村 保彦<sup>2</sup>  
EDAGAWA, Nobuko<sup>1</sup>; Tabei, Takao<sup>1\*</sup>; ICHITANI, Shozui<sup>2</sup>; NAKAMURA, Yasuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学理学部, <sup>2</sup> 高知大学大学院総合人間自然科学研究科  
<sup>1</sup>Fac. Science, Kochi Univ., <sup>2</sup>Grad. School Int. Arts Sciences, Kochi Univ.

西南日本を東西に縦断する中央構造線 (MTL) は、南海トラフにおけるフィリピン海プレートの斜め沈み込みに起因する右横ずれ断層で、西南日本を外帯と内帯に分割する。外帯はプレート沈み込みによる北西-南東方向の強い圧縮を受けながら、MTL を境に内帯ブロックに対してわずかに西向きに横ずれ運動し、前弧スリバーを形成している。こうした地殻変動場の解明には、南海トラフにおけるプレート境界面上の固着分布に加え、MTL 断層面の構造と運動様式が重要な要因となる。加えて、MTL はそれ自身が将来に内陸直下型の大地震を引き起こす可能性を有しており、地震災害リスク評価の面からも重要な監視対象である。

我々は国土地理院 GEONET を補完する MTL 横断稠密 GPS 観測を実施し、プレート沈み込みの影響を除去した変位速度場から、MTL 北側の幅 20-30km の領域に外帯/内帯の相対運動の遷移帯が存在することを示した (Tabei et al., 2002)。これを説明するため、MTL 周辺の地質構造は北傾斜であるという反射法地震探査結果 (Ito et al., 1996) を用い、北傾斜した断層面の上部が深さ 15 km まで固着し、それより深部で定常的右横ずれが起きているというモデルを提唱した。このモデルで速度場の遷移帯をうまく説明できるものの、傾斜断層面上の純粋な横ずれ運動という、応力場の観点からはいささか不自然な点が残った。さらに、MTL 北側の讃岐平野、燧灘、高縄半島では高角断層面上の右横ずれメカニズムを示す地震が MTL と平行に帯状に発生し (久保・岡田, 2007)、MTL の地表トレースや北傾斜構造と整合しない。こうした問題の解明には MTL 北側での地殻変動観測が重要であるが、瀬戸内海が存在により GEONET 観測点密度は低い。そこで、これを補完する目的で、燧灘とその周辺に計 3 点の GPS 連続観測点を設置し、2010 年 11 月より観測を実施している。

MTL 周辺の北傾斜構造と、MTL の北側に連なる高角/右横ずれメカニズムの地震分布の両方を説明するものとして、以下の運動学的モデルを提唱する。北傾斜した MTL 断層面上の盤内に、MTL と平行に複数の鉛直/右横ずれ断層が存在し、断層面が固着して外帯/内帯の相対運動を分散して阻害することで、全体として変位速度場の遷移帯を形成する。今回は深さの異なる 4 枚の平行断層を仮定した。ブロック速度の 1/4 に相当するすべり欠損速度を各断層に与え、それぞれが作る変位場とブロック運動を合算すると、1 枚の傾斜断層による遷移帯とほぼ同等の結果が得られた。

なお、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生が西南日本の地殻変動場に及ぼした影響を調べるため、GEONET 574 点の F3 解を用いて地震前 (2006 年 1 月-2009 年 12 月) と地震後 (2011 年 3 月-2013 年 7 月) の変位速度場を算出した。地震後の変動場には東北東に 1-4 cm/yr の広域の速度が重畳しており、震源域に向かう伸張ひずみが認められる。しかし、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西-南東方向の圧縮場に有意な変化は認められない。

キーワード: 中央構造線, 南海トラフ, GPS, 地殻変動

Keywords: Median Tectonic Line, Nankai Trough, GPS, Deformation

## 南西諸島北部におけるGPS連続観測 Continuous GPS observation in northern part of Nansei Islands

中尾 茂<sup>1\*</sup>; 八木原 寛<sup>2</sup>; 平野 舟一郎<sup>2</sup>; 後藤 和彦<sup>2</sup>  
NAKAO, Shigeru<sup>1\*</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>2</sup>; HIRANO, Shuichiro<sup>2</sup>; GOTO, Kazuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学工学研究科, <sup>2</sup> 鹿児島大学南西島弧地震火山観測所  
<sup>1</sup>GSSE, Kagoshima Univ., <sup>2</sup>NOEV, Kagoshima Univ.

GEONET, which is a nationwide GPS observation in Japan cover on all over Japan. However, there is a GEONET site in Toshima-mura which is located in northern part of Nansei Islands. This region is defined the boundary between Northern and Central part of Ryukyu arc (Nishimura et al., 2004). It is not clear that where is the boundary because there is almost no GPS site. Goto (2013) concluded that the great earthquake occurred in 1911 is the interpolate event in this region. We set up the continuous GPS in islands of this region due to observe crustal deformation in this region.

In Akuseki Island (AKSK), Takarajima (TAKR) and Kuchinoshima (KCHI), continuous GPS (CGPS) observation started in March 2007, July 2007 and September 2010, respectively. CGPS set up on Gajyajima (GJYA) and Ujishima (UJIS), where is a deserted island, in May 2009. CGPS in Yokoatejima (YKAT) started in September 2013. Data is recorded at CGPS sites. Electric power system at GJYA, UJIS and YKAT is composed of batteries and photovoltaic cells.

Bernese GPS Software ver. 5.0 are used with IGS precise ephemerides and IERS rotation parameters. We also estimated tropospheric delays every hour and their horizontal gradients every six hours.

The short-term repeatabilities are from 1.6 to 3.0 mm in horizontal component and from 6.5 to 7.9 mm in vertical components. These observation is expected to make contribution to resolve rigid movement and crustal deformation in this region.



## 合成開口レーダを用いたタンザニアの群発地震における地殻変動の検出とその発生メカニズムについて The detection of crustal deformation associated with earthquake swarm in Tanzania observed by SAR

姫松 裕志<sup>1\*</sup>; 古屋 正人<sup>1</sup>  
HIMEMATSU, Yuji<sup>1\*</sup>; FURUYA, Masato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Hokkaido University

東アフリカ地溝帯は、陸域で発散するプレート境界がある数少ない地域である。この地域は東西に年間数 cm 拡大し続け、数百万年後には大陸が分断するとされている。また、この地域では中規模の地震や火山活動が活発にみられ、至る所に断層や火山が存在する。

2007年7月にタンザニア北部で最大 Mw5.9 の地震を含む群発地震が発生し、およそ2ヶ月にわたって続いた。Global CMT の発表によると、この群発地震の間に  $M > 5$  の地震は8回発生しており、それらはいずれも正断層型の地震である。また群発地震が始まって1週間後には、震源域に近い Oldoinyo Lengai が噴火を始め、群発地震が終息に近づいた頃に噴煙中を伴う噴火をした。

Biggs et al.(2009,2013) では、主に C バンド衛星である ENVISAT/ASAR のデータに基づいて時系列的な群発地震と Oldoinyo Lengai の噴火に伴う地殻変動を検出した。しかし位相アンラップが部分的にできていない領域もあり、データが欠落している領域もある。いずれも Descending のみのデータであるため、地殻変動の詳細を検出できていない可能性がある。そこで本研究では、より位相アンラップが容易な長波長のマイクロ波を用いている L バンド衛星である ALOS/PALSAR の Ascending と Descending のデータを用いて地殻変動の検出を行った。

本研究の目的は、群発地震に伴う地殻変動の検出を行い、その地殻変動をより詳細に説明するために断層モデルを推定することで、陸域のプレート境界における地殻変動のメカニズムを解明する手掛かりを得ることである。

Ascending と Descending の InSAR による解析結果は、北東-南西方向にのびる沈降した領域がみられ、この領域を境に北西-南東方向に拡大する地殻変動が明らかになった。この地殻変動の空間変動パターンは、東アフリカ地溝帯が拡大している方向とほぼ一致する。さらに Azimuth Offset の結果は、沈降した領域がやや南に変動していることを示している。以上の3つの結果を用いて3次元変位を求めた。沈降した領域では、鉛直方向に最大 62cm の沈降と南南東方向に最大 33cm の水平移動がみられ、それを挟む東西の領域では、わずかな隆起と北西-南東方向へ 50cm 程度の水平移動がみられた。

これらの変動を詳細に説明するために、半無限均一弾性体を仮定して断層モデルを推定した。断層形状の複雑性を考慮するために、三角形の食い違い要素を用いた非平面断層モデルを推定した。求められた3次元変位とこの地域が引張場であることを鑑みて、西落ちと東落ちの2枚の断層をおいた。

InSAR によって得られた変位量を説明する断層のすべり量をインバージョン解析によって求めた。いずれの断層も 2-4km の深さで同じ程度のすべり量を示し、Strike 方向には最大 75cm、Dip 方向には最大 1m のすべり分布を示した。そのすべり量から得られる変位量は、観測値を良く説明するものである。

推定した断層モデルによるモーメントの解放量 (Geodetic Moment: GM) は群発地震で解放されたモーメント解放量 (Seismic Moment: SM) を上回り、その比 (SM/GM) は 37.2 % となった。この値が小さいほど非地震性の地殻変動が多く発生したことを示している。

群発地震の発生期間中に Oldoinyo Lengai が噴火し、InSAR によっても、この噴火活動に伴う地殻変動も検出された。群発地震と噴火との関連性についても議論する予定である。

キーワード: 干渉 SAR, 地殻変動, 東アフリカ地溝帯, 群発地震, 大陸形成, タンザニア

Keywords: InSAR, Crutal deformation, East Africa rift valley, Earthquake swarm, Continental techtonics, Tanzania

## 合成開口レーダーで捉えた2009年 Cinchona 地震 (Mw6.1, コスタリカ) に伴う地殻変動と断層モデリング Coseismic Deformation Detected by SAR and Fault Source Modeling of the 2009 Cinchona Earthquake (Mw6.1), Costa Rica

梅村 宗太郎<sup>1\*</sup>; 古屋 正人<sup>1</sup>  
UMEMURA, Shutaro<sup>1\*</sup>; FURUYA, Masato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻  
<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

2009年1月8日に中米コスタリカで Mw6.1 の浅い地震が発生した。Cinchona 地震と呼ばれるこの地震は多数の地すべりを引き起こし、20名以上の死者を出す大きな被害となった。付近には NNW-SSE 走向の Angel-Vala Blanca 断層があり、それが震源断層だと推定された (Montero et al., 2009)。地震発生後4日後 (2009年1月12日) には震源から6km西に位置する Poas 火山が1年ぶりに噴火した (VEI 1)。この火山は2006年に10年ぶりの噴火をして以来活動的な状態が続いていた。本研究では地震と火山の関係性を調べる第一歩として、ALOS/PALSAR のデータを用いて地震時地殻変動を検出し、InSAR データを説明する断層モデルを作成した。

本研究では ALOS/PALSAR の北行軌道 (path162, frame190) と南行軌道 (path465, frame3410) のデータを用いた。地形効果の補正に ASTER GDEM の数値標高モデルを、SAR データの解析には Gamma Remote Sensing のソフトを用いた。干渉処理においては大気ノイズの除去を行った。断層要素のグリーン関数の計算には Meade(2007) で公開されている半無限均質弾性体を仮定した triangular dislocation elements による変位の解析解のスキriptを利用した。

InSAR 解析の結果、北行軌道で最大20cm、南行軌道で最大22cmの地震時地殻変動による LOS (Line of Sight) 変位が認められた。断層モデルをトライアンドエラーで探したところ、strike/dip が133/65、中央での rake が-163の断層で変位をうまく説明できた。これは Angel-Vala Blanca 断層とは違う断層パラメーターであり、未知断層が震源となったと考えられる。また、断層運動によって Poas 火山の直下の圧力が増加した。この圧力変化が噴火にどう関連するか、さらなる議論が必要である。

キーワード: InSAR, 地震時地殻変動, 断層モデル, コスタリカ  
Keywords: InSAR, Coseismic Deformation, Fault Source Model, Costa Rica

精密水準測量による台湾台東縦谷断層中部における クリープ滑りの加速イベント  
(2010-2013)  
An acceleration event of creeping slip detected by precise leveling survey at the central  
part of the Longitudinal valle

村瀬 雅之<sup>1</sup>; 松多 信尚<sup>2\*</sup>; Lin Cheng-Hong<sup>3</sup>; Chen Wen-Shan<sup>4</sup>; Lin Jui-Jen<sup>3</sup>; 西川 由香<sup>4</sup>; 和田 絵里香<sup>1</sup>; 小泉 尚嗣<sup>5</sup>  
MURASE, Masayuki<sup>1</sup>; MATSUTA, Nobuhisa<sup>2\*</sup>; LIN, Cheng-hong<sup>3</sup>; CHEN, Wen-shan<sup>4</sup>; LIN, Jui-jen<sup>3</sup>; NISHIKAWA, Yuka<sup>4</sup>  
; WADA, Erika<sup>1</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 日本大学文理学部地球システム科学科, <sup>2</sup> 名古屋大学環境学研究所, <sup>3</sup> 中央研究院地球科学研究所 (中華民国台湾), <sup>4</sup> 国立台湾大学 (中華民国台湾), <sup>5</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Department of Geosystem, College of Humanities and Sciences, NIHON University, <sup>2</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>3</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, <sup>4</sup>National Taiwan University, <sup>5</sup>The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Precise levelling surveys were conducted across the central Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan, to understand the deformation of the transition zone between the stable fault creep area and the locked area, which maybe correspond to an asperity. In order to investigate the surface relationship between the fault creep area and the geological condition of the transition zone, we established levelling routes in the Yuli, and Chike-san areas. The Yuli area forms the geological boundary of the Lichi Melange Formation, which is composed of chaotic mudstones containing numerous exotic blocks of various sizes and lithologies. Along the Yuli route, located on the Lichi Melange, an uplift rate of 30 mm/yr was detected during the period 2010-2013, suggesting that aseismic fault creep might be continuing with long-term stability. Along the Chike-san route, located on no Lichi Melange, a vertical deformation rate of 8 mm/yr, 40mm/yr, and 20mm/yr were detected in the period 2010-2011, 2011-2012, and 2012-2013, respectively.

The creep slip distribution was estimated by using a two-dimensional single-fault model proposed at Chike-san in the period 2012-2013. Large slip rates were estimated at 4-5 km of the fault plane. At the previous periods 2010-2011 and 2011-2012, relatively large slip rates were estimated at two parts of the fault plane-one at a depth of about 1.5 km and another at a depth of 4-5 km-. We believe that the acceleration event of creeping slip was continued at the depth of 4-5 km in the period 2012-2013. The northern limit of the stable creep area may be the Yuli area. The episodic creep event occurred in the transition zone between the stable fault creep area and the asperity area. The boundary between the stable creep area and the episodic creep area is consistent with the geological boundary of the Lichi Melange Formation.

キーワード: 台東縦谷断層, クリープ, 精密水準測量

Keywords: Taiwan, Longitudinal valley fault, precise leveling survey, aseismic creep motion

## コサイスミックな内部応力変化の理論計算-丸い地球の場合 Internal stress changes due to point dislocations in a spherical earth

高木 悠<sup>1\*</sup>; 大久保 修平<sup>1</sup>  
TAKAGI, Yu<sup>1\*</sup>; OKUBO, Shuhei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

地震によって生じる応力変化などの内部変形は、一様半無限弾性体モデルについては Okada (1992) によってシンプルかつ完全な形で示された。この一様半無限媒質モデルは、例えば、地震間の「相互作用」を考える上での指標を与える  $\Delta$  CFF の計算に用いられるなど、現在幅広い研究で使われており、地震の理解に貢献してきた。一方、巨大地震に伴う広範囲な応力変化などのグローバルな変形は、より現実的な地球モデルである球対称モデルで計算する必要がある。Sun and Okubo (1993) は球対称モデルで、点震源によって生じる地表の変位や重力変化の計算に成功した。しかし、内部の応力や変位については、球対称モデルで計算された例はない。それは、原理的な方法は示されているものの (Takeuchi and Saito, 1972)、実際に計算しようとするに困難が生じるためである。そこで本研究では、球対称モデルで、点震源によって生じる内部変形を計算する手法を提案し、実際に計算を行った。

本講演では、以下の点について述べる。

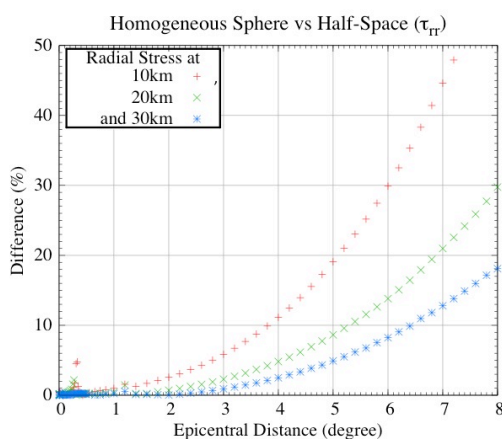
- i) 内部変形を計算するための手法の概説。
- ii) 解析解が分っている一様半無限媒質の結果と本研究で計算された一様球の結果との比較。
- iii) PREM のような成層構造モデルでの計算結果。

一様球と一様半無限媒質の結果を詳細に比較すると (ii)、例えば、深さ 32km の横ずれ断層によって生じる鉛直方向の垂直応力では、両者の差が 10 % になる角距離は、観測の深さが 10km、20km、30km でそれぞれ 4 度、5 度、6.5 度であることが分った (図)。4 度はおおよそ 400km であり、東北地方太平洋沖地震の断層の長さに相当する。

図. 一様球と一様半無限媒質との差。深さ 32km の横ずれ断層によって生じる鉛直方向の垂直応力変化を比較した。横軸が震央距離、縦軸がモデル間の差 (%) である。赤、緑、青はそれぞれ観測点の深さが 10、20、30km を表す。

キーワード: 内部応力変化, 球対称地球, 点震源, 成層構造

Keywords: internal stress change, spherically symmetric earth, point dislocation, stratification





## GPS 津波計を活用した GPS—音響システムによる海底地殻変動の連続観測 Continuous measurements of ocean bottom crustal movements based on GPS-acoustic system using GPS buoy

今田 成之<sup>1\*</sup>; 寺田 幸博<sup>2</sup>; 坂上 啓<sup>3</sup>; 田所 敬一<sup>4</sup>; 加藤 照之<sup>5</sup>

IMADA, Naruyuki<sup>1\*</sup>; TERADA, Yukihiko<sup>2</sup>; SAKAUE, Hiromu<sup>3</sup>; TADOKORO, Keiichi<sup>4</sup>; KATO, Teruyuki<sup>5</sup>

<sup>1</sup>日立造船株式会社, <sup>2</sup>高知高専, <sup>3</sup>所属なし, <sup>4</sup>名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター, <sup>5</sup>東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Hitachi Zosen Corporation, <sup>2</sup>Kochi National College of Technology, <sup>3</sup>None, <sup>4</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>5</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

GPS ブイを活用した GPS—音響システムに基づく海底地殻変動の連続観測の試験観測について報告する。

我々は GPS ブイを用いて津波を早期に検知するシステムを開発してきた。一方, Spiess らによって提唱され, 日本の海上保安庁や大学で開発が進められてきた GPS—音響を用いた海底地殻変動計測では海上の位置決めには船舶や船舶に曳航されたブイに設置された GPS を用いた間欠観測が行われてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受けてこのような海底地殻変動観測の重要性が改めて指摘されたが, 今後の課題として, これまでの間欠的観測から, より詳細な地殻変動観測のための連続観測の技術開発が重要であることが認識された。

我々が実施している津波の早期検知をめざした GPS ブイに海底地殻変動連続観測の機能を付加すれば, 海底地殻変動の連続的な計測が行えるはずである。そこで, GPS ブイに音響装置を設置して海底地殻変動の連続観測の可能性を検証する実験を行った。室戸岬西方沖 13km に設置していた GPS 津波計を用いた予備的な実験の後, 2013 年 8 月から室戸岬南方沖 35km の GPS 津波計 (黒牧 16 号ブイ) を用いて 2 カ月間の連続計測を実施した。この GPS 津波計設置位置の水深が 726m であることから, ブイの周囲 3 地点の海底に水深と同程度の距離を相互に離して音響トランスポンダーを配置した。海底に設置した 3 局とブイとの測距は, ブイの側面の海面下に音響送受波器 (周波数 10kHz) を設置し, PSK 変調をした 5 次の M 系列音波を用いて 1 分間隔でシーケンシャルに送受信する方式で行った。

現在得られたデータの解析中であり, 2 カ月間のデータから雑音特性や日々の座標値の繰り返し誤差, ブイの動揺による雑音等についての予察の結果を報告したい。現在日本周辺には津波監視用の GPS ブイが 15 基程度展開されているが, 今後 GPS ブイをさらに展開し, 津波の早期監視と共に海底地殻変動の連続的な監視が可能となれば日本列島の地殻変動と津波の監視に極めて効果的な監視体制が構築できると期待される。海岸から 100km を超える沖合での海面変動監視の可能性についての技術的課題が既にクリアされているが, ブイからのデータの伝送に関しては次世代の通信衛星が必要であり, 海面変動及び海底地殻変動をあわせた衛星データ通信の仕様の検討にも本試験による成果が有用であろうと期待される。

揚水・湧水により発生する断層の動きと間隙弾性体による理解 — 東濃地震科学研究所地域の NNW 断層の場合 —  
Movement of a fault arised by a pumping or a spring water and its understanding by poroelasticity -a case of NNW fault-

石井 紘<sup>1\*</sup>; 浅井 康広<sup>1</sup>  
ISHII, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ASAI, Yasuhiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東濃地震科研  
<sup>1</sup> TRIES, ADEP

東濃地震科学研究所では深部ボアホールで連続観測可能な総合観測装置や応力計を開発している。現在、研究所周辺の 10km 四方の地域に約 15 カ所の深部ボアホール観測を実施し、地殻変動や地下水の振る舞いなどを調べている。最も深いボアホールの深度は 1030m である。

東濃地震科学研究所の近くでは原子力研究開発機構 (JAEA) が直径 6.5m と 4.5m のそれぞれ主立坑と換気立坑を掘削しており、現在深度 500m に達している。両立坑は 40m 離れており、立坑はステージと呼ばれる横坑で繋がっている。この立坑の近くには右横ずれの NNW 断層が存在している。

地下水の変動と地球物理学的観測量との関連を実験や発生した現象を利用して調べている。それらは (1) 断層近くのボアホールにおいて揚水実験を行いボアホール観測点における歪変化や水位変化を観測・解析した。(2) 立坑において大規模な湧水が発生した時のボアホール観測点における歪変化や水位変化を観測・解析した。

その結果以下のような結果が得られた。

1. 立坑内における湧水や近傍のボアホールにおける揚水実験により TGR350 孔の水位は低下するが深度 350m に設置された歪計は NNW 断層が右横ずれの動きをするような観測結果を示した。
2. 湧水の止水や揚水後の TGR350 孔の水位の上昇に伴って深度 350m に設置された歪計は NNW 断層が左横ずれの動きをするような観測結果を示した。
3. 堆積層に設置した伸縮計や浅い深度 (深度 165m) に設置した歪計は断層運動などを反映したデータを示さない。
4. 間隙弾性体としての理解に基づいてこの地域の地下水流動とそのメカニズムを説明できる一つのモデルを考察した。

観測と解析結果の詳細を報告する。

キーワード: 深部ボアホール観測, 揚水・湧水と断層運動, 地下水流動, 間隙弾性体による理解, 連続観測応力計  
Keywords: Deep borehole observation, Fault movement by spring and pumping water, Groundwater flow, Understand by poroelasticity, Continuously observable stressmeter

## 正馬様地殻活動総合観測点の整備 —石井式ボアホール応力計の埋設・設置— Construction of Syobasama crustal activity observatory ?Installation of Ishii-type borehole stressmeter?

浅井 康広<sup>1\*</sup>; 石井 紘<sup>1</sup>  
ASAI, Yasuhiro<sup>1\*</sup>; ISHII, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

<sup>1</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Pred.

### 1. はじめに

瑞浪超深地層研究所 (MIU) の立坑や調査孔の掘削に伴う大量湧水の発生と調査孔における水理試験によって、亀裂性岩盤である土岐花崗岩中の間隙水圧に大きな変動が生じている。この水圧変動が原因となって MIU から約 0.5km 範囲内に位置する戸狩観測点 (TGR350, TGR165) と研究所観測点 (TRIES) および MIU 立坑内観測点 (STG100, STG200, STG300) では、地殻応力・歪・傾斜、地下水位・水圧の連続観測記録に地球潮汐変化の 100 倍以上の変化が記録されている (例えば浅井・石井, JPGU2013)。MIU の近傍には北北西走向のほぼ垂直変位の地質断層がある。

変化の特徴は、断層の南西側で間隙水圧変化が生じると、そのインパクトは同領域の観測点の水位/水圧記録にみられ、かつ、応力、歪、傾斜記録にもみられる。一方、断層の北東側の観測点ではその影響は水位・水圧観測に見られないが、応力、歪、傾斜記録に見られる。断層の北東側で水圧変化が生じる場合でも同様である。この観測結果は、断層は遮水性を持つが、間隙水圧変化によって生じた岩盤の弾性変形は断層に関係なくその周囲に及んでいることを示している。

### 2. 観測点整備の目的

MIU の北西約 1km に既存の正馬様観測点ボアホール (SBS110; 深度 110m 孔) がある。SBS110 の地下水位記録には MIU 近傍で見られるような水圧変動の影響が見られない。しかしながら、水圧変動に伴う地殻応力・歪変化が正馬様に及んでいるかどうかは、地殻応力・歪の観測を行っていないため不明であった。MIU 立坑掘削の影響がどのように、かつ、どの範囲まで及んでいるかの調査・研究を行うことを目的として、東濃地震科学研究所は、2013 年 12 月に正馬様観測点に新規 100m 深ボアホールの掘削を開始、2014 年 2 月 3 日現在整備を進めている。2 月中には当研究所で開発した石井式ボアホール応力計をボアホール孔底付近の岩盤状態の良い個所に埋設・設置し連続観測を開始する予定である。

講演では観測点整備の概要と最新の観測記録についての議論を行う。

キーワード: 間隙水圧変化, 弾性変形, 瑞浪超深地層研究所, 石井式ボアホール応力計

Keywords: Pore pressure change, Elastic deformation, Mizunami Underground Research Laboratory, Ishii-type borehole stress meter

## GPS観測に基づく2011年4月11日福島県浜通り地震(Mw6.6)の余効地殻変動 Post-seismic crustal movements of the 11 April Mw6.6 Fukushima Hamadori earthquake based on GPS observations

堀 草子<sup>1\*</sup>; 青木 陽介<sup>2</sup>; 加藤 照之<sup>2</sup>; 宮下 芳<sup>1</sup>  
HORI, Kayako<sup>1\*</sup>; AOKI, Yosuke<sup>2</sup>; KATO, Teruyuki<sup>2</sup>; MIYASHITA, Kaoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>茨城大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>東京大学地震学研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Ibaraki University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)は活発な余震活動を伴った。その一ヶ月後2011年4月11日にいわき市付近の深さ5kmで発生したMw6.6の正断層型地震(福島県浜通り地震)は東北地方太平洋沖地震の余震の一つと考えられる。この地震の発生に伴っていわきの観測点が約30cm北東方向に移動するなどの地殻変動が観測された。

福島県浜通り地震にともなう地殻変動はInSARを用いた先行研究により、詳細な断層すべりモデルが得られている(Kobayashi et al.,2013; Fukushima et al.,2013)が、ALOS衛星が福島県浜通り地震直後に運用を停止したために、SARデータを用いて余効変動を計測することはできず、余効変動を観測しているのはGPS観測点のみである。そこで、本研究ではGPSデータを用いて福島県浜通り地震の余効変動のメカニズムを解明することを目標とした。

本研究では、余効変動は先行研究による地震断層モデル(Kobayashi et al.,2013; Fukushima et al.,2013)で仮定した断層の周辺のすべりによって発生していると仮定した。GPSのデータには3月11日の本震以後の大きな余効変動が含まれているので、まず、Fukuda et al.,2013による本震の余効変動のモデルを用い、本震に伴う余効変動をデータから除去した。こうして得られたデータには4月11日の地震の余効変動と考えられる変位が見て取れる。この変位場のデータに基づいて、上記の先行研究で与えられた断層面上でのすべり分布を推定した。推定結果について、講演で解説する。



## 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時地殻変動の地形および球面補正 Coseismic slip distribution for the 2011 Tohoku-Oki earthquake with topographic corrections

五島 仁志<sup>1\*</sup>; 宮崎 真一<sup>1</sup>  
GOSHIMA, Hitoshi<sup>1\*</sup>; MIYAZAKI, Shinichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、断層面の破壊が自由表面まで及んだ海溝型地震である (Ide et al., 2011)。このような海溝型地震による地殻変動を計算する際、Okada(1992) 等による半無限弾性体の近似式を用いると、「観測点に対する相対的な震源深さ」、「自由表面までの断層滑り」という 2 つの条件を両立させることが不可能である。そのため Okada(1992) による式を用いて地殻変動を計算する場合、どちらか一方の条件のみを使用することになる。例えば、「観測点に対する相対的な震源深さ」という条件を用いる場合、基準平面を観測点に合わせる必要があり、一方、「自由表面まで断層が滑る」という条件を用いる場合、基準平面を断層上端部に合わせる必要がある。この 2 種類の断層モデルで地殻変動量を計算すると、水平・鉛直変位共に陸域で最大約 30cm の違いが生じる。これは、水平成分では 5 %、鉛直成分では 15 % に相当し、特に鉛直成分でこの 2 手法間の違いが大きくなる。すなわち、地震時の正しい地殻変動を計算したり、観測された地殻変動データから断層滑り分布の逆計算を行う際には、上記 2 種類の仮定を両立させる必要があり、そのためには地形の起伏の影響を考慮したモデルが必要である。そこで本研究では、地形の起伏の影響を考慮した地殻変動計算のソフトウェアを作成し、より現実的な断層滑り分布の逆計算を行った。

本研究では、半無限弾性体の近似式に「地形の傾き」・「地形の高さ」を表す項をそれぞれ追加して地形の影響を表す (Williams and Wadge, 2000)。また、この本手法を利用して地球の曲率を考慮した地殻変動計算も行うことができる。適用可能範囲は食い違い源から半径約 600km ではあるが、計算量が少なく、簡単に地球の曲率を考慮した地殻変動計算ができるという利点がある。

本発表では、東北地方太平洋沖地震の地震時地殻変動に関して地形・曲率の影響を加えた弾性インバージョンを行い、それらの影響を考慮しない半無限解と比較する。この際、陸上地殻変動データに国土地理院 GPS 連続観測網 GEONET の F3 解を、海底地殻変動データに海上保安庁・東北大学の海底地殻変動観測データ (Sato et al., 2011; Kido et al., 2011; Ito et al., 2011) を用いた。

キーワード: 地殻変動, 2011 年東北地方太平洋沖地震, 地形, 球

Keywords: crustal deformation, the 2011 Tohoku-Oki earthquake, topography, sphere

## 湧水量変化を用いて推定された透水係数の経年変化 Secular change of permeability estimated by using the variations of groundwater discharge

向井 厚志<sup>1\*</sup>; 大塚 成昭<sup>2</sup>

MUKAI, Atsushi<sup>1\*</sup>; OTSUKA, Shigeaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 奈良産業大学情報学部, <sup>2</sup> 神戸学院大学人文学部

<sup>1</sup>Faculty of Informatics, Nara Sangyo University, <sup>2</sup>Faculty of Humanities and Sciences, Kobe Gakuin University

透水係数の経年変化は、湧水量変化に含まれる気圧応答特性の時間的変化を引き起こす。2001 年以降の 12 年間に六甲高雄観測室で観測された湧水量変化を用いて周辺岩盤の透水係数を推定したところ、その透水係数の経年変化には単調な低下とともに、1 年程度の短い期間内での揺らぎが見られた。前者は 1995 年兵庫県南部地震時に緩んだ破碎帯の割れ目が泥の蓄積や地殻応力によって閉口しつつあることを反映しており、後者は大きな地震動によって一時的に割れ目が再開口した影響と推察される。

六甲高雄観測室は兵庫県南部の神戸市に位置し、万福寺断層の破碎帯を貫く坑道に開設された。同観測室では、1995 年兵庫県南部地震時に湧水量の顕著な増大が観測された(藤森他,1995)。このことは、兵庫県南部地震の地震動によって六甲高雄観測室周辺の破碎帯の割れ目が緩み開口したことを示唆している。向井・大塚(2009)は、六甲高雄観測室における潮汐歪から周辺岩盤の弾性定数を推定し、ヤング率が経年的に増大していることを報告した。この結果は、地殻応力による割れ目の閉口や泥の蓄積によって割れ目の固着が進み、破碎帯の強度が回復しつつあることを示している。

向井・大塚(2013)は、一次元の地下水流動モデルを仮定し、六甲高雄観測室で観測された湧水量の気圧応答を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う透水係数の時間的変化を推定した。透水係数は地震直後に約 1.9 倍に増大し、10 ヶ月後には約 1.3 倍にまで回復した。このことは、遠方の地震による地震動が割れ目内に蓄積されていた泥の流出を促し、一時的に割れ目が再開口されることを示唆している。

本発表では、向井・大塚(2013)と同じ手法を用いて、2001 年以降の 12 年間にわたって六甲高雄観測室周辺の透水係数の経年変化を推定した結果について報告する。湧水量変化の気圧応答を用いて推定された透水係数は経年的な低下を示し、2001 年と比べ、2012 年の透水係数は約 50 %に低下した。このことは、向井・大塚(2009)が潮汐歪を用いて推定したヤング率の経年的な増大と矛盾せず、1995 年兵庫県南部地震時に緩んだ破碎帯の割れ目が固着しつつあることを反映していると考えられる。

キーワード: 破碎帯, 透水係数, 湧水量, 歪変化

Keywords: fracture zone, permeability, groundwater discharge, strain change

## 水準測量と潮位から推定した房総半島の地殻上下変動（1966～2001 年） Vertical crustal deformation in Boso Peninsula from 1966 to 2001 deduced from leveling and sea level data

小林 昭夫<sup>1\*</sup>  
KOBAYASHI, Akio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所  
<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

関東地方は陸側プレートの下にフィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込む複雑な構造をしている。陸側プレートとフィリピン海プレートとのプレート境界では、1923 年関東地震が発生しており、プレート境界面での最近の固着分布も推定されている [鷺谷 (1998)、Nishimura et al. (2007)]。関東地方では、南海トラフ沿いのような深部低周波微動は観測されていないが、房総半島沖では数年に一度、地震を伴う継続期間 10 日程度のスロースリップが発生している。また、Fujii (1993) は房総半島の水準測量データを調査し、1965～1972 年の間にスロースリップが発生した可能性を指摘している。スロースリップの発生域は、将来の巨大地震発生に向けて歪が蓄積されているプレート境界の固着域に隣接しており、その過去からの発生状況を把握することは、プレート境界の状態把握や巨大地震の発生予測のための重要な情報となる。ここでは、GNSS 展開以前の房総半島について、非定常上下地殻変動の有無を確認した。

過去の地殻変動を調査する手段として、水準測量は観測精度が高いが実施頻度が低い。潮位記録は海況の影響除去が難しいために水準測量より地殻変動の観測精度は悪いが、連続記録でありイベントの時期の特定には有力な情報を提供する。これらを組み合わせることにより、過去に発生した非定常なイベントによる地殻変動の場所と時期を推定できる可能性がある。これまで、南海トラフ沿いの水準測量と潮位観測から、長期的スロースリップの場所と時期を推定してきた。

GNSS の上下変動データから定常的な地殻上下変動速度を推定し、それを水準測量結果による各測量間の上下変動から差し引くことにより、各期間に発生した非定常的な地殻変動を抽出する。GNSS データは国土地理院 GEONET の日座標値 F3 解を使用した。GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセットは、国土地理院 Web ページで公開されているデータセットを用いて補正した。ここでは 1997 年 1 月から 2011 年 1 月までの 14 年間のデータから定常的な地殻上下変動速度を推定した。この期間には房総半島の地殻上下変動に影響を与えるイベントは発生していない。なお 2000 年の伊豆諸島北部イベントや房総半島沖のスロースリップによる陸上の上下変化は 1cm 未満である。

房総半島の水準測量の間隔が 1～数年になった 1966 年以降 2001 年までについて調査した。水準測量データは地殻活動観測データ総合解析システム (INCA) [鷺谷・他 (2003)] から入手した。GNSS から推定された定常的な地殻上下変動速度に測量期間の長さに乗じた変化量を、水準測量間の地殻上下変動から差し引く。期間中に非定常な地殻変動が発生していなければ、上下変動の分布はゼロを中心とするばらつきの範囲内に入るはずである。

1966～2001 年の水準測量からは、市原市北部の工業用水の揚水による地盤沈下、茂原地区を中心とする天然ガスかん水の採取による地盤変動の他は、目立った非定常変動は見られない。津村 (1963) の方法で補正した潮位では、館山市布良で 1980 年代に沈降の停滞 (数 cm の非定常分) が見られるが、水準測量では対応する変化は見られない。また、Fujii (1993) により指摘された 1965～1972 年の房総半島中部の隆起もばらつきの範囲内であり、今後調査対象の水準路線を追加して確認する予定である。

本調査には国土地理院 GEONET の座標値およびオフセット値、水準測量結果を使用させていただきました。

キーワード: 房総半島, 地殻変動, 水準測量, 潮位  
Keywords: Boso Peninsula, crustal deformation, leveling, sea level

## 2014 年房総半島沖のスロースリップ 2014 Boso slow slip

小沢 慎三郎<sup>1\*</sup>  
OZAWA, Shinzaburo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院  
<sup>1</sup> Geospatial Information Authority of Japan

### はじめに

房総半島では 1996 年、2002 年、2007 年、2011 年にスロースリップイベント（房総半島 SSE）が発生している。過去 4 回とも 10 日間程度で収まっている。また滑り領域もほぼ同じような場所で発生しており、固有地震的なふるまいが見受けられていた。房総半島 SSE の発生間隔は、1996 年から、6.4 年、4.9 年、4.2 年と次第に短くなっていった。そのような中、2011 年の房総半島 SSE から 2.2 年程経過した 2014 年 1 月 1 日から、房総半島 SSE が発生した。本研究では、2014 年のスロースリップの滑り過程を時間依存のインバージョンで推定し、過去のスロースリップとの比較を行った。

### データと解析手法

GPS 観測によって非定常変動が 2014 年 1 月 1 日頃から捉えられている。捉えられた非定常変動を明瞭にするために、2009-2011 年の定常的な変動を地殻変動データから取り除き解析に使用した。この結果、房総半島中・南部の領域で南南東を向く非定常変動が検出された。最大の地殻変動は、1 cm 程となっている。この非定常変動は、房総半島 SSE のプレート境界面上の滑りによるものと考えられる。

上記の非定常変動のデータから、時間依存のインバージョンで房総半島 SSE の滑り過程を推定した。データは、房総半島地域の 40 点程の観測点の東西、南北、上下変動量を使用した。固定点は八郷を採用した。フィリピン海プレートの上面の形状は、Nakajima& Hasegawa [2006] を使用している。断層領域は、3 次の B-スプライン関数の重ね合わせで表現し、断層面の滑り量は、やはり B-スプライン関数の重ね合わせで表わされている。トレンド成分と周期成分を元の時系列データから除き解析に使用している。断層面の境界部では滑りが 0 という条件を採用した。

インバージョンの結果は、2014 年の房総半島 SSE では、房総半島沖合で滑りが発生し、時間と共に、滑り領域が南に広がっていることが推定された。推定されたモーメントマグニチュードは 2014 年 1 月 10 日時点で、6.4 に達している。また、過去の房総半島 SSE の推定モーメントマグニチュードは 1996 年で 6.4、2002 年で 6.5、2007 年で 6.5、2011 年で 6.6 と推定されている。5 つの房総半島 SSE では、ほぼ同じような領域で同じような規模で、似通った滑り過程が推定された。房総半島 SSE の再来間隔は、1996-2002 年で 6.4 年、2002-2007 年で 4.9 年、2007-2011 年で 4.3 年、2011-2014 年で 2.2 年となっている。この 5 回の SSE からは、滑り予測可能でも、時間間隔の予測可能でもないように思われる。2014 年の房総半島 SSE は、前回からの再来間隔がもっとも短い。これは、東北地方太平洋沖地震の影響が関連している可能性がある。実際東北地方太平洋沖地震によって、房総半島の付近では若干 CFF が大きくなっている。しかしながら、東北地方太平洋沖地震の CFF は 2011 年の房総 SSE と 2014 年房総 SSE ではあまり大きさに変化がない。したがって、なぜ 2014 年房総 SSE が前回から 2.2 年という短い時間で発生したのか明瞭でない。もう一つの解釈としては、いくつかのシミュレーション計算で、大地震の発生が近づくと、SSE の発生間隔が短くなるという結果が報告されている。1996 年からの房総 SSE の発生間隔の短縮は、このようなシミュレーションの想定を反映しているのかもしれない。この場合、対象となる大地震は、相模トラフ沿いの地震と思われる。従って、今後房総半島付近の地殻変動の様子を詳細に監視していく必要があるように思われる。

キーワード: 房総半島, スロースリップ  
Keywords: Boso peninsula, slow slip



**GPSデータの同化による余効すべり域の摩擦パラメータの推定：2003年十勝沖地震への適用**  
**Estimation of frictional parameters in afterslip areas by assimilating GPS data :The 2003 Tokachi-oki earthquake**

加納 将行<sup>1\*</sup>; 宮崎 真一<sup>2</sup>; 石川 洋一<sup>3</sup>; 日吉 善久<sup>3</sup>; 伊藤 耕介<sup>3</sup>; 平原 和朗<sup>2</sup>  
KANO, Masayuki<sup>1\*</sup>; MIYAZAKI, Shinichi<sup>2</sup>; ISHIKAWA, Yoichi<sup>3</sup>; HIYOSHI, Yoshihisa<sup>3</sup>; ITO, Kosuke<sup>3</sup>; HIRAHARA, Kazuro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 京都大学理学研究科, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>ERI, Tokyo Univ., <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>JAMSTEC

Seismological and geodetic observations have revealed that various aspects of fault slips are determined by frictional properties on the interface. Kano et al. (2013) developed an adjoint data assimilation method to estimate frictional parameters from synthetic in-situ slip velocity data and found by numerical experiments that all frictional parameters are constrained if both acceleration and deceleration phases are observed. Additionally, we found that synthetic surface displacement data also have the ability to constrain frictional parameters in the areas where slip is well resolved. Following their study, we then applied the method to an actual case of the 2003 Tokachi-oki earthquake. Given reasonable initial conditions of simulation variables, estimated frictional parameters are well constrained if two conditions above are satisfied. Our results imply that the adjoint method we developed is useful to investigate and understand fault frictional properties.

Keywords: afterslip, adjoint method, frictional parameters, GPS, earthquake cycle

## GPS データによる伊豆衝突帯北東縁の地殻変動 Crustal deformation of the northeastern margin of the Izu Collision Zone inferred from GPS observations

道家 涼介<sup>1\*</sup>; 原田 昌武<sup>1</sup>; 里村 幹夫<sup>1</sup>; 宮岡 一樹<sup>1</sup>  
DOKE, Ryosuke<sup>1\*</sup>; HARADA, Masatake<sup>1</sup>; SATOMURA, Mikio<sup>1</sup>; MIYAOKA, Kazuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

### はじめに

フィリピン海プレートの最北端である伊豆半島周辺の地域では、伊豆半島が本州に衝突すると共に、その東側では相模トラフ、西側では駿河トラフでそれぞれ日本列島下への沈み込みが発生している。このような複雑な衝突および沈み込みに特徴付けられる伊豆衝突帯の北東縁部では、歴史的にも M7 クラスの地震が多く発生している（宇佐美、1987；石橋、1993）。また、衝突帯周縁に位置する神縄・国府津 - 松田断層帯や、伊豆半島北半部を南北に走る北伊豆断層帯（丹那断層）など、多くの活断層が分布する（活断層研究会編、1991 など）。

以上の様な、複雑な断層構造・地震テクトニクスを示す伊豆衝突帯北東縁部において、定常的な地殻変動の様子を明らかにすることは、同地域で発生する地震のメカニズムを理解する上で重要である。本研究では、国土地理院の GEONET に加え、温泉地学研究所が独自に行っている GPS 観測のデータを用い伊豆衝突帯北東縁部の地殻変動の傾向について考察を行った。

### 使用データ・方法

GEONET における日々の座標値（F3 解）に加え、温泉地学研究所の観測点 12 点（内 1 点は、独立行政法人防災科学技術研究所との共同研究による観測点）のデータを用いた。温泉地学研究所の観測点のデータは、周辺の GEONET 観測点のデータと共に Bernese5.0 により解析を行った結果を用いた。また、解析結果と F3 解との座標値のギャップは、同時に解析を行った GEONET 小田原観測点の日々の座標値が F3 解に一致するよう補正した。F3 解におけるアンテナ保守などによるギャップは、国土地理院にて公開されている補正值を用いて補正した。

以上のデータから、GEONET 函南観測点を固定点とした各観測点の時系列グラフを作成し、周辺地域における群発地震活動、スロースリップイベントおよび 2011 年東日本太平洋沖地震による変位・余効変動の影響を受けていないと思われる期間を観測点毎に抽出し、各観測点における定常的な変位速度ベクトルを求め、平面ベクトル図および変位速度プロファイルを作成した。

### 結果および考察

伊豆衝突帯およびその周辺地域における定常的な変位速度ベクトルの分布・変位速度プロファイルより、以下の地殻変動の特徴が明らかとなった。

- 1) 北伊豆断層帯が分布する東経 139.00° 付近から東側の地域では、顕著な北向きの地殻変動が認められる。
- 2) 北伊豆断層帯から足柄平野付近までの幅 15~20km の区間では、東側ほど北向き変位速度が大きくなる傾向が認められ、同区間の両端における北向き変位速度の差は約 10mm/yr に達する。また、同区間の平均的な剪断歪速度は、およそ  $4.7 \times 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$  と算出される。
- 3) 北伊豆断層帯の西側では、わずかに北~東向きに地殻変動が認められるのみであり、その変位速度の変化も緩やかである。

以上から、伊豆半島の北東端の幅 15~20km の区間では、顕著な剪断変形が生じていることが示唆される。また、北伊豆断層帯は剪断変形帯の西端に位置しており、同断層帯を境とした東西において非対称な地殻変動のパターンを示す。

本研究で示した剪断変形帯は、伊豆半島が衝突する一方その東側の相模トラフで沈み込みが発生しているために、その両側に生じた地殻変動のギャップに起因し形成されたと見受けられる。すなわち、フィリピン海プレート上における衝突側ブロックと沈み込み側ブロックの間の漸移帯として位置付けることが可能である。

### 文献

- 宇佐美龍夫, 1987, 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 434p.  
活断層研究会編, 1991, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437p.  
石橋克彦, 1993, 小田原付近に発生した歴史地震とその地学的意義, 地学雑誌, 102, 341-535.

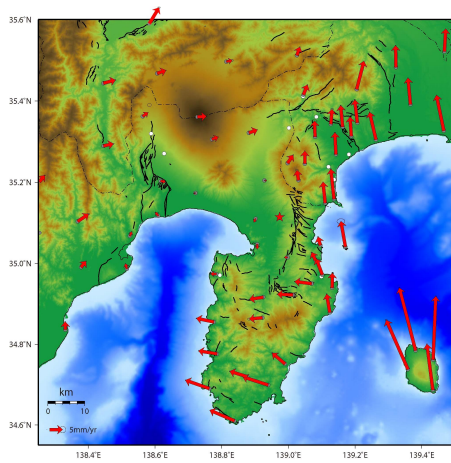
キーワード: GPS, 地殻変動, 伊豆衝突帯, 北伊豆断層帯

SSS33-P07

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

Keywords: GPS, crustal deformation, Izu Collision Zone, Kita-Izu fault zone



## 体積ひずみ計の降水補正に用いる降水量の風速補正 The wind velocity correction of the precipitation to use for the rainfall correction of the volumetric strainmeter

木村 一洋<sup>1\*</sup>  
KIMURA, Kazuhiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所  
<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

気象庁では東海地震の前兆すべりの監視のために東海地域等に体積ひずみ計や多成分ひずみ計を設置し、リアルタイム監視を行っている。それらのうち体積ひずみ計は特に降水の影響を受けやすいため、現在気象庁では体積ひずみ計のデータについてはタンクモデルを用いた降水補正(木村・他、投稿中)を行い監視するようにしている。地殻変動データの降水補正へのタンクモデルの適用に際し、これまで汎用的なタンクの形状は決まっていなかったが、木村・他(2011,2012)は体積ひずみ計データの24時間階差の絶対値の和を目的関数とした上で、この目的関数の値を指標としてタンクの形状を決定した。同様に木村・他(2013)は降水補正に用いる降水量データの選定に際して、レーダーアメダス解析雨量、アメダスによる降水量、ひずみ計観測点に設置した雨量計による降水量の3つについてこの目的関数の値を指標として比較を行い、妥当な結果を得た。このことは逆に言えば、体積ひずみ計のような地殻変動データは、降水量データの品質をも判断できるだけの感度を持つ可能性があるとも言える。

雨量計による観測には、強風時に雨滴の捕捉率が落ちるジェボンス効果があることが知られている。特に降水が雨よりも雪で顕著であるが、幸か不幸か気象庁の設置した体積ひずみ計は降水が雪として降りにくい東海地域や南関東地域である。横山・他(2003)は、雨量計の形状(風よけの有無等)にもよるが降水が雨の場合でも風速6m/sにおいて捕捉率が0.7~0.9に落ちることを指摘している。このような雨量計という測器そのものに起因する効果について体積ひずみ計で確かめられるのではないだろうかという視点で、体積ひずみ計の降水補正に用いる雨量計の風速補正についての調査を行った。しかし、この目論見は成功しなかった。気象庁の体積ひずみ計の降水補正パラメータ等を元に各観測点の特徴について検討したところ、その場で観測した降水量データだけで降水応答を説明できる観測点とそうではない観測点があり、後者については流域面積の大きな川の近くや大きな山の斜面に位置しており周辺部からの流入があっても不自然ではない。ジェボンス効果を確認できるとすれば、周辺部の降水の影響が少ない前者の観測点であろうと予想していたが、実際に降水補正に用いる雨量計の風速補正の効果が得られたのは予想に反して後者の観測点であった。その場で観測した降水量データだけで降水応答を説明できる観測点では大雨の際の流出も比較的早いために降水応答が頭打ちになりやすく、ジェボンス効果を確認できるだけの感度が低いのかも知れない。

なお、鈴木・中北(2009)は降水量の標高依存性について観測調査を行い、台風や低気圧による大雨は停滞前線による大雨に比べて標高依存性(標高が高いほど降水量が多い)が高いことを指摘している。台風や低気圧の際には強風が発生することが多いことから、強風時には降水量の標高依存性が高いと言い換えることもできるだろう。気象庁の体積ひずみ計で降水補正に用いる雨量計の風速補正の効果が得られた観測点は流域面積の大きな川の近くや大きな山の斜面に位置しており、これは観測点より標高の高い上流部で降った降水の影響を受けていると考えても不自然ではない。つまり、気象庁の体積ひずみ計の一部で得られた降水補正に用いる雨量計の風速補正の効果は、強風時における降水量の標高依存性の高さに起因すると考えられる。実際、これらの体積ひずみ計で降水補正に補正不足が生じている事例は台風や低気圧の通過時が多いが、多くの事例でレーダーアメダス解析雨量の面的分布において降水量の標高依存性が確認できている。また、観測点周辺の雨量計を用いた場合の風速補正では捕捉率が1.0よりも小さかったのに対し、標高の高いアメダスを用いた場合の風速補正では捕捉率が1.0を超えるケースも見られた。観測点周辺よりも標高の高いところの雨量計データを降水補正に使うには強風時に多めに降りすぎているということである。つまり、体積ひずみ計のような地殻変動観測施設の設置した場所によっては、観測点周辺で降水量を観測するだけでは不十分な場合もあり、観測点に影響を及ぼす標高の高い上流部で降った降水を何らかの方法で把握することによって降水補正を精緻化できる可能性があることが、体積ひずみ計の降水補正に用いる雨量計の風速補正という一見無関係に見える効果から示唆される。

キーワード: ひずみ計, 降水補正, 風速, 降水量の標高依存性

Keywords: strainmeter, rainfall correction, wind velocity, altitude dependence of the precipitation



## 伊豆半島東方沖の地震活動に関連した東伊豆奈良本の体積ひずみ計の急激な縮み以外の変化

The change except the sudden contraction of the Higashiizu strainmeter with the seismic activity east off Izu Peninsula

木村 一洋<sup>1\*</sup>; 木村 久夫<sup>2</sup>

KIMURA, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; KIMURA, Hisao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Japan Meteorological Agency

気象庁が東海・南関東地域に設置した体積ひずみ計のうち、東伊豆奈良本の体積ひずみ計では伊豆半島東方沖の地震活動に伴う急激な縮み変化が発生することが良く知られている。これは数日程度の期間で急激な変化をすることから誰が見ても明らかな現象であったが、体積ひずみ計は降水による季節変化が生じてしまうため、GNSSによって指摘されているやや長期の変化(村上, 2006)についてはこれまで東伊豆奈良本の体積ひずみ計では確認することができなかった。しかし、タンクモデルによる体積ひずみ計の降水補正(木村他, 投稿中)によって、体積ひずみ計の降水による季節変化を除去できるようになったことから、やや長期の変化についても体積ひずみ計で確認できる可能性が出てきた。今回、東伊豆奈良本の体積ひずみ計について、あらためて伊豆半島東方沖の地震活動に関連するひずみ変化を確認したところ、これまでよく知られていた急激な縮み変化以外に、多くの興味深い変化が確認できたので紹介する。

キーワード: ひずみ計, 伊豆半島東方沖の地震活動, 東伊豆奈良本

Keywords: Strainmeter, seismic activity east off Izu Peninsula, Higashiizu

## キネマティック PPP 時系列解析によって得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動にともなう特徴的ひずみ分布 Characteristic strain distribution following the 2011 Tohoku earthquake based on the kinematic PPP analysis

平田 雄一郎<sup>1\*</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 大園 真子<sup>2</sup>; 三浦 哲<sup>1</sup>  
HIRATA, Yuichiro<sup>1\*</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; OHZONO, Mako<sup>2</sup>; MIURA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 山形大学理学部

<sup>1</sup>Gradual School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Yamagata University

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に伴って東北地方を含む広い範囲で大規模な地震時変位が観測された。この地震に伴うプレート境界面でのすべりは広い範囲で数十 m 以上であり, (例えば [1]), これは, それまで上盤側プレートにかかっていた応力が急激に除荷されたことに相当する。Ohzono et al. [2] は GEONET 観測データの日座標値解析から推定される地震時ひずみ分布と, 断層モデルから推定される地震時ひずみ分布を比較することによって, 東北地方におけるひずみ不均質を見出し, それと地下不均質構造との関連性について議論を行っている。また Ozawa and Fujita [3] は, GPS 観測と In-SAR 解析から東北地方の火山周辺域における局所的な地震時変位を検出し, シミュレーション結果との比較から, それらは地下に弾性定数が小さい物質を仮定すれば説明可能であることを示した。一方で, これらの先行研究では GPS 日座標値を使用している。そのため本震直後に発生したと考えられる余効変動や余震の影響を含み, 純粋な地震時変位にもとづいた議論ではない。本研究ではキネマティック単独精密測位 (kinematic Precise Point Positioning; kPPP) 法を用いて 1 秒毎の GPS 座標値を推定することで, できるかぎり純粋な地震を抽出し, より短い時定数の地震後余効変動について議論を行う。

使用した観測点は GEONET 観測点 1208 点である。kPPP データ解析には GIPY-OASIS II を用いた。解析した結果のうち, 2011 年 3 月 11 日の本震後 1 時間分, 日座標データは 2010 年 1 月 1 日から 2012 年 10 月末までのデータのうち 2011 年 3 月 10 日から 15 日までのデータを使用した。また純粋な地震時変位は表面波の伝搬時間, 大きい余震の発生時刻, 震源時間関数等を考慮し, 本震後 600 秒の前後 100 秒の変位の平均値と地震前の座標値の差から求めた。そして 2011 年 3 月 12 日での日座標値から 10 日の日座標値を差し引いて得られる変位から, 純粋な地震時変位を除去することで純粋な地震時変位以外の変位を抽出した。さらに得られた変位場の特徴を見るために, それらの変位を入力として Shen et al. [4] の手法にもとづき面積ひずみ分布を求めた。その結果, 大局的には東日本の広範囲で地震直後から進行する余効変動による膨張ひずみが明瞭であるが, 山形県の月山周辺域で周囲よりも大きな膨張となり, 一方, 宮城・山形県境に位置する蔵王周辺域では, その大きさが本震前の kPPP データから推定したノイズレベル以下ではあるが, 収縮となるような特徴的ひずみ分布が得られた。次に, 12 日の日座標値の代わりに 15 日のものを使用して同様にひずみ分布を求めた。その結果, 月山周辺の膨張ひずみ域は拡大し, 蔵王周辺の収縮ひずみは膨張ひずみへとその極性が反転することが明らかとなった。これらの結果は先行研究である Ozawa and Fujita [2] による結果と解析期間を揃えた場合は調和的であるものの, 地震直後ではその膨張-収縮の極性が逆転しているという興味深い結果が得られた。本発表では, こうした特徴的なひずみ分布の時空間発展がどのように生じているかを, 地震波速度構造との比較を含め, より詳細な議論を行う。

[1] Inuma et al., (JGR, 2012), [2] Ohzono et al., (EPS, 2012), [3] Ozawa and Fujita, (JGR, 2013), [4] Shen et al., (JGR, 1996)

キーワード: ひずみ分布, 東北地方太平洋沖地震, 余効変動, キネマティック PPP  
Keywords: strain, 2011 Tohoku earthquake, postseismic deformation, kinematic PPP

## フィリピン・ミンダナオ島におけるフィリピン海プレートの収束の解明 Convergence of the Philippine Sea Plate in Mindanao, the Philippines

中村 保彦<sup>1\*</sup>; 田部井 隆雄<sup>2</sup>; 大倉 敬宏<sup>3</sup>; 木股 文昭<sup>4</sup>; Teresito C. Bacolol<sup>5</sup>; Endra Gunawan<sup>6</sup>  
NAKAMURA, Yasuhiko<sup>1\*</sup>; Tabei, Takao<sup>2</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>3</sup>; KIMATA, Fumiaki<sup>4</sup>; TERESITO C., Bacolol<sup>5</sup>; ENDRA,  
Gunawan<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 高知大学大学院総合人間自然科学研究科, <sup>2</sup> 高知大学理学部, <sup>3</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>4</sup> 東農地震科学研究所, <sup>5</sup> フィリピン火山地震研究所, <sup>6</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>Grad. School Int. Arts Sciences, Kochi Univ., <sup>2</sup>Fac. Science, Kochi Univ., <sup>3</sup>Aso Volcanological Laboratory, Kyoto Univ., <sup>4</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, <sup>5</sup>Philippine Institute of Volcanology and Seismology, <sup>6</sup>Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

フィリピンではフィリピン海プレート (PHP), スンダランドプレート (SUP) がそれぞれ東方向, 西方向から沈み込んでいる。また, 長大な左横ずれ断層であるフィリピン断層がフィリピン全土を南北に縦断している。人口密集域であるフィリピンにおいて, 地震災害リスクを予測することは非常に重要であるが, 日本のような精密観測網による監視体制が整備されておらず, 未解明の問題が多数残されている。2009 年より JICA-JST 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「フィリピン地震火山監視能力強化と防災情報の利活用推進プロジェクト」が開始され, その一環として, 2010 年よりミンダナオ島において GPS キャンペーン観測が行われている。本研究ではこの観測データより地殻水平速度場を求め, ミンダナオ島の地殻ブロックについて議論する。

2010~2013 年までの毎年 3 月に, ミンダナオ島東部の 15 箇所において, 毎回 3~6 日間にわたって連続観測データを取得した。解析には Bernese GPS Software 5.0 を用い, IGS 連続観測点 PIMO (ケソン市) を基線解析に含めることで, ITRF に準拠した全点の座標と速度を算出した。なお, この期間には治安上の問題によりミンダナオ島西部で観測が行われていない。そこで, 1997~2003 年に西部を含めて実施された観測から得られた地殻水平速度場を併用する。また, 議論の際は全体の速度場を SUP に準拠させた。得られた地殻水平速度場を概観すると, PHP の沈み込みに伴い全体として西北西向きに水平変位が卓越する一方で, 海溝からの距離増加に伴う減衰は顕著でない。加えて, フィリピン海溝とフィリピン断層を境界とする前弧帯では北方向の水平速度が重畳し, ミンダナオ島の本体部とは異なる地殻ブロックを形成していると推定される。

USGS が公表するスラブモデルデータを元に, PHP 境界面の形状を深さ 80km まで 196 枚の三角形要素で近似した。この境界面に DeMets et al.(2010) によるプレート相対運動モデル MORVEL に基づく PHP - SUP の相対運動速度を与え, ミンダナオ島の弾性圧縮変形を計算した。深さ 80km まで固着率 100 % としているにも関わらず, 計算値は観測値を最大 15 % 程度しか説明できない。そこで, さらに地殻ブロックの剛体回転運動を考慮する必要がある。島全域の速度場から剛体回転運動のオイラー極の位置および角速度を推定した場合, ブロック運動の予測値と観測値の残差の観測値の持つ誤差を有意に上回ったため, ミンダナオ島全域が単一の地殻ブロックであるという仮説は棄却される。フィリピン断層を境界として速度場が系統的に変化することを考慮しても, ミンダナオ島は複数のセグメントから構成されていると考えられる。

さらに, 地殻水平速度データの逆解析を行い, PHP 境界面の固着分布の推定を試みた。しかし, 解析結果の解像度を事前評価するため Checkerboard Resolution Test を行ったところ, 十分な解像度が得られないことが判明した。これは, 観測点の数と観測網の空間的広がり両方が十分でないことによる。ミンダナオ島内の地殻変動は, 本研究で議論した PHP の沈み込みによる弾性圧縮変形および地殻ブロックの剛体回転運動以外にも, SUP の西側からの沈み込みによる影響, およびフィリピン断層の運動による影響なども内包している。これらの大部分が未解明であり, より稠密かつ広域の GPS 観測網が必要である。

キーワード: フィリピン海溝, フィリピン断層, GPS 観測, ミンダナオ島  
Keywords: Philippine Trench, Philippine fault, GPS observation, Mindanao

## 日本列島周辺のすべり欠損分布とその時間変化 Slip deficit rate distribution and its temporal changes along the Japan islands

樋口 駿<sup>1\*</sup>; 纈纈 一起<sup>1</sup>; 横田 裕輔<sup>2</sup>  
HIGUCHI, Shun<sup>1\*</sup>; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>; YOKOTA, Yusuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海上保安庁  
<sup>1</sup>Earthq. Res. Inst., <sup>2</sup>Japan Coast Guard

日本列島周辺には複数のプレート境界が存在し、海洋プレートの沈み込みによりプレート境界の固着域ではすべり欠損が生じて大きな歪みが蓄積される。そのため、これまで多くの巨大地震が発生してきた。プレート境界における巨大地震の詳細な発生機構を解明するためには、すべり欠損分布を詳しく知ることが重要だと考えられる。また長期的のスロースリップイベントに代表されるように、すべり欠損には時間的な変化が存在する。従って本研究では、GPS 時系列データを用いることで、日本列島全体に対して統一的にすべり欠損分布を推定し、さらにその時間変化を明らかにすることを目的とした。解析期間は国土地理院 GEONET の F3 解が入手可能である 1996 年から 2010 年までとし、インバージョン法によって日本列島全体のすべり欠損分布を 1 年毎に推定した。

日本列島の地殻変動場を求めるために、F3 解の日々の座標値を用いた。各観測点の GPS 時系列データから基準系に対する大陸プレートの運動を差し引き、さらに地震などによるオフセットや余効変動を取り除いた。各観測点で得られた時系列データに対して最小二乗法による回帰分析を行い、日本列島の 1 年毎の水平変動場を推定した。プレート境界面には全国 1 次地下構造モデル (Koketsu et al., 2012) に組み込まれたプレートモデル (馬場・他, 2005) を使用した。また、測地グリーン関数は水平成層構造に対して Zhu and Rivera (2002) による波数積分法を用いて計算した。インバージョンには Yoshida et al. (1996) の手法を用いた。

インバージョンによって得られたすべり欠損分布は、プレート収束速度や先行研究とおおよそ整合的な結果が得られた。すべり欠損分布の時間変化の中には、既知の長期的スロースリップイベント (東海 SSE、豊後水道 SSE) との対応が見られた。また、北海道や関東地方でもすべり欠損に時間的な変化が見られ、プレート間固着の状態に変化があった可能性が示唆された。本研究で得られたすべり欠損分布は各地域の超巨大地震の震源域と空間的な対応を示した。この対応は地球科学的に意義深いだけでなく震災対策上も意義深いものだと考えられる。

謝辞：本研究では国土地理院の GEONET の F3 解を使用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 日本列島, 地殻変動, GPS, すべり欠損, 超巨大地震

Keywords: the Japan islands, crustal deformation, GPS, slip deficit, megathrust earthquake



## 安政三年七月二三日 (1856-VIII-23) 北三陸沖地震の津波浸水高分布 Height Distribution of the tsunami of the Ansei North Sanriku-Oki earthquake of August 23, 1856

都司 嘉宣<sup>1\*</sup>; 馬淵 幸雄<sup>2</sup>; 岡田 清宏<sup>2</sup>; 畔柳 陽介<sup>2</sup>; 大家 隆行<sup>2</sup>; 栗本 昌志<sup>2</sup>; 木南 孝博<sup>3</sup>; 堀江 岳人<sup>4</sup>; 橋本 佳祐<sup>4</sup>; 佐々木 崇之<sup>4</sup>; 岩淵 洋子<sup>5</sup>; 今井 健太郎<sup>6</sup>; 今村 文彦<sup>6</sup>  
TSUII, Yoshinobu<sup>1\*</sup>; MABUCHI, Yukio<sup>2</sup>; OKADA, Kiyohiro<sup>2</sup>; KUROYANAGI, Yosuke<sup>2</sup>; OOIE, Takayuki<sup>2</sup>; KURIMOTO, Masashi<sup>2</sup>; KINAMI, Takahiro<sup>3</sup>; HORIE, Takehito<sup>4</sup>; HASHIMOTO, Keisuke<sup>4</sup>; SASAKI, Takayuki<sup>4</sup>; IWABUCHI, Yoko<sup>5</sup>; IMAI, Kentaro<sup>6</sup>; IMAMURA, Fumihiko<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 深田地質研究所, <sup>2</sup> パシフィックコンサルタンツ (株), <sup>3</sup> 頸城技研 (株), <sup>4</sup> (株) アルファ水工コンサルタンツ, <sup>5</sup> 原子力安全基盤機構, <sup>6</sup> 東北大学災害科学国際研究所

<sup>1</sup>Fukada Geolog. Inst., <sup>2</sup>Pacific Consultant, <sup>3</sup>Kubiki Techno., <sup>4</sup>Alpha Hydraulic Eng. Consultant, <sup>5</sup>JNES, <sup>6</sup>IRIDeS, Tohoku Univ.

安政三年七月二三日 (1856-VIII-23) の正午頃、三陸地方北部東方沖海域で発生した安政北三陸地震の震源は、延宝五年 (1677)、および、1968 年の十勝沖地震 (1968) とほぼ同じ位置であったと見られる。これら 3 個の地震は日本海溝と千島海溝の会合点にあたるこの付近で起きる固有のプレート境界型地震であると理解することができる。安政北三陸地震による津波は、三陸海岸および北海道で記録されている。この津波による死者数は全体で 38 人にすぎなかった。この数字は他の自然災害、たとえば同年 8 月 25 日の日本列島を縦貫した台風による約 3 万人の死者数に比べて非常に少ない死者数である。その 40 年後に起きた明治三陸津波の際、ほとんど教訓とされなかったのは、安政北三陸津波の死者が少なかったためであろう。以下、古文献が掲載されている地震史料集のうち武者 (1951) を M4、「新収日本地震史料 第 5 巻」を S5、と略記する。この津波の最北の記録は、厚岸の国泰寺の『日鑑記』(S5-p246) で、厚岸会所付近で津波があって、人々が騒いだとされ、この付近で浸水高 2.0m と推定される。日高地方の日高町門別にあった沙流会所付近については「沙流会所前は高潮強」の記載がある (『時風録』、M4-p667)。沙流会所は現在の門別稲荷石段の最下端付近にあった。この付近での地盤高 11.2m まで浸水したと推定される。室蘭では『時風録』(M4-p667) に「エトモ辺も余程高潮入」の記載から 5.6m と推定される。モロラン会所付近で流死者があり 4.8m とする。函館半島の太平洋側海岸から遡上浸水した海水は、津軽陣屋 (現・千代台公園) に達し (『見聞随筆 17』、S5-p243)、8.6 m と測定された。同半島の西側の函館港の市街地の地蔵町、枅形、および沖ノ口番所などで、2.6~3.9 m 程度であった。青森県では、三沢市の三川目 (みつかわめ) で 3.5m であった。八戸市には、南部藩八戸支藩の記録『内史略』(S5-p188)、豪商大岡長兵衛の『多志南草』(S5-p232) など、信頼性の高い一次史料が豊富である。中心市街地の新湊で 6.9m、白銀で 7.1m、鮫で 7.3m という高い値を得た。現在の八戸市北部の一川目では、「田中庄吉の家屋に浸水」(『一川目郷土史』) の記載から浸水標高 7.3m を得た。岩手県久慈市久喜では、市街地内海岸沿いの畑に浸水した記録から 5.2m となった。宮古湾は典型的な V 字湾であるが、その奥部の金浜で 5.7m であった。山田町以南については都司ら (1995) の結果を参照して、津波浸水高分布図を得る。本研究は原子力安全基盤機構からの委託業務「平成 25 年度津波痕跡データベースの高度化—確率論的津波ハザード評価に係る痕跡記録の調査および波源モデルのデータベース化—」(代表: 東北大学 今村文彦) の一部として実施した。

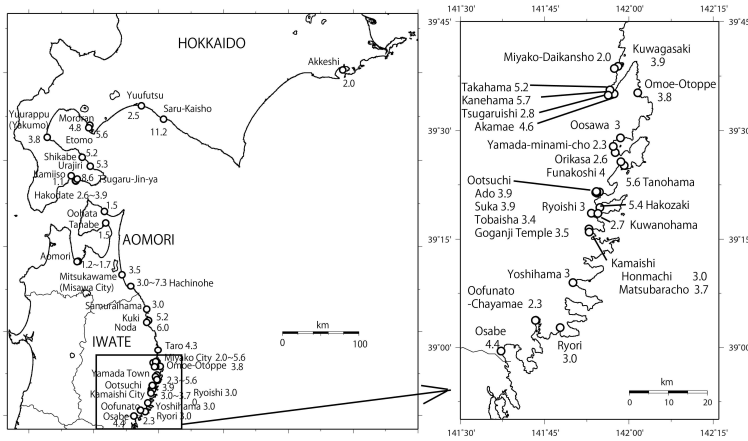
キーワード: 歴史地震, 歴史津波, 三陸, 北海道, 日本海溝

Keywords: historical earthquake, historical tsunami, Sanriku coast, Hokkaido, Japan trench

SSS34-01

会場:502

時間:4月29日 09:00-09:15



## 1945年三河地震による地域の被害再検討 (1) 死者の地域別分布 Reexamination of 1945 Mikawa earthquake disaster (1) Detailed distribution of earthquake victims

木股 文昭<sup>1\*</sup>; 松多 信尚<sup>2</sup>

KIMATA, Fumiaki<sup>1\*</sup>; MATSUTA, Nobuhisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科附属 地震火山・防災研究センター

<sup>1</sup>Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Predict, <sup>2</sup>Earthquake and Volcano Research Center, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Iida (1978) organized the Mikawa earthquake disaster under the cooperation of Aichi prefecture, and clarify the whole picture of the disaster. However, he could not discuss the disaster in community level precisely. For example, 46% of 1200 houses were collapsed in Hukuji village, Hazu-gun in 1944 ToNankai earthquake, and additionally 67% of left 650 houses were also collapsed in 1945 Mikawa earthquakes one month later. The reason of strong damages in Hukuji is not discussed enough until now.

It is very important to make clear whole picture of the earthquake disaster in history and in near future as national government. As the earthquake disaster remains a rare event, detailed research of the historical earthquake disasters needful to understand the following disasters. In the presentation, we would like to discuss the disaster of the Mikawa earthquake in local community level.

### 1. Discussion on characteristic disaster based on earthquake victim distribution

Earthquake fault shaped S was appeared in the ground surface at the Mikawa earthquake. However recent researches of fault geomorphology and ground deformation based on geodesy point out two main faults striking with NNW-SSE direction, and an E-W striking fault is tear fault caused by slips on two faults. Additionally, dominant rupture should be occurred at Fukodu fault located in east. The total  $M_0$  estimated by ground deformation is the earthquake moment of  $1.6 \times 10^{19} \text{Nm}$  ( $M_w 6.7$ ), and the third four of the released one is by slip of Fukodu fault. In our presentation, we discuss earthquake disaster with the local community level based on two N-S striking earthquake faults.

#### 1) Katahara: compact cluster of dead located close to Fukodu fault

Katahara town of Hoi-gun (then-9300 people and 1887 houses) located just on Fukodu fault, lose 227 people and 319 completely destroyed houses (15.2% collapse rate). In the town, the damages are different in each street corner. Numbers of dead and completely destroyed houses within the town are shown as bar charts and color scale in 59 neighborhood blocks. The dead are limited in the narrow zone of 1 km wide along the earthquake fault. There are some communities with no collapsed house, which are located 1 km distance from the fault. Dead are corresponding to 73 % of completely-destroyed houses, and some blocks closing the fault show the rate over 90%. Precisely, people are attacked by strong seismic waves during the hours of sleep, and they had no time to evacuate to outsides from houses. There are many blocks to have no dead and no collapsed houses, which are locating more 1 km far from the fault.

#### 2) Fukuji: Decentralized dead far from fault in river plain

On the one way, Fukuji village (then-673 houses), Hazu-gun locating 5 km southwestward from the Yokosuka Fault, one of main faults, lost 162-350 peoples and 400 houses completely. In one month before, the village also attacked by 1944 ToNankai earthquake, lost 21 people and 550 houses completely. They lost 1000 houses by earthquakes in 1200 houses for one month. The numbers of the dead are shown in each block in Fig.1B.

The dead distributions are obviously different with that in Katahara. They lost many people in almost all blocks in the village. The collapse rate of ToNankai earthquake is by far the worst in Aichi prefecture, because, second worst is 21.3% in Tomiki village, Chita-gun. The Fukuji village is just located in river plain with Yahagi and old-Yahagi rivers. An exist of thick alluvial formation caused the large damages in Fukuji.

The dead by Mikawa earthquake are caused by two reasons. One is there are very strong shaking at the blocks located immediately above the fault, and second is amplitude shaking by alluvial formation in river plain. The former is a case of Katahara and later is a case of Fukuji.

キーワード: 三河地震, 深溝断層, 横須賀断層, 地震災害, 死者, 家屋全壊率

Keywords: Mikawa earthquake, Fukuji fault, Yokosuka fault, earthquake disaster, seismic victim, collapse rate

## SfMによる大正関東地震の石碑碑文の判読 - 千葉県南房総市巖島神社の石碑について Interpretation of an illegible old stone inscription by SfM image analysis at Itsukushima shrine, Nojimizaki

鈴木 比奈子<sup>1\*</sup>; 内山庄一郎<sup>1</sup>; 井上 公<sup>1</sup>  
SUZUKI, Hinako<sup>1\*</sup>; UCHIYAMA, Shoichiro<sup>1</sup>; INOUE, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所

<sup>1</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

歴史上、ある地域で同様の自然災害が繰り返す事例は数多く存在する。地域の経験した過去の自然災害を知るうえで、災害記念碑（以下石碑）などの歴史災害資料は有用である。しかし屋外に存在する石碑は日々風化が進み、文字の輪郭は不鮮明になり、時に失われる。従来であれば、こうした資料は拓本やX線走査による調査が行われてきた。しかしながら、拓本は対象物を汚損する恐れがあり、X線は高コストである。そのような中、SfM (Structure from motion) などの画像処理をベースとした三次元形状復元技術により、デジタルカメラとデスクトップPCで容易に三次元モデルを生成できるようになった。判読が困難となった石碑に対しSfMを用いることで、低コストかつ効率的に歴史災害資料の解析に活用できる可能性がある。本稿では、千葉県南房総市にある巖島神社境内の大正関東地震に関する石碑（1927年建立）を対象に、SfMの適用とその活用可能性について検討した。

この石碑の碑文は268文字の漢文調で、本地域の海岸の隆起量（六尺）や被害の様相、復興の社会的な動きが記録された貴重な災害資料である。石碑のサイズは幅80cm、高さ150cm、厚さ12cmほどの板碑で、表面に5mm程度の深さで文字が彫られている。文字列は、苔の繁茂や風化作用によって読み取りが難しくなりつつある。

この石碑から60cm程度の距離でカメラ(Richo GR)を保持し、石碑表面に対して平行移動しながら158枚の写真を撮影した。撮影した写真を基にSfM処理を行い、三次元モデルを生成した。SfMソフトウェアにはAgisoft PhotoScan 1.0.1を用いた。SfM処理で生成した三次元モデルでは、石碑表面の微細な汚れの影響が除去され、文字の彫りの凹凸が抽出された。さらに陰影処理を行うことで、明瞭に文字列が判読できる状態となった。

判読した石碑の本文と大意は以下のとおりである。

### 【本文】

#### 「震災復興記念■碑

大正十二年九月一日関東地大震海底之隆起約六尺如  
我白濱亦漁港水涸舟損之便全廢矣  
爾來区民相謀與村当局協力日事其復興浚海底（※1）岩石候潮汐以力役  
大正十三年三月起工同十五年六月十日竣工  
工別東西費猶七與八總金一万五千余円  
所謂嶋崎之左右以象野島者是也  
当時凄慘絶言語而此地有燈台倒潰之一大驚異  
焉然全村被害極微区民以爲神明之冥護甲唱乙和欲改築鎮守巖島神社  
以報神德得懸費補助金八百二円宮城福島兩県之寄付金百四十二円總金四千七百円  
昭和二年二月二十日又竣成於是区民之志兩達矣  
乃樹此碑勒其梗概以（※2）後嗣者云  
昭和二年七月十日建之」

### 【大意】

#### 「震災復興記念碑

大正12（1923）年9月1日、関東大地震で海底が約1.8m隆起した。私達の白浜の漁港は潮が引いてしまい、船が掬われてすべてだめになった。これより後、住民は村当局と力を合わせて一緒に計画を立てて、毎日、朝から晩まで復興のため岩石をうがち、海底をさらう作業を行うこととなった。大正13（1924）年3月に工事が始まり（起工）、大正15（1926）年6月10日に完了した（竣工）。工事の総額は1万5000円余りであった。野島は周囲が現れて、岬となった場所であるが、当時、この地の灯台が倒壊したのは普通では考えられないくらいの驚きで言葉が出ないくらいむごたらしい様子だった。しかし、村全体の被害は軽微で、住民は神様が知らず知らずのうちに守ってくださったからだ、鎮守の巖島神社を改築したいと誰かが言いはじめ、皆が同意した。神様のご神徳に報いるお金は補助金802円と宮城、福島両県からの寄付金142円を合わせ総額4,700円を得た。昭和2（1927）年2月20日に竣工し、住民たちの両方の希望がかなった。そこで、このことを子孫に念入りに伝えるためにこのあらしを石に刻み石碑を建てる。昭和2（1927）年7月10日建之」



SSS34-03

会場:502

時間:4月29日 09:30-09:45

SfM の活用は石碑の文字列の判読に有効であり、非接触式の手法であることから、石碑を損なうことなく情報の取得が可能である点もメリットである。撮影は容易で、なおかつオープンソースの SfM ソフトウェアを使用すればコストも非常に小さい。生成した三次元モデルは共有可能な程度のデータサイズであり、研究者等のネットワークで共有しデータベース化することで、研究の促進や、石碑の地理空間的な分布を示すなど、今後の展開が期待される。

■：読み取り不能文字、※1：歯受の下に金、※2：言の右に念

キーワード: SfM, 石碑, 判読, 歴史災害, 野島崎

Keywords: structure from motion (SfM), stone inscription, interpretation, historical natural hazard, Nojimizaki



## 三浦半島南部の沖積谷底に分布する海成段丘から推定する関東地震の隆起 The Evidence of the Uplift associated with the Kanto Earthquakes inferred from the Marine Terrace in the Alluvial Valley

金 幸隆<sup>1\*</sup>; 萬年 一剛<sup>1</sup>; 捧 一夫<sup>2</sup>; 熊木 洋太<sup>3</sup>; 松島 義章<sup>4</sup>

KIM, Haeng yoon<sup>1\*</sup>; MANNEN, Kazutaka<sup>1</sup>; SASAGE, Kazuo<sup>2</sup>; KUMAKI, Yohta<sup>3</sup>; MATSUSHIMA, Yoshiaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>2</sup> パスコ, <sup>3</sup> 専修大学, <sup>4</sup> 神奈川県立生命の星・地球博物館

<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>2</sup> PASCO, <sup>3</sup> Senshu University, <sup>4</sup> Kanagawa Prefecture Museum of Natural History

関東地震の震源域では、隆起海岸が発達しており、関東地震の履歴について研究がなされている。その研究の多くは、主として房総半島を対象としており、同じように重要な三浦半島では、関東地震の履歴と上下変動量の情報は1703年および1923年の2つの地震に限られている。古地震の発生履歴を解明するためには、堆積物を調べる必要がある。

三浦半島では更新世海成段丘を開析する沖積谷の中に、完新世の海成・河成の堆積層が分布し、その堆積面が隆起・陸化して形成された海成段丘が分布する。こうした堆積物を伴う段丘は、古地震の年代および上下変動量を解明する上で重要であると判断される。

本研究は、半島南部の毘沙門湾沿いの沖積谷の中に分布する段丘を分類し、ボーリング調査を行った。堆積物の分析から、段丘の形成過程を解釈し、古地震との関係について検討する。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 1946年米軍撮影の縮尺4万分の1の空中写真の判読と1921年測量の縮尺1/25,000の地形図の読図より、海成段丘および河成段丘を詳細に分類した。平均潮位から海拔10mまでの間に、海成段丘が7段分布している。ここでは、段丘面を低位より高位の順にL1面からL7面とよぶ。

2. 段丘面は海岸線にほぼ平行に分布するほか、おぼれ谷状に内陸に入り込む形態を呈し、おぼれ谷を埋めた海成・河成の堆積面が陸化したものであり、また、その堆積面と連続する岩石海岸の侵食面からなると判読した。段丘の成因について、1946年の海岸線は、現在の海岸線とほぼ同じ位置に分布しているが、1921年の地形図に描かれた海岸線は内陸側に最大約20mほど前進している。1923年の関東地震の隆起によって、毘沙門湾の海底が陸化し、L1面が形成され、海岸線が海退したものと判断する。なお1921年の地形図の海岸線の位置は、1946年の写真でも判読されたL1面とL2面の境界線にほぼ一致している。

3. 開発が進み、沖積谷の中は耕作土が埋められている。そこで、毘沙門湾の西奥に分布する沖積谷とその支谷で、深さ2~5mのボーリング調査を9地点で実施した(4地点については、2ヶ月前に掘削したばかりである)。その結果、耕作土は厚さ1~2mあり、その下からウミナ Batillaria multiformis、真牡蠣 Crassostrea gigas などの貝化石を含む砂礫層や有機質の砂泥層が堆積している。こうした潮間帯の貝化石のほか、木片や貝殻片が含まれ、泥の量も多いことから、これらの貝片砂礫層・貝片砂泥層は毘沙門湾の入り江の湾奥に堆積した干潟の堆積物であると判断する。川の流出口付近とそこから180m上流のL1面および支谷のL3面の掘削調査では、干潟層の上に河成の砂礫層が堆積している。こうした段丘堆積物は、現在の干潟の堆積物の層相によく似ている。

4. 海成層の堆積面から、L1面はM.S.L.+0.8m~1.3m、L2面はM.S.L.+1.5m~2.1m、L3面はM.S.L.+3.7mに分布する。これらの段丘面が地震性隆起によって生じたものであれば、これらの段丘面の高度はおおよそ関東地震の隆起量と地震間の沈降量の累積合算値を示す。

5. 半島南部の毘沙門湾の入り江に面した沖積谷は、堆積段丘面の分類の模式地である。湾の最奥部の高度7~10mでは、海成砂層中の貝殻と海成砂層を覆う泥炭層の年代測定から3100年前頃に形成された段丘面が分布する[熊木、1981]。この面は、L6面に対比される。国土地理院地理調査部(1981)は、同面よりも下位に4段の段丘が分布するとしている。段丘面の標高は、2.1m、3.9m、5.5mおよび6.2~6.4mである。この研究は、標高2.1m以下の段丘が、毘沙門地域の最低位にある段丘面であり、1923年大正関東地震で隆起・陸化したものであると解釈し、関東地震の発生間隔を平均700~800年と見積もっている。しかし本研究は、上述のとおり、2.1m面をL1とL2の2段に区分した。陸地測量部(1926)の三等三角点の改測に基づく、毘沙門湾の周辺の隆起量は約1.2~1.3mであるため、標高2.1mの段丘面が1923年の地震で段化・陸化したのではなく、1923年のひとつ前の地震で陸化した可能もある。またL1面およびL2面の堆積面の高度は、岩礁に付着するカンザシゴカイの化石の高度から推定された1923年と1703年の隆起量[西畑・他1988; 宍倉・越後、2001]とも、ほぼ一致する。

キーワード: 関東地震, 古地震履歴, 沖積谷底, 微地形, 潮間帯堆積物, 三浦半島

Keywords: Kanto Earthquake, Paleo-earthquake Record, Alluvial Valley, Microlandform, Tide-zone Deposits, Miura Peninsula

## 伊豆半島南端と清水平野沿岸部の地震性隆起 Coseismic uplifts of the southern Izu Peninsula and the coastal area of Shimizu Plain

北村 晃寿<sup>1\*</sup>; 小林 小夏<sup>1</sup>; 大橋 陽子<sup>2</sup>; 横山 祐典<sup>2</sup>; 宮入 陽介<sup>2</sup>  
KITAMURA, Akihisa<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Konatsu<sup>1</sup>; OHASHI, Yoko<sup>2</sup>; YOKOYAMA, Yusuke<sup>2</sup>; MIYAIRI, Yosuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学, <sup>2</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Shizuoka University, <sup>2</sup>The University of Tokyo

We examined coseismic uplift events in the coastal area of the Shimizu Plain, and at the southern end of the Izu Peninsula. On the basis of lithologies, fossil contents, and radiocarbon dating, we identified geological and paleontological evidence for abrupt changes in depositional environments related to coseismic uplift associated with the AD 1854 Ansei-Tokai earthquake. We estimated a maximum coseismic uplift of 1.2 m and post-earthquake gradual subsidence of ca. 0.6 m. Radiocarbon dating of the emerged sessile assemblages at the southern end of the Izu Peninsula, central Japan suggest that at least four coseismic uplift have occurred in the area, during 3387-2485 cal yr BP, AD 570?820, AD 1000?1270, and AD 1430?1660.

キーワード: 伊豆半島南端, 清水平野沿岸部, 地震性隆起, 完新世, 安政東海地震

Keywords: Coseismic uplifts, southern Izu Peninsula, Shimizu Plain, Holocene, Ansei-Tokai earthquake



## 福井県小浜湾沿岸の地殻変動と断層運動 Former shoreline height and Active Faulting around Obama Bay, Fukui, Central Japan

渡辺 満久<sup>1\*</sup>  
WATANABE, Mitsuhsisa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東洋大学  
<sup>1</sup>Toyo Univ.

### 1 はじめに

福井県若狭湾沿岸地域は、電力事業者の詳細な調査により微量のテフラも検知され、海成段丘面の編年が可能となっている地域である。たとえば、関西電力による詳しい分析によって、大飯原子力発電所敷地内に分布する海成段丘面の被覆層中から K-Tz 火山灰 (約 950ka) が見出され、小浜湾沿岸における MIS 5e の海成段丘面の対比・編年を行うことが可能となった。本研究では、海成段丘面 (MIS 5e) の旧汀線高度分布と断層運動との関係を数値計算によって検討した。その途中経過を報告する。なお、「旧汀線高度」とは地形的に認められる汀線アングルの高度のことを指し、精度 0.01m 程度のレーザー計測装置を用いて測定した。本研究では、平成 25~28 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) 研究代表者: 渡辺満久) を使用した。

### 2 海底活断層と海成段丘面

(1) 活断層と海成段丘面との関係: 小浜の東南東約 20km の位置から小浜湾沿岸付近まで、WNW-SES 走向の熊川断層が連続するとされている。また、日本海沖から小浜湾入り口までは、NW-SE 走向で延長約 35km の FO-B 断層・FO-A 断層が分布している。いずれも左横ずれの活断層であると考えられているが、前者の方が縦ずれ量は大きい。これらの活断層が小浜湾の中で連続しているかどうかは、現在、議論的になっている。海成段丘面は、後述するように、すべて熊川断層と FO-A 断層を連続させた場合の「隆起側」に分布している。「沈降側」にあたる内外海半島には、複数の河成面が確認できるものの、海成面の可能性がある平坦面は見いだせない。

(2) 大島半島の海成段丘面: 大飯原子力発電所敷地では、3つの平坦面が確認できる。このうち、最下位のもは人工平坦面の可能性がある。中位の平坦面は平坦性が高く、波蝕によって平坦化された岩盤上面と、これを覆う層厚数 m 以下の海成礫層が確認できる。関西電力の詳細な分析によると、この海成層は K-Tz 火山灰に覆われることから MIS 5e の海成段丘面に対比できる。大島半島北端部の鋸崎では、岩盤の露出高度は 12m 程度、旧汀線高度は 15m 程度である。ただし、ここから西方へ 1km 足らずの台場浜では、旧汀線高度は 8~11m となる。最高位の平坦面は鋸崎に見られ、その高度は約 22m であるが、詳細は不明である。中位の平坦面 (海成面) は、赤礁 (アカグリ) 崎へ追跡することができる。赤礁崎においても、波蝕台状の基盤上面を覆う海成礫層が確認でき、旧汀線高度は 10~11m であった。また、大島周辺の海成段丘面と推定される平坦面の旧汀線高度は約 10m である。

(3) 小浜湾南岸: 波縣鼻から西方の津崎鼻にかけては、少なくとも 2 面の海成段丘面が認められる。下位の段丘面は平坦性が高く、堆積物は褐色~赤褐色を呈する。高位の海成面はやや丸みを帯びた尾根上の形態となっており、堆積物には比較的顕著な赤色化が見られる。これらの特徴から、下位の海成段丘面が大飯原子力発電所敷地内の海成段丘面 (中位の平坦面) に対比できる。その旧汀線高度は、波縣鼻付近では約 10m であるが、西方の袖崎付近では 20m 弱と高度を増す。さらに西方では徐々に高度を下げ、津崎鼻付近では約 10m まで低下する。長井~尾内には標高 5~7m の平坦面が分布しているが、詳細は不明である。高位の海成段丘面の旧汀線高度は、波縣鼻付近では 13m 程度 (精度が悪い)、片江鼻~津崎鼻付近では 13.5m 程度である。高位の海成段丘面の分布は限られているため、旧汀線高度の変化パターンは不明である。

### 3 考察

内外海半島と小浜湾南岸は、いずれも古生界粘板岩類から成り、岩質の違いによって海成面の発達程度に違いがあるとは考えにくい。内外海半島に海成段丘面が見出されないのは、FO-A 断層と熊川断層が連続しており、その「沈降側」に位置していることが理由である可能性が高い。両活断層を連続させると、トレースは鋸崎付近で折れ曲がることになる。また、熊川断層の方が相対的に低角な逆断層成分をもつと想定される。このような断層モデルから計算される鉛直変位量分布は、旧汀線高度分布と調和的である。

キーワード: 海成段丘面, 旧汀線高度, 海底活断層, 数値計算, 小浜湾

Keywords: marine terrace surface, former shoreline, submarine active fault, calculated displacement, Obama bay



## 前期更新世までに活動を停止した断層における破砕帯と活断層破砕帯との比較 Comparison of the fault zones of the fault activity terminated until the Early Pleistocene and the active fault

大谷 具幸<sup>1\*</sup>; 河野 雅弘<sup>1</sup>; 小嶋 智<sup>1</sup>  
OHTANI, Tomoyuki<sup>1\*</sup>; KONO, Masahiro<sup>1</sup>; KOJIMA, Satoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岐阜大学  
<sup>1</sup> Gifu Univ.

活断層の活動性を評価する際に地表付近に若い被覆層が残されていない場合があり、基盤岩の破砕帯を調べることでより活動性を評価する手法の開発が望まれる。このときに活断層における破砕帯の特徴を明らかにするとともに、その特徴を比較的最近の地質時代に活動を停止した断層と比較することが重要である。そこで、奈良県吉野町に分布する中央構造線を対象として調査を行うとともに、それを活断層における調査結果と比較する。

中央構造線は四国から紀伊半島の中央部にかけては活断層としての活動を有するものの、紀伊半島中央部の奈良県五條市付近からは活断層としての活動は中央構造線から北に伸びる金剛断層へと続いており、そこから東側に続く構造線としての中央構造線には最近の活動は認められない。またこの地域では、岡田・東郷(2000)により活断層図に30万年前以前に活動を停止した断層が示されている。また、寒川・岡田(1977)は白亜紀の和泉層群と前期更新世の菖蒲谷層が中央構造線の破砕帯を挟んで接しており、それらを中期更新世の五條層が不整合で覆っている露頭を報告している。菖蒲谷層と五條層の堆積年代(水野, 1992)からこの露頭では中央構造線は100~120万年前にはほぼ活動を停止したことがわかっている。寒川・岡田(1977)により報告された露頭は現在は観察できないので、その露頭から東へ13km離れた地点に露出する破砕帯露頭で調査を行った。

この露頭では、幅約1mの断層ガウジ帯がほぼ東西走向で分布している。北側には和泉層群が分布するものの、南側には露出がなく中央構造線に接する地質体の種類を確認できていない。原岩である和泉層群は泥岩を主体としており、緩傾斜の層理面と思われる面構造が発達するものの、断層ガウジ帯の近くに分布するカタクレーサイトでは断層ガウジ帯とほぼ平行に急傾斜の面構造が発達している。カタクレーサイトには南側隆起のせん断センスを示す複合面構造が認められる。

この露頭から試料採取を行い、粉末X線回折分析と蛍光X線分析を行った。粉末X線回折分析の結果、断層ガウジに接する面状カタクレーサイトでは、雲母粘土鉱物の消失、緑泥石の生成が生じている。またこの面状カタクレーサイトとその直近の断層ガウジでは斜長石の分解、方解石の形成が生じている。このように変質鉱物の形成は断層ガウジよりもそれに接する面状カタクレーサイトで顕著である。一方で、断層ガウジ、カタクレーサイトともにスメクタイトは検出されなかった。

蛍光X線分析の結果、原岩からカタクレーサイト、断層ガウジの順にTiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の増加が認められた。CaO, Na<sub>2</sub>O, MnOは原岩と比べてカタクレーサイト、断層ガウジで減少しており、断層ガウジよりカタクレーサイトで減少を示している。

このような傾向を活断層の基盤岩からなる破砕帯における結果と比較すると、活断層の場合には破砕帯の最新すべり面にスメクタイトが含まれており、かつMnが濃集することが認められている。これは比較的低温で形成する鉱物であるスメクタイトが地表付近で形成し、地表付近の酸化的環境でMnが濃集すると考えられるのに対して、現在活動を停止している断層では以前に活動を生じた際には現在より地下深く地下水下の還元的環境で変位を生じたためにMnが濃集していないと考えられる。ただしスメクタイトが含まれていないことは、当時の地下水水質等が影響を与えるため、スメクタイトの有無と活断層の活動性については今後慎重に検討する必要がある。

キーワード: 前期更新世, 破砕帯, 活断層

Keywords: Early Pleistocene, fault zone, active fault

## 1586年天正地震を引き起こした阿寺断層の変形構造-鉱物組成-元素組成分析 Analysis for deformation structures, mineral composition, and elemental composition in the Atera fault

加藤 尚希<sup>1\*</sup>; 廣野 哲朗<sup>1</sup>; 石川 剛志<sup>2</sup>; 亀田 純<sup>3</sup>; 大谷 具幸<sup>4</sup>

KATO, Naoki<sup>1\*</sup>; HIRONO, Tetsuro<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>2</sup>; KAMEDA, Jun<sup>3</sup>; OHTANI, Tomoyuki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻, <sup>4</sup> 岐阜大学工学部社会基盤工学科

<sup>1</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup>Department of Civil Engineering, Gifu University

阿寺断層は岐阜県南東部から中部にかけて延びる全長約 70 km の活断層であり, 先行研究による阿寺断層南東部の田瀬露頭およびトレンチ調査の結果, 1586 年の天正地震の際に活動した可能性が高いとされている. しかし, 地震時における断層滑り挙動 (滑り距離や剪断応力など) は未だに不明のままである. そこで, 本研究では, 阿寺断層の地震時の滑り挙動を解明すべく, 田瀬露頭における変形構造観察, 偏光顕微鏡による微小変形構造観察, 粉末 X 線回折による鉱物組成分析, ICP 質量分析による微量元素組成分析を実施した. その結果, 厚さ約 10 cm の断層帯内にて 6 つの変形ゾーンを確認し, それぞれ特色をもつような元素濃度異常を検出した. これらの結果は断層内での水-岩石反応の存在を示唆し, 天正地震において阿寺断層が活動した一つの証拠となるかもしれない.

キーワード: 活断層, 断層ガウジ, 微量元素

Keywords: Active fault, Fault gouge, Trace element

ディスロケーション解により基盤運動を制御する個別要素法を用いた堆積層の変形シミュレーション  
Deformation simulations by the discrete element method controlling basement motions by the dislocation solutions

楠本 成寿<sup>1\*</sup>; 伊藤 康人<sup>2</sup>  
KUSUMOTO, Shigekazu<sup>1\*</sup>; ITOH, Yasuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部, <sup>2</sup> 大阪府立大学大学院理学系研究科  
<sup>1</sup>Grad. Sch. Sci. Eng. Res., Univ. Toyama, <sup>2</sup>Grad. Sch. Sci., Osaka Prefecture University

個別要素法を用いた基盤岩の運動による堆積層の変形シミュレーションでは、基盤は、これまで剛体として動かされてきた。本研究では、堆積層の変形を断層パラメータや弾性定数に関連付けて議論できるよう、個別要素法における基盤の運動を弾性論に基づく dislocation 解でコントロールすることを試みた。

その結果、堆積層の変形は、基本的に基盤岩の変形形状に追従するため、剛体基盤モデルでは現れなかった堆積層の傾斜などが今回のシミュレーションに現れた。また、断層端周辺の堆積層の変形様式も剛体基盤モデルと異なること、さらに断層基盤モデルにおいても、その形状は、モデル化の際に仮定される断層パラメータの影響を受けることが示された。堆積層表層の形状にも断層パラメータ依存性が示唆された。

これらのことから、我々のモデルを用いることにより、堆積層の変形形状だけでなく、trishear の形状やその発達過程についても、断層パラメータと関連付けて議論を行うことが可能になることが示された。今後、多くの地形、地質構造、震探データの解釈に用いることで、より実際の解析手法のノウハウを蓄積し、テクトニクスや構造の形成過程についての定量的議論を進めていきたいと考えている。

キーワード: 個別要素法, ディスロケーション解, 堆積層の変形, PFC

Keywords: Discrete Element Method, Dislocation analytical solutions, Displacement of sedimentary layer, PFC

## コンピュータシミュレーションを用いた櫛挽断層トレンチ側面で観察された地層変形の再現 The reproductive experiments of stratum deformation on the trench for the Kushibiki fault using numerical experiments

安藤 広一<sup>1\*</sup>  
ANDO, Koichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科  
<sup>1</sup>Tokyo Metropolitan University Department of Geography

### はじめに

東日本-中部日本にかけては第四紀広域応力場として東西圧縮力が働いている。その結果、同地域には多くの低角逆断層が発達している。これらの逆断層は地下数キロ以浅において分岐しバックスラスト撓曲等の複雑な形態を示すことがある。

断層の内、断層活動に伴って地震波を発生させる領域は3 km以深と考えられている。すなわち、3 km以浅で震源断層から分岐した二次的な地表地震断層は地震波を発生させないと考えられる。また、震源断層と直接連続している地表地震断層が周辺地域の主要な地殻変動を規定していると考えられる。したがって、防災や地形発達史を考察するためには、地表地震断層のうち震源断層と直接連続しているものと、断層面の分岐等による二次的なものを区別する必要がある。

ところで、アナログ実験や動力学モデルにおいて断層すべり速度が表層付近で加速する結果が得られている (e.g., Brune, 1996; Shi *et al.*, 1998)。シミュレーションによって、断層傾斜角  $15^{\circ}$  -  $45^{\circ}$  の逆断層では地表面における最大断層すべり速度が  $2.5$  -  $4.0$  m/s に達することが知られている (e.g., Oglesby *et al.*, 2000; Ma and Hirakawa, 2013)。これに対して、岩手・宮城内陸地震で発生した二次的なバックスラストでは最大断層すべり速度が約  $0.05$  m/s と上記に比べて極端に遅くなるとされる (安藤・山崎, 2013)。したがって、最大断層すべり速度を求めることで震源断層に直接つながる地表地震断層と二次的な地表地震断層を区別できる可能性がある。

そこで、本研究では数値計算によって深谷断層の二次的なバックスラストとされている櫛挽断層の最大断層すべり速度を求めた。

### 関東平野北西縁断層帯と櫛挽断層の関係

杉山ほか (2009b) によると、関東平野北西縁断層帯は関東山地北部と関東平野北西部の境界付近に位置する北西-南東走向の活断層帯である。

この断層帯の主部は、南西側隆起の逆断層である深谷断層とその北西及び南東に位置する断層群からなる。また、深谷断層の南西部には深谷断層と平行に走る平井-櫛挽断層帯が存在する。この断層帯は平井断層、櫛挽断層および神川断層からなる。これらの断層は、平井断層をのぞいて深谷断層のバックスラストであるとされる (杉山ほか, 2009a)。さらに、櫛挽断層はトレンチ調査およびボーリング調査から新第三系の層理面に平行な断層傾斜角約  $20^{\circ}$  の層面断層であるとされる (杉山ほか, 2009b; 新谷ほか, 2009)。

### 研究手法

地層変形シミュレーションプログラム SDSSC (Strata Deformation Simulation System using CIP method) Ver 4.09 (安藤, 2013) に、櫛挽断層西端部に位置する埼玉県大里郡寄居町大字用土字下平で行われたボーリング調査 (杉山ほか, 2009b) およびトレンチ調査 (新谷ほか, 2009) から得られた同地区の層序、断層傾斜角、単位変位量を入力し、断層変位に伴う堆積・浸食過程を考慮したシミュレーションを行い、地層変形の形状をトレンチの観察結果とマッチングすることで断層活動時の断層すべり速度の推定を行なった。

トレンチ地点の土質定数については同地点での土質試験が行われていないので不明である。したがって、吉見・竿本 (2006) によって行われたボーリング試料に対する土質試験の結果をトレンチ地点の土質定数に当てはめて計算を行なった。また、地層の変形特性として Hajiabdolmajid *et al.*, (2002) で紹介されている CWFS (cohesion weakening and frictional strengthening) model を採用して計算を行なった。

### 結果・考察

計算の結果、櫛挽断層の断層活動時の最大断層すべり速度は  $1$  -  $1.5$  m/s と推定された。この値はシミュレーションによって推定されている震源断層に直接つながる逆断層の地表面における最大断層すべり速度の  $25$  -  $60$  % にあたる。

したがって、二次的なバックスラストの最大断層すべり速度は震源断層に直接つながる逆断層にくらべて遅いことが示唆される。



SSS34-10

会場:502

時間:4月29日 11:45-12:00

**謝辞**

本研究のために、東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用させていただきました。

キーワード: 櫛挽断層, 地表地震断層, バックスラスト, 断層すべり速度, シミュレーション, CIP 法

Keywords: Kushibiki fault, earthquake surface faults, back thrust, fault slip velocity, numerical experiment, CIP method

## 地震の再来間隔分布にかかる空間的変動と長期確率予測への影響 Spatial Variation on Recurrence-time Distribution of Paleoearthquakes and Its Influence for Long-term Forecast

野村 俊一<sup>1\*</sup>; 尾形 良彦<sup>2</sup>

NOMURA, Shunichi<sup>1\*</sup>; OGATA, Yosihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学情報理工学研究所, <sup>2</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Information and Engineering, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>The Institute of Statistical Mathematics

地震調査研究推進本部地震調査委員会が実施し公表している日本の活断層地震の長期予測では、再来間隔が独立にBPT(Brownian Passage Time)分布に従うとするBPT分布更新過程モデルを採用している。このモデルの適用に際しては、地震再来間隔の平均値および変動係数の推定が必要となるが、長期予測において変動係数の推定誤差はときに平均値以上に地震発生確率の評価に大きな影響をおよぼす。さらに、おおまかな年代と活動回数から一定精度の推定が可能な平均値とは異なり、変動係数の推定には正確かつ多数の再来間隔データがない限りとても大きな誤差を伴う。この変動係数について、地震調査委員会の手法においては、全国共通とした値をおいているが、地質調査により地震活動データが蓄積されるに従い、活断層間で変動係数に有意な差が確認されてきている。

BPT分布更新過程モデルは物理的背景として一定の閾値まで応力蓄積と解放を繰り返す弾性反撥説を仮定しており、再来間隔の平均値はプレート運動による応力蓄積の速度、変動係数は周囲の地震活動による応力攪乱の大きさに依存すると考えられる。然るに、これらのパラメータは一定の地域性を持っていると考えられ、活断層ごとの推定値の分布からも実際に地域的傾向を確認することができる(Nomura et al., 2011)。そこで本研究では、日本内陸活断層に対するBPT分布パラメータの空間的分布を推定し、特に活動データの少ない活断層における長期予測性能の向上を図る。さらに、変動係数の推定値などの違いによる影響を地震調査委員会の長期予測と比較して議論する。

キーワード: 長期確率予測, BPT分布, 更新過程, 変動係数, 空間モデル

Keywords: long-term forecast, BPT distribution, renewal process, coefficient of variation, spatial model

## 高田平野西縁断層帯海域延長部における断層・褶曲分布について Spatial distribution of faults and folds in the offshore extension of the western margin fault zone of the Takada plain

阿部 信太郎<sup>1\*</sup>; 荒井 良祐<sup>2</sup>; 岡村 行信<sup>1</sup>  
ABE, Shintaro<sup>1\*</sup>; ARAI, Ryoyu<sup>2</sup>; OKAMURA, Yukinobu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 川崎地質株式会社  
<sup>1</sup> AIST, <sup>2</sup> KGE.Co.,Ltd

高田平野の東西両縁部に分布する高田平野断層帯のうち、西縁に分布する高田平野西縁断層帯の海域延長部において、断層長と活動履歴の把握を主な目的として、海底活断層調査を実施した。

高田平野西縁断層帯は、概ね南北方向に延びており、陸域の断層と「直江津北方沖の断層」とは6km程度の隔たりがあるが、微小地震分布、地質構造の類似性から一連として、直江津北方沖から妙高市に至る長さ約30km、西側隆起の逆断層で、平均変位速度0.5~1.1m/千年、平均活動間隔2200~4800年程度と評価されている(地震調査研究推進本部2009)。なお、「直江津北方沖の断層」は岡村他(1994)に記載されている無名の断層である。

本調査においては、ユニブームを震源とする高分解能マルチチャンネル反射法地震探査31測線を実施し、断層、褶曲の分布、性状を把握した。また、断層帯が陸域から海域に至る沿岸部においてはチャープソナーにより完新統堆積物の分布状況を把握し、柱状採泥試料を採取した。本講演においては、本調査で取得された反射法地震探査記録に基づく断層、褶曲の分布、性状について検討の途中経過を報告する。

陸域の高田平野西縁断層帯の海域延長部には、断層の西側が東側に対して相対的に隆起する撓曲構造が分布する。この撓曲構造は「直江津北方沖の断層」の南東側に位置し、走向が若干異なり、トレース上は連続しないものの、両者の下盤側には高田平野の海域部にあたる堆積盆が形成されており、同様の地質構造を有している。「直江津北方沖の断層」は、その北東にも断層関連褶曲が確認され、高田平野から続く堆積盆を下盤側に形成しつつ、地質構造としてさらに北東方向に続いている。この「直江津北方沖の断層」から続く断層関連褶曲は、岡村他(1994)に記載されている米山崎沖の褶曲に並走しており、その成長に伴って消滅している。この領域においては、褶曲の成長が東側から西側にシフトしつつ、断層関連褶曲の形成も断層の東側が西側に対して相対的に隆起する傾向に移り変わっていると解釈される。この断層関連褶曲は、位置的には岡村(2010)において中越沖地震の震源断層と関連する活褶曲として記載されている柏崎沖北背斜に連続する。

### <参考文献>

- 地震調査推進本部(2009): 高田平野断層帯の長期評価について
- 岡村他(1994): 佐渡島南方海底地質図、地質調査所
- 岡村(2010): 2007年中越沖地震震源域および佐渡海盆の活構造、活断層研究

キーワード: 高田平野西縁断層帯, 沿岸海域, 断層, 褶曲, 活構造, 高分解能反射法地震探査

Keywords: The western margin fault zone of the Takada plain, offshore, fault, fold, active structure, high-resolution seismic reflection survey

## 石狩低地東縁断層帯の主部と南部の接合部の地質構造とその活動性 Geologic structures and their activities around junction of main part and southern part of the active eastern boundary f

小松原 琢<sup>1\*</sup>; 佐藤 智之<sup>1</sup>; 康 義英<sup>1</sup>; 尾崎 正紀<sup>1</sup>; 小松原 純子<sup>1</sup>  
KOMATSUBARA, Taku<sup>1\*</sup>; SATO, Tomoyuki<sup>1</sup>; KOU, Yoshihide<sup>1</sup>; OZAKI, Masanori<sup>1</sup>; KOMATSUBARA, Junko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geoinformation, Advanced Industrial Science and Technology

石狩低地帯から勇払平野沖海域にかけて長さ 130 km の南北走向の断層褶曲帯 (石狩低地東縁断層帯) が存在する。この断層系は千島弧と東北日本弧の境界の一部をなしている。この断層系は低角東傾斜のスラストからなり、断層関連褶曲が発達する。石狩低地帯南部においては、断層系は勇払平野周辺の不連続と雁行配列によって2つに分けられる。主部は長さ 72 km、後期更新世以降の平均上下変位速度は 0.4 m/ky 以上である。南部は長さ 86 km、中期更新世後期以降の平均上下変位速度は 0.2~0.3 m/ky である。南部のうち陸上部分は短軸の背斜や短い単斜などからなる不規則で不連続な構造群をなす。この不連続な構造は石狩低地帯南部の不規則な基盤形状の影響を受けた結果と考えられる。

キーワード: 石狩低地東縁断層, 褶曲断層帯, 活断層, 平均変位速度, 地理情報システム

Keywords: Eastern margin fault zone of Ishikari Lowland, fold and thrust belt, active fault, mean displacement rate, geographical information system



## 糸魚川-静岡構造線活断層系の最新活動に伴う新たな古地震像 Revisited most recent paleoearthquakes along the ISTL active fault system, central Japan

近藤 久雄<sup>1\*</sup>; 谷口 薫<sup>1</sup>; 杉戸 信彦<sup>2</sup>  
KONDO, Hisao<sup>1\*</sup>; TANIGUCHI, Kaoru<sup>1</sup>; SUGITO, Nobuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産総研 活断層・地震研究センター, <sup>2</sup>法政大 人間環境学部

<sup>1</sup>AIST AFERC, <sup>2</sup>Hosei University

糸魚川-静岡構造線活断層系(以下,糸静線活断層系)は,1980年代以降に精力的に実施された詳細な古地震学的調査によって,近い将来に内陸大地震を生じる断層系の1つと考えられている(例えば,奥村ほか,1994;地震調査研究推進本部地震調査委員会,2003).糸静線活断層系におけるトレンチ調査等の地点数は約44地点にわたり,日本の内陸活断層帯の中で最も高密度に古地震学的調査が実施されてきた(例えば,糸静線活断層系発掘調査研究グループ,1988など).これらの成果では,断層系最北端を構成する神城断層から下葛木断層に至る区間(北部-中部区間:奥村ほか,1998)の最新活動時期が約1200年前と推定され,西暦841年もしくは西暦762年地震のいずれかに対比されるものと考えられてきた.甲府盆地の西縁付近を延びる南部区間では約1200年前とは異なり,より古い活動時期が推定されている(遠田ほか,1995;2000).

一方,上述の神城断層から下葛木断層に至る区間が連動型の1つの大地震であったのか,という点については課題が残されている.横ずれ成分を主体とする中部区間の中で,断層系のほぼ中央部に位置する諏訪湖周辺では盆地縁辺部を限る正断層群が発達し(例えば,今泉ほか,1997),同断層系で最も大規模な構造境界をなす.この盆地の成因については議論があるものの,最近検出された横ずれ地形(近藤・谷口,2013)等から判断して,藤森(1991)が指摘したように左横ずれ断層のステップ・オーバーに伴い形成されたプリアパート盆地である可能性が高い.すなわち,諏訪湖堆積盆地が断層セグメント境界をなすと考えられる.その一方では,糸静線活断層系の最新活動ではいずれかの歴史地震において諏訪湖セグメント境界を乗り越えて破壊が進展したとみなされてきた.しかし,例えば,諏訪湖堆積盆地の南東を延びる茅野断層におけるジオスライサー調査では最新活動時期は約2300年前であり,約1200年前のいずれの歴史地震でも活動していない(近藤ほか,2007).そこで,この諏訪湖セグメント境界周辺の最新活動時期をさらに高密度に復元することにより,諏訪湖セグメント境界の連動性を古地震学的に再検討した.

諏訪湖セグメント境界の北西側付近に位置する岡谷断層・郷田地点では,トレンチ調査の結果,過去4-5回の活動時期が明らかとなり,最新活動時期が1660+30 y.B.P.以降と推定された(近藤ほか,2013).さらに,諏訪湖セグメント境界の北東側に位置する諏訪湖北岸断層群・四賀桑原地点においてピット掘削調査を実施し,正断層運動に伴うとみられる傾斜不整合イベントをみいだした.この傾斜不整合の年代は2490±30から7710±40y.B.P.に限定され,少なくとも約1200年前の大地震に伴うものとは考えられない.さらに,下諏訪町下山田地点において実施したトレンチ・ボーリング調査では,沖積扇状地面を切る比高約2mの低断層崖が1790+30から6750+30y.B.P.に形成された可能性があり,現在さらに詳細を検討している.

これらの諏訪湖セグメント境界とその周辺の最新活動時期からみて,諏訪湖北岸断層群および諏訪湖南岸断層群では最新活動時期が約1200年前よりも古く,西暦841年と西暦762年地震のいずれにおいても活動していない.したがって,約1200年前の歴史地震に伴い神城断層から下葛木断層に至る区間が連動して1つの大地震を生じたとは考えられない.すなわち,神城断層から牛伏寺断層ないし岡谷断層までを含む区間と,釜無山断層群から下葛木断層までを含む区間が約1200年前にそれぞれ別々の大地震を生じた可能性が高い.歴史史料の制約から現状では断定できないが,前者の区間が西暦841年地震,後者の区間が西暦762年地震を生じたという対比,あるいはその逆の組み合わせの可能性もある.今後,緻密な年代測定等を実施することで,両地震の対比をより厳密におこなうことも重要である.

さらに,最新活動では諏訪湖セグメント境界を破壊が乗り越えなかったと考えられるものの,そのような連動型大地震が過去に生じなかったとは言えない.例えば,約2000-2300年前の古地震イベントでは,牛伏寺断層や岡谷断層,茅野断層においても共通して見いだされており,活動時期のみからは連動した可能性は考えられる.ただし,地層の欠落や年代測定の推定幅によって完全な同時性があるとは言えないため,このイベントに伴う地震時変位量を復元して検討することが必要である.さらに,数値シミュレーション等により物理的な背景をもった再現性を検討する必要がある.

謝辞:諏訪湖周辺の現地調査は(株)ダイヤコンサルタントのご協力を得ました.記して御礼申し上げます.

キーワード:活断層,古地震,歴史地震,糸魚川-静岡構造線活断層系

Keywords: active fault, paleoearthquake, historical earthquake, ISTL active fault system

## 呉羽山断層の高精度反射法地震探査 (音川測線) High resolution seismic reflection profiling across the Kurehayama fault, Otokawa Line, central Japan

石山 達也<sup>1\*</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 越谷 信<sup>2</sup>; 戸田 茂<sup>3</sup>; 小林 健太<sup>4</sup>; 照井 匡子<sup>2</sup>; 近藤 しおり<sup>3</sup>; 山内 紘一<sup>1</sup>; 阿部 紫織<sup>1</sup>

ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KOSHIYA, Shin<sup>2</sup>; TODA, Shigeru<sup>3</sup>; KOBAYASHI, Kenta<sup>4</sup>; TERUI, Kyoko<sup>2</sup>; KONDO, Shiori<sup>3</sup>; YAMAUCHI, Koichi<sup>1</sup>; SHIORI, Abe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 岩手大学工学部社会環境工学科, <sup>3</sup> 愛知教育大学, <sup>4</sup> 新潟大学理学部地質科学科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University, <sup>3</sup>Aichi Educational University, <sup>4</sup>Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

呉羽山断層は、富山平野とその西側に位置する呉羽丘陵の境界部に位置する、北北東走向の逆断層である(中田・今泉編、2002など)。呉羽山断層に沿っては第四紀後期から完新世の地形面や地層を累積的に変形させる証拠が分布し、当地域の地形・地質の構造的な落差に寄与した主要な活断層である。その一方で、断層構造そのものや変動地形と断層構造の関係については不明な点が多い。呉羽山断層で過去に実施された反射法地震探査(富山県・富山県活断層調査委員会、1997)によれば、断層面は地表から地下1.5 kmまでは中角度で西に傾斜するが、地下1.5 km程度でほぼ水平なデコルマとなると考えられる。このような薄皮褶曲衝上断層構造が呉羽山断層を代表する形状とするには疑問があり、浅部の複雑な構造や変動地形と深部構造を結びつけて論じるためには地下浅部の高解像度イメージングを行う必要がある。さらに、呉羽山断層を含む北陸地域に分布する活断層は、富山トラフの長軸と平行な概して北北東走向の逆断層であり、日本海拡大時に形成された背弧リフトの西部に位置しており、新潟地域などの日本海側の逆断層と同様に背弧リフトの構造に規制された活構造であると予察されるが、その実態については未解明である。そこで、筆者らは文部科学省「日本海地震・津波調査プロジェクト」の一環として、呉羽山断層南部を横断する測線において浅部の高解像度反射法地震探査を実施した。本実験では独立型収録システムGSR-1/GSX-1(OYO Geospace社製)およびMS-2000(地球科学総合研究所製)と、震源として中型バイブレーターEnviroVib(IVI社製)1台を用いた。測線は富山市婦中町十五丁から同細谷の約8 km区間である。主なデータ取得パラメータは以下の通りである: 受振・発震点間隔: 10 m、展開チャンネル数: 800 ch、スイープ長: 16 sec、スイープ周波数: 10-100 Hz、地震計固有周波数: 10 Hz、サンプリング間隔: 2 msec、平均垂直重合数: 5回。測線の東半部は幹線道路に位置することから、ノイズレベルは概して高かったが、可能な限り機器を本道から話して設置するなど、ノイズ低減に注意を払った。測線西半部ではノイズレベルは低く、殆どのショット記録においてS/N比の高い良好な記録が得られた。この観測記録を用いて、Super-XC((株)地球科学総合研究所製)を使用した共通反射点重合法に基づくデータ解析を行った。その結果、呉羽山断層およびその下盤側の地下1.5 kmまでの良好なイメージが取得できた。それによれば、後期更新世の段丘面の東向き撓曲崖基部は呉羽丘陵南部の複背斜構造を限る向斜軸とおおよそ一致している。複背斜構造の構造的な特徴から、ここでは呉羽山断層はウェッジ・スラストである可能性が高い。この様な断層構造の特徴は、上述した呉羽丘陵北部で得られている薄皮褶曲衝上断層とは明確に異なるものである。また、呉羽山断層下盤側の富山平野下には伏在する撓曲構造の存在が認められる。今後は、変動地形・表層地質などとあわせて呉羽山断層の浅部地質構造について詳細な解析を進める予定である。

## 吉野ヶ里遺跡周辺の活断層 Active faults in and around the Yoshinogari Heritage

楳原 京子<sup>1\*</sup>; 吉田 春香<sup>2</sup>; 副田 宜男<sup>3</sup>; 岡田 真介<sup>4</sup>; 松多 信尚<sup>5</sup>; 戸田 茂<sup>6</sup>; 今泉 俊文<sup>7</sup>; 長岡 信治<sup>8</sup>  
KAGOHARA, Kyoko<sup>1\*</sup>; YOSHIDA, Haruka<sup>2</sup>; SOEDA, Yoshio<sup>3</sup>; OKADA, Shinsuke<sup>4</sup>; MATSUTA, Nobuhisa<sup>5</sup>; TODA, Shigeru<sup>6</sup>; IMAIZUMI, Toshifumi<sup>7</sup>; NAGAOKA, Shinji<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 山口大学教育学部, <sup>2</sup> 無所属, <sup>3</sup> 西日本技術開発株式会社, <sup>4</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>5</sup> 名古屋大学減災連携研究センター, <sup>6</sup> 愛知教育大学, <sup>7</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>8</sup> 元・長崎大学

<sup>1</sup>Faculty of Education, Yamaguchi University, <sup>2</sup>non, <sup>3</sup>West Japan Engineering Consultants, Inc., <sup>4</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, <sup>6</sup>Aichi University of Education, <sup>7</sup>Graduate school of Science, Tohoku University, <sup>8</sup>formerly Nagasaki University

佐賀平野と背振山地との境界には、活断層が存在することが知られている(九州活構造研究会編, 1989など)。下山ほか(2010)は、ボーリング資料から阿蘇4火砕流堆積物とそれを覆う三田川層(約1.8-9万年前)の境界が、断層を挟んで南側に大きく沈み込んでいることを明らかにし、本断層の変位を相対的な北側隆起とした。そして地震調査研究推進本部の活断層の地域評価(九州)では、重力異常の特徴も踏まえ、佐賀平野北縁の活断層(佐賀平野北縁断層帯)が、小城市から吉野ヶ里町までの東西約22kmにわたる正断層帯であると評価された。しかし、詳細な活断層の分布やそれらの活動性に関しては不明な点が多い。

一方、この断層帯沿いには、阿蘇4火砕流堆積物からなる小高い段丘面上に吉野ヶ里遺跡がみられる。吉野ヶ里遺跡は我が国のクニの成立を伺い知ることのできる遺跡として学術的価値の高い遺跡である。ここでは旧石器から近世までの遺物が出土するが、特に、弥生時代の環濠集落遺跡として注目されている。この地でクニとして栄えた環濠集落の終焉は3世紀後半と言われている。その後、奈良時代には吉野ヶ里遺跡を含む佐賀平野北縁に大宰府から肥前の国(現在の佐賀県・長崎県)に延びる官道や官衙などが置かれた。このように、吉野ヶ里遺跡およびその周辺地域は、幾重もの時代の文明が残る地域である。すなわち、人間の活動を長期間記録するこの地域では、活断層と人間・文明との関わりを知ることができる期待される。

そこで本研究では佐賀平野北縁断層帯の分布と活動性を明らかにし、地震や変動地形が文明にどう影響したのかについて明らかにすることを目的とした調査研究を行った。まず、(故)長岡氏が遺した地形判読図を参考にしつつ、吉野ヶ里遺跡周辺において、大縮尺図、空中写真、5m DEMを用いた地形判読と地表踏査を行った。その結果を考古学的資料と比較することにより、段丘面、活断層、官道・官衙等の分布を捉えた。また、明瞭な崖を横断する測線を設定し、ランドストリーマーと稠密発震による極浅層反射法地震探査を行った。本発表では地表と地下構造から推定される吉野ヶ里遺跡周辺の活断層の特徴と分布、遺跡との関係について議論する。

キーワード: 正断層帯, 佐賀平野, 吉野ヶ里遺跡, DEM, 極浅層反射法地震探査

Keywords: Normal fault zone, Saga Plain, Yoshinogari Heritage, DEM, Very shallow seismic reflection profiling



## 中国四川盆地の巨大古地震と三星堆・金沙文明の滅亡 Study on great palaeoearthquakes and the decline of the Sanxingdui and Jinsha civilizations, Sichuan basin, China

林 愛明<sup>1\*</sup>; Rao Gang<sup>2</sup>; Wang Maomao<sup>1</sup>  
LIN, Aiming<sup>1\*</sup>; RAO, Gang<sup>2</sup>; WANG, Maomao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 浙江大学地球科学院

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

チベット高原の東縁部に発達した内陸長大活断層である龍門山活断層帯により引き起こされた2008年 Mw7.9 四川大地震の関連研究により、過去数千年間にこの断層帯は繰り返し大地震を引き起こしていることが明らかにされた。

本講演では、四大文明の一つ、黄河文明と変わらぬ高度な文明であったと注目されている長江文明（三星堆文明及び金沙文明）の突然の消失は四川盆地西縁部の龍門山断層帯で繰り返し発生した巨大古地震による可能性が高いことを報告する。

The ruins of ancient civilizations damaged by large palaeoearthquakes, which have been reported worldwide, are often used as surface markers for Holocene tectonic and palaeoseismic events. Previous studies have demonstrated that recurring palaeoearthquakes have caused repeated soil liquefaction at the same site, leaving a record in both sediments and ancient ruins; such records can reveal a great deal about earthquakes that occurred prior to human-recorded observations or measurements<sup>5,10</sup>.

The Sanxingdui civilization, which developed on the Sichuan Plain, central China, during the Bronze Age (ca. 4800 years ago), flourished from ca. 4200 to ca. 3500 years ago until its sudden disappearance ca. 3200 years ago. Subsequently, the Jinsha civilization arose in the area around Chengdu city, ca. 40 km southwest of the Sanxingdui site, but it too suddenly disappeared ca. 2500?2200 years ago. It has been speculated that floods or regime changes might explain the collapse of both civilizations, but no solid evidence for such causes has so far been reported.

In this study, to search for a link between palaeoearthquakes and the abrupt unexplained falls of the Sanxingdui and Jinsha civilizations, we investigated the liquefaction induced by great palaeoearthquakes that occurred repeatedly in the past 5000 years on the Sichuan Plain, central China, in the region of the former Sanxingdui and Jiasha civilizations. Here, we present evidence that great palaeoearthquakes may have caused the collapse of both the Sanxingdui and Jinsha civilizations, as the cultures flourished in the periods during ca. 4200?3500 years and ca. 2800?2300 years ago, respectively, on an active fault zone of the Longmen Shan Thrust Belt (LSTB) that triggered the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake. Field observations, archaeological evidence, and radiocarbon dating reveal that at least four great palaeoearthquakes have induced liquefaction in wide areas around the Sanxingdui and Jinsha civilization sites during the past 5000 years, with an average recurrence interval of ca. 1000 years. We suggest that palaeoearthquakes occurring ca. 3300 and ca. 2200 years ago caused the fall and disappearance of the Sanxingdui and Jinsha civilizations, respectively, by causing extensive damage to infrastructure and manufacturing facilities, as well as numerous deaths.

キーワード: 古地震, 三星堆文明, 金沙文明, 長江文明, 龍門山逆断層帯, 四川盆地

Keywords: palaeoearthquake, Sanxingdui civilization, Jinsha civilization, Yangtze River civilization, Longmen-Shan Thrust Belt, Sichuan Basin



**Active thrusting beneath an alluvial terrace in the southern Longmen Shan range front, Sichuan basin, China**  
**Active thrusting beneath an alluvial terrace in the southern Longmen Shan range front, Sichuan basin, China**

WANG, Maomao<sup>1\*</sup> ; LIN, Aiming<sup>1</sup> ; JIA, Dong<sup>2</sup> ; SHAW, John<sup>3</sup>  
WANG, Maomao<sup>1\*</sup> ; LIN, Aiming<sup>1</sup> ; JIA, Dong<sup>2</sup> ; SHAW, John<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kyoto University, <sup>2</sup>Nanjing University, <sup>3</sup>Harvard University

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kyoto University, <sup>2</sup>Nanjing University, <sup>3</sup>Harvard University

The devastating 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, China, demonstrates that the central and northern parts of the Longmen Shan are currently active. However, evidence for active faulting and folding in the southern Longmen Shan remains poorly documented. In this paper, we define the structural geometry, fault kinematics, and seismic hazard of the Qiongxian thrust fault system (QTF) along the southern Longmen Shan range front by integrating deep and shallow seismic reflection data and geomorphic observations. The QTF is a 50-km-long, N-S-trending set of faults and associated folds that exhibit geomorphic evidence of Quaternary surface deformation. Geomorphic observations and seismic reflection data reveal that these faults dip steeply to the east and merge at depth with a blind, west-dipping thrust ramp. The trend and reverse sense of slip along the QTF indicates that the structure accommodates east-west crustal shortening. Based on uplift of stratigraphic horizons across the fault zone, we define a late Pliocene to early Pleistocene fault slip rate of 0.2-0.3mm/yr, and a middle Pleistocene to present rate of 0.4-1.2 mm/yr on the west-dipping thrust ramp. This ramp soles to a basal detachment in the Triassic section at a depth of 4.5-5.5 km. To the west, this detachment steps down onto a blind, northwest-dipping thrust termed the Range Front Thrust. A rupture of the QTF in combination with the Range Front Thrust could generate a Mw7.8 earthquake with average displacement of 5.7m. This type of earthquake source poses significant hazards to the adjacent, highly populated Sichuan basin.

## 放射性炭素年代を用いた黒色土の層序対比と断層変位基準認定への活用 Identification of Fault Displacement and Stratigraphic Correlation of Black Soils based on Radiocarbon Ages

安江 健一<sup>1\*</sup>; 廣内 大助<sup>2</sup>; 國分 (齋藤) 陽子<sup>1</sup>; 松原 章浩<sup>1</sup>; 古澤 明<sup>3</sup>

YASUE, Ken-ichi<sup>1\*</sup>; HIROUCHI, Daisuke<sup>2</sup>; SAITO-KOKUBU, Yoko<sup>1</sup>; MATSUBARA, Akihiro<sup>1</sup>; FURUSAWA, Akira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>2</sup> 信州大学, <sup>3</sup> 古澤地質

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>2</sup>Shinshu University, <sup>3</sup>Furusawa Geological Survey

活断層の活動時期を正確に把握するためには、断層周辺の堆積物の堆積時期を高精度に決定する必要がある。堆積時期の決定には、主に <sup>14</sup>C 年代や火山灰層序が用いられる。しかし、堆積時期の決定に適した <sup>14</sup>C 年代測定試料 (葉、球果など) や火山灰は、堆積物中のどこにでも含まれているわけではなく、全く分布しないこともある。そこで本研究では、地表付近で比較的分布することが多い一方で、層理面の判定が難しい黒色土について、<sup>14</sup>C 年代測定を深さ方向に実施し、堆積年代に基づいて層序を対比した。さらにその結果を踏まえて、活断層の変位基準の認定とそれに基づく活動時期を検討した。

本研究では、まず試料の黒色土から草木の根や炭などを可能な限り取り除いた。次に、1M の塩酸により炭酸塩などを除去した後、1M の水酸化ナトリウムによる処理を行い、そこで得られるアルカリ可溶成分 (フミン酸) を測定試料とした。一方、溶解しない成分はさらに 1M の塩酸による処理を行い、その残渣 (ヒューミン) を測定試料とした。上記の試料調製及び年代測定は、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター及び同センターの加速器質量分析装置 (JAEA-AMS-TONO) で実施した。

試料は、岐阜県東部に分布する阿寺断層で実施されたトレンチ掘削 (廣内ほか, 2006) の壁面から採取された黒色土である。壁面においては、断層から約 50cm 離れた上盤及び下盤からそれぞれ層厚約 60cm の試料を 3~6cm 程度の間隔で連続採取し、<sup>14</sup>C 年代を測定した。フミン酸の年代測定は、上盤側で 12 試料、下盤側で 13 試料であり、ヒューミンは上盤側で 4 試料、下盤側で 6 試料を選定して測定した。測定の結果は、OxCal 4.2.3 (Bronk Ramsey, 2013) に IntCal13 (Reimer et al., 2013) を用いて暦年校正した。

測定の結果、フミン酸の年代値は約 4000~2000 年前であり、下部から上部へ若くなる傾向がある。試料採取した層より下位には K-Ah テフラが分布しており、年代値は矛盾しない。また、同一試料におけるフミン酸とヒューミンの年代値は、上盤側の最上部の 1 試料で 1000 年近い差が認められたが、それ以外は大きな差は認められない。黒色土は、下部から順に約 4000 年前から 2000 年前に向かって若くなる傾向がある。この特徴は、上盤側と下盤側の双方の試料で認められることから、断層を挟んで <sup>14</sup>C 年代値から地層を対比することが可能である。また、下盤側の黒色土の上位において、層厚 20cm 程の礫混じり土壌の年代値はどの深度でも 2000 年前頃である。

以上の結果から、約 4000~2000 年前は断層の両側でそれぞれほぼ一定の速度で黒色土が堆積していることから、この期間にこの断層は変位していないと考えられる。下盤側の黒色土の上位では、層厚 20cm 程の間で 2000 年前頃の値であることから、堆積速度が速かったと考えられる。このような断層付近での堆積速度の急激な変化の原因の一つとして断層変位があり、2000 年前頃の活動が示唆される。本結果の解釈については、阿寺断層全体の活動セグメントの問題も踏まえて、活動の時空分布を慎重に検討する必要がある。

本研究のように、黒色土を深度方向に連続的に採取し、丁寧に調製して年代測定をするとともに堆積物の特徴を踏まえて検討することで、詳細なイベント層準の認定や活動時期の解明が可能であると考えられる。発表では、より下位の <sup>14</sup>C 年代測定の結果と火山灰分析の結果も加えて報告する。

キーワード: 放射性炭素年代測定, C-14 年代, 黒色土, 阿寺断層, 活動時期

Keywords: radiocarbon dating, C-14 age, black soil, Atera fault, timing of faulting event

## 活断層の表面組織の電子顕微鏡観察 SEM observation on the active fault surface

田中 姿郎<sup>1\*</sup>; 蒲池 孝夫<sup>2</sup>; 蟹井 猛宏<sup>3</sup>; 溝口 一生<sup>1</sup>; 中田 英二<sup>1</sup>  
TANAKA, Shiro<sup>1\*</sup>; KAMACHI, Takao<sup>2</sup>; KANII, Takehiro<sup>3</sup>; MIZOGUCHI, Kazuo<sup>1</sup>; NAKATA, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所, <sup>2</sup> 関西電力, <sup>3</sup> ニュージェック  
<sup>1</sup>CRIEPI, <sup>2</sup>KEPCO, <sup>3</sup>NEWJEC

活断層の断層面の特徴を明らかにする事を目的に、最新の活動時期が示されている中期更新世～後期更新世以降に活動した断層を主な対象とし断層面の SEM 観察を実施した。断層面の観察においては、露頭観察により他の構造を切る直線性の高い面を最新の活動面と認定し、ブロックサンプリングを実施した。採取した試料はヘリカル X 線 CT 等を用いて内部構造の詳細観察を行ない断層面の連続性を確認した後、表面組織の観察用試料を作成した。最新活動面の実体顕微鏡および電子顕微鏡観察の結果、最新面には鏡肌が発達し条線が確認できること、断層面は粉碎され細粒化した物質から形成されており粘土鉱物が糊状に微細な粒子を覆い団子状を呈する物質が特徴的に認められる事、今回観察した最新活動時期が中期更新世～後期更新世以降の断層の最新面上にはイライト・緑泥石等の地下深部での続成作用で形成される鉱物の自形結晶の成長は認められないことが確認された。

キーワード: 活断層, 断層面, 粘土鉱物  
Keywords: active fault, fault surface, clay minerals

## 断層破碎帯の性状観察に基づく断層活動性評価手法の検討 - 1. 調査露頭の選定 - Examination of evaluation method for fault activity based on an observation of fault zone - 1. Selection of outcrops -

亀高 正男<sup>1\*</sup>; 岡崎 和彦<sup>1</sup>; 中山 一彦<sup>2</sup>; 瀬下 和芳<sup>2</sup>; 青木 和弘<sup>2</sup>; 田中 義浩<sup>2</sup>; 島田 耕史<sup>2</sup>; 下釜 耕太<sup>1</sup>; 稲田 徳之<sup>1</sup>  
KAMETAKA, Masao<sup>1\*</sup>; OKAZAKI, Kazuhiko<sup>1</sup>; NAKAYAMA, Kazuhiko<sup>2</sup>; SESHIMO, Kazuyoshi<sup>2</sup>; AOKI, Kazuhiro<sup>2</sup>;  
TANAKA, Yoshihiro<sup>2</sup>; SHIMADA, Koji<sup>2</sup>; SHIMOGAMA, Kota<sup>1</sup>; INADA, Noriyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ダイヤコンサルタント, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Dia Consultants, <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency

断層の活動性評価はいわゆる上載地層法として、断層に上載する地層に断層の変位・変形が及んでいるかどうかによってなされる。しかし、基盤岩中に断層破碎帯があり、それを上載する最近の地層が分布していない場合には、活動性を評価することが困難となる。基盤岩中にのみ破碎帯が分布する場合には、地形や地質の状況、応力場等を総合的に検討し、断層の活動性を評価する必要がある。破碎帯の調査項目としては、断層面形態、破碎幅、色調、硬さ、帯磁率、構成物の形態、鉱物組成、化学組成、年代測定などが実施されている。ただし、これらの調査項目には定量化や再現性などの検討が不十分な項目も含まれており、確立された活動性評価手法は現時点では存在していない。そこで、より科学的に断層活動性評価を実施するための一助とすべく、著者らは断層破碎帯の観察・分析に基づく活動性評価手法について活断層露頭と非活断層露頭の比較検討を進めている。

確実に活断層であるといえる基盤岩中の断層破碎帯において観察・分析を実施するためには、上載地層が変位・変形を被っている断層露頭において、その断層面を基盤岩中まで追跡して調査する必要がある。逆に、確実に活断層ではないといえる基盤岩中の断層破碎帯については、評価上十分に古い上載地層で覆われていることを確認する必要がある。

そこで本研究では、上記の条件を満たす断層露頭を文献調査により選定し、地表地質踏査を行い調査露頭を選定した。調査地点の選定にあたっては、基盤岩の組成や構造が比較的均質であり、陸域の基盤に多く露出し、断層岩の研究事例が多いとの理由から、調査対象を花崗岩地帯に限定した。

活断層の事例として検討したのは、兵庫県南部、六甲山地に分布する六甲-淡路断層帯五助橋断層の五助ダム上流地点(丸山ほか, 1997, 活断層研究の Loc.5)と、有馬-高槻構造線六甲断層の船坂西地点(Maruyama and Lin, 2002, Tectonophysics の Loc.1)である。

五助ダム上流地点では、六甲花崗岩中に五助橋断層の破碎帯がみられ、露頭上部では破碎帯が礫層と断層を介して接している。破碎帯は中央部に約 50cm の厚い断層ガウジを挟み、その周辺には面状カタクレーサイト及び花崗岩質カタクレーサイトが分布している。断層ガウジは主に褐色及び黒色を呈し、層状構造が認められる。

船坂西地点では、六甲花崗岩が有馬層群の流紋岩及びそれを覆う礫層と六甲断層を介して接している。花崗岩側は変質が著しく、断層面に沿って幅数 cm の褐色ガウジ、その外側に変質した面状カタクレーサイトや花崗岩質カタクレーサイトが分布している。流紋岩側は厚さ 1cm 程度の黒色の Fe-Mn 濃集層、流紋岩質カタクレーサイト、及び弱破碎流紋岩の順に分布している。

確実に活断層でない断層破碎帯の事例としては、高位段丘堆積物に変位・変形を与えていない断層露頭を地表地質踏査によって選定した。六甲山地北部の六甲蓬莱峡付近には上ヶ平面と呼ばれる厚い礫層から構成される高位段丘があり、その周辺には花崗岩の裸地が広がっている。六甲花崗岩と高位段丘構成層の不整合面に変位・変形を与えていない断層で、ガウジの最も厚い断層を調査対象とした。この断層を六甲蓬莱峡の断層と呼ぶこととする。なお、斜面からの落石が多いため安全上の観点から、調査は不整合露頭の断層を斜面下部に延長した地点で行った。露頭では破碎帯はマサ化の進行しつつある花崗岩中にみられ、カタクレーサイトや黒色 Fe 濃集層を伴う幅 1~3cm の褐色ガウジが分布している。

上記 3 地点において、断層破碎帯の性状観察(断層面の形態観察、原位置試験による硬さ及び色調の検討)、条線観察、研磨片・薄片・SEM 観察、鉱物組成分析、化学組成分析、力学試験及び物理試験を実施した。本発表では調査の概要と調査対象露頭の地表地質調査について報告する。なお、断層破碎帯の性状観察結果については岡崎ほか(2014, 連合大会予稿集)で報告する。

キーワード: 活断層, 断層活動性評価, 六甲山地, 五助橋断層, 六甲断層, 断層破碎帯

Keywords: active fault, evaluation method of fault activity, Rokko Mountains, Gosukebashi Fault, Rokko Fault, fault zone



## 断層破碎帯の性状観察に基づく断層活動性評価手法の検討 - 2. 断層面の形態観察, 硬さと色調の評価 - Examination of evaluation method for fault activity based on an observation of fault zone - 2. in-situ experiments -

岡崎 和彦<sup>1</sup>; 亀高 正男<sup>1\*</sup>; 中山 一彦<sup>2</sup>; 瀬下 和芳<sup>2</sup>; 青木 和弘<sup>2</sup>; 田中 義浩<sup>2</sup>; 島田 耕史<sup>2</sup>; 鈴木 一成<sup>1</sup>; 下釜 耕太<sup>1</sup>; 稲田 徳之<sup>1</sup>

OKAZAKI, Kazuhiko<sup>1</sup>; KAMETAKA, Masao<sup>1\*</sup>; NAKAYAMA, Kazuhiko<sup>2</sup>; SESHIMO, Kazuyoshi<sup>2</sup>; AOKI, Kazuhiro<sup>2</sup>; TANAKA, Yoshihiro<sup>2</sup>; SHIMADA, Koji<sup>2</sup>; SUZUKI, Kazushige<sup>1</sup>; SHIMOGAMA, Kota<sup>1</sup>; INADA, Noriyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ダイヤコンサルタント, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Dia Consultants, <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency

著者らは基盤岩中の破碎帯の性状観察・分析をもとにした断層活動性評価手法の確立を目標として、活断層露頭と非活断層露頭での断層破碎帯の比較調査を行っている。調査地点は兵庫県南部、六甲山地に分布する活断層である五助橋断層の五助ダム上流地点（以下、GSB）、六甲断層の船坂西地点（以下、FSW）、及び高位段丘に覆われており活断層ではないと考えられる六甲蓬莱峡の断層（以下、HRK）の3ヶ所である（亀高ほか、2014、連合大会予稿集）。本報告では、主に露頭において簡便に実施できる調査方法に着目し、断層面の形態観察（連続性・平面性など）、ならびに原位置試験として破碎帯の硬さ及び色調の評価について、それぞれの手法の妥当性を検討した結果を報告する。

活断層の最近活動した断層面は、他の構造を切って連続的・平面的に分布することが定性的に期待される。これを断層面の形態観察によって、より客観的・定量的に評価するために、1) 破碎組織相互の切断関係の評価、2) 連続性の評価、3) 平面性の評価、4) ISRM 指針（岩の力学連合会、1985、ISRM 指針）を用いた断層面の半定量的な評価、5) オルソ化した写真をもとにした算術平均粗さの検討を実施した。その結果、GSB と FSW では隣接する組織を切断する区間が長く、かつ連続性が良いのに対し、HRK では隣接する組織を切断する区間が短く、かつ断層面が途切れる区間が識別された。平面性については、GSB と HRK では期待通りの結果であったが、FSW では地表部での変質作用と推定される組織のために、平面的に連続しない区間もみられた。また、基盤岩中の破碎帯の断層面に比べて、礫層と破碎帯が接する部分の断層面は平面性が悪くなった。算術平均粗さの検討では平面性の定量化に成功したが、露頭の整形や断層面認定にやや課題が残っている。

活断層のガウジは軟質であり、活動的でない断層の破碎帯は固結して硬いということが定性的に言われている（木村、1981、応用地質）。破碎帯の硬さを定量化するために、軟岩ペネトロ計を用いた原位置試験（針貫入試験）を各破碎帯で実施し、破碎帯の硬さと断層活動性の関係について検討した。その結果、GSB、FSW 及び HRK ではともにガウジの硬さは  $0 \text{ kN/m}^2$  であり、破碎帯による明瞭な差異は認められなかった。地表付近の測定結果では、FSW の変質の進んだカタクレサイトや HRK のマサ化の進んだ弱破碎花崗岩も低い値を示すが、20cm 程度露頭を掘り込むと数値が高くなる傾向がある。一方で、断層ガウジは露頭を掘り込んでも低い値を示す傾向がみられた。

活断層のガウジは還元的な色調を呈し、活動的でない断層のガウジは酸化的な色調を呈することが指摘されている（産業技術総合研究所深部地質環境研究コア、2012、GSJ 研究資料集）。破碎帯の色調について、原位置試験として土色計を用いて各破碎部の色調を定量化し、破碎帯の色調と断層活動性の関係について検討した。その結果、GSB のガウジは Lab カラーの  $a^*$  値が  $-5.0 \sim 5.0$  程度、 $b^*$  値が  $0.0 \sim 15.0$  程度の還元的な値を示している。これに対して FSW のガウジの  $a^*$  値は  $10.0 \sim 15.0$  程度、 $b^*$  値は 35 程度と非常に高い酸化的な値を示している。一方、HRK のガウジは  $a^*$  値が  $-5.0 \sim 10.0$  程度、 $b^*$  値が  $5.0 \sim 20.0$  程度と幅広く、還元的からやや酸化的な値を示した。ガウジ周辺の破碎部は、非変形花崗岩の値とガウジの値を繋ぐように分布する場合が多く、全体として右上がりの直線状に配列し、花崗岩の風化による色調変化に対応した分布を示していると考えられる。

本発表では以上の結果について、根拠となる具体的なデータを示すとともに、活動性評価の観点からそれぞれの手法の妥当性や留意点などについて報告する。

キーワード: 活断層, 断層活動性評価, 六甲山地, 五助橋断層, 六甲断層, 断層破碎帯

Keywords: active fault, evaluation method of fault activity, Rokko Mountains, Gosukebashi Fault, Rokko Fault, fault zone

## 立体地形解析図上の活断層と地形面 Active faults and topographic surfaces on the stereoscopic topographic map

今泉 俊文<sup>1\*</sup>; 宮内 崇裕<sup>2</sup>; 楮原 京子<sup>3</sup>; 岡田 真介<sup>4</sup>; 白澤 道生<sup>5</sup>; 横山 隆三<sup>5</sup>; 佐々木 達哉<sup>6</sup>  
IMAIZUMI, Toshifumi<sup>1\*</sup>; MIYAUCHI, Takahiro<sup>2</sup>; KAGOHARA, Kyoko<sup>3</sup>; OKADA, Shinsuke<sup>4</sup>; SHIRASAWA, Michio<sup>5</sup>;  
YOKOYAMA, Ryuzo<sup>5</sup>; SASAKI, Tatsuya<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 山口大学教育学部, <sup>4</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>5</sup> 横山空間情報研究所, <sup>6</sup> 応用地質

<sup>1</sup>Graduated School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Graduated School of Science, Chiba University, <sup>3</sup>Faculty of Education, Yamaguchi University, <sup>4</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Yokoyama Geo-Spatial Information Lab., <sup>6</sup>OYO Corporation, Database Business Department

数値標高モデル (DEM) データを用いた地形解析手法によって、様々な地形の主題がわかりやすく鮮明に表現されるようになってきた。我々は、国土地理院の数値標高モデル (DEM) データのうち、5 m DEM データを用いて、2 万 5 千分の 1 地形図をそのまま立体視することを試みて、この立体地形解析図上に活断層情報を転記した。

地形図は、国土地理院の地形図仕様 (地形図の凡例) に基づいて作成し、これをアナグリフによって立体視化した。すなわち、市町村名などの地名に加え、山地・河川などの自然地名も地形図と同様に表示し、各種の施設・設備、市街地・住宅、道路・鉄道・水路などの地貌情報も市販の地形図どおりの表現とした。さらに、起伏を読み取る等高線も 10 m 間隔 (主曲線) で示しており、三角点や独標点をあわせて、それぞれの場所の標高値も同時に知ることができる。地形図を立体化することによって地形図の判読の不慣れさを補う効果が得られる。

この立体地形解析図上に、活断層の線分情報 (中田・今泉編, 2002) を重ねた。活断層の位置が、2 万 5 千分の 1 立体地形解析図上で読み取れるので、活断層と崖や傾斜地との関係、各種のインフラとの関係などが場所によっては詳しくわかる。逆に、活断層研究者が主に空中写真を用いて地表の起伏をどの様に判読して活断層と認定したのか、その根拠の一つが地形図上で明らかにされる。例えば、活断層の重要な諸元情報として断層形態、変位様式、変位量・変位速度があるが、これらは主に地形面を断層変位基準として求められている。縮尺 2 万 5 千分の 1 の地形図に 10 m 間隔で表現される地形の起伏から、各種の地形面 (扇状地や段丘面などの変位基準面) を読み取り、これらの変位基準に記されている崖や斜面の落差から断層による変位量を知ることが出来る (変位速度を知るには、変位基準の形成年代が必要)。

ポスターでは、逆断層が典型的な東北地方の活断層を対象に、立体地形解析図上に断層情報 (線分情報) を立体化して表示する。

キーワード: 活断層, 地形面, 立体地形解析図, 読図

Keywords: Active fault, Topographic surface, Stereoscopic topographic map, Interpretation of topographic map

## RBF 補間と GA を用いた LiDAR データからの地震時地表変位抽出手法の開発 Genetic algorithm-based displacement extraction technique for LiDAR dataset

竿本 英貴<sup>1\*</sup>; 丸山 正<sup>1</sup>; 近藤 久雄<sup>1</sup>  
SAOMOTO, Hidetaka<sup>1\*</sup>; MARUYAMA, Tadashi<sup>1</sup>; KONDO, Hisao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

近年における航空レーザー測定の発達は目覚ましく、広範囲にわたる詳細な地形が膨大な数の点群によって容易に表現されるようになってきた。この結果、詳細な崖地形解析、断層線の抽出、海岸線の抽出、遺跡範囲の特定など、さまざまな用途に航空レーザー測量で得られた点群データが利用されている。

ここでは地震の前後における地表の点群データに対してパターンマッチング処理を行い、地震時に地表で生じた変位を自動的かつ定量的に求めるための新たな手法を提案する。提案手法は RBF(Radial Basis Function) 補間と遺伝的アルゴリズムを組み合わせたものであり、疑似的に作成した地震前後の地形データにこれを適用し、一定レベルのノイズが地表データに混入している場合においても安定的に正しい変位が抽出できることを確認した。また、地形のパターンマッチング問題における目的関数は多峰的であり、勾配法に基づく最適解探索では正しい変位を探索できないことを示した。

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, 補間, LiDAR, 変位, 最適化

Keywords: genetic algorithm, interpolation, LiDAR, displacement, optimization

## 石狩低地東縁断層帯南部の海岸部における地質構造 Geologic structures around the coastal area of the southern part of the active eastern boundary fault zone of Ishikari I

佐藤 智之<sup>1\*</sup>; 小松原 琢<sup>1</sup>; 康 義英<sup>1</sup>  
SATO, Tomoyuki<sup>1\*</sup>; KOMATSUBARA, Taku<sup>1</sup>; KOU, Yoshihide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, AIST

石狩低地帯から勇払平野沖海域にかけて存在する石狩低地東縁断層帯南部の海岸部および沖合の地下構造について報告する。石狩低地東縁断層帯は長さ 130 km の南北走向の断層褶曲帯であり、千島弧と東北日本弧の境界の一部をなしている。海域での高分解能反射法音波探査と陸上ボーリングデータベースに基づき、勇払平野沿岸域の地下構造を調査した。その結果、海陸にまたがる二条の活背斜構造が認められた。これらは産業技術総合研究所(2007)で石狩低地東縁断層帯とされたスラストに伴う活背斜構造に対比できる。一つは静川台地付近から苫小牧東港を通過して陸棚外縁近くまで延びる勇払背斜であり、もう一つは東方の浜厚真から南東へ延びる浜厚真背斜である。地震調査研究推進本部地震調査委員会(2010)では南東へ延びるとされていた勇払背斜は南方へ延びており、浜厚真背斜は海域で鶴川沖背斜へと連続する。また、沖積層基底面を海陸に亘って復元した結果、苫小牧東港沖に存在する埋没谷は日高山脈側へ繋がることがわかった。

地震調査研究推進本部地震調査委員会(2010)石狩低地東縁断層帯の評価(一部改訂)。34p.

産業技術総合研究所(2007)石狩低地東縁断層帯の活動性および活動履歴調査「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書。H18-8, 35p.

キーワード: 石狩低地東縁断層帯, 反射法音波探査, 第四紀, 北海道, 沿岸域

Keywords: Active eastern boundary fault zone of Ishikari lowland, Seismic survey, Quaternary, Hokkaido, Coastal area



## 山形盆地断層帯北部における反射法地震探査データ取得 Seismic reflection survey across the northern part of the Western Boundary Fault Zone of the Yamagata Basin

岡田 真介<sup>1\*</sup>; 今泉 俊文<sup>1</sup>; 楮原 京子<sup>2</sup>; 越後 智雄<sup>3</sup>; 八木 浩司<sup>4</sup>; 松原 由和<sup>5</sup>; 三輪 敦志<sup>5</sup>; 小坂 英輝<sup>6</sup>  
OKADA, Shinsuke<sup>1\*</sup>; IMAIZUMI, Toshifumi<sup>1</sup>; KAGOHARA, Kyoko<sup>2</sup>; ECHIGO, Tomoo<sup>3</sup>; YAGI, Hiroshi<sup>4</sup>; MATSUBARA, Yoshikazu<sup>5</sup>; MIWA, Atsushi<sup>5</sup>; KOSAKA, Hideki<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 山口大学, <sup>3</sup> 地域 地盤 環境 研究所, <sup>4</sup> 山形大学, <sup>5</sup> 応用地質株式会社, <sup>6</sup> 株式会社環境地質  
<sup>1</sup>IRiDeS, Tohoku Univ., <sup>2</sup>Yamaguchi Univ., <sup>3</sup>Geo-Reearch Institute, <sup>4</sup>Yamagata Univ., <sup>5</sup>OYO Corporation, <sup>6</sup>Kankyo Chishitsu Company Limited

山形盆地断層帯は、山形盆地の西縁を限るように南北に約 60 km にわたって分布する活断層帯である。この活断層帯のうち、寒河江以北から大石田では、地表活断層のトレースも数条に分かれる分布形状を示している。また、盆地中央部に河島山が地形的な高まりとして存在し、その西側に最上川が穿入蛇行している。河島山の東側には向斜軸が指摘されており（池田ほか, 2002; 今泉ほか 2001）、これらの地形発達を明らかにする上でも、本地域の地下構造との関係について明らかにする必要がある。

そこで、本研究では山形盆地北部において山形盆地西縁断層帯を横切るように 2 本の測線（Line A および Line B）を設定し、2013 年 9 月・10 月に掛けて反射法地震探査を実施した。Line A は村山市西郷地区から共栄橋を経て、大槇までの 4.11 km、Line B は、村山市樽石地区から稲下を経て、基点にかけての樽石川に沿った 3.75 km である。震源には IVI 社製 Enviro Vib を用い 10?120 Hz の周波数帯で 16 秒間のスイープを行った。受振器には、GS-20DX (Geospace 社製、固有周波数 10 Hz) を用いた。発震点間隔および受振点間隔は共に 10 m を標準とした。また各発震毎に 192 ch の信号を記録した。総発震点数は Line A において 379 点、Line B においては 402 点である。レコーディングシステムは、Geometrics 社製のジオードを使用し、サンプリング間隔は 1 msec とした。

本調査は、東北大学大学院理学研究科地学専攻の修士 1 年生および理学部地圏環境学科の 3 年生・4 年生の諸君にも探査において尽力いただいた。また、金沢大学の 4 年生にも探査に協力頂いた。ここに記すと共に感謝します。本研究は東北大学災害科学国際研究所の特定プロジェクト研究費によって実施した。

### [文献]

池田ほか, 2002, 逆断層アトラス, 東京大学出版会。  
今泉ほか, 2001, 都市圏活断層図「村山」, 国土地理院。

キーワード: 活断層, 反射法地震探査, 山形盆地西縁断層帯, 地下構造, 村山

Keywords: active fault, seismic reflection survey, the Western Boundary Fault Zone of the Yamagata Basin, subsurface structure, Murayama City

## 福島県浜通りの地震で出現した地震断層の地下構造調査 —塩ノ平地区での極浅部地震探査— Very shallow seismic surveys of the Shionohira earthquake fault appeared at the Fukushima-ken Hamadori earthquake

山口 和雄<sup>1\*</sup>; 伊藤 忍<sup>1</sup>; 加野 直巳<sup>1</sup>; 山中 義彰<sup>2</sup>; 伊東 俊一郎<sup>2</sup>  
YAMAGUCHI, Kazuo<sup>1\*</sup>; ITO, Shinobu<sup>1</sup>; KANO, Naomi<sup>1</sup>; YAMANAKA, Yoshiaki<sup>2</sup>; ITO, Shunichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> サンコーコンサルタント  
<sup>1</sup>AIST,GSJ, <sup>2</sup>Suncoh consultant

福島県浜通り地方南部は 2011 年東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化し, 4 月 11 日に福島県浜通りの地震 (M7.0) が発生した. この地震で既知の活断層にほぼ沿って長さ 10 数 km にわたって地表地震断層 (正断層) が出現した. 地震断層の深度 20m 程度までの地下構造解明を目標として極浅部地震探査を実施した.

調査測線は福島県いわき市田人町黒田塩ノ平付近の東西方向の市道に設けた. 地震断層によりこの道路のアスファルト舗装に約 2m の西側低下と約 0.4m の左横ずれオフセットの変位が生じた. 探査を実施した 2012 年 12 月には道路面は補修が済み平坦になっていた. 道路面の状況から, 補修は断層の東側道路を削り西側道路は埋められてないと推定される. 人工埋積でないことは極浅部探査の条件として好ましいと考えられる. 地震断層は調査測線の距離程 110m 付近をほぼ直交する.

調査項目は S 波屈折法, S 波反射法 (S 波屈折法と同一データを使用), P 波屈折法, 表面波探査 (P 波屈折法と同一データを使用) である. 調査機器・仕様は以下の通り. 震源: S 波/SWG-5 (サンコーコンサルタント社製, 高圧空気を動力としたピストン叩き, 荷重 250kg), P 波/10kg カケヤ, 受振器: S 波/GS20DM (OYO-Geospace 社製, 28Hz), P 波/GS11D (OYO-Geospace 社製, 4.5Hz), 探鉱機: DSS-12 (サンコーコンサルタント社製), 測線長: 191m, 発震点間隔: 1m, 受振点間隔: 1m, 発震回数: 1~5 回. S 波探査は 1 受振点当たり 1 個の受振器をスパイクで地面に差し展開は 192 点固定とした. P 波探査は 96ch ランドストリーマを使用し震源が 48m 移動するごとに受振点を展開移動した. データ品質は交通量の少ない場所のため良好であった.

S 波屈折法データと P 波屈折法データに対して屈折トモグラフィ解析と, 3 種類の初期モデルによって解の信頼性および初期モデル依存性に関する評価を行った. 表面波探査データに対して位相速度分散曲線インバージョンを行い, 2 次元 S 波速度構造を求めた. 2 種類の初期モデルを設定し解の信頼性および初期モデル依存性に関する検証を行った. S 波反射法データに対して CMP 重合法を適用し, 時間断面図, マイグレーション時間断面図, 深度断面図を作成した. 使用するデータのオフセットを ± 25m 以内に限定した. マイグレーションと深度変換は, 速度解析で得られた重合速度分布を時間空間の両方向にスムージングした速度を用いた.

地震断層 (測線距離程 110m) を境に S 波屈折法および表面波探査による浅部の S 波速度分布の傾向はおおよそ 0.7km/s 以下の速度層が西側で厚く東側で薄い. S 波反射法の結果では, 堆積層と基盤層との境界と考えられる強い反射面は, 断層の西側で深く平坦で連続が良く, 東側で浅く凹凸を示し, 断層付近の距離程 95m~120m 区間では階段状の構造が認められる. この階段状部分から距離程 135m 付近までは基盤が盛り上がっているようである. それはブーゲー異常が周囲よりわずかに大きい (0.06mgal) 範囲とほぼ一致する.

キーワード: 福島県浜通りの地震, 井戸沢断層, 塩ノ平断層, 地下構造, 極浅部地震探査

Keywords: Fukushima-ken Hamadori earthquake, Itozawa fault, Shionohira fault, subsurface structure, very shallow seismic survey

## 立川断層帯・狭山神社地点のピット調査 Pit excavation along the Tachikawa fault at Sayama Shrine Site

石山 達也<sup>1\*</sup>; 廣内 大助<sup>2</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 鈴木 毅彦<sup>3</sup>; 小林 健太<sup>4</sup>; 郡谷 順英<sup>5</sup>; 小俣 雅志<sup>5</sup>; 柴田 剛<sup>6</sup>  
ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; HIROUCHI, Daisuke<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; SUZUKI, Takehiko<sup>3</sup>; KOBAYASHI, Kenta<sup>4</sup>; KORIYA,  
Yorihide<sup>5</sup>; OMATA, Masashi<sup>5</sup>; SHIBATA, Tsuyoshi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 信州大学教育学部, <sup>3</sup> 首都大学東京, <sup>4</sup> 新潟大学理学部地質科学科, <sup>5</sup> 株式会社クレアリア, <sup>6</sup> 株式会社 エアロ・フォト・センター

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Education, Shinshu University, <sup>3</sup>Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, <sup>4</sup>Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, <sup>5</sup>Crearia, Inc., <sup>6</sup>Aero Photo Center

立川断層は、多摩西部にあって北西-南東方向にほぼ一直線状に走る長さ 20km 余の活断層であり、北西延長部に存する名栗断層を含めた立川断層帯（総延長約 34km）の主部を占め、北東側を隆起させる縦ずれ断層（逆断層）とされる（山崎、1978）。このような見方を基本として調査研究が進められてきた（東京都、1998、1999、2000 など）が、制約の多い市街地域での調査ゆえ、その実態解明については著しく進展するには至っていない。その一方で、地震調査委員会（2003）は、今後 30 年の間に地震が発生する可能性は、我が国の活断層の中ではやや高いグループに属する、とした。さらに地震調査委員会（2011）は、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生に関連して次の大地震発生確率が高まった活断層の一つとして立川断層を挙げている。しかしながら、立川断層の断層型の確定や活動履歴の明確化などにつながる質の高い基礎資料の収集が喫緊の課題である。このような背景を踏まえて、立川断層の変位様式や活動性を明らかにする目的で、東京都西多摩郡瑞穂町・狭山神社においてピット掘削調査を実施した。本調査地は狭山丘陵西端部の南向き斜面を構成する孤立した小丘に位置し、立川段丘面を変位させる撓曲崖の南東延長にあたる。従来は、この小丘の南向き斜面基部に断層が通過するとされてきたが、米軍撮影の大縮尺空中写真の判読を行った結果、斜面基部ではなく斜面中腹部に、小丘の尾根線と直交方向に延びる南落ちの高度変換線が存在することが分かった。この高度変換線は小丘の両側に分布する新期の変動崖地形とほぼ一直線に連なる位置にあたる。加えて、斜面の高度変換線に沿っては、小丘の尾根線に見かけ上左横ずれが認められるほか、小丘の西側斜面基部（すなわち立川段丘面との交叉線）にも左横ずれが認められる。このような地形観察の結果を踏まえて、小丘南向き斜面に認められる高度変換線と直交方向に、小規模なピットを掘削した。掘削の結果、壁面には、やや風化の進んだ砂礫層が、斜面堆積物に衝上する、見かけ上北傾斜の断層構造が露出した。断層の傾斜は底面近傍で高角であるが、上方に向かって低角となり、断層の上端は、ほぼ地表面付近まで到達している。断層下盤側に分布する斜面堆積物の 14C 年代は完新世の年代を示しており、立川断層の完新世の活動を示唆する。また、底面に露出した延性剪断帯の微細構造や、断層の分岐形態は、断層は本質的には左横ずれ断層であることを示唆しており、このことは上述した地形学的な特徴と整合的である。今後は、堆積物の年代測定や火山灰分析などによってトレンチ壁面に露出した地層の層序を確立し、詳細な断層構造と活動時期について検討する。

なお、本調査は文部科学省「立川断層帯の重点的な調査研究」の一環として実施された。壁面の観察については、今泉俊文（東北大学）・杉山雄一（産総研・活断層・地震研究センター）・宮内崇裕（千葉大学）・越谷 信（岩手大学）の各氏に貴重な意見を賜った。記して感謝いたします。



## 立川断層帯を挟む 2 本のボーリングコアからみた武蔵村山市榎付近の地下構造 Geological structure interpreted from two boring cores beside the Tachikawa Fault Zone, Tokyo, NE Japan

鈴木 毅彦<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Takehiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京  
<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan University

関東平野西部を北西-南東方向に延びる立川断層帯は、首都圏直下地震を発生させる可能性をもつ活断層として注目されている。断層帯の正確な位置、活動履歴、平均変位速度などの解明のためには第四紀地質学、とくに高精度火山灰編年に基づく調査が有効である。この様な視点から、文科省重点調査「立川断層帯の重点的調査観測」の一環として、2012 年度に断層帯中央部の東京都武蔵村山市榎付において、相対的沈降側でオールコアボーリング (TC-12-1) を実施した。その結果、中期更新世堆積物の基底深度変化に断層変位があらわれている可能性を指摘し、低下側地下に 1.63 Ma の年代をもつテフラを認定した (平成 24 年度成果報告書)。この成果を踏まえて 2013 年度調査では、前年度のボーリング地点近傍の相対的隆起側においてオールコアボーリング (TC-13-1) を実施した。本報告ではその概要を予察的に述べる。

今回の掘削は、推定断層帯位置から約 300 m 北東側の標高 109.50 m 地点において、2013 年 12 月から 2014 年 1 月にかけて実施し、深度 90 m までのコアを得た。コアの概要は以下のとおりである。

地表面から深度 28.65 m (標高 80.85 m) までは粗粒礫からなる礫層であり、径 3-10 cm, 最大 20 cm の円礫を主体とする。これらの中、地表側の部位は、ボーリング掘削地点周辺に広がる立川 2 面の段丘構成層と考えられる。一方下位の部位は、後述の上総層群との関係からみて、これまで低下側コア (TC-12-1) で中期更新世堆積物としてきた礫層に対応すると思われる。この礫層の基底面高度は標高 80.85 m であり、相対的沈降側の TC-12-1 で得られた標高 71.97 m と比べて約 9 m 高い。同礫層基底標高は、TC-13-1 掘削地点の約 500 m 東南東側の相対的隆起域側の地点で標高 82.04 m であるため、昨年度の段階で、相対的沈降側の TC-12-1 と比べ有意に高く、立川断層帯の北西側を隆起させる活動か、本礫層が埋谷性でありその基底が凹凸に富むということに由来するという、2つの解釈を示した。今回の掘削結果は、断層帯の東側での同礫層基底の系統的な高さを示唆し、前者の説明がより説得力を持つ。

深度 28.65 m 以深では深度 90.00 m (標高 19.50 m) までシルト (泥岩)、砂、砂礫、礫の互層からなり、上総層群 (前期更新世) 相当層となる。深度 28.65-31.55 m が細粒砂、深度 31.55-34.95 m がシルト、34.95-36.60 m が礫混じり細粒砂、36.60-37.05 m が砂礫からなる。それ以深では深度 80.40 m まで 5 つの堆積サイクル認められ、それぞれ上位が層厚約 2.35-7.65 m の固結シルトないし泥岩 (一部細粒砂)、下部が層厚 1.9-6.3 m の礫層からなる。深度 80.40 m 以深では最深部までは 9.6 m の泥岩?砂層からなる。深度 67.15-68.00 m の泥岩部に貝殻を多く含むこと、その他泥岩部の複数の層準で凝灰質な部分が存在することがこれまで判明している。今後凝灰質の部分について、テフラ対比等の検討を進める予定である。

本ボーリング調査は、文科省重点調査「立川断層帯の重点的調査観測」によった。

引用文献：文部科学省研究開発局・国立大学法人東京大学地震研究所 2013. 立川断層帯における重点的な調査観測 平成 24 年度成果報告書。

キーワード: 立川断層帯, 地下構造, ボーリングコア, 武蔵村山  
Keywords: Tachikawa Fault Zone, Underground geology, Boring core, Musashi-murayama



## 新潟-長野県境部、信濃川流域におけるテクトニクスの検討 Examination of tectonics of the Shinano River basin, Niigata and Nagano prefectural border.

高桑 拳祐<sup>1\*</sup>  
TAKAKUWA, Kensuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 新潟大学理学部地質科学科

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University

新潟-長野県において一般的な構造のトレンドは、いわゆる新潟方向と呼ばれる、NNE-SSW 走向である。また、活断層のトレンドも同様に新潟方向をでであると考えられている。しかし十日町市内から新潟-長野県境部まで連続する十日町断層帯西部は、南限に、ENE-WSW 走向である宮野原断層を含むとしており（地震調査研究推進本部地震調査委員会 2010）、活断層のトレンドは新潟方向とは斜交している。

また、十日町市内より津南町まで連続する信濃川向斜も、十日町市内では新潟方向を持つが、津南町において屈曲し、E-W 走向になって長野県栄村まで連続していると示唆されている（島津・立石 1993, 竹内ほか 2000）が、正確な位置は特定されていない。

したがって、新潟-長野県境部における、地質調査を構造学的観点からより詳細に行うことで、本地域のテクトニクスを解明し、本地域に支配的なトレンドが E-W 方向か、新潟方向であるかを確認し、向斜構造や活断層の姿勢を議論する目的で、研究を行った。さらに、本地域に存在する小断層の解析を行うことで、古応力の変遷を求めた。

調査の結果、北東に存在する信濃川向斜は、津南町において屈曲し、本地域まで連続するが、宮野原で殲滅することが分かった。また、以西の地域においては信濃川向斜と同じく E-W 走向を持つ、千曲川向斜を新たに認定した。本地域の地層は、概ね、この二本の E-W 走向を持つ向斜構造によって規定されている。この二本の褶曲構造は軸の位置がずれていることとプランジ方向の違いから連続しないと考えた。

また、十日町市内において十日町断層帯西部と褶曲構造の姿勢を求めた瀬賀（2012MS）の断面図と、本研究における宮野原断層を跨ぐ断面図を比較すると、断層の直上において緩傾斜、急傾斜、緩傾斜と続く撓曲を形成することで両者の褶曲の形態は一致している。したがって、両断層は同じ姿勢であると考えられる。よって、この両者は一連の断層帯であり、十日町断層帯西部を構成していることは、地質調査からも明らかになった。また、十日町断層帯西部は宮野原断層を南限とすると考えられているが、さらに西方の、平滝周辺にも同様の姿勢の撓曲が観察されるため、十日町断層帯西部の南端はさらに西に延長される可能性がある。

さらに本地域の小断層の解析より、本地域は  $\sigma_1$  を NW、 $\sigma_3$  を SW とする横ずれ断層型応力にたびたび置かれてきたことが明らかになった。

この応力は、本地域で 2011 年、3 月 12 日に起こった長野県北部地震の余震の発震機構と整合的であり、東北地方太平洋沖地震後の現在と同様の応力化にあったことを反映していると考えられる。

キーワード: 十日町断層帯西部, 宮野原断層, 長野県北部地震, 信濃川流域

## 高田平野南方、妙高火山群東麓周辺の変動地形とそのテクトニックな意義 Tectonic geomorphology around the eastern piedmont of the Myoko volcano and their tectonic implications

田力 正好<sup>1\*</sup>; 水本 匡起<sup>1</sup>; 松田 時彦<sup>1</sup>; 堤 浩之<sup>2</sup>; 後藤 秀昭<sup>3</sup>; 中田 高<sup>3</sup>  
TAJIKARA, Masayoshi<sup>1\*</sup>; MIZUMOTO, Tadaki<sup>1</sup>; MATSUDA, Tokihiko<sup>1</sup>; TSUTSUMI, Hiroyuki<sup>2</sup>; GOTO, Hideaki<sup>3</sup>; NAKATA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 地震予知振興会, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 広島大学  
<sup>1</sup>ERC, ADEP, <sup>2</sup>Kyoto Univ., <sup>3</sup>Hiroshima Univ.

妙高火山群は高田平野の南方に位置し、その東麓地域は、西頸城山地と東頸城丘陵に挟まれた南北走向の細長い凹地帯(妙高凹地帯と仮称)をなしている。妙高凹地帯は高田平野の南方に連続し、野尻湖付近を経て長野盆地付近まで延びる。高田平野の東西縁には高田平野東縁断層と高田平野西縁断層が、長野盆地の西縁には長野盆地西縁断層が発達し、盆地と山地・丘陵の地形境界を形成したと考えられている(中田・今泉編, 2002 など)。今回、詳細な空中写真判読の結果、妙高凹地帯周辺において新たに断層変位地形が発見され、高田平野東縁断層がさらに南方へ延長する可能性が高いことが明らかとなった。本発表では、それらのトレースの位置と活断層の認定根拠を詳細に記載し、分布の特徴やテクトニックな意義について若干の考察を行う。

妙高凹地帯北部の妙高市葎生(もくろ)付近では、低位段丘面を変位させる東上りの明瞭な低断層崖および段丘面の東方への傾動が認められる。この低断層崖をほぼ垂直に横切る北沢川などの小河川沿いの沖積面は、低断層崖の下流側で下刻が進み段丘化している。この低断層崖は北方の高床山の西縁の直線的な山麓線に連続しているが、一部で段丘面の傾動がみられることから、高床山の西縁沿いに活断層が延びていると考えられる。また、高床山の西方の妙高火山火砕流堆積面(後期更新世)においては、長さ2 km程の南北走向のナマコ状の高まりが3箇所認められる。これらの高まりは、傾斜した厚い火砕流堆積物の重力的な変形、あるいは火砕流堆積面の初成的な起伏の可能性もあるが、高まりの走向が高床山西縁の断層と平行で火砕流堆積面の最大傾斜方向とは斜交していることから、高床山西縁の断層の活動により火砕流堆積物が圧縮されたことによって生じた褶曲変形の可能性が考えられる。

妙高凹地帯中央付近の妙高市二俣~田口付近の関川左岸沿いの段丘面上に、段丘面を刻み東流する流路を閉塞させるような高まりが断続的に発達する。これらの高まりは、その走向が妙高山の火山麓扇状地の傾斜方向と直交~斜交すること、北流する関川と火山麓扇状地の間に発達していることから、火山麓扇状地を流下する河川や関川の侵食地形である可能性は低いと考えられ、これらの高まりの西縁に東上りの活断層の存在が推定される。また、その南方の野尻湖の西岸付近には、南北走向および北東-南西走向のナマコ状の高まりが発達し、これらの高まりの西縁にも東上りの活断層が推定される(南側のトレースは中田・今泉編(2002)にも記載あり)。さらに南方の信濃町富士里付近では、西流する鳥居川の扇状地上に、扇状地の傾斜方向とほぼ直交する低断層崖が認められる(堤ほか, 2000)。この低断層崖でも、葎生付近の低断層崖と同様、隆起側での段丘面の傾動や下流側での顕著な段丘化などの地形が認められる。

以上の活断層群は、一部で分布の不連続はあるものの、高田平野東縁断層南端部付近からほぼ連続的に発達し、信濃町富士里付近まで延びる。この分布形態から、高田平野東縁断層とこれらの断層群は一連の構造であり、従来長さ約26 kmと評価されていた高田平野東縁断層は最大55 km程の長さを持つ可能性が指摘できる。高田平野東縁断層は断層の長さからM7.2程度の地震を発生させる可能性があるとして評価されていたが、今回の調査で断層長が延長する可能性が指摘されたことにより、最大M7.7程度の地震を発生させる可能性が考えられる。ただし、高床山よりも南方の地域では、これらの断層群と長野盆地西縁断層とは13-14 kmの間隔で平行に分布することから、両者が地下6-7 km程で収束している可能性があり(断層面の傾斜を45°と仮定)、これらの断層群は長野平野西縁断層のバックスラストと考えることもできる。高田平野東縁断層が起震能力のある活断層としてどこまで南方へ延長するかについては、今後、変位速度の分布や活動履歴、地質構造・地下構造などを考慮して総合的に判断する必要がある。

キーワード: 高田平野, 活断層, 空中写真, 妙高火山群, 高田平野東縁断層

Keywords: Takada plain, active fault, air photo, Myoko volcano group, Takada-heiya-toen fault

## Investigating the role of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line in the evolution of the Northern Fossa Magna rift basin

### Investigating the role of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line in the evolution of the Northern Fossa Magna rift basin

PANAYOTOPOULOS, Yannis<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KATO, Aitaro<sup>1</sup>; IMANISHI, Kazutoshi<sup>2</sup>; KUWAHARA, Yasuto<sup>2</sup>; CHO, Ikuo<sup>2</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>3</sup>; ASANO, Youichi<sup>3</sup>  
PANAYOTOPOULOS, Yannis<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KATO, Aitaro<sup>1</sup>; IMANISHI, Kazutoshi<sup>2</sup>; KUWAHARA, Yasuto<sup>2</sup>; CHO, Ikuo<sup>2</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>3</sup>; ASANO, Youichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>3</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>3</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The Itoigawa-Shizuoka tectonic line (ISTL) fault system is considered to have one of the highest probabilities for a major inland earthquake occurrence in the whole of Japan. It is a complex fault system with the dip directions of the local fault segments changing from north to south between an east-dipping low-angle thrust fault, a strike slip fault and a west-dipping thrust fault. The tectonic relations between the different parts of the fault system and the surrounding geological units are yet to be fully explained. This study aims to reveal the juncture of the northern and central parts of the ISTL and investigate its contribution towards the shaping of the Northern Fossa Magna rift basin. We conducted 3 deployments of 1 or 2 linear arrays of seismic stations across the central and northern ISTL regions and observed local micro-earthquakes for a period of 3 years. Each deployment recorded continuous waveform data for approximately 3 months. Using arrival times of 1193 local earthquakes, we jointly determined earthquake locations and a 3D velocity model, applying the tomography method. We were able to image the regional crustal structures from the surface to a depth of 20 km with a spatial resolution of 5 km. Subsequently, we used the obtained 3D velocity model to relocate the background local seismicity from 2003 to 2009. The juncture of the northern and central parts of the ISTL was well constrained by our results. The depth extension of the northern parts of the ISTL fault segments follows the bottom of the Miocene Northern Fossa Magna rift basin (NFM) and forms an east-dipping low-angle fault. In contrast, the central parts of the ISTL fault segments are estimated to lie along the eastern boundary of the Matsumoto basin forming an oblique strike slip fault.

キーワード: Itoigawa-Shizuoka tectonic line, tomography

Keywords: Itoigawa-Shizuoka tectonic line, tomography

## 糸魚川ー静岡構造線南部セグメント周辺域の活断層詳細マッピング Mapping of active faults in the area around the southern segment of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan

佐野 実可子<sup>1\*</sup>; 飯田 健太<sup>2</sup>; 林 愛明<sup>1</sup>  
SANO, Mikako<sup>1\*</sup>; IIDA, Kenta<sup>2</sup>; LIN, Aiming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 静岡大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Institute of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University

活断層周辺域で発達するテクトニック関連の変動地形は、大地震による断層変位を記録し、またテクトニック関連の地形学的な研究は、活断層から発生する大地震のマグニチュード、再来間隔、地震断層のスリップパターンなどの活動史や古地震に関する見識の発展に不可欠であることはよく知られている。したがって、人口密度の高い地域の地震ハザードを評価することを目的とした活断層の最近の活動の研究には、活断層およびテクトニック関連の変動地形の特徴を認識および識別することが重要となる。

本研究では、糸魚川-静岡構造線 (ISTL) 南部セグメント周辺域の活断層のマッピングに焦点をあてる。先行研究では、本研究地域でいくつかの活断層の存在が報告されたが、活断層の詳細な分布および幾何学的な形態は明らかになっていない。本研究では、5m メッシュの数値標高 (DEM) データから作成した地形透視マップおよび空中写真を使用して活断層の判読と解析を行った。また、活断層トレースの判読と解析の結果を元に、野外調査を行った。その結果、次の4点が明らかになった。1) 幅~100-500 までの変形帯をなす多くの活断層トレースが新しく発見される。2) 活断層トレースは、先行研究に報告された断層トレースより遥かに複雑、山と盆地の境界線沿いに湾曲した不規則な形状を示す。3) ISTL 南部セグメント沿いに発達した活断層は、先行研究に報告されたものよりも、少なくとも~25 km 長く南に延長される。4) 富士川河口断層帯においては、断層トレースは北部域の本栖湖周辺域まで伸びており、本断層の総延長は 50km に達することが確認された。

本研究の結果は、活断層の活動性、運動性質の研究および ISTL 沿いの人口密集地域の地震ハザードの評価などにおいて、活断層の詳細マッピングが新しい見識を提供することができ、今後地震防災の研究を行う上で有効な資料となるだろう。

キーワード: 活断層, 断層マッピング, 糸魚川ー静岡構造線南部セグメント, 断層トレース, 幾何学形態, 逆断層

Keywords: active fault, fault mapping, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (ISTL), fault trace, fault geometry, thrust fault



## 糸魚川—静岡構造線活断層系下円井断層及び鳳凰山断層の ESR 年代測定 ESR dating of the Shimotsuburai and Hoozan faults in the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line Active Fault System

福地 龍郎<sup>1\*</sup>; 田中 真実<sup>1</sup>; 橘田 拓人<sup>1</sup>; 今井 登<sup>2</sup>  
FUKUCHI, Tatsuro<sup>1\*</sup>; TANAKA, Mami<sup>1</sup>; KITTA, Takuto<sup>1</sup>; IMAI, Noboru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山梨大学, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> University of Yamanashi, <sup>2</sup> AIST

糸魚川—静岡構造線(糸静線)活断層系南部に位置する下円井断層は、約2万年前に形成された低位段丘堆積物を変位させており、戸沢露頭のトレンチ調査によると、最新活動年代は  $1,550 \pm 70$  yBP $\sim 2,350 \pm 60$  yBP であると推定されている(遠田他, 2000)。また、下円井断層の断層面沿いには黒色脈状岩がネットワーク状に分布しており、この黒色脈状岩は下盤の低位段丘堆積物や断層ガウジ中に注入していることから、下円井断層の最新活動時に地表下30~40m以浅で生成された粉碎起源シュードタキライトであると推定されている(狩野他, 2004)。一方、鳳凰山断層は下円井断層の西方に約6km離れて分布しており、ドンドコ沢露頭の断層破碎帯などでは断層ガウジがほとんど認められないことから、鳳凰山断層は新第三紀~第四紀初期に形成されて以降は活動しておらず、第四紀前期~中期頃には糸静線の活動は下円井断層に移動したと推定されている(Koyama, 1990)。鳳凰山断層や下円井断層の北西方延長部に位置する牛伏寺断層はM8級の大地震を発生させる可能性があり、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)以降、その活動性がさらに高まっている。牛伏寺断層を含む糸静線活断層系中部が活動した場合、その南東延長部はどこまで連動するか現時点では全く不明であり、下円井断層のみならず鳳凰山断層の詳しい活動性評価を行うことは非常に重要である。そこで今回、下円井断層及び鳳凰山断層から採取した断層岩のXRD(X線回折)分析及びESR年代測定を実施した。

XRD分析の結果、戸沢露頭の下円井断層の断層ガウジからはスメクタイトが検出され、断層面直上の黒色脈状岩からはスメクタイトと緑泥石/スメクタイト混合層が検出された。これに対し、石空川露頭の鳳凰山断層の黒色及び灰色断層ガウジからは、イライトの他、緑泥石(黒色ガウジ)と緑泥石/スメクタイト混合層(灰色ガウジ)がそれぞれ検出された。一般に、粘土鉱物の生成深度は、スメクタイト、緑泥石/スメクタイト混合層、緑泥石、イライトの順に深くなると考えられるので、鳳凰山断層はより深部に位置していた時に活発に活動していたことが示唆される。一方、ESR年代測定の結果、下円井断層の断層ガウジ及び黒色脈状岩の石英粒子から強いAl中心及びTi中心の信号が検出されたが、飽和傾向を示すことから断層摩擦熱によるリセットは働かなかったと考えられる。Al中心やTi中心は約300-350℃程度でリセットされる(福地, 2004)ので、最新活動時において摩擦熱温度はそれ程上昇しなかったと推定される。これに対し、鳳凰山断層の灰色ガウジからはモンモリロナイト固有の四重信号が検出され、 $2.8\sim 3.2 \pm 0.4$  MaというESR年代値が得られた。灰色ガウジから検出される緑泥石/スメクタイト混合層の生成温度は130-200℃程度であると考えられる(吉村, 2001)ので、隆起速度を本調査地域における100年間の平均値である2mm/y、地温勾配を30℃/kmと仮定すると、生成年代は2.2Ma~3.3Maとなり、ESR年代値と一致することが判明した。

### 引用文献

- 福地龍郎(2004) ESR法による断層活動年代測定, 深田研ライブラリー 63, 45p.  
狩野謙一・他(2004) 地質学雑誌, 110, 779-790.  
A. Koyama(1990) J. Geosci. Osaka City Univ. 33, 1-47.  
遠田晋次・他(2000) 地震, 52, 445-468.  
吉村尚久編(2001) 粘土鉱物と変質作用, 地学双書 32, 293p.

キーワード: 電子スピン共鳴, ESR 年代測定, 糸魚川—静岡構造線, 活断層系, シュードタキライト, 粘土鉱物

Keywords: electron spin resonance, ESR dating, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, active fault system, pseudotachylyte, clay mineral

## 活断層最新活動面での SEM 観察—阿寺断層田瀬の林道露頭の例— The SEM observation on the latest active fault plane - the Atera Fault, Tase, Gifu prefecture-

中田 英二<sup>1\*</sup>; 上田 圭一<sup>1</sup>; 相山 光太郎<sup>2</sup>; 重光 泰宗<sup>3</sup>; 大塚 良治<sup>3</sup>  
NAKATA, Eiji<sup>1\*</sup>; UETA, Keiichi<sup>1</sup>; AIYAMA, Kotaro<sup>2</sup>; SIGEMATSU, Yasumune<sup>3</sup>; OTSUKA, Yoshiharu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所, <sup>2</sup> ダイヤコンサルタント, <sup>3</sup> 関西電力

<sup>1</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry, <sup>2</sup>Dia Consultants Co.,Ltd, <sup>3</sup>Kansai Electric Power Co.,Inc.

断層の活動性を明らかにする目的として、阿寺断層最新活動面の SEM 観察を実施した。この結果、約 8400 年前以降少なくとも 3 回の活動履歴が報告されている露頭の断層面上には自形鉱物が形成されていないことを確認した。

調査は遠田ほか (1994) の田瀬の林道沿いの露頭でおこなった。露頭では花崗岩が阿寺断層によって第四紀後期の砂礫層や腐植土層に衝上している様子が確認できる。断層には幅 3~20 cm の断層ガウジが認められる。断層は露頭中央部から上方に向かって少なくとも 3 条に分岐している。

露頭下部では淡緑灰色のガウジ帯 (厚さ 3~10 cm) が 2 層認められ、それぞれに暗褐色のガウジ帯 (厚さ約 3 mm) が観察できる。これらのガウジ帯の内、上盤側に分布する暗褐色ガウジ帯が最もシャープなせん断面を有し、腐植土層まで連続している。シャープなせん断面は、X 線 CT による内部構造観察でも確認することができる。一方、下盤側の暗褐色ガウジ帯は露頭中央で一旦、上盤側のシャープなガウジ帯に収れんする。また下盤側では砂礫層から伸びる茶褐色の砂礫混じり粘土が淡緑灰色ガウジ帯へ注入し、左ズレをともない下盤側にある暗褐色ガウジ帯に向かって伸びる構造も観察できる。

SEM 観察は認識できるすべてのせん断面を丹念に剥ぎ取り、抽出した面に対しておこなった。暗褐色ガウジ帯では、ガウジ帯の上・下端面、および内部のシャープな面で観察をおこなった。その結果、抽出したすべての面から自形鉱物は確認できなかった。面の表面には蒲池ほか (2014) で紹介するように、粘土鉱物 (スメクタイト) が糊状に微細な粒子を覆い、団子状を呈する様子が認められ、一部で小さく寸断されている様子も認められた。

一方、2 層の淡緑色ガウジ帯の間には角レキ状の濃飛流紋岩や六角板状の黒雲母が取り込まれている黒色を呈するゾーンがレンズ状に点在しており、この黒色部からは Fe、Mn とともに、柱状結晶? (ハロイサイト様の物質) が認められた。

以上の結果から、約 8400 年前以降少なくとも 3 回の活動履歴が報告されている露頭の断層活動面上には自形粘土鉱物や沸石など低温でできる鉱物が確認できないことが明らかになった。

引用文献; 遠田ほか (1994) 地震, 47, 73-77. 蒲池ほか (2014) 連合大会 2014 年大会要旨

キーワード: 阿寺, 断層, 最新面, SEM

Keywords: Atera, fault, latest plane, SEM

## 石川県熱野遺跡の噴砂痕と森本・富樫断層帯 Sand boiling traces at the Netsuno ruin in Ishikawa Prefecture and the Morimto-Togashi fault zone

平松 良浩<sup>1\*</sup>; 小阪 大<sup>2</sup>  
HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>1\*</sup>; KOZAKA, Yutaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 白山手取川ジオパーク推進協議会  
<sup>1</sup> Kanazawa University, <sup>2</sup> Hakusan Tedorigawa Geopark Promotion Council

はじめに

遺跡発掘現場で発見される噴砂の痕跡は歴史時代の地震活動の解明に重要である。白山を源流として日本海に注ぐ手取川の扇状地の扇中部に位置する部入道遺跡では弥生時代後期(約 1800-1900 年前)から古代・中世(約 700-900 年前)にかけて発生した噴砂痕が確認されており、森本・富樫断層帯の活動との関連性が議論されている(平松・小阪, 2013)。本講演では部入道遺跡に近接する熱野遺跡で 2013 年度の発掘調査により発見された噴砂痕について報告する。

噴砂痕の形態と形成時期

熱野遺跡では、弥生時代後期月影式土器(約 1800-1900 年前)を含む竪穴住居跡が確認された面において、液状化現象による噴砂痕であるひび割れ状に延びる灰色の砂の跡が検出された。検出された噴砂痕は、液状化した砂礫層が上位のシルト層中を上昇する過程で形成された割れ目(以下、砂脈)である(写真 1)。砂脈は調査地で主なものが 4 箇所確認された。そのうち、噴砂 1 では最大幅 20cm で約 2m の長さで北西方向に延びている。砂脈内は 1mm 以下の灰白色の細砂である。この噴砂は砂脈が検出された面より約 50cm 下層の礫層とシルト層の間にある砂層から延びており、噴砂検出面の上位にある弥生時代後期から平安時代前期にかけて堆積した黒色土層に貫入していない。この噴砂は当時の地表に噴出した後に黒色土層に覆われたと考えられるため、この噴砂痕の形成年代は、弥生時代後期(約 1800-1900 年前)から平安時代前期(約 1100 年前)であると考えられる。

森本・富樫断層帯の活動

熱野遺跡と部入道遺跡の近くには活断層である富樫断層が位置し、森本断層、野町断層と合わせて長さ約 26 km の森本・富樫断層帯を成している。熱野遺跡と部入道遺跡周辺にはそれら以外の活断層の存在は報告されておらず、これらの遺跡で確認された噴砂痕は富樫断層単独の活動または森本・富樫断層帯として一括した活動によって生じた可能性が考えられる。森本断層北部の梅田地区でのトレンチおよび遺跡の調査結果からは、約 1800-2000 年前に断層活動があったことが報告されている(石川県, 1997)。梅田地区で断層変位が認められた遺跡は弥生時代後期であり、熱野遺跡や部入道遺跡での噴砂発生時期と同時期である。したがって、森本・富樫断層帯の最新の一括活動の時期は約 1800?1900 年前である可能性が考えられる。

キーワード: 強震動, 森本・富樫断層帯, 液状化, ジオパーク  
Keywords: strong motion, the Morimto-Togashi fault zone, liquefaction, geopark



## 高分解能音波探査からみた福井県三方断層帯及び野坂断層帯海域部における活断層分布及び活動履歴 Offshore active faults of the Mikata and Nosaka fault zones in Fukui Prefecture, revealed by high-resolution seismic pro

井上卓彦<sup>1\*</sup>; 杉山雄一<sup>1</sup>; 坂本泉<sup>2</sup>; 滝野義幸<sup>2</sup>; 村上文敏<sup>1</sup>; 細矢卓志<sup>3</sup>; 宇佐見琢哉<sup>4</sup>  
INOUE, Takahiko<sup>1\*</sup>; SUGIYAMA, Yuichi<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Izumi<sup>2</sup>; TAKINO, Yoshiyuki<sup>2</sup>; MURAKAMI, Fumitoshi<sup>1</sup>; HOSOYA, Takashi<sup>3</sup>; USAMI, Takuya<sup>4</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所, <sup>2</sup>東海大学海洋学部, <sup>3</sup>中央開発株式会社, <sup>4</sup>総合地質調査株式会社  
<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>Tokai University, <sup>3</sup>Corporation of Chuokaihatu, <sup>4</sup>Sogo Geophysical Exploration Co., Ltd

福井県三方郡美浜町に分布する三方断層帯及び野坂断層帯の海域部の海底活断層については、これまでも音波探査結果などから完新世に複数回の活動があった可能性が指摘されているが、詳細な活動時期及び陸域の活動との同時性についてはデータが得られていない。また三方断層帯の最新活動は1662年寛文地震とされているが、このときに海域部まで活動したか否かについても、確定的なデータが得られていない。そこで、産総研では文部科学省平成25年度「沿岸海域活断層調査」の一環として、東海大学と共同で断層活動履歴の認定や最新活動時期の把握などを目的としたブーマーを音源とするマルチチャンネル音波探査、パラメトリック方式高分解能シングルチャンネル音波探査、海上ボーリング調査を実施した。本発表では主にブーマーを音源とした音波探査結果について報告する。

音波探査断面には“沖積層”基底面と考えられる明瞭な反射面が認められる。この基底面は比較的平坦で下位の凹地形を埋積している地層上面にあたり、基底面の深度が沖合から岸方向へ75mから67mへ徐々に浅くなることなどから、海水準上昇期の外浜浸食によって形成されたラビンメント面であると考えられる。この基底面を覆う完新統は三方断層帯沖合海域において層厚約30mで沖合に向かって徐々に薄くなる。また野坂断層帯沖合海域では、水深が浅く反射面としては不明瞭ではあるものの、断層近傍では層厚約15mの完新統が認められる。

今回の調査ではこの三方断層帯及び野坂断層帯海域部の構造を横切る探査記録断面中に、基底面及び完新統内の反射面に顕著な変形が認められる。この変形は小松原ほか(2000)が示す断層方向に沿って三方断層帯ではほぼ南北方向、野坂断層帯では北西南東方向に連続的に追跡できる。完新統内反射面の変形は上位ほど小さくなり累積傾向が認められる。このことは、これらの断層活動が過去10000年間に複数回あったことを示唆している。基底面の変位量は三方断層帯海域部で約11mであり、この基底面がラビンメント面であるとする、汎世界的な海水準上昇から基底面の形成年代を推定すると三方断層帯海域部では約12000年前と推定され、平均上下変位速度は約0.9m/千年と見積もられる。一方、野坂断層帯海域部の基底面の上下変位は約8mである。野坂断層帯海域部ではこの基底面に達するボーリング試料が得られており、今後音波探査記録と堆積年代から断層活動についてより詳細な検討を行う。これらの解釈は、まだ解析中で変更の可能性があり、今後ボーリングの年代値も含め更に詳細な検討を行う予定である。

キーワード: 海底活断層, 三方断層帯, 野坂断層帯, 音波探査, 活動履歴

Keywords: Offshore active fault, the Mikata fault zone, the Nosaka fault zone, high-resolution seismic survey, Event history



沿岸海域における活断層調査「三方断層帯および野坂断層帯」-高分解能地層探査結果-  
Offshore active fault survey "Mikata fault and Nosaka fault zones". Result of high-resolution stratigraphic survey.

八木 雅俊<sup>1\*</sup>; 坂本 泉<sup>1</sup>; 滝野 義幸<sup>1</sup>; 藤巻 三樹雄<sup>2</sup>; 田島 智子<sup>1</sup>; 井上 智仁<sup>1</sup>; 杉山 雄一<sup>3</sup>; 井上 卓彦<sup>3</sup>  
YAGI, Masatoshi<sup>1\*</sup>; SAKAMOTO, Izumi<sup>1</sup>; TAKINO, Yoshiyuki<sup>1</sup>; FUJIMAKI, Mikio<sup>2</sup>; TAJIMA, Tomoko<sup>1</sup>; INOUE, Tomohito<sup>1</sup>; SUGIYAMA, Yuichi<sup>3</sup>; INOUE, Takuhiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東海大学海洋学部, <sup>2</sup> 沿岸海洋調査株式会社, <sup>3</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所活断層・地震研究センター  
<sup>1</sup>School of Marine Science and Technology, <sup>2</sup>COR, <sup>3</sup>Active Fault and Earthquake Research Center

三方断層帯は、福井県三方郡美浜町沖合の若狭湾から遠敷群上中町に至る断層帯であり、若狭湾内の A 断層系、陸域の日向断層、三方断層および倉見峠断層よりなり、M7.2 程度の地震が発生すると推定されている（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2003）。

野坂・集福寺断層帯は、北西延長にあたる若狭湾底において、長さ約 17km で南西落ちとされる北西-南東走向の断層（海上保安庁水路部，1980；小松原ほか，2000；岡田，2012）が確認され、完新統とみなされる地層を変位させ、その上下変位速度は 0.8m/千年程度と推定される（小松原ほか，2000；岡田，2012）。これら両断層帯は、若狭湾大陸棚上の水深 70m 付近でひとつの断層として収斂する。2013 年度の文部科学省による「沿岸海域における活断層調査」では、両断層帯の大陸棚上の位置・形状及び最新の活動を明らかにするため、若狭湾東部海域において測線長約 187km にわたる極表層部を対象とした高分解能地層探査を実施した。

本海域には海底に粗粒な堆積物が分布し、海底からの強い反射、地層内部からの散乱等により表層部に認められる反射面の分布は局地的であった。調査海域の全域で極表層部には内部反射に乏しい透明層が確認され、これを A 層とした。A 層は最大層厚約 8m の薄い堆積物で、西に向かいその層厚を増す。また、三方断層帯の西側（下盤側）において数条の内部反射面の変形が確認されたが、三方断層帯東側（上盤側）への連続が認められず、変位の有無は不明である。しかしながら、A 層基底を成す明瞭な反射面は、本調査海域のほぼ全域にわたりその連続が確認され、三方断層帯において最大 10m 程度の高度差がみられる。A 層より下位には、沖合断層帯収斂部で野坂断層に向かい傾動する不連続な数条の反射面、三方断層帯周辺では沖側へ傾斜するプログラデーションパターンを示す反射面が確認された。

以上、若狭湾東部海域における地層探査の結果、両断層は海底面上の顕著な段差として表現され、西側（下盤側）ほど大陸棚堆積物が厚く堆積していることが明らかになった。これらの層内には最新活動を示す明瞭な変位は認められなかったが、A 層基底及びその下位層において高度差や反射面の傾動など変位を示す構造が数か所で認められた。これらの解釈はまだ解析中で、他の調査結果や今後のボーリングデータを含め検討を行う予定である。

キーワード: 若狭湾, 三方断層帯, 野坂断層帯

Keywords: Wakasa Bay, Mikata fault zone, Nosaka fault zone

## 福井県美浜町沖における三方断層帯及び野坂断層帯海域延長部のボーリング調査 Drilling survey of the seaward extension of the Mikata and Nosaka fault zones off Mihama Town, Fukui Prefecture

杉山 雄一<sup>1\*</sup>; 井上 卓彦<sup>1</sup>; 村上文敏<sup>1</sup>; 坂本 泉<sup>2</sup>; 滝野 義幸<sup>2</sup>; 永田 高弘<sup>3</sup>; 細矢 卓志<sup>4</sup>; 宇佐見 琢哉<sup>5</sup>  
SUGIYAMA, Yuichi<sup>1\*</sup>; INOUE, Takahiko<sup>1</sup>; MURAKAMI, Fumitoshi<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Izumi<sup>2</sup>; TAKINO, Yoshiyuki<sup>2</sup>;  
NAGATA, Takahiro<sup>3</sup>; HOSOYA, Takashi<sup>4</sup>; USAMI, Takuya<sup>5</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所, <sup>2</sup>東海大学, <sup>3</sup>ダイヤコンサルタント, <sup>4</sup>中央開発, <sup>5</sup>総合地質調査

<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>Tokai University, <sup>3</sup>Dia Consultants Co., Ltd., <sup>4</sup>Chuo Kaihatsu Corporation, <sup>5</sup>Sogo Geophysical Exploration Co., Ltd.

産総研と東海大学は、平成25年度文部科学省「沿岸海域における活断層調査」の一環として、福井県美浜町沖の三方断層帯と野坂断層帯の音波探査とボーリング調査を実施した。本発表では、ボーリング調査について報告する。三方断層帯に関しては、美浜町日向沖約4kmにおいて、断層の西側（沈降側；水深51m）で深さ4mのコア（MKO-1コア）を採取した。野坂断層帯については、美浜町菅浜沖約1.5kmにおいて、断層の南西側（沈降側；水深12m）で深さ27m、北東側（隆起側；水深12m）で深さ12mのコア（NSO-1コアとNSO-2コア）を採取した。これらコアの詳細肉眼観察を行い、縮尺10分の1の柱状図を作成すると共に、帯磁率測定、放射性炭素年代測定、火山灰分析、花粉・珪藻分析を実施した。

三方断層帯については、深度3.8mから6180 - 6010 cal.yBPと6380 - 6260 cal.yBP（いずれも2σ値）が得られるなど、深度にほぼ比例して古くなる放射性炭素年代が得られた。掘削地点（水深51mの沈降側）における最近6千年間の平均堆積速度は約0.6m / kyと求められた。本断層帯については、音波探査によって、沖積層基底面に加えて沖積層内（4m以深）に、断層変位を被った複数の顕著な反射面が捉えられた。目下、各反射面の断層を挟んでの高度差（≒上下変位量）などを手掛かりとして、断層活動の層準の特定を進めている。ボーリング調査では、これらの反射面の年代を直接求めることはできなかったため、後期更新世末～完新世初期の海水準変動に関する文献レビューに基づいて掘削地点への海の侵入時期（≒堆積開始時期）を見積もり、堆積開始から6kaまでの深度-年代曲線を外挿して、各反射面の年代を推定することを検討している。1662年寛文地震時における本断層帯海域延長部の活動の有無については、音波探査データの高度解析の結果を合わせて検討中である。発表では、これらの検討結果について報告する予定である。

野坂断層帯については、NSO-1コアとNSO-2コアの肉眼観察に基づく層相対比と年代測定結果に基づき、堆積物を上位から、主に粗砂と細砂からなるA1層（約6ka以降）、主に粗砂からなるA2層（約6～7.3ka）、主に粗砂と細砂からなるA3層（約7.3～7.5kaと推定される）、砂礫と礫混じり粗砂からなるB1層と主に粗砂と中砂からなるB2層（約7.5～8kaと推定される）、主に粘土と砂混じりシルトからなるC層（約8～10ka）、砂礫からなるD層（沈降側ではAT火山灰を挟む）に区分した。また、A1層は上部（約4ka以降）と下部（約5.5～6ka）に細分した。B2層の基底（B2層/C層境界）は断層を挟んで約5mの高度差があるのに対して、A1層下部の断層を挟んだ基底高度の差は約1.7mと見積もられる。また、A1層下部は沈降側では約1.1mの厚さがあるが、隆起側では約0.2mと薄くなっている。以上の層序・層相の対比結果からは、C層堆積後/A層堆積前（8～6ka）とA1層下部堆積後/同層上部堆積前（約5.5～4ka）に断層活動があった可能性が指摘できる。断層活動の層準・年代と1回の断層活動による変位量については、音波探査データの解析結果と照らし合わせて更に検討を行う。

キーワード: 三方断層, 野坂断層, 活断層, 音波探査, 海上ボーリング

Keywords: Mikata fault, Nosaka fault, active fault, acoustic reflection survey, sea drilling

## 生駒断層帯に沿って産する断層露頭における断層ガウジの内部構造 The fault gouge along the Ikoma active fault zone

三田村 圭祐<sup>1\*</sup>; 奥平 敬元<sup>1</sup>; 三田村 宗樹<sup>1</sup>  
MITAMURA, Keisuke<sup>1\*</sup>; OKUDAIRA, Takamoto<sup>1</sup>; MITAMURA, Muneki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪市立大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Osaka City University

近畿中央部の地形の特徴は、南北性の山地と盆地の交互配列として反映されている。生駒山地は大阪平野と奈良盆地を分かち、北北東-南南西から南北に伸びる山地である。生駒山地西麓を走る生駒断層帯（交野断層および生駒断層）は、東西圧縮場における基盤褶曲で形成された高角逆断層として認識されている（Huzita, 1962）。また、生駒断層帯の第四紀における活動は、大阪層群を傾斜させる撓曲構造の形成によって特徴付けられる（近畿の活断層, 2000）。しかし、岩石力学では一般に逆断層は低角で形成されるため、生駒断層帯のような高角逆断層は現在の東西圧縮場における基盤褶曲で形成されたものではない可能性がある。筆者らは生駒断層帯に沿って発達する断層露頭の岩石学的記載による検討を行った。

検討した露頭は大阪府交野市倉治、四條畷市清瀧、四條畷市飯盛山の3地点である。これらには幅数メートルの断層破碎帯が認められ、主断層面に沿って幅 5-20cm 程度の断層ガウジ帯が発達する。主断層面には明瞭な条線が認められ、主断層面と条線の姿勢は、交野市倉治では N45° E50° E, S60° E (50°)。四條畷市清瀧では N27° W62° W, S70° W (60°)、四條畷市飯盛山では N10° W55° E, N70° E (50°) であった。主断層面近傍と断層ガウジ帯周縁部において定方位試料を採取し、これらを 20×30 μm 厚の薄片に加工し、偏光顕微鏡下において観察を行った。ガウジには主断層面と平行な暗色のシームが発達し、顕著な面構造を形成していた。また、亜角から亜円のフラグメントが認められ、これらの長軸方向は、このシームによる面構造と斜交している場合が多い。シームはフラグメントの周囲で湾曲し、フラグメントとシームが接する部分はより平滑となっているため、シームの形成と圧力溶解が密接に関係していたことを示唆する。このフラグメントの粒径や長軸方位を主断層面と条線を座標系として解析した。その結果、より高いアスペクト比を持つフラグメントが主断層面から 10° 程度の斜交角をもって配列しており、より断層面に近い試料においてこの斜交角が小さいことが明らかとなった。これはフラグメントの非共軸変形による剛体回転を示していると考えられ、主断層面（条線）に対する非対称性から、上盤が落ちる運動センス（正断層運動）を示した。また、粒径と累積頻度の両対数プロットより、フラクタル次元を求めた結果、各露頭とも主断層面近傍の試料が断層ガウジ帯周縁のものよりも高いフラクタル次元を示すことが明らかとなった。

これらのことは、生駒断層帯の断層露頭において、正断層運動による破碎により形成された断層ガウジを示したものである。よって、生駒断層帯のような高角逆断層は基盤褶曲で形成されたものではなく、既存の正断層が現在の東西圧縮場において再活動したもの（tectonic inversion）であることを示唆する。

### 【文献】

近畿の活断層（2000）岡田篤正・東郷正美編，東京大学出版会，408p.

Huzita, K. (1962) Tectonic development of the median zone (Setouchi) of Southwest Japan since Miocene. Geosciences, Osaka City Univ., 6, 103-144p.

キーワード: 生駒断層帯, 活断層, 反転テクトニクス, 断層ガウジ, 内部構造, 破碎帯

Keywords: Ikoma fault zone, active fault, tectonic inversion, fault gouge, internal structures, fracture zone

## 重力・磁気異常からみた大阪平野南部の密度構造 Subsurface density structure in Southern Osaka Plain based on gravity and magnetic anomalies

井上 直人<sup>1\*</sup>; 北田 奈緒子<sup>1</sup>; 竹村 恵二<sup>2</sup>  
INOUE, Naoto<sup>1\*</sup>; KITADA, Naoko<sup>1</sup>; TAKEMURA, Keiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 地盤研究財団, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

<sup>1</sup>Geo-Research Institute, <sup>2</sup>Beppu Geothermal Research Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science,

大阪平野では強振動予測や地震危険度評価のために反射法地震探査をはじめとした物理探査・地質調査が実施され、詳細な地下構造情報が蓄積されている。最近では文部科学省による 2010 年度から 2012 年度にかけての「上町断層帯における重点的な調査観測」により、強振動予測高精度化のための調査や情報も蓄積されてきた結果、これまで調査密度が低かった平野南部での速度構造情報が大幅に蓄積され、強振動予測のための地下構造モデルも高精度化された(岩田・上町断層帯重点調査観測研究グループ, 2013)。

種々の物理探査データの中で、重力探査は測定の簡便さから昭和 50 年代頃から探査が実施され、平野部の稠密なデータが蓄積されてきた。しかし、微動アレイ探査や反射法地震探査データが蓄積されるに従い、均質な 2 層構造を仮定して重力異常から推定された基盤深度は、特に大阪平野南部で乖離の大きな部分が認められている。反射法地震探査結果をもとに重力異常を説明する密度構造を推定した結果(井上ほか, 2007)では、北部の堆積層の密度が南部よりも小さい傾向にある。また、重力解析による基盤深度の乖離が顕著な部分は、高磁気異常エリア近傍である。火山岩起源の局所的な高密度岩体の存在を考えれば、堆積層と基盤といった 2 層構造に基づく解析では基盤深度は浅く求められる。平野南部で実施された反射法地震探査の解釈においても、新生代の火山岩分布を推定している部分もある(伊藤ほか, 2012; 岩田・上町断層帯重点調査観測研究グループ, 2013)そこで本研究では、既存の調査結果で得られた地下構造をもとに、重力異常データ(Inoue and Nakagawa, 2000)に加えて航空磁気データ(中塚ほか, 2005)を用いて大阪平野南部の密度構造の検討を行った。

キーワード: 重力異常, 磁気異常, 密度構造, 大阪平野

Keywords: gravity anomaly, magnetic anomaly, density structure, Osaka plain



## 四国中央部の中央構造線活断層帯岡村断層の最新活動時期と変位量 Age and horizontal offset of the latest faulting event on the Okamura fault of the MTL fault zone in central Shikoku

池田 倫治<sup>1\*</sup>; 後藤 秀昭<sup>2</sup>; 堤 浩之<sup>3</sup>; 近藤 久雄<sup>4</sup>; 西坂 直樹<sup>5</sup>; 大野 裕記<sup>5</sup>; 露口 耕治<sup>6</sup>; 小林 修二<sup>1</sup>  
IKEDA, Michiharu<sup>1\*</sup>; GOTO, Hideaki<sup>2</sup>; TSUTSUMI, Hiroyuki<sup>3</sup>; KONDO, Hisao<sup>4</sup>; NISHIZAKA, Naoki<sup>5</sup>; OHNO, Yuki<sup>5</sup>; TSUYUGUCHI, Koji<sup>6</sup>; KOBAYASHI, Shuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株)四国総研, <sup>2</sup> 広島大学, <sup>3</sup> 京都大学, <sup>4</sup> 産総研活断層・地震センター, <sup>5</sup> 四国電力(株), <sup>6</sup> (株)四電技術コンサルタント  
<sup>1</sup>Shikoku Research Institute Inc., <sup>2</sup>Hiroshima University, <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>AIST/AFERC, <sup>5</sup>Shikoku Electric Power Co. Inc.,  
<sup>6</sup>Yonden Consultants Co. Inc.

一般に内陸活断層で発生する地震の震源域は深度 10 km 程度以浅の浅い領域にある。そのため、震源断層面上の変位量分布は、地表地震断層上の変位量分布あるいは活断層に沿って観察される平均変位速度分布と極めて密接な関連を示すと考えられる(杉山ほか, 2001; 岩城ほか, 2006)。従って、活断層に沿った単位変位量分布あるいは平均変位速度分布を広域的に密に得ることができれば、アスペリティ領域の位置の推定の基礎データとして用いることが可能である。

しかし、実際には、地形地質情報から横ずれ変位量に関する情報を密に得ることは難しく、日本で最も長大で活動的な中央構造線活断層帯においても、四国全域(全長約 200 km)で単位変位量は 30 箇所程度、平均変位速度情報は 6 箇所ではしか得られていない(堤・後藤, 2006)。我々はこのような問題点に注目し、四国中央部の岡村断層の単位変位量・変位速度に関する既存情報に加え、活動履歴を明らかにすることを目的として、平成 20 年度に新居浜市萩生地点においてトレンチ調査を実施した。

岡村断層は、西条平野南縁から関川丘陵南縁に至る長さ約 30 km で走向 N70° E の直線的な活断層である。岡村断層ではこれまでに多くのトレンチ調査が実施され、その活動性に関する情報が得られている。特に Tsutsumi et al (1991) では、西条市飯岡地点における扇形のトレンチ調査の結果から、最新活動時の横ずれ変位量を 5.7 m、平均変位速度を 5~8 mm/y と推定した。これまでに、本断層で得られた変位量情報はこの値のみである。また活動履歴情報についても、多くのトレンチ調査が実施されているものの、その最新活動時期については 4~7 世紀(岡田ほか, 1998)、1090~960 yBP(愛媛県, 1999)、16 世紀以降(後藤ほか, 2001)と地点毎に異なる時期が示されており、十分に絞られていない。

今回のトレンチ調査地点である新居浜市萩生周辺では、北流する小河川によって形成された扇状地性の中位~低位段丘面が発達する。これらの段丘面群は岡村断層で切断され、東北東-西南西に延びる主として北落ちの低断層崖が連続して観察される(岡田, 1973; 後藤・中田, 2000 など)。低断層崖の比高は、低位段丘面で 10~16 m、沖積面で 2~3 m である。

今回のトレンチ調査から、岡村断層の最新活動時期は 1490AD 以降と推定された。この結果は、後藤ほか(2001)による 16 世紀以降という結果と調和的である。また、最新活動時の変位量を推定するため、トレンチ壁面で観察された旧河谷の削り込み形状を基に旧河谷の流路跡の追跡を行った。現在、断層より南側の旧河谷の流路は人工改変されており精度良く復元できない。しかし、現在の河谷は開析谷の西縁に沿って北流していることから、旧河谷の流路はこの現在の流路より東側を流れていたと考えられる。現在の河谷の流路と断層の北側の旧流路跡を基に推定すると、岡村断層の最新活動時の右横ずれ変位量は最大で 7.5 m と見積もることができる。四国の中央構造線の横ずれ変位量の分布は、大まかには四国中東部(神田断層)~四国中央部(岡村断層)に至る区間で 5 m 以上と大きく、その東西で変位量が小さくなる傾向があることが報告されており(堤・後藤, 2006)、今回得られた変位量はこの傾向とも調和的である。

ここで仮説的な検討を加えると、古地震学的調査結果(岡田ほか(1998)の飯岡 II トレンチを再検討した森野・岡田(2002)による結果)から求められた活動間隔(1245~1620 年)と、7.5 m の変位量と変位速度(5~8 mm/yr)から算定される活動間隔(938~1500 年)とに大きな違いはない。このことは、推定誤差を伴っているものの、本研究で求められた最大 7.5 m の変位量が断層内での変位量の違いを示している可能性を示唆している。2 地点のみの変位量情報のため厳密な議論は難しいが、一般的に変位量分布は断層の中央よりも末端近くで小さくなることが想定されることから、本研究の調査地点は岡村断層の末端付近でないことや、アスペリティに近い可能性があることが示唆される。

キーワード: 最新活動時期, 変位量, 中央構造線活断層帯, 岡村断層

Keywords: latest faulting event age, fault offset, Median Tectonic Line active fault zone, Okamura fault

## 南海トラフ地震の地震性変動評価と歴史地震災害規模の把握にむけた高知県沖の海底遺構調査 Seafloor exploration at off Kochi Prefecture for coseismic subsidence during hysterical Nankai earthquakes

谷川 亘<sup>1\*</sup>; 徳山 英一<sup>2</sup>; 村山 雅史<sup>2</sup>; 山本 裕二<sup>2</sup>; 蛭原 周<sup>3</sup>  
TANIKAWA, Wataru<sup>1\*</sup>; TOKUYAMA, Hidekazu<sup>2</sup>; MURAYAMA, Masafumi<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Yuhji<sup>2</sup>; EBIHARA, Shu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>2</sup> 高知大学海洋コア総合研究センター, <sup>3</sup> 日本海洋株式会社  
<sup>1</sup>JAMSTEC/Kochi Kore Center, <sup>2</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, <sup>3</sup>Nippon Kaiyo Ltd.

歴史地震の地震活動履歴と災害規模の調査は、陸上トレンチ調査と陸上津波堆積物の分析を中心に行われている。一方、海岸付近の海底にも地震記録が保存されていることが考えられるがほとんど研究例がない。また、元寇調査（長崎県鷹島海底遺跡）をはじめとした歴史考古学的な海底遺構調査はこれまでも行われているが、地震災害を研究目的とした海底遺構の研究例はない。

歴史資料などによると、684年に南海トラフ型の白鳳地震が発生し、地震による大規模な地盤変動により、土佐国の『黒田郡』という村一帯（面積にして約10km<sup>2</sup>）が水没したという伝承が受け継がれている。また、過去の海底調査や住民からの聞き取り調査から、安芸市から足摺岬に渡る高知県沖海岸付近約10ヶ所で海底遺構と海底遺物が報告されている。海底遺構近くの陸上遺跡では、白鳳地震以前の時代の遺物が発掘されている。また、海底遺構が確認されている場所は、昭和南海地震後に沈降したという共通の特徴がある。しかし、海底遺構・遺物の詳細な調査が行われていないため、海底遺構の特徴とその年代および南海地震との関係はわかっていない。

そこで本研究では海底遺構を『地震災害遺構』に見立てて、海底遺構が確認・推定されている高知県沖で調査船と潜水による海底地形と海底遺構の調査を行う。また、海底から採取した海底遺物と海底堆積物の年代分析を行う。以上の調査結果をもとに、南海トラフ地震と海底遺構の関係を明らかにし、過去に発生した南海トラフ地震に伴う土佐湾周辺の地殻変動を評価し、南海トラフ地震の規模と津波被害の大きさの把握に努める。特に本研究の重要性は以下の3点に集約される。

1. 日本書紀などによると、684年に南海トラフ型の白鳳地震により、土佐沖で『黒田郡』という村全体が水没したことが記述されている。しかし、『黒田郡』がどの地域で、どのような被害（地盤沈下、津波）により消滅したのかわかっていない。その一方、昔から土佐湾海岸の海底には人工遺物・遺構らしきものが報告されており、『黒田郡』との関連性が指摘されてきた。そこで、本研究では、これら海底遺構と南海トラフ地震との関係を調べ、『黒田郡』の存在を明らかにする。

2. 海底遺構調査から過去に発生南海トラフ地震の規模とその津波被害の大きさを明らかにすることで、将来発生する南海トラフ地震の津波の発生規模と推定される被災状況の推定につなげる。

3. 地震に伴い海底が隆起・沈降し、その地殻変動が現在の地形に重要な役割をなしている。また、海底遺構が形成される場所と地殻変動には何らかの相関があるものと考えられる。そこで海底堆積物と海底遺物の分析から南海トラフ地震発生にともなう地震性地殻変動の推定を行う。

本研究は、過去に行われた調査記録を踏まえて、南国市十市沖と須崎市野見湾周辺の二ヶ所で海底調査を開始する。本発表では、2014年3月に行う第1回海底地形調査結果を速報するとともに、今後の研究計画を紹介する。

### 謝辞

本研究の海洋調査は日本海洋株式会社の多大なご協力を頂きました。ここに厚く御礼を申し上げます。

キーワード: 白鳳地震, 震災遺構, 南海トラフ地震, 地震性変動

Keywords: Hakuho earthquake, earthquake foundation, Nankai Trough earthquake, coseismic uplift and subsidence



## 九州北部, 小倉東断層および福智山断層帯の活動性調査 Fault activity of the Kokura-higashi fault and the Fukuchiyama fault zone in northern Kyushu Island, Japan

吉岡 敏和<sup>1\*</sup>; 谷口 薫<sup>1</sup>; 細矢 卓志<sup>2</sup>; 八木 達也<sup>2</sup>  
YOSHIOKA, Toshikazu<sup>1\*</sup>; TANIGUCHI, Kaoru<sup>1</sup>; HOSOYA, Takashi<sup>2</sup>; YAGI, Tatuya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター, <sup>2</sup> 中央開発株式会社  
<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST, <sup>2</sup> Chuo Kaihatsu Corporation

小倉東断層は, 九州北部, 福岡県北九州市小倉北区から小倉南区にかけて北北東-南南西方向に分布する活断層である。福智山断層帯は頓田断層および福智山断層からなり, 同じく九州北部, 北九州市若松区から田川市にかけて北北西-南南東方向に延びる活断層である。ともに断層の西側が相対的に隆起する上下変位成分を有しており, 小倉東断層では右横ずれ, 福智山断層帯では左横ずれ変位を伴うことが指摘されている。平成 25 年 2 月に地震調査研究推進本部地震調査委員会から公表された長期評価では, 小倉東断層については将来の地震発生確率は不明とされ, 福智山断層帯では将来の地震発生確率は今後 30 年間でほぼ 0-3 % と十分に絞り込めていない。そのため産業技術総合研究所では, 平成 25 年度文部科学省の委託を受け, 小倉東断層および福智山断層帯について, 断層活動性を明らかにするための調査を実施した。

小倉東断層においては, 南部の 2 地点 (北九州市小倉南区志井および同区新道寺) において, それぞれ 4 孔ずつの群列ボーリング調査を実施した。志井地点では, 東西方向に並んだ 4 本のコアのうち, 最も西側のコアの基盤岩のみが風化した火山性の堆積岩で, 残りの 3 本のコアの基盤岩は破碎した緑色岩であること, 最も西側のコアとその東側のコアの間で, 基盤岩の上面深度に約 1 m の西上がりの高度差があることから, この間に断層が存在することが推定される。基盤岩の上位に載る堆積物は腐植質シルト層を挟む砂礫層からなり, 基盤岩の上面とほぼ同じ高度差が認められることから, 断層はこれらの堆積物を変位させている可能性があると考えられる。

新道寺地点では, 千田ほか (2005) によって示された断層位置をまたいで分布する段丘面上で 4 孔のボーリングを掘削した。この段丘面には地形の段差は認められないが, 米軍撮影の空中写真では南北方向に直線的な色調境界が認められる。東西方向に並んだ 4 本のコアのうち, 西側から 2 本目と 3 本目のコアの間で, 基盤岩の上面に約 2.3 m の高度差が認められた。

福智山断層帯においては, 北部の頓田断層におけるトレンチ調査, および福智山断層での 2 地点での群列ボーリング調査を行った。

頓田断層のトレンチは, 断層沿いに並ぶ分離丘陵の直線的な境界の延長線上で掘削した。この地点では, 谷底の地形面に下流側が相対的に 0.5 m 程度高くなる段差が認められ, その段差が断層が推定される分離丘陵の縁辺とほぼ一直線上に並ぶこと, 北九州市 (1998) による群列ボーリング調査で, この段差の地下に白亜系の関門層群と古第三系の芦屋層群の境界をなす地質断層が推定されていること, 段差の東側のみに厚さ 1~2 m の沖積粘土層が分布していることが報告されていたため, この段差が頓田断層の低断層崖である可能性が高いと考え, この段差を横切ってトレンチを掘削した。

トレンチ壁面には, 西に急斜した芦屋層群の砂岩および泥岩が露出し, その上位には, 段差の東側のみに礫層とシルト層がほぼ水平に分布しているのが観察された。芦屋層群は壁面の東寄りほど急傾斜で破碎度も高くなっていることから, 関門層群との境界をなす地質断層 (二島断層) はトレンチの東方に位置するものと考えられる。芦屋層群の砂岩層には, 熱水変質によるものと思われる粘土脈が発達している。礫層とシルト層の分布の西端は, 地形的な段差の 2~3 m 東に位置し, 境界は高角度で, 特に南側壁面では一部で上下が逆転しているが, 境界面には明瞭な断層構造は認められない。境界付近の基盤岩は著しく風化しており, 粘土化した基盤岩と堆積物との区別が困難な部分もある。

八幡西区池田では, 地質境界となっている主断層の西側に, 段丘面に東側隆起の撓曲変形を与える副次的な断層が推定されている (千田ほか, 2005)。この撓曲構造を横断して, 東西方向に幅約 200 m の範囲で 8 孔の群列ボーリング調査を実施した。その結果, 基盤岩の上面とその上位の礫層に撓曲状の高度差が認められ, その東側の基盤岩中には断層および破碎帯が確認された。

さらに南方の福智町上野付近では, 扇状地性の段丘面を変位させる逆向き低断層崖と, 一部に河谷の左横ずれ屈曲が認められる。このうちの福智町堀田において, 逆向き低断層崖を横切って北東-南西方向に 4 孔の群列ボーリング調査を行った。その結果, 段丘面を構成する礫層の上面は, 扇状地面が南西に傾斜するのに対してほぼ水平で, 最も南西側のコアでは礫層中に断層構造が認められた。

今後, 試料の年代測定結果をもとに解釈の検討を進めるとともに, 活動履歴を明らかにするための調査を実施する予定である。

キーワード: 小倉東断層, 福智山断層, 頓田断層, 福岡県, 九州, 活断層

Keywords: Kokura-higashi fault, Fukuchiyama fault, Tonda fault, Fukuoka Prefecture, Kyushu Island, active fault

## 1771年八重山津波の断層モデルの再検討 Revised fault model of the 1771 Yaeyama tsunami, southwest Ryukyu

中村 衛<sup>1\*</sup>  
NAKAMURA, Mamoru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学理学部  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Univ. Ryukyus

1771年4月24日に南西諸島南部で発生した八重山津波(明和の大津波)は、最大遡上高約30m、死者約12000人もの多大な被害をもたらした津波であった。琉球海溝で発生しうる最大級の津波を考える上で非常に重要な津波であるものの、この津波の波源域モデルについては不明な点が多く残っていた。そこで、新たに明らかになった知見をもとに津波の断層モデルを検討した。

まず、宮古島の遡上高を修正した。古文書・伝承の中で妥当性の高い証拠を基にした津波遡上高は、石垣島周辺で約30m、多良間島で15m、伊良部島で15m、宮古島で18mである(後藤・他, 2011)。宮古島南部については従来、球陽に記載された宮古島南部集落での遡上高約10.5mが用いられてきた。しかし地元に残る伝承(後藤・他, 2011)や、宮古島に残された八重山津波に関する資料「御問合書」に記録された集落の被害状況から推定した遡上高の値約20m(加藤, 1988)から判断すると、宮古島南部での遡上高は約20mであったと考えるのが妥当であろう。

また、津波は平坦な島の内部まで遡上した。最大遡上高としては石垣島での約30mという値が顕著であるが、それ以外の平坦な島でも島の内陸部まで津波浸水が生じている。多良間島は標高10~14mの石灰岩台地が広がる島である。津波はこの島の中央よりやや北側にある集落(仲筋、塩川)の標高15m地点まで達した。集落の北側には標高30mの丘陵があるため、津波は東西または南の海岸から約1.5~3km遡上してきたと考えられる。下地島も多良間島と同様に標高10~20mの石灰岩台地の島である。この島は津波当時無人島であったが、御問合書には「平坦之所ニ波打越作物惣様相損海垣迄被取其上土も大半引流置候馬之内五拾五疋又ハ百姓所持之牛羊等到溺死候」と書かれており、島が広範囲で津波浸水したことが読み取れる。

以上、これらのことをもとに断層モデルを再検討した。検証を行ったモデルは、プレート内活断層+海底地すべりモデル(Miyazawa et al., 2012)、宮古島沖の分岐断層のみが活動するモデル(Hsu et al., 2013)、および琉球海溝でのプレート間地震(Nakamura, 2009)を修正したモデルである。

まず、活断層+海底地すべりによるモデル(Miyazawa et al., 2012)を用いた場合、各地の遡上高は宮古島周辺を除いて再現することができた。しかし多良間島と下地島の浸水域は海岸から約500mおよび200mであり、島の内陸部まで浸水域が広がる様子は再現できなかった。これは想定している断層モデルが70°と高角断層であるため波源域の幅が狭くなり、沿岸波高および遡上高は高いものの内陸部まで津波が遡上できないためであると考えられる。

宮古島沖の分岐断層のみが活動した場合、滑り量を調整することで宮古島での遡上高は再現できるが、多良間島での遡上域、および石垣島での遡上高は再現できなかった。

プレート間地震であるとした場合、断層長さ200km、断層幅70km、滑り量20m、傾斜12度の断層モデル(Mw8.6)で計算をおこなった場合、石垣島東部以外の遡上高および浸水域を再現できた。多良間島での浸水域は海岸から約1.5kmまで達し、下地島でも島東部の標高10m以下の部分が広範囲で浸水した。しかしこのモデルでは石垣島南東部の遡上高が約20mとなり、記録された遡上高約30mを再現できない。そこで石垣島南方沖のプレート上面の一部に長さ・幅が40km・30km、滑り量40mの局所的な大滑り領域を設定した(全体でMw8.7)ところ、石垣島東部での遡上高をも再現できた。

これらのことから1771年八重山津波の断層モデルとしてはMw8.7程度のプレート間地震が妥当であると考えられる。ただし石垣島南方沖には他よりも大きめの滑りを必要とする。ただしこれは必ずしもプレート間の断層滑りでなくても良い。他の可能性として分岐断層の活動や海底地滑りも考慮すべきかもしれない。

キーワード: 津波, 琉球海溝, プレート間地震, 歴史津波  
Keywords: tsunami, Ryukyu Trench, interplate earthquake, historical tsunami



## Systematical deflections and offsets of stream channels along the left-lateral strike-slip Kunlun Fault Systematical deflections and offsets of stream channels along the left-lateral strike-slip Kunlun Fault

YAN, Bing<sup>1\*</sup>; LIN, Aiming<sup>2</sup>  
YAN, Bing<sup>1\*</sup>; LIN, Aiming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

During the past two decades, the integration of geologic, geomorphic, seismic, and geophysical information has led to increased recognition and understanding of the tectonic significance of geomorphic features caused by strike-slip along active strike-slip faults. Tectonic landforms developed along active strike-slip faults are mainly characterized by systematic deflections and offsets of streams which are regarded as reliable displacement markers useful for reconstructing the long-term activity of active faults. It has been demonstrated that stream offsets have resulted from repeated large strike-slip earthquakes. The study of tectonic geomorphology will provide a new insight into the seismic activity, longevity and structural evolution of active strike-slip faults.

The Kunlun Fault is a typical active strike-slip fault zone extends for ~1200 km in the northern Tibetan Plateau that has triggered the 2001 Mw 7.8 Kunlun great earthquake. In this study, we present evidence for the systematical sinistral deflection and/or offset of the stream channels and valleys of the upper Yellow River drainage along the eastern intramontane segment of ~400 km of the fault zone. Topographic analysis of 3D perspective images constructed using Digital Elevation Model (DEM) data, high resolution Google Earth images and 15-m-resolution Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) images reveals the following: (i) various amounts of sinistral offset have accumulated on the tributary stream channels, valleys, and gullies of the upper Yellow River; (ii) the eastern intramontane segment of Kunlun fault accumulated sinistral offset amount for at least 12 km; (iii) the linear relationship between the accumulated offset amount and the upstream length from the deflected point to valley head of the stream involved can be reliable indicator of long-term slip rate.

The findings of this study support that the Kunlun Fault is a left-lateral strike-slip that partitions deformation into the eastward extrusion of the Tibetan Plateau to accommodate the continuing penetration of the Indian plate into the Eurasian plate.

キーワード: Kunlun Fault, left-lateral strike-slip fault, stream channel, systematical deflection, Tibetan Plateau, eastward extrusion

Keywords: Kunlun Fault, left-lateral strike-slip fault, stream channel, systematical deflection, Tibetan Plateau, eastward extrusion

## SPAC法の一般化とCCA法の開発について On the generalization of the SPAC method and the development of a CCA method

長 郁夫<sup>1\*</sup>  
CHO, Ikuo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研

<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

### はじめに

微動アレイ探査法は常時微動のアレイ観測で得られるレーリー波位相速度の分散データに基づく地下構造推定法である。いわゆる表面波探査のように人工振源を必要とせず、数m程度のごく浅部から数kmまでの大深度に至るまで手軽に探査できる。位相速度の解析法には大別して Spatial Autocorrelation Method (SPAC法) [Aki, 1957] と FK法 [Capon, 1969] がある。FK法では任意形状のアレイが利用されるが、SPAC法は標準的には「円形アレイ」に限定される [Okada, 2003]。しかし地震計数や解析可能波長帯域を考慮した総合的な解析効率では FK法よりも優れる [Okada, 2003]。さらに SPAC法には本来2点アレイを適用できる可能性があり [Aki, 1957]、この10年間にそれが再評価されてきた。例えば、Chavez-Garcia et al. [2005] や Extrom et al. [2009] は、長時間データを利用すれば2点 SPAC法を適用可能なことを実証している。このような背景により、近年は SPAC法のほうが良く使われるだけでなく、適用性の理論検討や様々な拡張がなされている。

### SPAC法の一般化とCCA法の開発

著者らの場合、Henstridge[1979]に基づいて Akiの SPAC法の理論を一般化した [Cho et al., 2006]。すなわち定常確率過程論に基づいて3成分円形アレイの解析法を一般的に記述した。この理論は、レーリー波の位相速度や楕円率、レーリー波とラブ波のパワー比等を効果的に抽出するための解析手法を生み出すための基礎となった。ラブ波の位相速度をレーリー波と完全に分離して抽出する方法を生み出すための基礎となった。2点 SPAC法(2点干渉法)の適用条件や最適な観測時間を厳密に理論検討するための基礎となった。

Centerless Circular Array (CCA)法は、この一般理論に基づくレーリー波位相速度解析ツールの1つである。不規則に配置した3個の地震計で構成されるアレイへの適用性を最大の特徴とする。また、長波長の解析性能に優れるという特徴もある。解析性能を低下させるファクターとしての SN比の評価法やノイズの補正法も検討している。

本発表の前半では微動アレイ探査の概略に触れた上で、以上の経緯を述べる。

### 浅部探査のための極小アレイ解析の開発

後半は、CCA法を基礎とする「極小アレイ解析」について報告する。極小アレイ解析とは、ごく小さいアレイ(半径1m以下)を用いた10~15分程度の微動観測で地表から数10m、時として100mを超える深さに対応する分散データを取得するための方法である。解析結果の品質管理のための指標も得られる。この1年は、極小アレイ解析の実用化のために次の課題に取り組んだ。すなわち、(i) 微動強度が低い場合十分な SN比が得られず目的深度に対応する長波長を解析できないケースがあるが、一般に解析結果の品質が悪く信頼性が疑わしい場合にどう対応すれば良いか? (ii) 速度構造推定は一般に非一意であり、その対応として先験情報が必要となる。しかし変化に富む浅部ではごく近接地点の情報が必要となるので結局はデータがない場合が多い。諸々の情報を補間して先見的なモデルを作るのは相当骨が折れる作業であり、微動探査の「簡易性」というメリットが損なわれる。地下構造推定まで含めた探査効率の追求のためにはどうすれば良いか?

極小アレイの観測例を増やしつつこの問題の対処策を検討した結果、(i)については、補足的に小半径(半径数m~10m程度)の3点不規則アレイを追加すればそれほど観測効率を下げずに対処できることが分かってきた。(ii)については、分散曲線に簡単な変換式を適用して S波速度の深度分布に変換する昔ながらの Simple Profiling Method (SPM) [e. g., Heukelom and Foster, 1960] で客観的なイメージを得、引き続き簡単な処理— H/V 深度変換 [長他, 2013] および Simplified Inversion Method (SIM) [Pelekis and Athanasopoulos, 2011] — で分解能を向上することにより、かなりの効果を上げられることが分かった。

上記の解析プロセスを自動化できれば、微動探査の最大のメリット「いつでもどこでもデータを取得可能」に「誰でも、大量でも解析可能」が加わり、微動探査分野でも「ビッグデータ」に対応できるようになる。現在、データ解析区間の自動判別に加え、精度向上の余地はあるが分散データおよび H/V 深度変換の自動読み取りアルゴリズムの開発が終了したところである(長他, 本大会; 先名他, 本大会)。こうして得られた極小アレイ解析で S波速度2次元断面を半自動で描き出す解析ツールは、公開中の解析ソフト BIDO (<https://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/bidodl.html>) の拡張版として公開する予定である。

謝辞 前半の成果の多くは多田卓博士、篠崎祐三教授との共同研究で得られた。後半の成果の多くは先名重樹博士および防災科学技術研究所および微動の会有志の方々との共同研究で得られた。

SSS35-01

会場:502

時間:5月2日 14:15-14:35

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, 探査, アレイ

Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, exploration method, array

## 微動アレー観測による Rayleigh 波と Love 波の検出 Detection of Rayleigh wave and Love wave detection from microtremor array measurements

大堀 道広<sup>1\*</sup>; チタク セチキン<sup>2</sup>; 久保 篤規<sup>3</sup>; 大石 佑輔<sup>3</sup>; 高橋 宏和<sup>3</sup>; 山品 匡史<sup>3</sup>  
OHORI, Michihiro<sup>1\*</sup>; CITAK, Seckin<sup>2</sup>; KUBO, Atsuki<sup>3</sup>; OISHI, Yusuke<sup>3</sup>; TAKAHASHI, Hirokazu<sup>3</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 福井大学附属国際原子力工学研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>3</sup> 高知大学理学部  
<sup>1</sup>University of Fukui, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Kochi University

地震動予測に必要な S 波速度構造の探査法として、微動アレー観測はもっとも実用的な方法の一つである。すでに多くの研究事例 [例えば堀家 (1985)] に見られるように、S 波速度構造の推定には、多くの研究事例では主に上下動成分が利用されており、これより検出される Rayleigh 波の分散性が用いられている。これに対して、水平成分より Love 波を検出する試みは非常に少ない [例えば山本 (2000)]。これには、微動の水平成分には Love 波と Rayleigh 波の両方が含まれており、これらを分離するのが難しいことも一因と考えられる。

微動アレー観測記録の代表的な解析法として、FK 法 [Capon(1969)] と SPAC 法 [Aki(1957)] があげられる。いずれの手法も Rayleigh 波の検出に用いられるが、FK 法は斎藤 (2007) により、SPAC 法は岡田・松島 (1990) や山本 (2000) により、それぞれ拡張され、Love 波の検出も可能になっている。これらの手法の適用性は、今後、多くの場所で確認される必要がある。著者らの既往の研究 [大堀ほか (2013)] では、高知市の高須地区において 2010 年 11 月に微動アレー観測を実施し、FK 法により Rayleigh 波と Love 波の検出に成功している。この時、8 台の地震計を用いて、半径 50m および 100m の円形アレーを同時観測し、FK 法により 1.2~3.8Hz の範囲の Rayleigh 波と Love 波を検出している。

対象地点における微動の伝播特性の理解を深め、より高い周波数 (約 6Hz) までの位相速度を得るために、著者らは 2013 年 3 月に同じ場所で 4 台の地震計を用いて、半径 50m, 25m, 12.5m の微動アレー観測を順次実施したので報告する。位相速度の推定には、上下動成分に対しては Capon(1969) の方法を、水平成分については斎藤 (2007) の方法を、それぞれ用いている。さらに、SPAC 法 [山本 (2000)] による位相速度の算出を行い、FK 法による結果との比較も行っている。なお、SPAC 法より得られた微動の水平成分における Love 波のエネルギー比率は、1.4~6Hz にかけて概ね 40~70% の範囲に分布しており、既往の研究事例と調和的な結果が得られている。

本研究にあたり、機動式地震計を快くご貸与頂いた防災科学技術研究所藤原広行氏、先名重樹氏に感謝申し上げます。本研究の一部は科学研究費補助基金・基盤研究 (C) 課題番号 24540464 (研究代表者: 大堀道広)、おなじく基盤研究 (C) 課題番号 25420479 (研究代表者: 小嶋啓介) の支援を受けたことを記します。

キーワード: 微動アレー観測, FK 法, SPAC 法, Rayleigh 波, Love 波

Keywords: microtremor array measurements, FK spectral method, SPAC method, Rayleigh-wave, Love-wave



## 三成分アレイを用いた微動の構成成分の推定：遠野アレイにおける結果 Estimating composition of ambient noise from three-component records at Tono array

高木 涼太<sup>1\*</sup>; 中原 恒<sup>2</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>  
TAKAGI, Ryota<sup>1\*</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>2</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 東北大・理・地球物理

<sup>1</sup>RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Geophysics, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

Ambient noise methods have become common tools to explore and monitor subsurface structure. However, effective uses of ambient noise should stand on the knowledge of a nature of ambient noise. In order to reveal the composition of ambient noise quantitatively, we extend the SPAC method to body wave incidence. Applying the extended SPAC method to the observation at Tono array, northeast Japan, we shows a good agreement between the theoretical cross spectra and the observed cross spectra. By fitting the theoretical cross spectra to the observed cross spectra, we estimated the composition ratio of Rayleigh, Love, and P waves. The characteristics of the composition ratio show a significant change at 1 Hz. While the P wave composition in total power is 5-15% and the lowest one below 1 Hz, the P wave composition suddenly increases above 1 Hz and reaches 50% and the highest one in those of the three wave modes. The change at 1 Hz is attributed to attenuation of high-frequency surface waves because the decay rate of the absolute value of power spectra of surface waves gets steeper around 1 Hz as compared with the constant decay of P wave. We also examine the temporal variation of the composition of ambient noise. Whereas power spectrum of each mode shows long-term and short-term temporal variations coincident with offshore significant wave height, the ratio between power spectra varies little with time. The constant composition ratio suggests that the mechanism and the source-receiver distance are stable in time. Accordingly, near coastal region is a possible region of the dominant source of the observed ambient noise. For applications of ambient noise, we should take account of the composition of ambient noise.

キーワード: 常時微動, SPAC, 三成分アレイ観測

Keywords: ambient noise, SPAC, three-component array observation

## Toward Earthquake Ground Motion Prediction using the Onshore-Offshore Ambient Seismic Field in Subduction Zones Toward Earthquake Ground Motion Prediction using the Onshore-Offshore Ambient Seismic Field in Subduction Zones

VIENS, Loic<sup>1\*</sup> ; MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup> ; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>  
VIENS, Loic<sup>1\*</sup> ; MIYAKE, Hiroe<sup>1</sup> ; KOKETSU, Kazuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Ground motion prediction is critical to evaluate the seismic hazard specially in high seismicity areas as Japan. A source of particular concern is the complex geological structures as sedimentary basins which can trap and amplify seismic waves. It has been proved by Prieto and Beroza (2008) that reliable phase and amplitude of the impulse response functions can be extracted by deconvolution of the ambient seismic field recorded by two on-land stations without any pre-processing. This approach has the great advantage to predict accurate ground motion of moderate earthquakes at periods longer than 4 s without the need of any external information about the velocity structure. However, this method allows only to recover relative, rather than absolute, amplitudes. To retrieve the corresponding Green's functions, impulse response amplitudes need to be calibrated using records of an earthquake which happened close to the "virtual" source. Moreover, as surface-to-surface Green's functions are extracted, some mismatches are observed between Green's functions and the earthquake records. This feature is due to the fact that depth and focal mechanism of the event are not taken into account. Despite of these disadvantages, accuracy of the predicted ground motion is high and such long-period ground motion investigation is critical to carried out seismic hazard assessment for high-rise buildings, bridges, or oil tank having long-period resonance. In this study, we use this technique in subduction zones to extract vertical-to-vertical component of the Green's functions between seismic stations located on the ocean bottom and on-land Hi-net stations. The target region is located in the Tokai/Tonankai areas where two submarine cable-based sea-bottom seismographic observation systems have been deployed by the Japan Meteorological Agency (JMA). We use one month of noisy data recorded in January 2013 to compute the Green's functions. The choice of these data is motivated by a strong signal-to-noise ratio of the causal part of the Green's functions during this period. We validate this approach by comparing computed Green's functions with offshore moderate earthquake ( $M_w \sim 5$ ) records in the Nobi sedimentary basin where the Nagoya city is located. As megathrust earthquakes are expected in this area, we extrapolate our results to predict magnitude  $M_w \sim 6$  or larger earthquake ground motions using the scaling law of seismic spectrum developed by Aki (1967). These results are finally compared to long-period ground motion prediction equations to evaluate their validity.

キーワード: Ground motion Prediction, Ambient seismic field, Subduction zones, Low frequency, Deconvolution  
Keywords: Ground motion Prediction, Ambient seismic field, Subduction zones, Low frequency, Deconvolution

## 微動単点測定による地盤構造推定に関するレビューとその適用例 Review of study on microtremors and application for subsurface structure modeling

鈴木 晴彦<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Haruhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 応用地質  
<sup>1</sup> OYO

微動の研究は、金井の一連の研究 (Kanai et al., 1954) に端を発し、微動 (短周期) の卓越周期や振幅スペクトルと地盤構造の関連性が議論された。その後、卓越周期が必ずしも地下構造と対応しない場合があるため、スペクトル比の利用が考案された。2地点間の微動のスペクトル比を取り、基準点に対するスペクトル比を求め、微動源と伝播経路の影響を取り除く試みが行われた。微動のスペクトル比と地震動のスペクトル比の対応などについての研究が行われている (例えば、瀬尾・佐間野、1993)。

さらに、1980年代になると微動の水平動成分と上下動成分のスペクトル比を推定し、地盤構造の推定が行われるようになった。Arai and Tokimatsu(2005)は、微動を表面波の基本モードだけでなく高次モードの重ね合わせであるとして、表面波の高次モードを考慮した理論 H/V スペクトル比を示し、逆解析による S 波速度構造の推定が行われるようになった。これは、微動の短周期成分の振幅が明瞭な日変化を示して (山中ほか、1991) いること、長周期成分の振幅が波浪や低気圧により生成 (鏡味ほか、1983) されることより、微動の振動源は主に地表に存在すると考えられ、Arai and Tokimatsu(2005)の仮定を支持している。一方、中村 (1988) では、基本的に微動の H/V スペクトル比は SH 波の重複反射による増幅特性を示しているとしている。地盤の 1 次固有周波数付近では SH 波の重複反射による増幅特性を示し、1 次固有振動数の 2 倍付近の周波数帯域は、Rayleigh 波によって乱された特性を示している (中村、2008)。時松・田村 (1995) による、地表面鉛直加振の数値シミュレーションでは、1 次固有周波数付近は、振源の十分遠方でも実体波が卓越するとしており、微動の H/V スペクトル比は地盤の 1 次固有周期付近では実体波の水平動と上下動の比を示している可能性がある。Sanchez-Sesma et al.(2010) では、拡散波動場を仮定した表面波および実体波を考慮した理論 H/V スペクトル比が提案されている。

微動の H/V スペクトル比は、地震災害危険度評価の一環としてサイスミックマイクロゾーニングに活用されている。若松ほか (1998) では、大阪平野を対象として実施した短周期微動観測から、微動の H/V スペクトル比に基づく大阪平野のサイスミックマイクロゾーニングを行っている。また、Senna et al.(2013) では、短周期帯域の微動 H/V スペクトル比に加え、小規模微動アレイデータ、地震動の長周期帯域のラディアル成分と上下動成分のスペクトル比のデータを用いて、地下数 m から数 km までの浅部深部統合地下構造モデルの構築が行われ、強震動計算のモデルとして活用されている。

### 参考文献：

Arai and Tokimatsu(2005):Bull. Seism. Soc. Am., 95, 1766-1778. ; Kanai et al. (1954):Bull. Earthq. Res. Inst.,32,199-209. ; 鏡味ほか (1983):地震 2, 36, 609-618. ; 中村 (2008) : 物理探査学会第 3 回地震防災シンポジウム予稿集 ; 瀬尾・佐間野 (1993) : 文部省科学研究総合研究 (A) 研究成果報告,198-200. ; Senna et al.(2013):Journal Disaster Research,889-901.; 時松・田村 (1995) : 日本建築学会構造系論文集, 493, 49-55. ; 山中ほか (1991) : 1991 年度春季地震学会講演予稿集, No.1, 107. ; 若松ほか (1998) : 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 1077-1082.

キーワード: 微動, スペクトル比, S 波速度構造モデル  
Keywords: Microtremors, Spectral ratio, S-wave structural modeling

## 液状化地域の「i 微動」的解釈：浦安地域におけるケーススタディ（2） Geological Interpretation of a Liquefied Area by 'i-Bido': A Case Study in Urayasu City, Japan (2)

佐藤 伸司<sup>1\*</sup>; 東 将士<sup>2</sup>; 樋口 茂生<sup>3</sup>; 稲田 晃<sup>3</sup>; 伊藤 彰秀<sup>4</sup>; 岩本 広志<sup>5</sup>; 上加 世田 聡<sup>6</sup>; 川崎 健一<sup>7</sup>; 楠 恵子<sup>8</sup>; 品田 正一<sup>2</sup>; 末永 和幸<sup>9</sup>; 渡邊 拓美<sup>3</sup>; 先名 重樹<sup>10</sup>; 藤原 広行<sup>10</sup>  
SATO, Shinji<sup>1\*</sup>; HIGASHI, Masashi<sup>2</sup>; HIGUCHI, Shigeo<sup>3</sup>; INADA, Akira<sup>3</sup>; ITO, Akihito<sup>4</sup>; IWAMOTO, Hiroshi<sup>5</sup>; KAMIKASEDA, Satoshi<sup>6</sup>; KAWASAKI, Kenichi<sup>7</sup>; KUSUNOKI, Keiko<sup>8</sup>; SHINADA, Shoichi<sup>2</sup>; SUENAGA, Kazuyuki<sup>9</sup>; WATANABE, Takumi<sup>3</sup>; SENNA, Shigeki<sup>10</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>10</sup>

<sup>1</sup> 千城台高校, <sup>2</sup> 石油資源開発, <sup>3</sup> 無, <sup>4</sup> 千葉北高校, <sup>5</sup> 関東天然瓦斯開発, <sup>6</sup> NTC コンサルタンツ (株), <sup>7</sup> 千葉西高校, <sup>8</sup> 浦安高校, <sup>9</sup> (株) 地球システム科学, <sup>10</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup> Chishirodai high school, <sup>2</sup> JAPEX, <sup>3</sup> No affiliation, <sup>4</sup> Chiba-kita High school, <sup>5</sup> Kanto Natural Gas Development Co., Ltd, <sup>6</sup> NTC Consultants Co., Ltd., <sup>7</sup> Chiba-nishi High school, <sup>8</sup> Urayasu high school, <sup>9</sup> Earth System Science Co., Ltd., <sup>10</sup> NIED

2011.3.11 東北地方太平洋沖地震で浦安高校に2本の長大地割れ(①, ②)が発生した。この地域は、埋立プロセスから《A》海面下土地、《B》海底浚渫土砂による埋立地《C》護岸周辺地帯という3地区に分類可能で、前述の地割れ①は《A》地区と《B》地区の境界に、②地割れは《B》地区と《C》地区の境界に発生したと考えられる(岩本ほか, 2014)。

これらのことを踏まえ、地下地質の物性の把握とこれまでの線的な把握を面的に拡張することを目的として、《A》《B》《C》の3地区に沖積地を加えた4地区で常時微動観測を行った。具体的には、微動観測の後、得られたH/Vスペクトルと地下地質との比較および解析を行った。常時微動観測では防災科学技術研究所のJU310微動計を用い、その計測、解析には同研究所の「i 微動」システム(先名ほか, 2011)を用いた。

この結果、明らかになったのは次のとおりである。(1)《A》《B》《C》全ての地区で1Hz強にピークが認められる。これは洪積層と沖積層のインピーダンス比によるピークと考えられ、沖積地および埋立地に共通する。(2)《B》地区(第1期埋立地)では、4-5Hz前後にピークが認められ、典型的な埋立地の特徴を示す。ボーリング調査の結果を踏まえると、《B》地区に特徴的に分布する(Nd値0の海底浚渫土砂による)埋立地シルト層と沖積層とのインピーダンス比が関係している点が重要である。(3)《A》《C》地区では、4-5Hz前後のピークは見られないか、不明瞭である場合が多く、このピークを生じる両者のコントラストは認められない。ただ《C》では、護岸周辺のNd値の高い物質の関与が推定される。一方、①および②地割れを挟む両側では、たった数メートルの距離でも、この4-5Hz前後のピークが一方では認められ、他方では認められない。

以上から、「i 微動」による解析結果は、岩本ほか(2014)による埋立層の地質単元区分が地割れ生成史を解く上で不可欠である点を、物理的な側面から裏づけた。このように、常時微動観測は、ボーリング結果との併用により地下地質の物性把握と面的な拡張に非常に有用である。今後防災分野への利用に向けた積極的な展開を考えたい。

謝辞 中山俊雄氏(NIED客員研究員)には、i 微動システムの利用にあたって大変お世話になった。ここに感謝申し上げる。

### 文献

岩本広志, 東将士, 樋口茂生, 稲田晃, 伊藤彰秀, 上加世田聡, 川崎健一, 楠恵子, 佐藤伸司, 品田正一, 末永和幸, 渡邊拓美(2014) 液状化地域の現世地質学的解釈：浦安地域におけるケーススタディ(1)。地球惑星科学連合2014年大会。

先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行(2011) 微動探査観測システム「i 微動」等の開発。物理探査学会第124回学術講演会論文集, 346-348。

キーワード: 液状化, 地割れ, 常時微動, i 微動, 浦安, 埋立地

Keywords: liquefaction, crack, micro tremor, i-Bido, Urayasu, reclaimed land



SSS35-06

会場:502

時間:5月2日 16:15-16:30

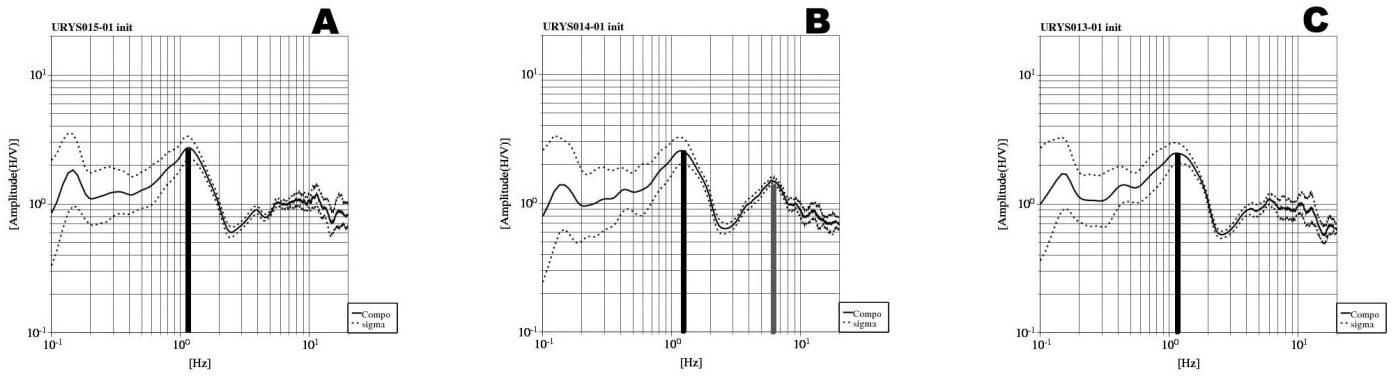


図1 A, B, C各地域におけるH/Vスペクトル

## 地震動と微動のH/Vスペクトル比の違いと拡散場動場に基づく理論的解釈 H/V Spectral Ratios for Both Microtremors and Earthquake Motions and Interpretation based the Diffuse Field Theory

川瀬 博<sup>1\*</sup>; 松島 信一<sup>1</sup>  
KAWASE, Hiroshi<sup>1\*</sup>; MATSUSHIMA, Shinichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

微動データのH/Vスペクトル比(HVR)は簡便であることから、多方面で数多く利用され、その適用性検討の過程で地震動データのHVRも最近多く解析されている。一方、地震記録においては、古くから遠地記録の軸方向Radial成分と上下動の比(RVR)が地殻構造を反映しているものとして活用され、今日ではレシーバー関数法として一次元的地殻構造のP-SV波場のレスポンスと対応させることにより、標準的に地殻構造逆算に用いられている。しかしながら、その短周期域については同様に評価手法が確立され活用されているとは言い難い状況にある。

微動HVRを用いて地盤構造を推定する手法ではこれまで水平成層構造におけるレーリー波の励起として解釈されることが多く、その性質を利用して上下動成分を用いたアレー微動解析でレーリー波の位相速度と対応付けられてきた。一方実体波が主体の地震動HVRにおいては水平成層構造への斜め入射のP-SV波場でモデル化できるはずだが、実際には微動HVRとほぼ類似のスペクトル形状となることが多く、それは盆地生成表面波のためと解釈されてきた。浅部地盤のインピーダンス比が大きい場合、HVRのピーク振動数と表層S波増幅のピーク振動数、および表面波のピーク振動数が対応することはよく知られており、これまで理論と観測とのスペクトル形状の一般的不一致から、微動および地震動のHVRの利用においてはその適用限界を弁えるべきものと解釈されてきた。

しかし最近、拡散理論に基づき、HVRは上下加振グリーン関数の虚部に対する水平加振グリーン関数の虚部の比になることを明らかにした。この解釈では微動の場合は点加振解に、地震動の場合は平面波入射の解でそれぞれ水平方向と上下方向に応答を求めればよい。

本稿ではこれまで観測してきた地震動のS波部分および同一地点の微動に対して水平上下スペクトル比を求め、それを系統的に比較するとともに、拡散波動場理論に基づく解釈を適用し、推定地下構造の理論予測値と比較した結果を報告する。

結論からいうと、一般的性状として微動は一次のピークがあってその直後に谷となったあと、高振動数域でのピークも谷も明瞭ではなくなるが、地震動の場合には高振動数域にも明瞭なピークや谷が存在し、それは深部地盤速度構造の影響を反映したものであること、地震動で最適化した構造が必ずしも微動に対しても最適なスペクトル比を生成できるとは限らず、同時インバージョンの有効性が示唆されることを明らかにしている。

キーワード: 微動, 地震動, 拡散波動場  
Keywords: microtremors, strong motion, diffuse-field theory

## 盆地端部形状が微動の水平上下スペクトル比に与える影響 The Effect of the Basin Edge to the Directional Dependent Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Microtremors

松島 信一<sup>1\*</sup>; デ マルタン フロロン<sup>2</sup>; 川瀬 博<sup>1</sup>; 福岡 侑里<sup>3</sup>; サンチェス-セスマ フランシスコ<sup>4</sup>  
MATSUSHIMA, Shinichi<sup>1\*</sup>; DE MARTIN, Florent<sup>2</sup>; KAWASE, Hiroshi<sup>1</sup>; FUKUOKA, Yuri<sup>3</sup>; SANCHEZ-SESMA, Francisco<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> フランス地質調査所, <sup>3</sup> 京都大学工学部, <sup>4</sup> メキシコ国立自治大学工学研究所  
<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>2</sup>Risk and Prevention Division, BRGM, <sup>3</sup>School of Engineering, Kyoto University, <sup>4</sup>Institute of Engineering, UNAM

著者らは京都大学宇治キャンパス内で常時微動観測を行い、水平上下 (H/V) スペクトル比解析で慣例的に行われているように水平 2 成分の平均をとらず NS/UD と EW/UD とを別々に求めたところ、ピーク振幅は NS/UD の方が大きく、ピーク振動数は EW/UD の方が高いという方位依存性があること示した。また、微動の H/V スペクトル比は、理論的には拡散波動場においてある一点を加振点及び受振点とする上下加振に対する上下応答のグリーン関数の虚部に対する水平加振に対する水平応答グリーン関数の虚部の比の平方根であることが明らかにされている (Sanchez-Sesma et al., 2011)。この理論は微動の H/V スペクトル比は水平成層構造を仮定する必要がないのが大きな特徴である。著者らは、観測記録の分析から、観測記録に見られる方位依存性が基盤の不整形性から起因していること示す一方で、数値計算により微動の H/V スペクトル比を計算し、基盤の不整形性が H/V スペクトル比に与える影響について検討した (Matsushima et al., 2014)。

京都大学宇治キャンパス周辺では、P 波反射法地震探査等の地下構造調査が行われており、東側に黄檗断層があり、そこから西に向かって基盤が傾斜して深くなっていることが示されている。本研究では、これらの情報をもとに基盤の不整形性が二次元的な構造をしており、約 1km の距離の間で基盤深さが二次元的に 420m 深くなる基盤構造であると仮定したモデルを用いた。

この二次元地盤構造モデルを用いて、三次元スペクトルエレメント法 (SEM) (De Martin, 2011) により、対象点における上下加振に対する上下応答のグリーン関数の虚部に対する水平加振に対する水平応答グリーン関数の虚部の比を、二次元構造に直交する方向 (EW 成分) と並行する成分 (NS 成分) について計算を行ったところ、NS/UD は EW/UD よりピーク振幅が大きく、EW/UD は NS/UD よりピーク振動数が高いという観測記録に対応する結果が得られた。また、直下の構造を抽出して水平成層構造を仮定して計算した結果と比べるとピーク振幅が小さく、ピーク振動数が高く、二次元構造の影響が H/V スペクトル比に与える影響が大きかった。また、盆地端部の形状が H/V スペクトル比に与える影響について数値計算にて検討したところ、盆地端部の形状が微動の H/V スペクトル比に大きな影響を与えることがわかった。さらに、二次元構造に直交する形で 2 つの測線に沿って多点の微動観測をした結果、理論的に予想される観測結果が得られた。

このように、二次元的な基盤の不均質性に影響を受けた微動観測記録の H/V スペクトル比の方位依存性を SEM による数値計算にて定性的に再現し、不整形な基盤構造が微動の H/V スペクトル比に大きな影響を与えることを示した。このことは、微動の H/V スペクトル比を用いて基盤の不均質性を考慮した地下構造の推定を行うことが出来ることを示す一方で、水平成層構造を仮定した推定を行う際に注意を要することを表している。

キーワード: 微動, H/V スペクトル比, 拡散波動場, 不整形, 地下構造

Keywords: Microtremor, H/V Spectral Ratio, Diffuse Field, Heterogeneity, Velocity Structure

## 微動を用いた浅部構造探査法の高度化(その1):自動読み取りアルゴリズムの開発 Sophistication of microtremor methods to survey shallow structures, PartI: Development of automatic reading algorithms

長 郁夫<sup>1\*</sup>; 先名 重樹<sup>2</sup>; 藤原 広行<sup>2</sup>  
CHO, Ikuo<sup>1\*</sup>; SENNA, Shigeki<sup>2</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産総研, <sup>2</sup>防災科研

<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

近年、我々は微動を用いた浅部構造探査法の潜在能力を最大限に発揮するための効果的な手順を検討してきた。観測の簡易化は、ポータブル微動計の開発(先名他, 2006, 2012)に加え、CCA法を用いた極小アレイ観測と3点不規則小アレイの適用(長他, 2013a)によりほぼ実用化されたと考えている。データ解析では位相速度の分散データに古典的な直接変換法(例えば、Heukelom and Foster, 1960)を適用すれば低分解能ながら簡便にS波速度構造のイメージが得られるので、我々は不連続構造を抽出するためのツールとしてH/Vスペクトルの深度変換(長他, 2013b)を提案し、その適用結果を位相速度と合わせて簡易逆解析法(Pelekis and Athanasopoulos, 2011)にかけることで分解能を向上できることを示した(先名他, 2013; 吉田他, 2013)。

現時点での課題は、データ解析の最初の段階すなわち位相速度の読み取りを目視で実施しているため、観測の簡易化で膨大なデータが得られるようになっても対処が困難となることである。読み取り結果の再現性や分析者の癖によるバイアスも問題となる。H/V深度変換のためのスペクトルの山谷の読み取りも目視なので同様の問題がある。そこで我々は、位相速度およびH/V深度変換を自動読み取りするために次のようなアルゴリズムを考えた。

### ・位相速度の自動読み取り

あるサイトにおいて複数のアレイ、複数の解析法(すなわち、nc-CCA法, CCA法, SPAC法)でそれぞれ位相速度の分散曲線が得られているとする。各分散曲線にそれぞれ次の処理を適用する。(1)周波数を対数刻みで等間隔な区間(BIN)に分け、BINごとに位相速度を算術平均する。(2)BINごとの平均データがアレイ半径に対する相対波長が手法ごとに決められた範囲を逸脱する場合および位相速度の解析結果が解析限界に近い場合(中心点付きのアレイを用いることで解析限界が計算可能となる)、それらのデータは以降の処理から除外する。隣合うBINの並びが原点を通る直線状となる場合も適切な解析結果が得られていないと判断してその区間はデータ処理から除外する。こうしてふるいにかけて得られたすべてのデータをBINごとに算術平均し、自動読み取り値とする。ただし再度データ開始部の直線的傾向をチェックし、直線的傾向が確認された場合、その区間を除外する。

### ・H/Vスペクトルの山谷の自動読み取り

同一サイトで得られたすべてのH/Vスペクトルを周波数ごとに算術平均し、周波数依存のウィンドウ幅を持つ窓関数で平滑化する。スペクトルの微係数が0となる点を低周波数側から順にサーチして山谷を同定する。その際、初めての山の出現後にサーチを開始し、必ず山と谷がペアになるように読み取ることにする。ロバスト化のために、隣り合う山と谷の周波数の差あるいはH/V値の比が閾値よりも小さい場合、高周波数側にある山と谷のペアは読み飛ばす仕様とする。また、ある山よりも次の山のH/V値のほうが小さい場合、あるいはある谷よりも次の谷のH/V値のほうが小さい場合も、次の山と谷のペアを読み飛ばす。こうして得られた山と谷のペアごとに、山に対応する深度と谷に対応する深度を平均してH/V深度変換の代表値とする。

ある測線に沿う微動アレイデータに上記のアルゴリズムを適用して2次元断面を描いたところ、目視で読み取った場合とそれほど違わない、概ね自然なS波速度断面が得られた(先名他, 2014(本大会))。読み取り精度にはまだ向上の余地があるものの、第一段階としては良好な結果である。本発表では実際の自動読み取りと目視読み取り結果の比較例を報告する。例えば図1はアレイ半径3.5mの3点不規則小アレイによるCCA法の分散曲線(紫線)とアレイ半径0.6mの極小アレイによるnc-CCA法, CCA法, SPAC法の分散曲線(それぞれ黄, 青, 緑線)が得られているサイトへの適用例である。自動読み取り結果(黄四角)は、異なる半径、異なる解析手法の分散曲線が互いに自然に接続し、目視(×印)による結果とほとんど相違がない。同図に示される細赤線は極小アレイによる位相速度の解析限界である。この解析限界は、それよりも位相速度が十分に低い周波数帯域では解析結果の信頼性が高いことを示す指標として自動読み取りに活用されている。

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, 探査, アレイ

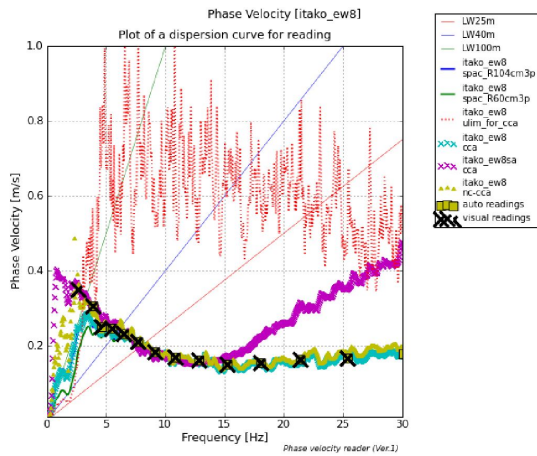
Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, expolation method, array



SSS35-P01

会場:3階ポスター会場

時間:5月2日 16:15-17:30



## 微動を用いた浅部構造探査の高度化 (その2): 自動読み取りアルゴリズムの適用 Sophistication of microtremor methods to survey shallow structures, Part2: Application of automatic reading algorithms

先名 重樹<sup>1\*</sup>; 長 郁夫<sup>2</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
SENNA, Shigeki<sup>1\*</sup>; CHO, Ikuo<sup>2</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 産業総合技術研究所  
<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>AIST

### 1. はじめに

近年, 我々は微動を用いた浅部構造探査法について, 簡便で精度の高い手法を検討してきた. 観測の簡易化は, 微動システムの開発(先名他, 2006, 2012)や, CCA法を用いた極小アレイ観測等(長他, 2013a)で実用化した. 一方で, データ解析では, 位相速度をS波速度構造に直接変換する手法(Simple Profiling Method, SPM)(例えば, Heukelom and Foster, 1960)を適用した上で, 層構造を仮定するためのH/Vスペクトルの深度変換(長他, 2013b)を提案し, 簡易逆解析法(Simplified Inversion Method, SIM)(Pelekis and Athanasopoulos, 2011)を適用して分解能を向上できることを示してきた(先名他, 2013). さらに長他(2014, 本大会)は現時点での課題として膨大な量のデータへの対処を見据え, 分散曲線・H/Vスペクトルの自動読み取りアルゴリズムを提案した. 本報告では長他(2014)の自動読み取りアルゴリズムを実データに適用し, 目視による読み取り結果と比較して実用性を検討する.

### 2. 観測・解析手法について

観測・解析は, 下記の流れで実施している.

#### 1) 極小アレイおよび不規則アレイでの観測

微動の観測時間は, アレイの形状(60cm 極小アレイおよび, 3m~10m の3点不規則アレイ)によらず15分間の連続観測としている.

#### 2) 分散曲線とH/Vスペクトルの自動解析・読み取り

微動解析ソフトBIDOを用いてデータ解析区間を自動選択し, 自動解析を実行している. 分散曲線およびH/Vスペクトルのピーク・谷の読み取りは長他(2014)の提案アルゴリズムで自動処理している.

#### 3) 1次元S波速度構造の推定と2次元断面の構築

波長Lと位相速度 $V_r$ の関係で示される分散曲線を深さDとS波速度 $V_s$ の関係で示される1次元S波速度構造に変換する(SPM). その際の変換式は $V_s = V_r / 0.92$ ,  $D = 0.375L$ とする. この1次元速度構造を空間補間して2次元断面にする. この2次元断面に, H/V深度変換による不連続深度を重ね描きする. ここまでの処理はすべて自動処理で行われる. なお1節では解析の最後にSIMを実施すると述べたが, 現状ではロバスト性の問題でSIMの自動処理アルゴリズム開発には至っていない. そのため本研究ではSIMは扱わない.

### 3. 2次元断面結果

4つの異なる堆積環境の地域(潮来市・秦野市・柏市・浦安市)で得られた微動アレイデータに上記の手順を適用して2次元断面を描いたところ, 分散曲線の読み取りとH/Vスペクトルのピーク・谷の読み取りを目視で実施した場合とそれほど違わない, 概ね自然なS波速度断面が得られた. なお, ボーリングのN値分布や想定地質断面図, Senna et al.(2013)の地盤モデルともそれほど違わない結果となっている. . . . このように長他(2013)による自動読み取りアルゴリズムは, 位相速度等の読み取り精度にはまだ向上の余地があるものの, 比較的良好な結果が得られるものと考えられる. また, 本報告では, さらに地盤構造の地域特性や, 既往の地盤モデルとの比較を行い, 手法の精度の検証を行っている.

### <謝辞>

秦野市の結果については, 神奈川大学荻本孝久教授等に微動観測について多大なご支援をいただいた. また, 柏市の結果については, 産業総合技術研究所の中澤努氏に多大なご協力をいただいた. ここに謝意を表します.

キーワード: 微動, 速度構造, 表面波, 位相速度, アレイ, 地下構造モデル

Keywords: Microtremor, velocity structure, surface waves, phase velocity, array, underground structure model

## 微動システムの開発と今後の展開 Future Initiatives of development of microtremor survey observation system

先名 重樹<sup>1\*</sup>; 藤原 広行<sup>1</sup>  
SENNA, Shigeki<sup>1\*</sup>; FUJIWARA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup> NIED

### 1. はじめに

地震動予測地図の高度化のためには、高精度な地盤モデルの作成は必要不可欠であるが、そのためのボーリング調査や反射法地震波探査は、莫大にコストがかかる。一方で、近年、直接的な地震観測以外で地震時の揺れの周期特性や地盤の速度構造を良くとらえることのできる常時微動観測が行われてきている。常時微動観測は、地震動予測のための地盤構造モデル作成に非常に有用な物理探査手法である。その観測の手軽さにより、ここ 10 年で各大学・研究期間では非常に多くの研究がなされている。しかしながら、研究そのものはバラバラの機材・考え方により各大学の小さな研究素材としてとじられており、データの共有等についても、ボーリングデータ以上に集約が難しい情報となってしまう。そこで、筆者等は、微動計の管理・データベース登録等システム・教育システムをパッケージとして用意・提供し、機材・データの品質・情報管理を効率良く行っていく仕組みの構築を行っている。本報告では、これまでの取り組みと、現在実施している取り組みをまとめた報告を行う。

### 2. これまでの開発と展開

本研究の微動システム開発のコンセプトは、安定的（観測のばらつきが少ない）に大量のデータを取得することができる仕組みを作ることである。地面に置くだけで、短時間に高精度な微動観測を可能とし、専門家・技術者でなくても安定的に観測・データ登録・解析の一連の工程について、バラツキの少ない観測・解析結果が出せるシステムを構築するため、以下に示す 4 つの項目について検討してきた。

① 常時微動解析ソフト「Tremor data View」のバージョンアップと微動アレイ解析ツール「Microtremor Array Observation Tool(MAOTool)」の作成

② スマートフォンを利用した観測データおよび観測位置情報等のデータベースへの即時登録（スマートフォンアプリケーション「i 微動」の作成/微動データベースのバージョンアップ）

③ スマートフォン等に安定的にデータ転送できる通信システムを搭載した微動計の製作（JU-310 の製作）

④ 微動観測結果の即時解析による結果の閲覧および、J-SHIS 等との既存システムとの相互運用による、観測地点の震度・地盤情報等との比較・解析機能（クラウド型解析機能の構築）

なお、上記システムは現時点で常時稼働しており、複数の研究者に利用されている。

### 3. 今後の展開

筆者等の提案として、防災科研がデータセンターとしての機能を持ち、微動計の管理・データベース登録等システム・教育システムをパッケージとして用意・提供し、機材・データの品質・情報管理を効率良く行っていく開発を実施するため、現在、上記微動システムを地方大学・研究機関等の希望者に観測レクチャーおよび解析教育も提供してデータを共有しており、大きな成果を得られつつある。先々収集される微動観測や地盤情報の「ビックデータ」の管理を効率化するため、現在の微動システムを再構築する必要が出てきており、今後も開発を続けていく予定である。

#### <謝辞>

防災科学技術研究所の内藤昌平氏、東宏樹氏および白山工業（株）の中井俊樹氏には、微動システムの開発の段階において、貴重なご意見をいただいた。ここに謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1) 先名重樹, 安達繁樹, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回物理探査学会予稿集, pp.120-122, 2006.
- 2) 先名重樹, 大井昌弘, 藤原広行: 微動探査データの収集管理とデータベースシステムの構築, 地球惑星科学連合大会, S150-P010, 2007.
- 3) 先名重樹, 藤原広行: 微動探査観測ツールの開発その 1 - 常時微動解析ツール -, 防災科学技術研究所研究資料第 313 号, 2008.
- 4) 先名重樹, 東宏樹, 武留井優子, 藤原広行: 微動探査観測システム「i 微動」等の開発, 第 124 回物理探査学会予稿集, pp.82-84, 2011.

SSS35-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 2 日 16:15-17:30

キーワード: 微動, 観測システム, クラウドシステム, ビックデータ  
Keywords: microtremor, survey observation system, cloud system, big data



## 線形アレーを使ってレーリー波位相速度の推定 Estimation of phase velocity of Rayleigh wave using linear array

ZHANG XINRUI<sup>1\*</sup>; 盛川 仁<sup>1</sup>  
ZHANG, Xinrui<sup>1\*</sup>; MORIKAWA, Hitoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

Since the spatial autocorrelation (SPAC) method has been proposed by Aki (1957), the observation using a circular array of evenly spaced sensors and a central sensor becomes a commonly used measurement technique in the microtremor survey method (Okada, 2003). However, in practice, the strict arrangement of sensors required by the method is difficult to conduct because of the limit of real environment. In order to slacken the requirement of the arrangement, Chavez-Garcia et al. (2005) discussed the validity of performing the SPAC method with a linear array. However, the conclusion of this research is result-based and is not backed by theoretical demonstration. Aki's autocorrelation coefficient could be alternatively seen as the azimuthal average of CCFs (Okada, 2003; Shiraishi 2006). A CCF consists of the Bessel function and an error term which varies with the azimuth of sources. By taking the azimuthal average, the error term vanishes and direct  $J_0(kr)$  can be obtained. The discrete formula of the CCF offers the possibility of extending the original SPAC method. In this research, we develop the solution by controlling the error term in CCF which can obtain directly the phase velocity instead of using records of sensors in a line instead of azimuthally arranged ones.

Under the assumption: 1) Only the fundamental mode is dominated. 2) Different sources are not correlated, the real part of discrete formula of CCF could be expressed as (Shiraishi, 2006). If we neglect the terms of order larger than 6, we can obtain:

$\text{Re}(\gamma_{pq}) = J_0(kr) - 2J_2(kr) \sum \lambda_l \cos 2\theta_l + 2J_4(kr) \sum \lambda_l \cos 4\theta_l$ . It can be seen that there are only three unknown variables  $kr$ ,  $\sum \lambda_l \cos 2\theta_l$  and  $\sum \lambda_l \cos 4\theta_l$ . It is required of at least three sensors (3 different intervals) to solve the 3 unknown variables theoretically. The three sites need to be in a line to make the three CCFs share the same unknowns. Because of the coupling variables and non linear functions, we use the genetic algorithm and particle filter to solve out the optimum solution.

In order to confirm the validity of this new theory preliminarily, the simple wavefield composed of unidirectional plane wave is used to examine the accuracy of estimating phase velocity obtained from a linear array with 3 sensors. The distances between adjacent sensors ( $r$  and  $0.5r$ ,  $r=30\text{m}$ ) are set to be different so that we can have totally 3 different CCFs to solve out the optimum solution. Except for the analytical simulation, we also applied a field test to examine the availability of the new method. We have applied field test to confirm the availability of the method. Observation was conducted on 23 October 2013 at the parking lot of Zoorasia Yokohama Zoological Gardens (ZRS) in Yokohama city of Japan. We deployed 7 seismometers (KVS-300, moving speedometer) constituting two linear arrays. The two linear arrays forms an angle of 60 degree so that the SPAC method could be applied for confirmation.

In the analytical simulation, we confirmed the availability of the new method. The sensitivity of CCF with respect to phase velocity depends on the direction of linear array. When the sensitivity is low, the estimation will be bad. Hence, it is better to use at least two linear arrays forming an angle (90 degree is the best). In the field test in Yokohama, we applied both the SPAC method and the new method using 7 speedometers. Both SPAC method and the new method show good match with the theoretical dispersion curve. The new method shows narrower effective scope and shows some unstablity in both low and high frequency range. Through both simulation and field test, the availability of the new method has been confirmed. This new method makes the arrangement of sensors easier which needs only two linear arrays with a non-strict angle. In the future, we will study more about improving the inversion technique and the application of linear array.

キーワード: SPAC method, linear array, coherence complex function, particle filter

Keywords: SPAC method, linear array, coherence complex function, particle filter

## 小笠原硫黄島における常時微動観測に基づく地盤構造の推定 Estimation of Subsurface Structure using Microtremor Observation in Ogasawara Iwo-To Island

村越 匠<sup>1\*</sup>; 小森 恵津郎<sup>1</sup>; 島田 正樹<sup>1</sup>  
MURAKOSHI, Takumi<sup>1\*</sup>; KOMORI, Etsuro<sup>1</sup>; SHIMADA, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防衛大学校

<sup>1</sup> National Defense Academy

小笠原硫黄島は火山性地震や地殻変動の活発な活火山である。重力変化に関しては鶴川・他 (2011, 日本火山学会秋季大会) や鶴川・他 (2006, 測地学会誌), 地震活動に関しては渡辺・他 (2010, 日本地震学会秋季大会) や鶴川・他 (2002, 地学雑誌) などで報告されている。地下構造については, 熊谷・高橋 (1985, 地学雑誌) の人工地震探査により深さ約 1 km 前後までの 3 層構造が報告されているが, 地震基盤や硫黄島全域の地下構造については明らかになっていない。そこで本研究では地表から地震基盤までの地下構造を推定するため, 小笠原硫黄島で 2013 年 10 月 18 日から 21 日にかけて常時微動観測を行った。常時微動の単点観測は, 1 地点あたり 15 分以上の観測を島内全域の 54 地点で実施した。常時微動のアレイ観測は, アレイ半径 30m, 150m, 600m の観測を 1 地点, アレイ半径 30m のみの観測を別の 1 地点で実施した。H/V スペクトル比の空間分布をみると, 硫黄島の中央部で卓越周期 1.1 秒で, 南西端のすり鉢山に向かって卓越周期が大きくなり周期 3.5 秒まで徐々に増加する傾向があることがわかった。

謝辞: 海上自衛隊硫黄島基地の皆様、特に気象班には観測点設置の際に協力して頂きました。東濃地震科学研究所の大久保慎人氏、鈴木貞臣氏には地震計の利用で協力して頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 常時微動, 小笠原硫黄島, 地盤構造

Keywords: microtremor, Ogasawara Iwo-To Island, subsurface structure

## 鳥取県大山地域における微動探査および重力探査 Determination of Subsurface Structure of the Mt. Daisen area in Tottori Prefecture by Microtremor and Gravity Survey

野口 竜也<sup>1\*</sup>; 香川 敬生<sup>1</sup>; 安永 晴信<sup>1</sup>; 石郷 真大<sup>1</sup>; 小坂 修平<sup>1</sup>  
NOGUCHI, Tatsuya<sup>1\*</sup>; KAGAWA, Takao<sup>1</sup>; YASUNAGA, Harunobu<sup>1</sup>; ISHIGO, Masaharu<sup>1</sup>; KOASAKA, Shuhei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 鳥取大学  
<sup>1</sup>Tottori Univ.

鳥取県の大山地域では、1983年鳥取県中部地震、2000年鳥取県西部地震、2002年鳥取中西部地震等により、被害が発生しており、この要因として地盤構造の影響が示唆される。よって、この地域で地盤構造を把握することは地震防災を考える上で重要である。地盤構造の情報に関しては、大山地域を中心に微動探査と重力探査が実施されている。本研究では、海岸部の平野を中心に新たに単点3成分観測、3地点のアレイ観測による微動探査および重力探査を実施し、既往の研究によるデータを含めて地盤構造の推定を行った。その結果、対象地域において微動データより地盤の卓越周期とS波速度構造を推定することができた。また、新規の重力データを加えた重力異常分布を得ることができた。

## 微動アレイ探査記録から推定される2地点間のグリーン関数 Estimation of inter-station Green's functions using microtremor array data

林田 拓己<sup>1\*</sup>; 吉見 雅行<sup>2</sup>  
HAYASHIDA, Takumi<sup>1\*</sup>; YOSHIMI, Masayuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所 国際地震工学センター, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター  
<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, BRI, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, AIST

近年、地震波干渉法を地下構造モデルの評価ツールとして活用するための技術開発が多くの研究者によって進められている [例えば Ma et al. (2008); 山中・他 (2010); Asano et al. (2012); 林田・他 (2014)]. 地震波干渉法を常時微動記録に適用する際には、微動の振動源が2地点の周囲に等方的に存在し、微動があらゆる方位から到来しているという仮定を満たす必要があるが、現実には振動源の不均質な分布(気候条件、環境条件に伴う要因)や微動の局所的な減衰・散乱(不均質地盤構造に伴う要因)等の可能性が推察されるため、相互相関関数をグリーン関数として扱う際にはこれらの影響を十分に考慮することが必要である。

Yoshimi et al. (2012)では、新潟県南部の丘陵地帯を中心とする13地域において微動アレイ探査(SPAC法, V法)を実施している。これらの探査では半径約300m, 1000m, 3000m(小アレイ, 中アレイ, 大アレイ;それぞれ正三角形の頂点と重心からなる4点アレイ)の3種類のアレイが展開されており、測定期間は1ヶ所あたり10日以上に及んでいる。微動アレイ探査では方位角の異なる等距離の観測点ペアを展開しているため、これらのデータに対して地震波干渉法を適用することで、振動源の不均質分布が相互相関関数にもたらす影響の検討が可能となる。本研究では、微動アレイ探査記録の毎正時から1時間分の連続記録(3成分)を1単位としてデータの切り出しを行い、振幅値の正規化(Bensen et al., 2007)処理後に2地点ペア(6種類の観測点間距離:300-5200m)における微動記録の相互相関関数を導出した。

導出した相互相関関数中には、小アレイで0.4-1.0Hz前後、中アレイで0.2-0.7Hz前後、大アレイで0.1-0.6Hz前後の周波数帯域において明瞭な波群が見られた。これらの相互相関関数は方位角によらず共通の波群を有しており、位相もほぼ一致している。沿岸域近傍に展開したアレイ(海岸から500-8000mの範囲)探査記録を用いた結果においても同様の結果が得られており、10日間以上の観測データを用いることで、十分な停留位相近似が施されたと考えられる。次に、微動アレイ探査によって推定された1次元S波速度構造から理論グリーン関数を計算し、地震波干渉法によって導出した相互相関関数との比較を行った。相互相関関数と理論グリーン関数との対応は概して良好であるが、高周波数帯域ではモデルの僅かな差異が波形の再現性に大きく影響し、再現性が低下する事例も見られる。今後、微動アレイ探査による位相速度およびグリーン関数の群速度双方の再現性に留意しながらモデルの妥当性を検討し、速度構造モデルの高度化を図る予定である。

謝辞:本研究で用いたデータは、独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究「平成22年度柏崎深部地震動観測サイト周辺の広域地下構造探査—微動・自然地震動観測及びGPS観測の実施—」の一環として実施された微動アレイ探査記録で取得されたものです。

キーワード: 常時微動, 地震波干渉法, グリーン関数, 群速度, SPAC法  
Keywords: microtremor, seismic interferometry, Green's function, group velocity, SPAC method



## 地震波干渉法及び微動解析による能登半島北西部の基盤構造の推定 Seismic basement structure estimated from seismic interferometry and microtremor analysis

小泉 亮<sup>1</sup>; 澤田 明宏<sup>1</sup>; 平松 良浩<sup>1\*</sup>; 2007年能登半島地震 合同余震観測グループ<sup>2</sup>  
KOIZUMI, Ryo<sup>1</sup>; SAWADA, Akihiro<sup>1</sup>; HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>1\*</sup>; THE GROUP, Aftershock observation<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup>2007年能登半島地震合同余震観測グループ  
<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>the group for the joint aftershock observations

### 1. はじめに

近年、地下構造探査の中で地震波形記録の自己相関解析(あるいは相互相関解析)から地下構造のレスポンスを評価する地震波干渉法が注目されている。本研究では、能登半島北西部を対象に、地震波干渉法及び微動解析を用いて基盤構造の推定を行った。また、この地域における重力異常解析や反射法地震探査(佐藤・他,2007)の結果と比較を行うことで、地震波干渉法及び微動解析の有効性について検討し、能登半島の地塊構造について議論する。

### 2. データ及び解析手法

#### (1) 地震波干渉法

2007年能登半島地震合同余震観測グループ(酒井・他,2007)による観測点の内、44地点で観測された2007年能登半島地震の余震データから観測点に対する入射角が35度以内であり、S波の検出がなされているものを利用した。変位波形のSH成分に2Hzのハイパスフィルターを適用し、S波到達時から10秒間を解析区間として自己相関関数(ACF)を計算した。各観測点において得られたACFを重合処理し、その観測点におけるACFとした。

#### (2) 微動解析

地震波干渉法の解析を行った44の観測点の設置地点において微動観測を行い、得られた微動データのH/Vスペクトル比を求めた。二層構造を仮定し、H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトル比のピーク周波数が一致するよう、基盤構造を推定した。

### 3. 結果・まとめ

地震波干渉法による深度推定において、ACFの卓越したピークが確認される観測点はそのピーク時間より基盤深度を求め、卓越したピークが複数存在する観測点は重力異常解析より得られた基盤構造を参考にして基盤深度を求めた。なお、地震波速度は佐藤・他(2007)のP波速度3.2km/sを使用し、地震調査研究推進本部2012が提案する全国一次地下構造モデルよりP波速度3.2km/sに対応する値としてS波速度1.7km/sを使用した。

反射法地震探査(佐藤他,2007)による基盤深度が100m以下の浅い地域では、反射法地震探査による結果と地震波干渉法による結果は一致しなかった。またACFのみで深度を推定できた観測点は44地点中10地点であった。一方、微動解析では44地点中35地点で深度推定が可能であった。したがって、地震波干渉法は能登半島北西部において基盤深度の推定を行う上では有効的な手法ではないと考えられる。

深度推定が可能であった観測点では、地震波干渉法、微動解析、重力異常解析より得られた結果は概ね一致しており、桑塚地塊は猿山地塊よりも基盤深度が浅いことが示された。2007年能登半島地震では桑塚地塊での隆起が観測されており、2007年能登半島地震の震源断層のような海域の活断層の活動によって桑塚地塊が継続的に隆起して基盤深度が浅くなったという考え(Hiramatsu et al., 2008)と本研究結果は整合的である。

謝辞:本研究では2007年能登半島地震合同余震観測グループによる地震波形記録を使用しました。また微動解析では防災科学技術研究所から微動計を借用し、防災科学技術研究所の先名重樹博士には微動解析についてご指導いただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 自己相関関数, H/V スペクトル, 重力異常, 地塊構造, 能登半島

Keywords: auto correlation function, H/V spectrum, gravity anomaly, geological block structure, the Noto Peninsula

### 3次元不均質媒体における非等方震源分布による波動場の地震波干渉法によるグリーン関数合成に関する検討 Retrieval of Green's function in a 3D inhomogeneous medium with nonisotropic source distribution using interferometry

地元 孝輔<sup>1\*</sup>; 山中 浩明<sup>1</sup>  
CHIMOTO, Kosuke<sup>1\*</sup>; YAMANAKA, Hiroaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東工大総理工  
<sup>1</sup>Tokyo Tech.

弾性均質媒体における等方震源分布では、地震波干渉法によってグリーン関数を合成できると考えられるため (e.g., Wapenaar and Fokkema, 2006)、長期微動記録を用いた地震波干渉法によって速度構造の推定が行われている (e.g., Shapiro and Campillo, 2004)。しかし、現実の微動場は非弾性不均質速度構造における非等方震源分布と考えられ、理論的な適用性についても検討されているように、現実の地震波干渉法によるグリーン関数合成においては十分に妥当性が検討されなければならない。

本研究では、関東平野を対象として、3次元不均質構造における非等方震源の地震波干渉法の適用性について数値実験により検証する。地震波干渉法の数値実験は3次元差分法によって行い、リッカーウェーブレット型の複数地表震源に対する2点の地表応答の相互相関を計算する。3次元不均質構造は山中・山田(2006)による堆積層モデルを用いた。また、非等方震源は、海域にのみ震源を置くこととした。これらによる結果は、それぞれ均質構造および等方震源による結果と比較することでそれぞれの影響を調べた。

まず、均質媒体における等方震源の場合、相互相関関数は直接計算されたグリーン関数と完全には一致しないものの、表面波成分はよく合成され、表面波群速度は理論値と一致する。若干の不一致は、地震波干渉法理論においてグリーン関数を合成する際の近似に由来するものと考えられる (e.g., Kimmman and Trampert, 2010)。また、相互相関関数は正と負の遅れ時間に関して完全に対称となった。つぎに、均質媒体における非等方震源の場合、相互相関関数は顕著に非対称となり、正の遅れ時間の相互相関関数には顕著な表面波成分は確認できなかったものの、負の遅れ時間の相互相関関数は等方震源の場合とほぼ一致し、それによる表面波群速度に関しても理論値と調和的であった。これらのことは、これまでの地震波干渉法の研究で震源分布がグリーン関数合成の成否に影響することが指摘されているとおりである (e.g., Tsai, 2010)。

関東平野の堆積層モデルを用いた3次元不均質媒体においては、等方震源の場合でも相互相関関数は非対称となった。すなわち、3次元不均質媒体においては等方震源分布であっても、震源からの波動伝播が複雑になり、みかけの震源分布が非等方になったためと考えられる。特に、負の遅れ時間の相互相関関数が正のそれよりも大きくなっていることから、東側の震源がみかけ上大きくなったものと考えられる。関東地域のモデルは、西側に関東山地が位置し、東側が太平洋となり堆積層が厚くなることを考慮すると、厚い堆積層によって東側の震源による表面波の励起が大きくなったことが、みかけの震源分布を非等方にしたためであると考えられる。この非対称のため、相互相関関数はグリーン関数とあまり一致しない。表面波群速度についても、相互相関関数の正負の遅れ時間によるもので若干異なるものの、それぞれグリーン関数による表面波群速度と大きくは異なる結果となった。最後に、3次元不均質媒体において非等方震源とした場合についても、同様に相互相関関数は正負非対称となり、グリーン関数との一致もよくない。しかし、表面波群速度に関してはおおむね一致した。

これらの結果により、地震波干渉法によるグリーン関数の合成に関しては、震源の等方性が大きく影響することがわかる。また、不均質構造は震源のみかけの等方性に寄与するため、グリーン関数合成に関してそれと同様の問題となる。すなわち現実問題においては震源の等方性(不均質構造による影響も含めて)がどれくらい満たされているか重要となるが、それを知ることは容易ではなく、今後も現実の適用事例から検討する必要があるといえる。ただし、地震波干渉法の多くの適用事例では表面波群速度から速度構造モデルの推定を行っているように、本研究においても表面波群速度に関してはグリーン関数のそれとおおよそ良い一致をみせるので、現実の適用事例においても妥当である可能性が大きいと考えられる。

キーワード: 地震波干渉法, グリーン関数, 不均質構造, 等方震源, 3次元差分法

Keywords: Seismic interferometry, Green's function, inhomogeneous, isotropic source, 3D FDM

## 高密度常時微動観測から推定される高知平野の表層地盤構造 Estimation of subsurface structure by high density microtremor observations in Kochi Plain

大石 佑輔<sup>1\*</sup>; 久保 篤規<sup>2</sup>; 高橋 宏和<sup>3</sup>; 山品 匡史<sup>2</sup>  
OISHI, Yusuke<sup>1\*</sup>; KUBO, Atsuki<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Hirokazu<sup>3</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学大学院総合人間自然科学研究科, <sup>2</sup> 高知大学理学部附属高知地震観測所, <sup>3</sup> 高知大学理学部  
<sup>1</sup>Studies in Science, Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University, <sup>2</sup>Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University, <sup>3</sup>Faculty of Science, Kochi University

高知平野は南海地震の震源域近傍に位置し、南海地震発生時には強震動や津波による複合災害が危惧されており、減災に向けた強震動予測を行うことは重要である。強震動予測の為に、「震源特性」、「伝播経路特性」、「サイト増幅特性」の3つの特性を評価する必要がある。これらのうちサイト増幅特性の把握が近年盛んに行われている。サイト増幅特性の評価に必要な地盤モデルは、ボーリングなどの既存地盤資料によって進められているが、本研究では、コストの低さや測定方法の簡便さの観点から、常時微動（以下、微動：地表の微小な揺れの総称）の観測を行い、得られる水平動と上下動のスペクトル比（H/V スペクトル比）を用いた高密度のサイト増幅特性の評価や地盤モデルの作成を行うことを目的とする。

本研究では「狭義の高知平野」と隣接する「香長平野」「高岡・弘岡低地」において1272点の単点微動観測を行い、そのうち1254点におけるH/V スペクトル比を求めた。狭義の高知平野では約200m間隔で、香長平野と高岡・弘岡低地では500~1000m間隔で1点当り11分から15分以上の微動3成分観測を行った。H/V スペクトル比の解析には、TremorDataView [先名・藤原 (2008)] を使用し、スペクトル比のピーク数とピークごとの周期・振幅を読み取った。H/V スペクトル比の卓越周期は表層地盤の厚さを、また振幅は地盤増幅率を反映した物理量であることが示されている [例えば中村 (2008)]。

高知平野におけるH/V スペクトル比の卓越周期（図参照）は、浦戸湾北部周辺で長くなる傾向があり、最大で1.6秒である。その他の地域では0.1~0.8秒程度である。スペクトル比の最大値には地域的な特徴はみられず、局所的に振幅が非常に大きい地域が数か所存在する。卓越周期とスペクトル比の最大値の分布は、過去の南海地震の被害報告 [都司 (2012); 間城 (2011); 三神・辻野 (2012); 山品ら (2013)] とよく対応しており、被害が大きかった地域は微動の卓越周期が長く堆積層の厚いと考えられる地域や、スペクトル比の最大値の大きい、すなわち地盤増幅率の大きいと考えられる地域とよく対応している。中村 (2008) の提唱する地盤に対する壊れやすさの指数Kg値 (=最大値<sup>2</sup>/卓越周波数) の分布を見ると、過去の被害分布とよく一致しているため、高知平野に点在するKg値の高い地点は過去の被害報告がなくとも周辺よりも大きな被害を受けると予測される。また、浦戸湾周辺ではH/V スペクトル比に2つのピークが表れるという特徴がある。狭義の高知平野西部と香長平野では、2つのピークを示す観測点は少ない。

得られたH/V スペクトル比の卓越周期および第2ピーク周期情報と大堀 (2013) の地盤モデルとを比較検討したところ、卓越周期は基盤深度と、第2ピーク周期は沖積層基底深度と一次の線形関係があることが分かった。求めた実験式より推定した地盤構造は、概ね深度80mまでは良い一致を示す。ただし、一部の地域では差が明瞭であり、深度80m以深の深い構造では一致の度合いが悪い。これは、大堀 (2013) の地盤モデル作成に使用されているボーリング数が不十分であるからと考えられる。また、4分の1波長則（層厚=周期× $V_S/4$ ）を用いて第2ピーク周期と地盤モデルの沖積層基底深度から沖積層のS波伝播速度 $V_S$ を求めると、浦戸湾北部周辺を含む狭義の高知平野東部では158m/s程度となり、これは周辺（ $V_S=200$ m/s程度）よりも小さい結果であり、沖積層と洪積層（ $V_S=300$ m/s程度）のコントラストが大きいことが分かる。H/V スペクトル比の第2ピークを示す観測点が少ない狭義の高知平野西部や香長平野では、沖積層と洪積層の $V_S$ コントラストが大きくないものと推定できる。

本研究では、高知平野における強震動予測に必要な地盤特性と地盤構造を、単点微動観測により推定できた。より精度良く各層の $V_S$ を求めるには、層厚と $V_S$ の双方を同時に拘束できるアレイ観測などが求められる。また、狭義の高知平野で求めた線形関係が他の地域で利用できるかについては、地盤構造が異なるとその地域特有の新たな関係が存在する可能性があり、既に地盤構造が明らかな複数箇所で単点微動観測を行い、その関係を検討する必要がある。

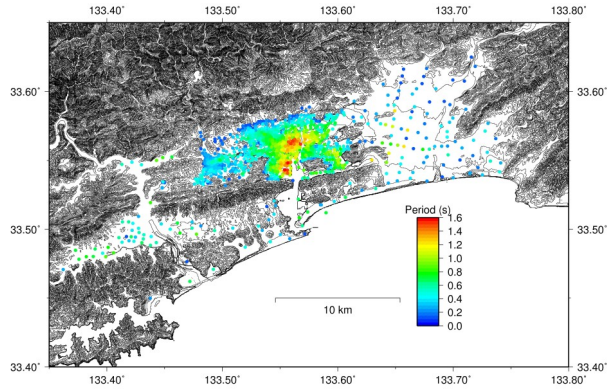
キーワード: 常時微動, H/V スペクトル比, 表層地盤, 高知平野  
Keywords: microtremor, H/V spectral ratio, subsurface structure, Kochi Plain



SSS35-P10

会場:3階ポスター会場

時間:5月2日 16:15-17:30





## 液状化地域の現世地質学的解釈：浦安地域におけるケーススタディ（1） Recent Geological Interpretation of A Liquefied Area: A Case Study in Urayasu City, Japan (1)

岩本 広志<sup>1\*</sup>; 東 将士<sup>2</sup>; 樋口 茂生<sup>3</sup>; 稲田 晃<sup>3</sup>; 伊藤 彰秀<sup>4</sup>; 上加世田 聡<sup>5</sup>; 川崎 健一<sup>6</sup>; 楠 恵子<sup>7</sup>; 佐藤 伸司<sup>8</sup>; 品田 正一<sup>2</sup>; 末永 和幸<sup>9</sup>; 渡邊 拓美<sup>3</sup>

IWAMOTO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; HIGASHI, Masashi<sup>2</sup>; HIGUCHI, Shigeo<sup>3</sup>; INADA, Akira<sup>3</sup>; ITO, Akihide<sup>4</sup>; KAMIKASEDA, Satoshi<sup>5</sup>; KAWASAKI, Kenichi<sup>6</sup>; KUSUNOKI, Keiko<sup>7</sup>; SATO, Shinji<sup>8</sup>; SHINADA, Shoichi<sup>2</sup>; SUENAGA, Kazuyuki<sup>9</sup>; WATANABE, Takumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 関東天然瓦斯開発, <sup>2</sup> 石油資源開発, <sup>3</sup> 無, <sup>4</sup> 千葉北高校, <sup>5</sup> NTC コンサルタンツ (株), <sup>6</sup> 千葉西高校, <sup>7</sup> 浦安高校, <sup>8</sup> 千城台高校, <sup>9</sup> (株) 地球システム科学

<sup>1</sup> Kanto Natural Gas Development Co., Ltd, <sup>2</sup> JAPEX, <sup>3</sup> No affiliation, <sup>4</sup> Chiba-kita High School, <sup>5</sup> NTC Consultants Co., Ltd., <sup>6</sup> Chiba-nishi High School, <sup>7</sup> Urayasu High School, <sup>8</sup> Chishirodai High School, <sup>9</sup> Earth System Science Co., Ltd.

2011.3.11 東北地方太平洋沖地震で著者のひとりが勤務する浦安高校において、大量の噴砂、噴水をともなう長大地割れが発生した(楠ほか, 2011)。本研究の目的は、この生成メカニズムおよび原因究明にある。地下地質調査にはハンドオーガーおよび動的コーン貫入試験を用い、埋立層の層序を明らかにした他、空中写真解析をおこなった。その結果、次のことが明らかになった。

調査地域は浦安高校敷地内で、旧海岸線から数 100m 海寄りに位置する埋立地である。沖積層頂部までの深さは 3-4m である。校庭には 2 本の地割れが、①地割れ：北北東-南南西方向、および、②地割れ：西北西-東南東方向に分布する。地割れの直下には、地震後の改修工事で埋立時のものとみられる杭列が見つかった。この杭列は周辺の砂、シルト埋立層に包埋されていて、地震動に対する受動特性の違いから地表部に開いた地割れを生じたものと考えられる。一方、地割れを挟んだ埋立層の層相の違いは顕著で、①地割れに直交する断面：沖積層頂部からその上約 2m ほどの埋立層の層相が、西側では砂質で Nd 値も比較的高いのに対し、東側ではシルト質で Nd 値は 0 に近い。②地割れに直交する断面：北東側(猫実川側)では非常に Nd 値が大きいのに対し、南西側では比較的小さい、と対照的な特徴を示す。

次に、空中写真解析の結果、①地割れおよび②地割れともに埋立過程における工事(工期、工区)の不連続の場所に当たることが判明した。埋立地は、①②2本の地割れを挟んで次の3地区に区分され、《A》地区：海面下土地(浦安市史編さん委員会, 1985)、《B》地区：海底浚渫土砂による埋立地《C》地区：護岸周辺地帯である。なお、《A》は文字通り海面下にありながら土地所有者が存在した地区。また《B》とは埋立工程や盛土など埋立層の構成も異なっていた。《B》はこの時期の埋立の圧倒的な部分を占め、海底浚渫土による埋立を行った典型的な埋立地である。《C》は海底浚渫土による埋立を行っておらず、《B》に遅れて護岸的な性格をもった堅固な埋立地帯として生成された。ちなみに、①地割れは《A》と《B》の境界に、②地割れは《B》と《C》の境界に位置し、沖積地(旧海岸線の陸側)を含めると4地区に分けられる。

以上のことから、埋立プロセスの不連続が、地割れの発生要因になっていると考えられる。液状化地域の問題解決にあたっては、沖積層および埋立層の生成、埋立プロセスの把握が大切であり、これが防災上重要であることを強調したい。

文献

楠 恵子, 東 将士, 樋口 茂生, 稲田 晃, 伊藤 彰秀, 岩本 広志, 上加世田 聡, 川崎 健一, 末永 和幸 (2011) 2011 年東北地方太平洋沖地震による人工地盤の変状-1970 年前後の千葉県浦安市埋立地における液状化現象-. 地学団体研究会青森総会.

浦安市史編さん委員会 (1985) 浦安市史. 浦安市, 64-66.

キーワード: 液状化, 地割れ, 動的コーン貫入試験, 浦安, 埋立地

Keywords: liquefaction, crack, dynamic cone penetration test, Urayasu, reclaimed land

## 富士山全磁力連続観測データの解析手法の開発 Development of analysis strategy for continuous total geomagnetic field data around Mt. Fuji

阿部 聡<sup>1\*</sup>; 宮原 伐折羅<sup>1</sup>; 森下 一<sup>1</sup>; 小林 勝博<sup>1</sup>; 豊福 隆史<sup>1</sup>; 小山 崇夫<sup>2</sup>; 小河 勉<sup>2</sup>  
ABE, Satoshi<sup>1\*</sup>; MIYAHARA, Basara<sup>1</sup>; MORISHITA, Hitoshi<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Katsuhiko<sup>1</sup>; TOYOFUKU, Takashi<sup>1</sup>; KOYAMA, Takao<sup>2</sup>; OGAWA, Tsutomu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>GSI of Japan, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

国土地理院では、平成12年秋から急増した富士山直下の低周波地震に対応した観測を強化するため、富士山北東部（富士吉田観測点）および富士山南方（富士市観測点）に全磁力連続観測点を設置し、以降現在に至るまで観測を継続してきた。また、平成23年に富士山北西部（富士御庭観測点）にGNSS火山変動リモート観測装置（REGMOS）を設置する際に全磁力計測機器を併設し、全磁力連続観測を開始した。さらに、東京大学地震研究所は富士山周辺に全磁力連続観測点（富士吉田）、地球電磁気観測所（八ヶ岳）を運用しており、これらのデータも富士山周辺の磁気変化を把握するために有用である。

従前より、富士市観測点を参照点とし、富士山北部の観測点との間で全磁力の単純差をとることで磁気変化を監視してきたが、火山帯における地磁気観測では、主磁場や外部磁場に加え、火山活動に起因する成分と、観測点固有の局所成分が同時に観測されるため、火山性の変動のみを識別することが困難である。そこで、今回、富士山周囲の地磁気観測点データを用いて、主成分分析をはじめとした手法により火山活動に起因したシグナルの抽出を試みるとともに、主成分分析を用いた富士山周辺の地磁気による監視手法の開発を検討したのでここに報告する。

キーワード: 全磁力観測, 富士山, 主成分分析

Keywords: Total geomagnetic field, Mt.Fuji, principal component analysis

## 水深に基づく津波ダイナモ現象の分類 Classification of tsunami dynamo phenomena in terms of ocean depths

南 拓人<sup>1\*</sup>; 藤 浩明<sup>1</sup>  
MINAMI, Takuto<sup>1\*</sup>; TOH, Hiroaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

良導体である海水が地球主磁場中を運動すると、ダイナモ効果が生じ電磁場が誘導される。この効果は海洋ダイナモ効果として古くから（例えば Faraday, 1832）よく知られており、主に潮汐や準定常海流などの長周期現象について研究が行われてきた。しかし近年、海底電磁場観測技術の進歩により、津波も顕著な海洋ダイナモ効果を伴うことが明らかになった。Toh et al. (2011) は、2006 年及び 2007 年千島列島沖地震津波により誘導された電磁場を、北西太平洋の海底で実際に観測した例を報告した。Toh et al. (2011) 以降現在まで、多くの津波起因の海洋ダイナモ現象例（以下、津波ダイナモ現象）が報告されている（e.g., Manoj et al. 2011; Suetsugu et al., 2012; Ichihara et al., 2013）。これらの津波ダイナモ現象を説明するために、先行研究では主に Tyler (2005) による解析解が用いられてきた。Tyler (2005) による解析解は非常に簡便かつ有用であるが、解析解だけでは現象の物理的理解には繋がらない。

そこで本研究では、解析解に基づいた理論と孤立波を扱った数値計算との比較により、津波ダイナモ現象が磁場の誘導方程式における拡散項の大小で分類できることを明らかにした。津波ダイナモ現象の場合、拡散項の大小は、主に水深によって変化する事を二次元の計算結果は示した。すなわち、水深の浅い海域では、拡散項が大きくなる一方、自己誘導の影響が小さくなるため、海水運動  $v$  と地球主磁場  $F$  とのカップリング ( $v \times F$ ) によって生じる磁場は、ほとんど減衰されることなくそのまま海底や海面で観測される。この場合の津波ダイナモ現象は、アンペールの法則のみによっても現象の説明がほぼ可能である。一方、水深が深くなると、拡散項が小さく、同時に自己誘導の効果が大きくなるため、 $v \times F$  によって生じた磁場は大きく減衰される。特に、水深が 5000m を越えた海域では、 $v \times F$  によって生じた磁場に比べて観測される海底磁場変化は、振幅にして七割以下、位相角にして 70 度以上遅れることとなる。Minami and Toh (2013) で報告された津波ダイナモ現象の場合、北西太平洋に設置された観測点の水深が約 5600m であったため、自己誘導が支配的な現象を観測していたものと判断できる。このことは、観測された磁場鉛直成分の変化波形が、電磁場観測点最寄りの海底圧力変化（＝波高変化）と位相を含めて酷似していたことと整合する。さらに、解析解を用いた理論計算では、津波波高を 1m に固定した場合、津波の引き起こす磁場の振幅は、水深に対する依存性が異なる拡散項と自己誘導項とのバランスにより、水深 2000m 付近で最大になることが明らかとなった。

本発表では、津波ダイナモ現象の分類法、及び、水深に応じてどのように津波電磁場が変化するかについて、考察結果を報告する。また、Minami and Toh (2013) で報告された、津波到来に先んじて観測される磁場水平成分の変動 (initial rise) の水深依存性についても議論する。

キーワード: 津波, ダイナモ, 孤立波, 海底観測, 有限要素法

Keywords: tsunami, dynamo, solitary wave, seafloor observation, finite element method

## 地震で励起された電磁波から地中媒質の電気的パラメータの算出 Electric conductivity of earth's medium derived from earthquake-excited electromagnetic signals

筒井 稔<sup>1\*</sup>  
TSUTSUI, Minoru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都産業大学 コンピュータ理工学部  
<sup>1</sup> Kyoto Sangyo University

京都産業大学では以前から地中で電磁波が励起されるかどうかを確かめるための観測研究を行ってきたが、周波数が数 kHz については殆ど全てが雷放電によるもので、地中起源の電磁波は全く見つける事が出来なかった。しかし、2011 年の 12 月から検出対象周波数を 25 Hz 以下にしたところ、電磁波観測点での震度が 1 以上であれば地震により励起された電磁波を検出確認できる事を明らかにした。2013 年の 3 月以降は地震励起電磁波と地震波の波形同時観測を行ってきた結果、地震波が伝搬している近傍では常に電磁波も励起されている事を示した [1]。地中では電気伝導度が高いために、残念ながら励起された電磁波は遠距離まで伝搬出来ないが、周波数の低い (25 Hz 以下) 電磁波は、地中でもある程度伝搬出来る事が明らかとなってきた。

2013 年 12 月 25 日に電磁波観測点から極めて近い 5.4 km 北の、深さ 10 km という場所で M3.0 の地震が発生した。これは震源が観測点に対して伏角が約 60 度の方向にあった。この時、京都産業大学構内での電磁波観測点で地震波 3 軸成分と電磁波の磁界 3 軸成分の波形を同時に取得できた。震源に対する伏角が約 60 度と極めて大きいため、地震波はほぼ上向きに伝搬しており、振動波形の垂直成分観測では P-波 (縦波) 成分が極端に卓越しており、S 波との分離は困難な状態であった。一方、水平振動成分の測定では、P-波が約 1.8 秒続いた後に明瞭な S-波の到来を示す典型的な波形が得られた。これを Fig.1(a) に示す。図から明らかなように、S-波は極めてシャープでしかも短時間で終了している。これは地震が極めて近いため、他の地層境界からの反射波等が含まれていないためと思われる。これに対してほぼ同時に検出された地中電磁波の磁界の水平成分の振動には興味のある波形が現れている。それを Fig.1(b) に示す。これによると電磁波の磁界成分は S-波の到来する約 1 秒前からその振幅が指数関数的に増加し、S-波の到来時点で最大となり、それを過ぎると徐々に減小する形となっている。この現象は以下のように説明する事ができる。

岩盤内では P-波であれ S-波であれ、地震波が存在すると圧電効果により常に電磁波が励起されており、岩盤からは電磁波が放射されている。S-波は特に強い電磁波を放射する波源と見なす事ができ、これが S-波の速度で伝搬してくる。しかし、地中内では電気伝導度が高いため、放射された電磁波の振幅は空間的には指数関数的に減衰する形をしている。このため電磁波観測点に向かって一定速度 (S 波の) で到来する電磁波源からの電磁波振幅を観測点で見ると時間的に指数関数的に増加する形をとる。更にその観測点を過ぎた電磁波源からの電磁波振幅は指数関数的に減衰する形となる。これが Fig. 1(b) に現れた電磁波振幅の時間変化を示しているものと思われる。これにより、地中における電磁波振幅の空間距離依存性が得られるので、それを対数グラフにプロットする事により、地中媒質の電磁波に対する表皮の厚さ (Skin depth) を算出する事ができる。Fig.1(b) のデータについてこれを適用した結果、周波数 20 Hz のこの地中での Skin depth は約 850m であり、電気伝導度は 0.0175 S/m が得られた。またこの時、電磁波は約 2 km の深さから放射された電磁波を検出できた事を示している。

[1] M. Tsutsui, submitted to IEEE Geoscience, Letters, 2014.

キーワード: 地震波, 電磁波, 地中観測, 表皮の厚さ, 電気伝導度

Keywords: seismic wave, electromagnetic wave, observation in the earth, skin depth, electric conductivity



SEM36-03

会場:413

時間:4月30日 15:45-16:00

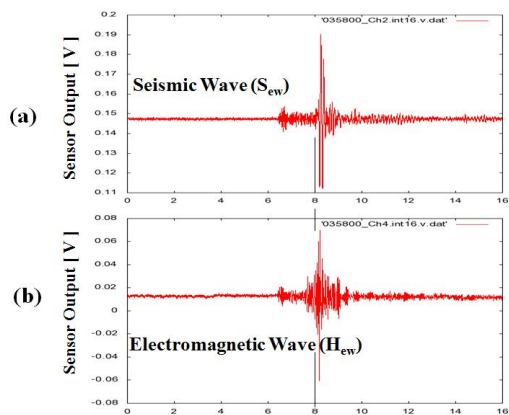


Fig. 1

03:58:00.059 JST, Dec. 25, 2013

## マグマの脱ガスフラックス推定のための電気伝導度構造の利用 Electrical conductivity structures of volcanic areas: a proxy for volcanic gas fluxes

小森 省吾<sup>1\*</sup>; 鍵山 恒臣<sup>2</sup>; フェアリー ジェリー<sup>3</sup>  
KOMORI, Shogo<sup>1\*</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>2</sup>; FAIRELY, Jerry<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中央研究院地球科学研究所 (台湾), <sup>2</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>3</sup> アイダホ大学

<sup>1</sup>Institute for Earth Sciences, Academia Sinica (Taiwan), <sup>2</sup>Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, <sup>3</sup>University of Idaho

火山活動は、マグマが地表まで急速に上昇し爆発的噴火に至る活動から、マグマが途中で上昇を停止し地表に地熱兆候をもたらすのみで終息する活動まで様々である。マグマの上昇のしやすさは、マグマの粘性・周囲との密度差に依存する。マグマの粘性・密度を規定する要因の1つである火山ガス(揮発性物質)は、マグマの上昇過程で含有量を大きく変化させる。それゆえ、マグマからどれだけ効率的に揮発性物質の放出がなされているかを明らかにすることが、上記の様な火山活動の多様性を考える上で重要である。

火山ガスは、地下水に溶解すると地下水の成分濃度・温度を増加させ、間隙水の導電性を高める。また、変質作用が高導電性の粘土鉱物(スメクタイト)の生成を促すため、熱水に晒された岩石もまた導電性(表面伝導度)を増加させる。それゆえ、高電気伝導度領域の広がり、マグマからの火山ガスの散逸の指標になる可能性がある。我々はこのことに着目し、下記に示すように、火山体の電気伝導度分布を利用した火山ガスフラックスの推定法の開発に取り組んできた。

### [熱水温度が母岩の表面伝導度に与える影響の定量的検討]

間隙水の電気伝導度は、既存研究により熱水の温度と溶存成分濃度の関数として定式化されている。一方で、表面伝導度とそれを制御するスメクタイトの生成・安定条件(特に温度)との対応関係は、今まで必ずしも明確に定量化されていなかった。そこで我々は、温泉・火山体掘削等で得られたコアサンプルを利用した電気伝導度測定試験により母岩の表面伝導度を推定し、これを曝露された熱水温度の関数としてプロットすることを試みた。本研究には、低温熱水系として雲仙火山 USDP-1 サイトにおける掘削コアを、比較的高温の熱水系として別府地域の掘削コアを用いた。その結果、母岩の表面伝導度は、スメクタイトの生成・安定条件に対応する熱水温度の簡単な関数として表現できる可能性が明らかになった(Komori et al., 2010, 2013)。

### [雲仙火山地域への適用を目指した火山ガス散逸モデルの構築]

雲仙火山地域では多くの地球物理・化学的研究がなされ、1990—1995年の噴火活動期を含めたマグマの移動や脱ガス・温泉生成機構に関する様々なモデルが提案されている。Ohba et al. (2008)によれば、雲仙火山のマグマは3段階の脱ガス過程を経ており、第1段階の脱ガスは深度4—6kmで起こると考えた。この脱ガス深度は、Kohno et al. (2008)によって得られている島原半島西部の圧力源群の位置と一致する。さらに前述の圧力源の直上には、200℃以上の高温領域が存在していることが知られており(NEDO, 1988)、この領域とほぼ一致するように電気伝導度の高い領域が存在することがSrigutomo et al. (2008)のTDEM調査により明らかにされている。

本研究では、大沢(2006)による島原半島の温泉生成機構も参考に、上記研究に基づいた簡単な火山ガス散逸モデルを構築しTDEMによる電気伝導度構造を用いることで、火山ガスフラックスを推定することを試みた。単純な形状・物性を持つ帯水層を仮定し、火山ガスの付加に伴い生じる熱水の溶存成分濃度・温度・フラックスの条件などを変えた数値計算を行った。これにより、熱水流動に対応した間隙水の溶存成分濃度・温度の空間分布が求められる。これらの分布は、間隙水の電気伝導度・母岩の表面伝導度に変換される。さらに、これら2つの導電性成分をバルク電気伝導度に合成することで、熱水流動とバルク電気伝導度構造とを対応付けた。その結果、雲仙火山地域において、高電気伝導度領域の空間分布は、天水付加量・火山ガスフラックスの2者で本質的に決まる可能性が明らかになった(Komori et al., under review)。

### [推定された火山ガスフラックスから考える脱ガス効率性・火山活動様式]

上記で得られた知見をTDEMによる島原半島西部の電気伝導度構造に適用した。その結果、火山ガスフラックスが $10^{4.8 \pm 0.5}$  t/yr と推定された。この値から計算されたマグマ性CO<sub>2</sub>フラックス( $10^{3.1 \pm 0.5}$  t/yr)・マグマの貫入レート( $10^{0.1 \pm 0.5}$  million t/yr)は、他の地球化学・物理学的手法によって得られている値と整合的であることが分かった。本研究により、雲仙火山では、数十年間隔で起こる間欠的なマグマ貫入の度に地下でマグマが効率的に脱ガスしている可能性があり、これがドーム形成のようなeffusiveな噴火活動が卓越する要因の1つになっているかもしれないことが定量的に示唆された(Komori et al., under review)。

キーワード: バルク電気伝導度, 間隙水電気伝導度, 表面伝導度, 火山ガスフラックス, 雲仙火山地域

---

SEM36-04

会場:413

時間:4月30日 16:15-16:45

Keywords: Bulk electrical conductivity, Pore water conductivity, Surface conductivity, Volcanic gas fluxes, Unzen volcanic area

## Audio frequency magnetotelluric imaging and tectonic activity evaluation of the Cimandiri Fault, West Java, Indonesia

### Audio frequency magnetotelluric imaging and tectonic activity evaluation of the Cimandiri Fault, West Java, Indonesia

Febriani Febty<sup>1\*</sup>; 山谷 祐介<sup>2</sup>; 服部 克巳<sup>1</sup>; Widarto Djedi S.<sup>3</sup>; Han Peng<sup>1</sup>; Yoshino Chie<sup>1</sup>; Nurdiyanto Boko<sup>4</sup>; Effendi Noor<sup>4</sup>; Maulana Iwan<sup>4</sup>; Gaffar Eddy<sup>5</sup>  
FEBRIANI, Febty<sup>1\*</sup>; YAMAYA, Yusuke<sup>2</sup>; HATTORI, Katsumi<sup>1</sup>; WIDARTO, Djedi S.<sup>3</sup>; HAN, Peng<sup>1</sup>; YOSHINO, Chie<sup>1</sup>; NURDIYANTO, Boko<sup>4</sup>; EFFENDI, Noor<sup>4</sup>; MAULANA, Iwan<sup>4</sup>; GAFFAR, Eddy<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Chiba University, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup>Upstream Technology Center, <sup>4</sup>Indonesian Geophysical, Meteorological, Climatological Agency (BMKG), <sup>5</sup>Research Center for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences (LIPI)

<sup>1</sup>Chiba University, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup>Upstream Technology Center, <sup>4</sup>Indonesian Geophysical, Meteorological, Climatological Agency (BMKG), <sup>5</sup>Research Center for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences (LIPI)

The tectonic activity around the Cimandiri fault zone, Pelabuhan Ratu, West Java, Indonesia, has been analyzed for 30 years (1973-2013). The subsurface electrical resistivity structure close to the Cimandiri fault has been also investigated by twenty five audio-magnetotelluric (AMT) sites. The AMT exploration was carried out during two weeks, from July 27, 2009 to August 8, 2009. The sites were distributed on two lines along about 13 km x 6.5 km profile. There are two profiles of the AMT: (1) the A-A' line of the AMT which is perpendicular to the fault (2) the B-B' line of the AMT which is parallel to the fault. Two-dimensional modelling using the code developed by Ogawa and Uchida 2-D inversion has been applied in the AMT data. The result of tectonic activity analysis shows that the Cimandiri fault is the active fault. The subsurface electrical resistivity structure of the Cimandiri fault zone is characterized by (1) the A-A' and B-B' lines present a conductive zone (1-100  $\Omega\text{m}$ ) from the surface up to the depth of 1 km, which is possibly associated with quaternary volcanics. At the surface, there are also some very conductive spots (1-5  $\Omega\text{m}$ ) which are indicating the existence of the marine sediments in the study area. (2) The gradual conductive-resistive (500-1,000  $\Omega\text{m}$ ) zone at the depth of 1-3.5 km overlays above a low resistivity zone (10-100  $\Omega\text{m}$ ). This low resistivity zone may reflect the combined influences of a fluid network and the presence of the young and less compact sediments with the 500-1,000  $\Omega\text{m}$  zone as a cap rock that defines the upper boundary of the low resistivity zone (10-100  $\Omega\text{m}$ ). Finally, the result of both methods presents that the Cimandiri fault is the strike-slip fault.

キーワード: audio frequency magnetotelluric, subsurface electrical resistivity structure, 2-D inversion, Cimandiri Fault, Indonesia

Keywords: audio frequency magnetotelluric, subsurface electrical resistivity structure, 2-D inversion, Cimandiri Fault, Indonesia



## 統計学的に頑健なMT インバージョン Robust magnetotelluric inversion

松野 哲男<sup>1\*</sup>; Chave Alan<sup>2</sup>; Jones Alan<sup>3</sup>; Muller Mark<sup>3</sup>; Evans Rob<sup>2</sup>  
MATSUNO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; CHAVE, Alan<sup>2</sup>; JONES, Alan<sup>3</sup>; MULLER, Mark<sup>3</sup>; EVANS, Rob<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> ウッズホール海洋研究所, <sup>3</sup> ダブリン高等研究所

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Woods Hole Oceanographic Institution, <sup>3</sup>Dublin Institute for Advanced Studies

A robust magnetotelluric (MT) inversion algorithm has been developed on the basis of quantile-quantile (q-q) plotting with confidence band and statistical modelling of inversion residuals for the MT response function (apparent resistivity and phase). Once outliers in the inversion residuals are detected in the q-q plot with the confidence band and the statistical modelling with the Akaike information criterion, they are excluded from the inversion data set and a subsequent inversion is implemented with the culled data set. The exclusion of outliers and the subsequent inversion is repeated until the q-q plot is substantially linear within the confidence band, outliers predicted by the statistical modelling are unchanged from the prior inversion, and the misfit statistic is unchanged at a target level. The robust inversion algorithm was applied to synthetic data generated from a simple 2-D model and observational data from a 2-D transect in southern Africa. Outliers in the synthetic data, which come from extreme values added to the synthetic responses, produced spurious features in inversion models, but were detected by the robust algorithm and excluded to retrieve the true model. An application of the robust inversion algorithm to the field data demonstrates that the method is useful for data clean-up of outliers, which could include model as well as data inconsistency (for example, inability to fit a 2-D model to a 3-D data set), during inversion and for objectively obtaining a robust and optimal model. The present statistical method is available irrespective of the dimensionality of target structures (hence 2-D and 3-D structures) and of isotropy or anisotropy, and can operate as an external process to any inversion algorithm without modifications to the inversion program.

Keywords: Inversion, Probability distribution, Magnetotellurics

## 野島断層 1800m 深注水実験時における自然電位観測序報 Preliminary report of self-potential observation during a water injection experiment at 1800 m depth in Nojima fault

村上 英記<sup>1\*</sup>; 比嘉 哲也<sup>2</sup>; 鈴木 健士<sup>2</sup>; 吉村 令慧<sup>2</sup>; 後藤 忠徳<sup>3</sup>; 川崎 慎吾<sup>4</sup>; 大内 悠平<sup>5</sup>; 山口 覚<sup>6</sup>  
MURAKAMI, Hideki<sup>1\*</sup>; HIGA, Tetsuya<sup>2</sup>; SUZUKI, Takeshi<sup>2</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>2</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>3</sup>; KAWASAKI, Shingo<sup>4</sup>; OUCHI, Yuhei<sup>5</sup>; YAMAGUCHI, Satoru<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 高知大学教育研究部自然科学系理学部門, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 大阪市立大学理学部, <sup>6</sup> 大阪市立大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Natural Sciences Cluster-Science Unit, Research and Education Faculty, Kochi University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>4</sup>Disaster Prevention Research, Kyoto University, <sup>5</sup>Faculty of Science, Osaka City University, <sup>6</sup>Graduate School of Science, Osaka City University

1995年兵庫県南部地震(Mw6.9)の地表地震断層である野島断層の深さ1800mの断層破砕帯に対する注水実験期間中に、1800m注水孔および地表断層に近い500m孔の周辺にて自然電位の観測を実施した。注水期間は2013年9月15日から29日までで、注水の平均流量は2リットル/分、圧力5MPaでおこなわれた。野島断層における注水実験は、断層の回復過程をモニタリングする目的で1997年、2000年、2003年、2004年、2006年、2008年と実施されてきたが、いずれの実験でも深さ540m付近のパイプの継手部分からの流出であったことが孔内温度計のデータから推定されている。今回の注水実験では、540mからの漏水防止の工事をおこない注水を実施したので1800mの注水孔先端部から断層破砕帯への注水がおこなわれたものと推測される。しかし工事途中のトラブルのため孔内温度計による計測が実施されていないので注水深度に関する直接的な情報はない。

自然電位の観測を2013年9月6日から10月21日まで、従来の注水実験同様に1800m注水孔周辺にて実施した。また、今回初めて注水孔の北西約250mに位置する500m孔の周辺でも自然電位の観測をおこなった。1800m注水孔の周辺では18箇所(1800m孔、800m孔を電極とする2点を含む)、500m孔周辺では地表の9箇所および500m孔の中の4箇所の電極(深さ500m、440m、380m、および320m)を使い測定を実施した。1800m孔および800m孔のケーシング・パイプおよび500m孔内の電極を除く地表に設置した電極には銅-硫酸銅電極を使用した。1800m注水孔周辺の18箇所の自然電位については1秒間隔、500m孔周辺の13箇所については1分間隔で記録した。

1997年から2008年までの注水実験時の自然電位観測では、3つの特徴的な自然電位変動が観測されていた: 1) 注水の開始・停止に同期した自然電位変動、2) 注水孔周辺が負に変動する、3) 注水孔からの距離が大きくなると変動量が小さくなる。これらの自然電位の特性から、観測している自然電位変動は注水に伴う流動電位を観測しているものとして、同レベルの流量・圧力に対する自然電位変動が年々大きくなることを地下の水力パラメータが年々小さくなっていくものと推定した。この結果は、同時に観測している800m孔の湧水量の変化や歪データなどから推定されている結論と調和的であった。ただし、2006年くらいから一部の電極で逆センスの変動がみられるようになり、1800mケーシング・パイプも逆センスに変動することがわかっている。

今回の注水実験期間中に観測した自然電位変動は、最近の観測結果と異なり生データで注水の開始と停止との明瞭な対応が見られない。S/N比が悪いので断定できる状況にはないが特に停止に対応した回復が明瞭ではない。また、今回初めて観測した500m孔周辺でも1800m孔周辺と同期した自然電位変動が観測されている。これらの自然電位変動は地磁気変動による誘導電流によるものではないことは確認できている。

独立成分分析を用いた予察的な解析では、注水期間前半は振動的な変動であり後半には2mV程度の負側への自然電位変動が1800m注水孔近傍の電極では見られるがこの大きさは従来の変動と比べて極めて小さい。一部の電極や1800mケーシング・パイプでの電位が逆センスであることは2006年以降の観測と調和的である。注水作業に伴うノイズの影響と考えられる変動が大きくなるノイズ軽減策が必要であるが、従来の数mVから10mVを超える変動に比べて極めて小さな変化であった。今回観測されている注水期間中の自然電位変動の特性は、深さ1800mの断層破砕帯においてはまだ水が通りやすい状況にあるために発生する流動電位が小さいのか、1800m注水孔のケーシング・パイプが理想的な導体ではなく有限な比抵抗値を持つために地表での値が小さくなっているのかは、今後の検討課題である。

キーワード: 野島断層, 1995年兵庫県南部地震, 自然電位, 注水実験, 流動電位

Keywords: Nojima fault, 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, self-potential, water injection experiment, streaming potential

## 日本各観測所の地磁気変換関数の長期変化 Long-term variation of geomagnetic transfer function in Japan

竹田 雅彦<sup>1\*</sup>  
TAKEDA, Masahiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地磁気センター

<sup>1</sup>Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto Univ.

日本の観測所での地磁気変換関数の長期変化をデジタル 1 分値が利用できるようになった主に 1985 年以降について求めその長期変化を調べた。解析には外部場の変化の影響を小さくし、各日 4 時間ずつのデータを用いて月別に計算し、さらにそれらの年平均を算出した。その結果、各観測所とも夜間 0h-4hLT のデータを用いると季節変化はあるものの年平均をとることによりかなり安定した長期変化を見ることができた。その結果として長期的変化は概してほぼ全ての観測所に共通であり、それらには太陽活動度の変化を反映しているとみられるものも多いが、いくつかの観測所では特定の期間に特異的に変化しているケースも見出され、それらは地球内部電気伝導度変化に起因する誘導電流の変化を反映している可能性がある。詳しくは学会時に報告する予定である。

キーワード: 地磁気, 変換関数, 長期変化, 地球内部誘導電流, 地域差

Keywords: geomagnetism, transfer function, long-term variation, induced current, locality

## 岩石サンプルの高解像度比抵抗イメージングに向けた数値実験 Numerical simulations for the electrical prospecting of the rock samples

鈴木 健士<sup>1\*</sup>; 吉村 令慧<sup>2</sup>; 大志万 直人<sup>2</sup>  
SUZUKI, Takeshi<sup>1\*</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>2</sup>; OSHIMAN, Naoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所地震防災研究部門

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Earthquake Hazards Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地震発生域における活断層調査や熱水鉱床・石油資源開発を目的として、電気・電磁探査による比抵抗構造のイメージングが広く実施されている。電気・電磁探査は、他の物理探査手法に比べ流体に関する感度がよいという特徴があり、地殻における水の分布や熱構造などを探るための強力な探査手法である。

得られた比抵抗イメージから地下の情報を引き出す際には、母岩に対し、間隙水などの良導相のつながり方を仮定することで、比抵抗と地下構造の関係を推定している。このような解釈のプロセスでは、いくつかの分布モデルに従って良導体が連結し、バルクとしての性質を規定するという仮定のもと議論が行われている。そこで我々は、このような仮定をフィールドスケールにまで拡張するプロセスは、どのスケールまで適用可能であるのか議論したいと考えた。具体的には、ハンドサイズの岩石サンプル(大きさ10cm×10cm×10cm程度)に対する高解像度の比抵抗イメージングと、ほかの構造情報との対比による検証を計画している。検証に用いる岩石サンプルについては、X線CTスキャンによる非破壊岩石内部クラック構造観察が比較的容易に行えるほか、外力に対するAE波震源の詳細なマッピングなどが報告されており、比抵抗イメージとの多面的な対比が可能であると考えられる。このような内部構造情報から、どの程度の比抵抗が算出されるかをモデリングにより見積もることで、比抵抗イメージとどの程度の整合性がとれるのかを検証することができるだろう。

比抵抗イメージングには、高密度の電気探査を用いることを予定しているが、実験を行う前段階として、ハンドサイズの岩石サンプルに対する検出可能な不均質構造のスケールや、モデリングに最適な電極配置を見積もる必要がある。そこで本研究では、3次元電気探査の数値計算コードを開発し、数値実験による検討を進めている。開発したコードはDey and Morrison(1979)の手法を参考にしたものであり、任意の比抵抗3次元構造・電流ソースに対する、ポテンシャル場を有限差分法により計算するコードである。本発表では、数値コードの詳細と検討の結果を報告するとともに、今後の岩石実験について紹介する予定である。

キーワード: 岩石実験, 電気伝導度, 数値実験

Keywords: rock experiments, electrical conductivity, numerical simulations



## 草津白根火山における Volcano Loop 観測 Volcano-Loop observation at Kusatsu-Shirane volcano

日野 裕太<sup>1</sup>; 小川 康雄<sup>2\*</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 長谷 英彰<sup>2</sup>; 関 香織<sup>1</sup>  
HINO, Yuta<sup>1</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2\*</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; HASE, Hideaki<sup>2</sup>; SEKI, Kaori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学理学部地球惑星科学科, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

We have made successful measurement of time domain electromagnetic signals using transmitting and receiving loops at the same location. This system is being planned to work for monitoring the volcano vent.

The test measurement was conducted in the Kusatsu-Shirane volcano where detailed resistivity structure is known by audio-magnetotelluric method. The stepwise waveform was used and off-time response was measured using a transmitting and receiving loop both with 33m radius. The induced voltage was measured from the 0.1ms to 30ms. The observed voltages as a function of time in logarithm were inverted using Occam's algorithm and the model resistivity and resolution of the model were investigated. We also compared the result with those obtained by magnetotelluric method and found that the upper surface layers which have 1d structure are consistent with volcano loop results. We plan to use the system for repeated measurements or continuous monitoring the volcano in the future.

キーワード: 電磁誘導, 時間領域, ループ, 火山, モニタリング

Keywords: Electromagnetic induction, time domain, loop, volcano, monitoring

## 山田断層帯郷村断層（京都府京丹後市）の地下比抵抗構造の特徴 Electrical conductivity structure beneath the Gomura Fault (Kyotango, Kyoto)

大内 悠平<sup>1\*</sup>; 山口 覚<sup>2</sup>; 三島 稔明<sup>2</sup>; 小田 佑介<sup>2</sup>  
OUCHI, Yuhei<sup>1\*</sup>; YAMAGUCHI, Satoru<sup>2</sup>; MISHIMA, Toshiaki<sup>2</sup>; ODA, Yusuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪市立大学理学部地球学科, <sup>2</sup> 大阪市立大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Geosciences, Osaka City University, <sup>2</sup>Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University

### はじめに

断層には規模の大小にかかわらず Damage zone が伴われる。Damage zone とは断層ガウジの外側に発達し、断層運動に関連したすべての変形を含む領域である (Vermilye and Scholz, 1998)。Damage zone では空隙率が高く、水が浸入すると周りの岩石よりも比抵抗値が低くなる。そのため、地下の比抵抗構造を調べることで、地下の断層構造を推定することができる。

地下の比抵抗構造を調べる手法の1つに地磁気地電流法 (Magnetotelluric 法: MT 法) がある。MT 法とは、地球磁場の変動と、それによって大地に誘導される電場の変動とを同時に観測し、両者の振幅比と位相差から地下の比抵抗構造を推定する方法である。可聴波数帯 (10000Hz~1Hz 程度) の磁場変動を信号源とする MT 法を Audio-frequency Magnetotelluric 法 (AMT 法) と呼ぶ。AMT 法では、高い周波数帯の電磁場の変動を信号源として用いるため、地下数 km までの比較的浅い部分の比抵抗構造を高い分解能で描くことができる。また、1つの地点での観測に必要な時間が短いため、多数の観測点で観測を行うことができる。

山田断層帯は山田断層帯主部と郷村断層帯に分けられる。郷村断層帯は、郷村断層、丹後半島北西沖合の断層、仲禅寺断層などで構成される (地震調査委員会, 2004)。郷村断層は、京都府京丹後市に位置し、北北西-南南東方向に延びる断層である。1927年、マグニチュード 7.3 の北丹後地震に伴って出現した。陸上で確認される部分の長さは 13km に及び、郷村断層の延長上の沖合約 13km にも郷村断層と同じ走向の断層が認められている。また、岡田 (2002) より、破碎帯幅が 0.1m から 0.9m であることが確認されている。

郷村断層の東側約 2~3km のところには仲禅寺断層が、郷村断層の西側約 800m のところには郷西方断層が並走している。松田 (1990) の起震断層の定義に基づけば、郷村断層、丹後半島北西沖合の断層、仲禅寺断層、郷西方断層は、1つの断層帯を構成していると考えられる。

本研究では、郷村断層を横切る測線に沿って行った。AMT 探査の概要と地下比抵抗構造について報告する。

### 観測と解析

郷村断層を横切る約 4km の測線上に 12 点の観測点を設けた。また、Remote reference 処理を行うため、最東端の観測点から北東に 10km のところに磁場参照点を設置した。

それぞれの地点での夜間の観測データを基に、Phoenix 社 (カナダ) の解析ソフト SSMT2000 を用いて MT 応答関数を算出した。次に、Phase Tensor 法 (Caldwell et al., 2004; Bibby et al., 2005) を用い、比抵抗構造の次元を判定した。その結果を基に、Ogawa and Uchida (1996) による平滑化拘束付き 2 次元比抵抗構造モデルインバージョンコードを用いて深さ 1.5km までの 2 次元比抵抗モデル (GMR モデル) を求めた。

### GMR モデルの特徴

GMR モデルは 4 つの低比抵抗領域と 2 つの高比抵抗領域で特徴づけられる。

C1: 郷村断層地表トレースの南西側約 2km の深さ 0.15km 以深に存在する幅 1km の低比抵抗領域 ( $10^{2.5} \Omega \text{ m}$  以下)

C2: 郷西方断層地表トレース直下の深さ 0.15km~0.3km に存在する幅 0.75km の低比抵抗領域 ( $10^{2.5} \Omega \text{ m}$  以下)

C3: 郷村断層地表トレース直下の深さ 0.45km~1km に存在する幅 1.3km の低比抵抗領域 ( $10^{2.5} \Omega \text{ m}$  以下)

C4: 郷村断層地表トレースの北東約 2km の深さ 0.5km~1.4km に存在する幅 0.7km の低比抵抗領域 ( $10^{2.5} \Omega \text{ m}$  以下)

R1: 郷西方断層地表トレース直下深さ 0.4km の深さ 0.3km~1km に存在する幅 1.1km の高比抵抗領域 ( $10^3 \Omega \text{ m}$  以上)

R2: 郷村断層地表トレースの北東約 1km の深さ 0.25km~0.7km に存在する幅 1.6km の高比抵抗領域 ( $10^3 \Omega \text{ m}$  以上)

### 考察

郷村断層地表トレース直下の低比抵抗領域 C3 の幅は 650m 以上あることが検証された。Vermilye and Scholz (1998) の関係式から導いた Damage zone の片側幅と、低比抵抗領域 C3 の片側幅が同じ規模であった。また、郷村断層周辺で

SEM36-P04

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

は、岩石の部分溶融、岩石の温度上昇、導電性物質の存在によって低比抵抗領域ができるとは考えづらい。この低比抵抗領域 C3 は郷村断層の Damage zone に水が浸入したものと推定した。よって、郷村断層は深さ 0.45km から 1km に幅 650m のダメージゾーンが形成されていると解釈した。

キーワード: 郷村断層, 比抵抗構造, 地磁気地電流法, ダメージゾーン

Keywords: The Gomura Fault, electrical resistivity structure, Magnetotelluric(MT), Damage zone

## 中国・四国地方の比抵抗観測研究の概要 A Summary report on the investigations of an electrical resistivity structure beneath Chugoku and Shikoku regions, south

塩崎 一郎<sup>1\*</sup>; 宇都 智史<sup>1</sup>; 吉村 令慧<sup>2</sup>; 大志万 直人<sup>2</sup>; 久保 篤規<sup>3</sup>; 村上 英記<sup>4</sup>

SHIOZAKI, Ichiro<sup>1\*</sup>; UTO, Tomofumi<sup>1</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>2</sup>; OSHIMAN, Naoto<sup>2</sup>; KUBO, Atsuki<sup>3</sup>; MURAKAMI, Hideki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 鳥取大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所地震防災研究部門, <sup>3</sup> 高知大学理学部附属高知地震観測所, <sup>4</sup> 高知大学理学部応用理学科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Tottori University, <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>3</sup>Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University, <sup>4</sup>Department of Applied Science, Faculty of Science, Kochi University

本研究の目的は、地殻深部低比抵抗領域と地震活動の関連を明らかにするために、西南日本島弧の縦断方向ならびに横断方向の電気比抵抗構造断面を推定することである。このために、日本列島弧、西南日本弧を横断・縦断する電気比抵抗構造の調査研究から、主に山陰地域では、歪み集中帯外における地震発生と比較的長い期間噴火記録のない火山と地殻流体との関連を解明すること、内陸地震発生域と内陸地震空白域（第3種及び第四紀火山下）および深部低周波地震の構造的不均質性、また、四国地方では、地殻地震および深部低周波地震の発生様式と構造的地域性について、沈み込む海洋プレートから供給が想定される流体と関連づける観測研究を行っている。

これまでに京都大学防災研究所並びに鳥取大学工学部を中心とする研究グループは、山陰地方や四国地方外帯において電気比抵抗構造と地震活動の間に密接な関連がみられることを示してきた。例えば、山陰地方東部では（鳥取地震（1943年、M=7.2）の地震断層である吉岡・鹿野断層をはじめとして、鳥取県西部地震（2000年、M=7.3）等）顕著な地震の震源域およびそれらを含み日本海沿岸部に沿う帯状の地震活動域を横切る測線で深部地殻比抵抗構造調査を実施し、その結果、ほぼ東西方向に伸びる地震活動帯に沿って、高比抵抗領域である地震発生層の下、地殻深部に低比抵抗領域の存在を明らかにした。

しかしながら、尾崎他（2011）は、鳥取県中西部の地震（2002年、M<sub>j</sub>5.3）発生域の南北横断測線から推定された比抵抗モデルの特徴として地殻は全般的に高比抵抗であることを示した。この観測事実は、上述のこれまでに筆者を含む山陰地方の電気比抵抗を研究するグループが提唱してきたモデルと調和しない。さらに、塩崎他（2013）は、同地震発生域直近の2地点（志津および岡）の補観測により得られたデータの特徴から地殻深部に低比抵抗領域の存在を示唆した。これは前調査の観測データにはみられなかった新しい特徴である。僅か数kmしか離れていない地点で探查曲線の形状に違いがみられることになる。

すなわち、既存研究より東西方向に隣接する地域で指摘されたような山陰地方下の10 Ω m以下の深部低比抵抗領域がみられず、ここでは山陰地方の深部低比抵抗領域は連続して存在しない可能性がある。内陸地震が地震活動帯の直下の不均質構造に起因する局所的な応力集中により発生する（飯尾、2009）ならば、この不均質構造について、今後はさらなる面的な構造データの充実を図ることが必要であるとともにも既存データをもとにした広域の比抵抗構造の空間的特徴を明らかにする必要がある。

一方、四国地方においては、これまで、主に中央構造線南側の外帯で同様の調査を行い、その予察的な結果から、外帯の上部地殻内に顕著な低比抵抗領域が存在すること、それが中央部・西部では無地震域と明瞭な関連がみられることが示唆された。また、西南日本弧を横断する調査研究に関して島弧横断「山陰-山陽-四国地方（鳥取東部-岡山-香川-徳島-室戸）」測線の構造解析から得られた四国地方東部並びに中国地方東部の2次元比抵抗構造断面図と佐藤ほか（2005）やIto et al.（2009）の求めた詳細な地震反射波断面を比較検討し、いずれの地域でも比抵抗構造と反射法探查により示された反射断面と地質構造解釈との間に明瞭な対応関係がみられる領域が存在することを確認した。

このような観測事実は、低比抵抗領域をもたらすもの、おそらくは地殻流体（水）が、地震発生に関して重要な役割を果たす可能性を示す。その地殻流体の供給源の一つの候補として沈み込むフィリピン海プレートの脱水反応に伴う水が想定されるが、西南日本弧では、北部地域（中国地方）において海洋プレートの沈み込みの様子がまだ完全にわかっていない。西南日本弧において海溝から背弧側までの全体像をつかむ上でも、中国・四国地方広域の深部比抵抗構造探查をもとにした定量的な議論の展開が望まれる。従って、中国地方から四国地方にかけての島弧横断構造断面の作成に関しては、フィリピン海プレートの北限位置の問題にこたえるために、瀬戸内海側の未測定地域を中心とした構造調査が必要である。

本講演では、新たに得られた瀬戸内海側のデータを取り入れた中国・四国地方を横断する比抵抗構造解析の結果を示すとともに、同地方の広域の空間的な比抵抗構造の特徴について報告する。

キーワード: 電気比抵抗, 中国四国地方, 不均質

Keywords: electrical resistivity, Chugoku and Shikoku regions, heterogeneity



## 東北日本沈み込み帯背弧地域における比抵抗構造 Electrical resistivity features of the back-arc areas in the NE Japan subduction zone

市原 寛<sup>1\*</sup>; 多田 訓子<sup>1</sup>; 馬場 聖至<sup>2</sup>; 笠谷 貴史<sup>1</sup>; 市來 雅啓<sup>3</sup>; 海田 俊輝<sup>3</sup>; 小川 康雄<sup>4</sup>  
ICHIHARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; TADA, Noriko<sup>1</sup>; BABA, Kiyoshi<sup>2</sup>; KASAYA, Takafumi<sup>1</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>3</sup>; KAIDA, Toshiki<sup>3</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 東北大学, <sup>4</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>3</sup>Tohoku University, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

Electrical resistivity in the crust and upper mantle depends on the pore-fluid distribution, salinity, and connectivity of fluid-filled rock pores. Thus imaging of resistivity distribution based on magnetotelluric surveys gives us fundamental information about fluid distribution of subduction zones. Marine magnetotelluric survey is important to understand dynamics of the NE Japan subduction zone because dehydration of subducting Pacific plate occurs under the Japan Sea. In this study, we discuss resistivity distribution around back-arc areas in the NE Japan subduction zone based on the marine MT data.

We collected natural EM signals with ocean bottom electro-magnetometers (OBEMs) in the eastern Japan sea area between April and August 2013 by MR13-02A and NT13-18 JAMSTEC scientific cruises. In addition, 3 land MT stations were settled in islands in the Japan Sea (Tobishima, Awashima and Sado islands) between April and October 2013. These recorded time-series data were converted to a frequency-domain impedance tensor based on the BIRRP program [1]. The remote reference technique [2] was applied in the data processing using horizontal magnetic field data from Kakioka Station in the period range between 10 and 20000 seconds. As results, high-quality MT responses and geomagnetic tippers in both the trench and back-arc areas.

We calculated phase tensors [3] based on MT impedances by this and previous studies [4] to discuss re-sistivity distribution beneath the back-arc area. The phase tensor ellipse indicates high  $\Phi_{max}$  (>65 degrees) and  $\Phi_{min}$  (>50 degrees) in the long periods (>8000 seconds). Large  $\beta$  of phase tensor and large amplitude of geomagnetic transfer function are also shown. These features cannot be explained with bathymetry and sediment effects based on the 3-D forward modeling [5]. Thus strong three-dimensionality and deep conductor possibly distributed beneath the Japan sea. In order to discuss detailed resistivity structure, 3-D inversion approaches are required by using a newly developed 3-D MT inversion code for marine data to treat complicated ocean bottom and land topography [6].

**References:** [1] Chave, A. D. and D. J. Thomson, *Geophys. J. Int.* 157, 988-1006 (2004); [2] Gamble, T. D. et al., *Geophysics*, 44, 53-68 (1979); [3] Caldwell, T. G et al., *Geophys. J. Int* 158, 457-469 (2004); [4] Toh, H. et al., *Geophys Res Lett*, 33, L22309 (2006); [5] Baba, N. et al., *Geophys. J. Int* 158, 392-402 (2002); [6] Tada, N. et al., *Earth Planets Space*, 64, 10051021 (2012).  
Keywords: back arc, NE Japan subduction zone, magnetotelluric, OBEM, phase tensor

## 山崎断層帯主部のセグメントギャップにおける地下電気比抵抗構造 (2) Conductivity structure beneath the fault segment gap in the Yamasaki fault zone, south-west Japan (2)

小田 佑介<sup>1\*</sup>; 山口 覚<sup>1</sup>; 村上 英記<sup>2</sup>; 加藤 茂弘<sup>3</sup>; 上嶋 誠<sup>4</sup>; 三島 稔明<sup>1</sup>; 大内 悠平<sup>5</sup>  
ODA, Yusuke<sup>1\*</sup>; YAMAGUCHI, Satoru<sup>1</sup>; MURAKAMI, Hideki<sup>2</sup>; KATO, Shigehiro<sup>3</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>4</sup>; MISHIMA, Toshiaki<sup>1</sup>; OUCHI, Yuhei<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 大阪市立大院・理・地球, <sup>2</sup> 高知大・自然科学系・理学部門, <sup>3</sup> 兵庫県立人と自然の博物館自然・環境評価研究部, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所, <sup>5</sup> 大阪市大・理・地球

<sup>1</sup>Department of Geosciences, Graduate school of Science, Osaka City Univ., <sup>2</sup>Natural Sciences Cluster-Science Unit, Kochi Univ., <sup>3</sup>Division of Natural History, Hyogo Museum of Nature and Human Activities, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>5</sup>Faculty of Science, Osaka City University

### —はじめに—

断層運動に伴い断層周辺に生じた破碎域に水が浸入することによって、周囲に比べて電気比抵抗値が低い領域が形成されることが報告されている (e.g. Unsworth et al., 1997; Yamaguchi et al., 2010). このプロセスに注目し、断層周辺の比抵抗分布を知ることから、断層およびその周辺の地下構造を推定することが可能である。

地下の電気比抵抗分布を描き出す方法の1つとして、地磁気地電流法 (Magnetotelluric 法) がある。このうち、可聴周波数帯域の自然電磁場変動を用いた Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) 法は断層の地下構造、特に、地表から数 km の比較的浅部の構造探査に適している。

岡山県東部から兵庫県南東部にかけて位置する山崎断層帯は、那岐山断層、山崎断層帯主部および草谷断層からなる。山崎断層帯主部は全長約 79km の左横ずれ断層帯であり、最新活動時期の違いから、大原断層、土万断層、安富断層および暮坂峠断層からなる北西部活断層群と、琵琶甲断層と三木断層からなる南東部活断層群に区分されている。この断層帯で発生する地震の最大マグニチュードは、前者では 7.7 程度、後者では 7.3 程度と想定されている。さらに、山崎断層帯主部全体が連動して活動することも考えられており、その場合には、マグニチュード 8.0 程度の地震が発生する可能性があるとして指摘されている (地震調査委員会, 2013)。

山崎断層帯主部北西部と主部南東部の地震活動の連動性について議論するうえで、両部が完全に独立しているのか、地下深部では繋がっているのかは重要である。例えば、地表での断層トレースが不連続であっても地下で断層面が繋がっていれば、その領域を破壊が伝播し、両断層群が連動して活動する事が考えられる。そのため、2つの活断層群の間の断層トレースが途切れている領域 (セグメントギャップ) の地下構造を明らかにする事は重要である。

### —観測—

山崎断層帯北西部安富断層と南東部琵琶甲断層との間のセグメントギャップおよびその南方に位置する北西部暮坂峠断層の東方延長部を南北方向に横切る長さ約 16km の測線を設定し、測線上の 11 点で AMT 探査を行った。また、Remote reference 処理を行うため、測線の中央から北西に約 30km 離れた地点に磁場参照点を設けた。各観測点では昼間に観測装置を設置し、夜間に電場水平 2 成分と磁場 3 成分の測定を行った。

### —解析—

これまででは、電場と磁場のそれぞれの水平 2 成分から、Remote reference 法 (Gamble et al., 1978) に基づき、MT 応答関数を算出した。次に、Phase Tensor 法 (Caldwell et al., 2004) を用いて、Distortion 解析を行った後、Ogawa and Uchida (1996) の平滑化拘束付き 2 次元比抵抗法インバージョンコードを用いて、地下 4km までの 2 次元比抵抗モデルを求めた。

得られた比抵抗モデルでは、3つの低比抵抗領域で特徴づけられる。これらは、それぞれ、安富断層、暮坂峠断層、琵琶甲断層の地表トレースの延長線が測線と交わる領域の地下に認められた事から、地表では断層トレースが確認されていないが、観測測線の地下にはそれぞれの断層が存在していると結論づけた。

今回は、MT 応答関数に加えて、Induction vector の分布も考慮したインバージョン解析を行うことでより良い二次元比抵抗モデルを求め、その結果について報告する。

キーワード: 電気比抵抗構造, 活断層, 山崎断層帯, 地磁気地電流法

Keywords: conductivity structure, active fault, Yamasaki fault system, Magnetotellurics

## Electrical Resistivity Imaging at Western Turkey by Wideband Magnetotelluric Method Electrical Resistivity Imaging at Western Turkey by Wideband Magnetotelluric Method

Tuncer Mustafa Kemal<sup>1\*</sup> ; CENGIZ Ozlem<sup>2</sup> ; TANK Bulent<sup>3</sup> ; TOLAK-CIFTCI Elif<sup>4</sup> ; KAYA Tulay<sup>5</sup> ; OGAWA Yasuo<sup>6</sup> ; HONKURA Yoshimori<sup>7</sup> ; MATSUSHIMA Masaki<sup>8</sup> ; OSHIMAN Naoto<sup>9</sup> ; CELIK Cengiz<sup>10</sup>  
TUNCER, Mustafa kemal<sup>1\*</sup> ; CENGIZ, Ozlem<sup>2</sup> ; TANK, Bulent<sup>3</sup> ; TOLAK-CIFTCI, Elif<sup>4</sup> ; KAYA, Tulay<sup>5</sup> ; OGAWA, Yasuo<sup>6</sup> ; HONKURA, Yoshimori<sup>7</sup> ; MATSUSHIMA, Masaki<sup>8</sup> ; OSHIMAN, Naoto<sup>9</sup> ; CELIK, Cengiz<sup>10</sup>

<sup>1</sup>Istanbul University-Turkey, <sup>2</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>3</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>4</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology, Japan, <sup>6</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>7</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>8</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>9</sup>Kyoto University-Japan, <sup>10</sup>Bogazici University-Turkey

<sup>1</sup>Istanbul University-Turkey, <sup>2</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>3</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>4</sup>Bogazici University-Turkey, <sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology, Japan, <sup>6</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>7</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>8</sup>Tokyo Institute of Technology-Japan, <sup>9</sup>Kyoto University-Japan, <sup>10</sup>Bogazici University-Turkey

The westward migration of large magnitude earthquakes along the North Anatolian Fault Zone indicates that a major event may take place at and around the Marmara region, following the Izmit (Mw7.4) and Duzce (Mw7.2) earthquakes that took place in 1999 in northwest Turkey. For this reason many studies were conducted around Marmara sea, west of these events. These studies focused mostly on the northern part of this area because of the high damage risk near Istanbul, but the similar potential is also present for the southern Marmara. In order to investigate the upper crustal electrical resistivity structure at this location, wide-band magnetotelluric data were collected at sixteen sites forming two parallel profiles. These profiles were constructed to cross the southern branches the North Anatolian Fault. Following the application of Groom and Bailey decomposition that has been applied to remove the surplus features and to deduce the appropriate geo-electric strike direction which is an important requirement for two-dimensional interpretation, an inversion algorithm developed by Ogawa and Uchida (1996) was utilized to develop electrical resistivity models. These models pointed out a relatively complicated shallow (surface-to-5 km) structure which may be associated with the presence of crustal fluids, but below these depths the electrical resistivity is more uniform with only a deep conductor appearing beneath the northern ends of the two profiles. The known faults in the survey area correlate well with the features characterized in the final geo-electric models. A resistive-conductive boundary between Manyas - Karacabey basin and Bandirma-Karadag uplift on the western and Uluabat uplift and Mudanya uplift on the eastern profiles may be associated with the South Marmara Fault.

キーワード: North Anatolian Fault, Fluids, Electrical resistivity, Magnetotellurics, geo-electric models  
Keywords: North Anatolian Fault, Fluids, Electrical resistivity, Magnetotellurics, geo-electric models

## 津波早期警戒のための陸上地磁気三成分観測点 Installation of a Vector Magnetometer for a Ground-based Tsunami Early Warning

川嶋 一生<sup>1\*</sup>; 藤 浩明<sup>2</sup>; 吉村 令慧<sup>3</sup>; 藤井 郁子<sup>4</sup>; 仰木 淳平<sup>4</sup>; 阿部 聡<sup>5</sup>  
KAWASHIMA, Issei<sup>1\*</sup>; TOH, Hiroaki<sup>2</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>3</sup>; FUJII, Ikuko<sup>4</sup>; OOGI, Junpei<sup>4</sup>; ABE, Satoshi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所地震防災研究部門, <sup>4</sup> 気象庁地磁気観測所, <sup>5</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Earthquake Hazards Division, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, <sup>5</sup>GeoSpatial Information Authority of Japan

Conductive sea water moving in the geomagnetic main field generates electromagnetic variations by a physical process called the oceanic dynamo effect. This effect at the time of tsunami passages was recently detected on the seafloor in the northwest Pacific (Toh et al., 2011) and on Easter Island (Manoj et al., 2011). The tsunami-induced electromagnetic field is expected to contribute to existing global tsunami warning systems.

We are carrying out a project that aims to observe geomagnetic variations associated with tsunami passages by ground-based real-time observations. This project requires a pair of geomagnetic observation sites for clear detection of tsunami events. The geomagnetic coast effect and the external field due to ionospheric and/or magnetospheric disturbances can be removed by taking real-time differences between a coastal and an inland geomagnetic sites. We installed a vector magnetometer at Umaji located in the middle of Muroto Peninsula, where artificial electromagnetic noises are very small. This location is selected as a counterpart of the existing observation site at Muroto located at the tip of the peninsula, which is operated by Geospatial Information Authority of Japan (GSI).

In this presentation, we will make a progress report on our ground-based tsunami warning system consisting of a pair of vector magnetometers. This system is intended to detect the geomagnetic field variations induced by tsunamis at the time of Nankai/Tonankai earthquakes.

キーワード: 地磁気, 津波

Keywords: Geomagnetism, Tsunami



気象庁父島地磁気観測点で得られた数例の津波誘導磁場の記録  
The several Records of tsunami induced magnetic field obtained by the JMA Chichijima observation station(CBI).

館畑 秀衛<sup>1\*</sup>; 浜野 洋三<sup>2</sup>  
TATEHATA, Hidee<sup>1\*</sup>; HAMANO, Yozo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁, <sup>2</sup> 海洋開発研究機構  
<sup>1</sup>JMA, <sup>2</sup>JAMSTEC

津波によって導電性のある海水が流動する時、地球磁場との相互作用によって起電力が生じ、さらに誘導磁場が励起される。父島(CBI)観測点は、太平洋に浮かぶ島の観測点であることから、津波による誘導磁場の記録を期待し、観測データが安定した1995年からの秒値データを、父島二見検潮所の検潮記録と対比して精査したところ、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波を含め、合計9例に津波誘導磁場が認められた。上の津波に加えて明瞭な現象記録は、1996年2月17日イリアンジャヤ地震津波、2010年2月27日チリ中部沿岸の地震津波であった。父島(CBI)では、概ね高さ20cm以上の津波から津波誘導磁場が認められる。ただ、高さ30~40cmの津波であっても磁気嵐によって判別不可能な場合があるが、高さ1m以上であれば、ほぼ確実に津波による誘導磁場の記録が得られそうである。標本数が限られているため暫定的であるが、津波の高さ(半振幅) $\eta$ と誘導磁場の振幅 $Z$ との回帰式も得られた。この様に一観測点で9例の津波の誘導磁場記録が得られたことは、世界的にも例がないと思われる。これらの記録と若干の解析結果を紹介する。

キーワード: 津波, 誘導磁場, 父島  
Keywords: tsunami, Induced magnetic effects, chichijima

## 伊豆半島東部における地殻の上下変動と関連する地磁気全磁力変動 Geomagnetic total intensity variations associated with vertical crustal movement in the eastern part of Izu Peninsula

笹岡 雅宏<sup>1\*</sup>; 小河 勉<sup>2</sup>  
SASAOKA, Masahiro<sup>1\*</sup>; OGAWA, Tsutomu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地磁気観測所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

伊豆半島東部地域では、群発地震活動・異常地殻活動に関連する地磁気変化を検出するために大学等研究機関により地磁気全磁力連続観測が行われている。この地域の群発地震は、主にマグマの貫入に伴って発生すると考えられている。マグマ貫入に伴う火山性の群発地震の場合は、岩石の持つ磁気の強さが岩石の温度や応力に応じて増減するため地磁気は変化する。気象庁地磁気観測所もこの地域で1990年代末から全磁力連続観測を実施していたが、2010~2012年にかけて、伊東市と熱海市の境界付近の御石ヶ沢から伊東市の市街地に近い玖須美元和田に連続観測点を移設し全磁力観測を継続した。玖須美元和田は、2009年12月に発生した伊豆半島東方沖地震の震央に近い。玖須美元和田での観測期間中、主なイベントとして2011年3月の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動やその後7月と9月に伊豆半島東方沖で発生した小規模な群発地震がある。2010~2012年の調査期間中、地震活動については2011年が比較的活発であったのを除けば静穏であった。この期間中は、火山性の地震活動は無かったと判断されている。全磁力連続データについては外部磁場変動成分や年周変化等を除去する解析を施した上で利用した。

地殻の隆起に伴う圧力効果が全磁力変化に与える影響を確認するために、気象庁地磁気観測所及び東京大学地震研究所の全磁力連続データと国土地理院が公開しているGPS（汎地球測位システム）を用いて測定された測地高度の日々変動とを比較することにより、全磁力変動と地殻の上下変動との関連について調査した。2010~2012年の期間中は地殻の上下変動については季節的な変化が見られたが、2010年より2011年の方が上下変動の振幅は小さかった。全磁力については、2010年の地震活動が静穏な期間から2011年の地震活動が比較的活発な期間にかけて地殻の上下変動に対応した全磁力の増減、そして2011年の群発地震終息後10月頃に地殻の上下変動を伴わない全磁力の減少などが見られた。また、2012年の地震活動が静穏な期間では有意な全磁力変化は見られないことが分かった。結局、地殻の隆起に伴い期待されるピエゾ磁気変化は有意には観測されなかった。観測された全磁力変化の定性的な理解のため、2009年12月のマグマ貫入に伴う群発地震に関係する地下の熱変化が2011年10月頃まで継続し、地殻の上下変動に伴い地下の熱水が変位することにより地磁気全磁力の増減変動が2010~2011年にかけて観測され、2012年には地下の熱活動を伴わないため地殻が上下変動を示す時期に全磁力変化は見られなくなったと推論された。つまり地下の熱活動は、2010~2011年の期間で強化されることなく衰弱し、2011年10月以降の熱供給の途絶に伴う温度降下による帯磁をもって終結した。観測された顕著な全磁力変化については、地震（断層のずれ）と直接には関係なく、岩石の応力変化よりはむしろ地下の熱変化が原因で生じた結果である可能性が高いと考えられる。

キーワード: 伊豆半島東部, 地磁気全磁力, 地殻変動, 熱活動

Keywords: eastern part of Izu Peninsula, geomagnetic total intensity, crustal movement, hydrothermal activity

## 応力磁気効果起源の電磁場変動計算における無限媒質近似の妥当性 Validity of using space approximation in calculating EM variations generated by the piezomagnetic effect

山崎 健一<sup>1\*</sup>  
YAMAZAKI, Ken'ichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学  
<sup>1</sup> Kyoto University

地殻内部で応力変化が生じると、応力磁気効果を介して地表での磁場変化が生じる。この磁場変化は、いくつかの仮定のもとで次のように計算することができる。適当な応力磁気効果の構成則と応力分布を仮定すれば地殻内の各点における磁化変化が計算される。十分な時間が経過した後の磁場変化は、地殻内の各点における磁化変化が作る静磁場を積分することで求められる。この方法で、点膨張源や矩形断層の一様変位などから生じる磁場変化の表現式が求められている。それは測地データの逆解析とは独立な応力源位置情報を磁場変化の観測値から推定するためなどに利用できる。

近年、地震発生等による応力変化発生後ただちに発生する磁場変化が報告されており、その主要な原因も応力磁気効果であろうと考えられている [Okubo et al. 2011, EPSL]。しかしこの場合、十分な時間が経過したとみなして計算した結果が妥当か否かは検討が必要である。磁化の時間変化をあらわに考えるためには、静磁場を扱うのではなく、時間変化する電磁場を扱う必要がある。その際に重要なパラメータは、地殻の電気伝導度である。簡単な状況のひとつとして、有限電気伝導度をもつ大地と絶縁大気からなる二層モデルを仮定した場合に応力磁気効果から生じる電磁場を計算した結果からは、有限電気伝導度媒質の存在が生じる磁場の時間変化を明確に変化させることが示されている。すなわち、地震発生直後などの磁場変化を正確に求めるためには、電気伝導度の影響は無視できないといえる。そのため、点膨張源や矩形断層の一様変位などから生じる磁場変化の表現式を、電気伝導度媒質に対する結果に修正する必要がある。

しかし、単純な半無限媒質であっても、その表現式は複雑であり、点膨張源や矩形断層の一様変位に適用することは困難である。もしもこれを、全無限媒質で置き換えることが許されるならば、問題の対称性が高いために解析は著しく容易になる。応力磁気効果起源の電磁場変動の観測は通常地表付近で行われるから、無限媒質として計算した結果と半無限媒質として計算した結果が地表、すなわち媒質境界付近で十分な精度で一致していれば、置き換えが許される、といえる。

そこで本報告では、半無限媒質を無限媒質で置き換えることによって、結果にどの程度の違いが生じるのかを、解析解が比較的容易に得られる二次元問題を用いて論じる。なお、本講演申込み時点では2次元の結果しか得られていないが、3次元での結果が得られたら、これを合わせて報告する。

キーワード: 応力磁気効果, 電磁場変動, 電気伝導度, 半無限媒質, 無限媒質

Keywords: piezomagnetic effect, electromagnetic field, electrical conductivity, infinite space, semi-infinite space

## ウィルソン法による古地磁気強度測定 Testing paleointensity determination using Wilson method

福間 浩司<sup>1\*</sup>; シェルバコフ ヴアレリイ<sup>2</sup>; シェルバコワ ヴァーリヤ<sup>2</sup>  
FUKUMA, Koji<sup>1\*</sup>; SHCHERBAKOV, V. P.<sup>2</sup>; SHCHERBAKOVA, V. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 同志社大学理工学部, <sup>2</sup> ロシア科学アカデミー・ボロク地球物理学研究所

<sup>1</sup>Dept. Env. Sys. Sci., Doshisha Univ., <sup>2</sup>Borok Geophysical Observatory, Russian Academy of Sciences

古典的なテリエ法は未だ古地磁気強度測定のための最も信頼できる方法だが、非常に厳しい、まれにしか満たされない条件 — 自然残留磁化 (NRM) はすべての温度区間で実験室の熱残留磁化 (TRM) に置き換えられる — を必要とする。かなりの量の多磁区粒子が存在する場合、この条件は成立せず、アライ図に見られる曲線から誤った古地磁気強度が得られることになる。

非常に原始的 (e.g., Folgheraiter [1899]) だが本質的にショー法にも使われているような単一ステップ加熱法は、テリエ法に要求される厳格な条件を回避することができる。ウィルソン法は単一ステップ加熱法の一つであり、約半世紀前に提案された (Wilson [1961, 1962])。NRM を高温で連続的に消磁して測定し、同様に実験室で与えた TRM を消磁して比較することで古地磁気強度が得られる。ウィルソン法がこれまでほとんど古地磁気強度測定に使われなかった理由は、磁化を高温で測定する必要があるためである。一方この方法は他の古地磁気強度法より非常に迅速である利点をもっている。自動化された高温磁力計を使用すれば、1-cc キューブを用いたウィルソン法による測定を1時間以内に完了することができる。

三宅島における1983年噴火(地球磁場:  $45.1 \mu\text{T}$ )の玄武岩とスコリアの27個の1-cc キューブを用いてウィルソン法に基づく古地磁気強度測定を行った。1-cc キューブを Borok 地球物理研究所の Orion 三成分試料振動型磁力計を用いて毎分約  $40^\circ\text{C}$  で空気中で加熱し、同時に高温で NRM 3成分を測定した。磁化が初期値の1%未満に低下すると加熱を中止し、 $45 \mu\text{T}$  の磁場中で冷却して TRM を付与した。TRM も NRM と同様に連続的な熱消磁を行った。

測定したサンプルの85%で NRM — TRM 図上にきれいな直線を見た。アンブロッキング温度スペクトルの形状が NRM と TRM の間で本質的に変化していないことを示す。約半分のサンプルから予想される古地磁気強度を得た。隣り合うサンプルのテリエ法も期待される磁場強度を与えたが、幾つかのサンプルではうまくいかなかった。他の半分のサンプルでは、NRM — TRM の直線の傾きが1から大きくずれ、高いまたは低い値に外れた。このことは、熱変質(磁区の変質は含まない)が TRM 容量を増加させたり減少させたりしたが、アンブロッキング温度スペクトルの形状は変化しなかったことを意味する。このような熱変質は NRM — TRM 図では検出されないが、誤まった古地磁気強度を与える可能性がある。

ウィルソン法は、迅速かつ多磁区粒子を含むサンプルにも使えるが、熱変質は必ずしも NRM — TRM 図上の直線性から検出されないことに注意する必要がある、このことは他の単一ステップ加熱法にも当てはまる。

キーワード: 古地磁気強度, ウィルソン法, テリエ法, 高温磁力計

Keywords: paleointensity, Wilson method, Thellier method, high-temperature magnetometer



## 火山岩の古地磁気強度実験におけるチタン磁鉄鉱粒子の顕微鏡観察 Microscopic observation of titanomagnetite grains during paleointensity experiments of volcanic rocks

田中 秀文<sup>1</sup>; 山本 裕二<sup>2\*</sup>

TANAKA, Hidefumi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Yuhji<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 高知大学 教育学部, <sup>2</sup> 高知大学 海洋コア総合研究センター

<sup>1</sup>Faculty of Education, Kochi University, <sup>2</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University

Titanomagnetite (Tmt) grains, some partially maghemitized, of various oxidation levels were microscopically observed under reflected light as a function of temperature step in a Königsberger Thellier Thellier experiment in air. The reflected light microscopy indicated that the brownish colour of homogeneous Tmt turned blue at  $\sim 300$  °C. This false blue colour was caused by submicron scale rugged stripes on the surface, according to scanning electron microscope observations, which was made after the final heating step. The typical grey-to-bluish colour of maghemitized parts of Tmt grains turned to a brownish colour at  $\sim 300$  °C, indicating inversion of titanomaghemite to a mixture of magnetite and ilmenite (Ilm) or haematite (Hem). Although these observations were from Tmt grains on the sample surface, oxidation must have proceeded similarly within samples because the surface changes in the Tmt grains were highly correlated with behaviour of data points on Arai plots. Alterations in Tmt after heating at 610 °C in air for increasing times from 10 to 500 min were evaluated by reflected light microscopy and scanning electron microscopy at the end of the experiment. Mottled patches gradually emerged in the Tmt grains during subsequent heatings. However, the formation of new Ilm lamellae was not observed, even after the final 500 min heating. In conclusion, the alteration of Tmt during laboratory heating in air at  $\sim 600$  °C is likely not due to the typical high-temperature oxidation that forms trellis-type Ilm lamellae. Below  $\sim 400$  °C, the process should be closer to low-temperature oxidation. On the other hand, maghemitized parts of Tmt grains invert instantaneously at 300 °C, and a trellis-type structure with Hem lamellae soon emerges when heated at 610 °C.

## 8～11世紀の岡山県における考古地磁気強度の傾向 Archeointensity trend between 8th and 11th century in Okayama

北原 優<sup>1\*</sup>; 山本 裕二<sup>2</sup>; 畠山 唯達<sup>3</sup>; 鳥居 雅之<sup>4</sup>; 亀田 修一<sup>5</sup>

KITAHARA, Yu<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Yuhji<sup>2</sup>; HATAKEYAMA, Tadahiro<sup>3</sup>; TORII, Masayuki<sup>4</sup>; KAMEDA, Shuichi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 高知大学 大学院 総合人間自然科学研究科, <sup>2</sup> 高知大学 海洋コア総合研究センター, <sup>3</sup> 岡山理科大学 情報処理センター, <sup>4</sup> 岡山理科大学 総合情報学部 生物地球システム学科, <sup>5</sup> 岡山理科大学 生物地球学部 生物地球学科

<sup>1</sup>Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University, <sup>2</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, <sup>3</sup>Information Processing Center, Okayama University of Science, <sup>4</sup>Faculty of Informatics, Okayama University of Science,

<sup>5</sup>Faculty of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science

本発表では、岡山県備前市佐山地区における8～11世紀までの期間に属する3サイトの考古地磁気強度の推定値を提示する。用いた焼土試料は、同地区における奈良～平安時代の窯業発展史の解明を主な目的とする考古学的なプロジェクト（岡山理科大学考古学研究室, 2012; 2013）の中で実施された5回の調査の際に、発掘された須恵器古窯跡の床面および壁面より採取されたものである。年代値は、陶器型式編年（e.g. 中村, 2006）に準拠する考古学年代を採用すると、3サイトの内、佐山新池1号窯跡と佐山東山窯跡は8世紀後半（? 775 ± 25年）、佐山東山奥窯跡は10世紀周辺（? 900 ± 50年）である（岡山理科大学考古学研究室, 2012; 2013）。

岩石磁気実験と段階熱消磁実験の結果、(1)これらの試料は加熱に対して安定であり、(2)試料の形状異方性も小さく、(3)磁性粒子集団の大部分が数%のチタンを含むチタノマグネタイトでありブロッキング温度が高いことが分かっている。新池窯からは15個の焼土試料から19試片、東山窯からは10個の焼土試料から10試片、東山奥窯からは9個の焼土試料から19試片を整形し、IZZI テリエ法（2回加熱法; Yu & Tauxe, 2005）による古地磁気強度測定を行った。厳密に設定した合格基準をパスした測定結果から得られた考古地磁気強度は、新池窯が  $61.6 \pm 4.4 \mu\text{T}$  (N=4)、東山窯が  $51.8 \pm 6.5 \mu\text{T}$  (N=8)、東山奥窯が  $49.8 \pm 9.8 \mu\text{T}$  (N=9) となった。これらの値は、予察的に実施した綱川 - ショー法（Tsunakawa and Shaw, 1994; Yamamoto et al., 2003）により得ている強度とも矛盾しない。我々のデータを日本における最新の考古地磁気強度データのコンパイル結果（Yoshihara et al., 2003）と比較すると、3サイトともにデータのばらつきは大きいものの、おおよそ整合的である。平均的な傾向に着目すれば、紀元後600年以降に見られる著しい強度減少の様子についても矛盾していないことが確認できる。

キーワード: 考古地磁気強度, IZZI テリエ法, 綱川 - ショー法, 須恵器古窯

Keywords: Archeointensity, IZZI-Thellier method, Tsunakawa-Shaw method, Old kilns of Sue wares

## 溶結凝灰岩による絶対古地磁気強度測定：相対古地磁気強度と絶対古地磁気強度の対比

### Absolute paleointensity determinations of welded tuffs: Correlations between relative and absolute paleointensity data

藤井 哲夢<sup>1</sup>; 望月 伸竜<sup>2\*</sup>; 長谷川 健<sup>3</sup>; 岡田 誠<sup>3</sup>; 渋谷 秀敏<sup>1</sup>

FUJII, Satomu<sup>1</sup>; MOCHIZUKI, Nobutatsu<sup>2\*</sup>; HASEGAWA, Takeshi<sup>3</sup>; OKADA, Makoto<sup>3</sup>; SHIBUYA, Hidetoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学自然科学研究科, <sup>2</sup> 熊本大学大学院先端機構, <sup>3</sup> 茨城大学理学部

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Science, Kumamoto University, <sup>2</sup>Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University, <sup>3</sup>Department of Earth Science, Faculty of Science, Ibaraki University

Absolute geomagnetic paleointensities (APIs) have been estimated from igneous rocks, while relative paleomagnetic intensities (RPIs) have been reported from sediment cores. These two datasets have been treated separately, as correlations between APIs and RPIs are difficult on account of age uncertainties. We present a procedure for directly correlating APIs with RPIs of a RPI stack. Correlations between APIs and RPIs were conducted with virtually no associated age errors using both tephrochronologic correlations and RPI minima. Using the stratigraphic positions of tephra layers in oxygen isotope stratigraphic records, we directly compared the RPIs and APIs reported from welded tuffs contemporaneously extruded with the tephra layers. In addition, RPI minima during geomagnetic reversals and excursions were compared with APIs corresponding to the reversals and excursions. The comparison of APIs and RPIs at these exact points allowed a reliable calibration of the RPI values. In this study, we applied the Tsunakawa-Shaw method to 21 welded tuffs to increase API dataset. We obtained mean paleointensities for 16 of the 21 welded tuffs. Since eight of the 16 welded tuff units were correlated with the oxygen isotope stratigraphy, they can be added to the API data used in the correlation procedure. Combining these API data with the reported data, we correlated API data with RPIs from the PISO-1500 stack and SINT-800 stack. For 13 correlation points, RPIs of the PISO-1500 stack showed a linear relationship with virtual axial dipole moments (VADMs) calculated from the APIs, indicating that the PISO-1500 stack has a linear relation to the axial dipole moment. On the other hand, RPIs from the SINT-800 stack has a trend with VADMs and the correlation coefficient is lower than that of the PISO-1500 stack. The correlation procedure with increased API data can contribute to constraining the relation between RPI of a RPI stack and API and calibrating a RPI stack to absolute values.

キーワード: 絶対古地磁気強度, 相対古地磁気強度, テフラ, 酸素同位体比層序, 溶結凝灰岩

Keywords: absolute paleointensity, relative paleointensity, tephra, oxygen isotope stratigraphy, welded tuff

## Rock magnetic study of the North Atlantic sediment during late Pliocene and early Pleistocene

佐藤 雅彦<sup>1\*</sup>; 大野 正夫<sup>1</sup>; 林 辰弥<sup>2</sup>; 桑原 義博<sup>1</sup>; 宮川 千鶴<sup>1</sup>; 藤田 周<sup>1</sup>; 北 逸郎<sup>1</sup>

SATO, Masahiko<sup>1\*</sup>; OHNO, Masao<sup>1</sup>; HAYASHI, Tatsuya<sup>2</sup>; KUWAHARA, Yoshihiro<sup>1</sup>; MIYAGAWA, Chizuru<sup>1</sup>; FUJITA, Shu<sup>1</sup>; KITA, Itsuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>御船町恐竜博物館

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>Mifune Dinosaur Museum

As the ocean is a major component in the climatic system, it is crucial for palaeoclimatic study to understand the past evolution of the thermohaline circulation. The North Atlantic Ocean is one of the most important sea areas because newly formed deep water mass is redistributed to the global ocean from there (Broecker et al., 1991). In order to recover the past change in deep ocean circulation at the North Atlantic Ocean, a variety of proxies have been studied. However, the change during Pleistocene and Pliocene is still poorly understood.

In this study we conducted rock magnetic measurement of deep-sea sediments recovered from IODP Site U1314 on the Gardar Drift, to investigate the past change in bottom current flows at the North Atlantic Ocean. Since a coercivity of magnetic mineral varies sensitively with its state such as chemical composition, grain size, grain shape, stress, and so on, coercivity spectra can be used as a proxy for the constituent spectra of the sediment.

The samples were collected at 16 - 50 cm resolution from 199.3 to 262.5 mcd of the core, which corresponds to the age between 2.22 and 2.75 Ma according to the age model by Hayashi et al. (2010). Rock magnetic properties were measured for these samples using a MicroMag 2900 Alternating Gradient Magnetometer. The isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curve was obtained by the application of stepwise-increasing uniaxial fields to the sample at 30 steps from 1 mT to 1 T. The ratio of IRM acquired in a back-field of 0.1 T to that in a forward-field of 1 T (S-ratio) was also measured for all samples.

In order to reveal constituents of the sediment, decomposition of coercivity spectra were conducted. The IRM acquisition curve was normalized by the IRM intensity at 1 T and then the first derivative of the curve was calculated with respect to log<sub>10</sub> field (hereafter referred to as IRM gradient curve). The least square fit was performed so as to decompose the IRM gradient curve into linear combination of two end-members. Two end-member components were calculated by averaging the IRM gradient curves of selected samples. Samples with low S-ratio (<0.57) and younger than 2.4 Ma were chosen for component 1. Samples with high S-ratio (>0.88) and during MIS100, which were associated with the ice rafted debris, were chosen for component 2. These components were distinctly different from each other; coercivity distribution of component 1 was magnetically harder than that of component 2.

In consequence of the decomposition, the fitting error was significantly small for all samples, indicating that North Atlantic sediments in the Gardar Drift during late Pliocene and early Pleistocene are explained by mixing of two end-member components. The fraction of two components periodically changes with time and agrees well with the LR04  $\delta^{18}\text{O}_{\text{benthic}}$  stack (Lisiecki and Raymo, 2005): the high-coercivity component dominated during interglacial periods, and the low-coercivity component dominated during glacial periods.

On the basis of the elemental ratio of potassium to titanium (K/Ti), Grutzner and Higgins (2010) reported change in proportion of sources of sediment at Site U1314 during the last 1.1 Ma. They demonstrated that Ti-rich basaltic material transported by the Iceland-Scotland Overflow Water and K-rich particle (continental rock like) derived from the other source dominated during interglacial periods and glacial periods, respectively. Our result is consistent with their result because high-coercivity and low-coercivity components are interpreted as the fine-grain titanomagnetite of Icelandic sources and the coarse-grain magnetic mineral of continental sources, respectively. Therefore the change in fraction of two end-member components represents change in fraction of bottom currents, and the bottom current flow patterns similar to those during the last 1.1 Ma might prevail at the North Atlantic Ocean during late Pliocene and early Pleistocene.

Keywords: North Atlantic Ocean, Deep-sea Sediment, IRM acquisition curve, Bottom current flow



## 南鳥島周辺海域の高レアアース含有赤色粘土の磁気特性 Magnetic properties of REY rich red clay near Minami-Torishima in the Pacific Ocean

山崎 俊嗣<sup>1\*</sup>; 臼井 洋一<sup>2</sup>; 下野 貴也<sup>3</sup>  
YAMAZAKI, Toshitsugu<sup>1\*</sup>; USUI, Yoichi<sup>2</sup>; SHIMONO, Takaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科  
<sup>1</sup>AORI, University of Tokyo, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>University of Tsukuba

Red clay accumulates slowly on the seafloor deeper than CCD in mid-latitudes. Paleoceanographic and paleomagnetic studies were limited so far because red clay does not yield microfossils that can be used for precise age estimation and sedimentation rates were extremely low, less than a few meters per million years. However, red clay has attracted interest since Kato et al. (2011) reported that red clay rich in REY (rare-earth elements and yttrium) distributes widely in the Pacific Ocean. In this paper, we present magnetic properties of red clay cores obtained from the seafloor near Minami-Torishima during the R/V Kairei KR13-02 cruise. From these cores, extremely high REY contents were reported (Fujimoto et al., 2013, JpGU; Suzuki et al., 2013, JpGU). We will discuss a possible relationship between REY content and magnetic properties.

It is known in red clay that magnetostratigraphy can be established back to only ~3 Ma, and this also holds for the KR13-02 cores. However, noisy but rather coherent inclinations were obtained throughout the cores even where polarity reversal patterns were obscure. Although a possibility that these directions are of magnetic overprint cannot be excluded, the observed inclinations are not much lower than that expected from the GAD model at the present latitude. This may suggest that the sediments including the intervals of high REY content are not very old, possibly Eocene to Oligocene or younger in age, and that they deposited in the northern latitudes not very far from the present sites. This result is not consistent with the idea that the high REY content is influence of hydrothermal activity along the East Pacific Rise. The cores showed a common magnetic susceptibility variation pattern, and a peak of REY content occurs just below an interval of high magnetic susceptibility. The REY peak coincides with a sharp upward decrease in the ratio of ARM to SIRM, which indicates an increase of the mean magnetic grain size and/or an increase in the proportion of detrital to biogenic magnetic mineral component. These results suggest that the increased REY concentration may have occurred in association with a paleoceanographic event.

Keywords: red clay, REY, rock magnetism, environmental magnetism, Pacific, Minami-Torishima

## パルス強磁場中の磁化過程高速測定システムとその岩石磁気への応用 A method for measuring rapid magnetization change in high field using a pulse magnetizer: A new rock magnetic approach

小玉 一人<sup>1\*</sup>  
KODAMA, Kazuto<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 高知大学海洋コア総合研究センター

<sup>1</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University

簡便に強磁場を発生できるパルス磁化器 (pulse magnetizer) は、IRM 着磁装置として広く岩石磁気研究に用いられている。いくつかの市販品があるが、それらの発生磁場の形状は、やや非対称な半周期正弦波形でその幅は 10ms 程度である。本研究では、このパルス継続時間中の岩石試料の磁化変化を高速かつ高精度に測定するための試作システムを開発した。いくつかの自然試料を測定した結果、これまで VSM や IRM 測定では見られなかった新たな岩石磁気的知見を得ることができた。

本システムは、パルス磁化器として IM-10-30 (ASC Scientific 社製、2" コイル装着) を利用し、このコイル空間中に新開発の差動型コイルペア等を含む磁化検知コイルシステムを設置した。パルス磁場信号と試料による誘導磁場信号は、パルス磁場をトリガーとして高速デジタルオシロスコープ (Agilent MSO9104 2GHz) に記録し、Windows PC に取り込んで信号処理・解析を行った。校正は、常磁性塩 (酸化ガドリニウム) とニッケル粉末を用いた。自然試料として、伊豆大島や桜島の火山岩、一部の古土壌や火山灰などを測定した。弱磁化試料では、単発の測定結果にノイズが目立つが、複数回の繰り返し測定結果の重ね合わせによって S/N 比の向上を図ることができる。1 回の測定・解析が数秒程度で完了することが、本システムの最大のメリットである。一部の火山岩からは、VSM による磁化曲線 (ヒステリシス) では見られない、ごく短時間 (<1 ms) の磁化変化が観測された。これら時間領域の測定結果を、交流磁化率による周波数領域での測定結果と比較・対照することにより、磁性粒子のサイズや磁区構造を特定するための新たな岩石磁気学的手法を提案する。

キーワード: 岩石磁気, パルス磁場, 磁気ヒステリシス

Keywords: rock magnetism, pulse magnetic field, magnetic hysteresis

## 阿蘇火山中央火口丘群における火山岩・テフラの古地磁気学的研究 Paleomagnetic study of the Holocene volcanic rocks and tephra from post-caldera central cones of Aso Volcano

阿比留 拓哉<sup>1</sup>; 渋谷 秀敏<sup>2\*</sup>; 望月 伸竜<sup>3</sup>; 弥頭 隆典<sup>2</sup>; 宮縁 育夫<sup>4</sup>

ABIRU, Takuya<sup>1</sup>; SHIBUYA, Hidetoshi<sup>2\*</sup>; MOCHIZUKI, Nobutatsu<sup>3</sup>; YATO, Takanori<sup>2</sup>; MIYABUCHI, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学理学部, <sup>2</sup> 熊本大学自然科学研究科, <sup>3</sup> 熊本大学大学院先導機構, <sup>4</sup> 熊本大学教育学部

<sup>1</sup>Faculty of Science, Kumamoto University, <sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University, <sup>3</sup>Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University, <sup>4</sup>Faculty of Education, Kumamoto University

本研究では阿蘇火山の火山活動史研究に利用できる基礎データを得ることを念頭に、阿蘇火山中央火口丘群の完新世火山岩・テフラの古地磁気学的研究を進めている。これまでに火山岩7ユニットにおいて25サイトをもうけて定方位サンプリングを行った。全25サイトのうち19サイトからは95%信頼限界が5度以下の精度の良い平均方位(古地磁気方位)が得られた。その結果によれば、火山地質図において1枚に区分されていた杵島岳溶岩・往生岳溶岩・中岳新期溶岩には、形成時期が数十~数百年以上離れた複数回の溶岩流が含まれている。また、上米塚スコリア・杵島岳溶岩の2サイト・往生岳溶岩の2サイトから得られた平均方位は95%信頼限界の範囲で一致した。この古地磁気方位の一致は、複数の火口から同時期(数十年以内)にこれらの溶岩流が流下した可能性を示唆する。以上の火山岩の古地磁気方位測定に加えて、本研究では、中岳の北北東4kmのテフラ層(宮縁・渡辺, 1997)の測定も進めている。火山灰の残留磁化方位は同時に噴出した溶結凝灰岩の熱残留磁化方位と一致することから、火山灰は堆積直後の地球磁場を記録すると報告されている(Reynolds, 1979; Hayahida et al., 1996; 中島・藤井, 1998; Fujii et al., 2001)。自作のサンプリングツールを用いてテフラ層の22層準から定方位試料を採取し、段階交流消磁によって特徴的残留磁化の検出を行った。その結果、22層準中17層準で95%信頼限界が5度以下の精度の良い平均方位が得られた。これらの平均方位を古地磁気方位とすることで、形成時間やテフラ層序と溶岩層序の対比を検討した。その結果、N6層の大部分、N5層、N4層からは同じ古地磁気方位を得たことから、これらのテフラ層は短期間(数十年間)に形成したことが示唆される。また、テフラから得た古地磁気方位と溶岩から得た古地磁気方位が一致するものがあり、これらの火山噴出物が同時期に形成したことが示唆された。

キーワード: 阿蘇火山, 古地磁気方位, 火山岩, テフラ

Keywords: Aso Volcano, paleomagnetic direction, volcanic rock, tephra

## 秋田県一ノ目潟のピストン・コア堆積物から得られた過去7000年間の古地磁気永年変化の記録 Paleomagnetic secular variation record for the last 7000 years observed in piston cores from the Ichinomegata Maar

安楽 和央<sup>1\*</sup>; 林田 明<sup>2</sup>; 原口 強<sup>3</sup>; 山田 和芳<sup>4</sup>; 篠塚 良嗣<sup>5</sup>; 五反田 克也<sup>6</sup>; 米延 仁志<sup>7</sup>  
ANRAKU, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; HAYASHIDA, Akira<sup>2</sup>; HARAGUCHI, Tsuyoshi<sup>3</sup>; YAMADA, Kazuyoshi<sup>4</sup>; SHINOZUKA, Yoshitsugu<sup>5</sup>  
; GOTANDA, Katsuya<sup>6</sup>; YONENOBU, Hitoshi<sup>7</sup>

<sup>1</sup>同志社大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup>同志社大学理工学部環境システム学科, <sup>3</sup>大阪市立大学大学院理学研究科, <sup>4</sup>早稲田大学人間科学学術院, <sup>5</sup>北海道大学大学院地球環境科学研究院, <sup>6</sup>千葉商科大学政策情報学部, <sup>7</sup>鳴門教育大学大学院学校教育研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, <sup>2</sup>Department of Environmental Systems Science, Doshisha University, <sup>3</sup>Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, <sup>4</sup>School of Human Sciences, Waseda University, <sup>5</sup>Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, <sup>6</sup>Faculty of Polycy Informatics, Chiba University of Commerce, <sup>7</sup>Graduate School of Education, Naruto University of Education

秋田県男鹿半島に位置する一ノ目潟マールでは2006年にシンウォール・コア(IMG06)が採取され、Uチャンネル試料の残留磁化測定によって完新世の古地磁気永年変化(PSV)の記録が得られている。本研究では、2013年に湖の中央部で2本のピストン・コア(IMG13P-1およびIMG13P-2)を採取し、7ccキューブ試料について初磁化率( $\kappa$ )と磁化率異方性(AMS)の測定、自然残留磁化(NRM)の段階交流消磁を行った。まず、初磁化率の変動と岩相変化をもとにIMG06とピストン・コアの対比を行った結果、IMG13P-1とIMG13P-2は過去約7000年をカバーしていることが明らかとなった。NRMの段階交流消磁では、ほぼ全ての層準で強度の大きいNRMが原点に向かって直線的に減衰することが確認され、主成分解析によって各試料の磁化方位を決定することができた。ただし、AMS楕円体の最小軸の伏角 $K_{min}$ と形状パラメータ $q$ の値にもとづき、初生的な堆積構造を保持していないと推定された一部分のデータを排除した。コア採取時に堆積物が乱されたと考えられる部分を除き、残留磁化の伏角および相対的な偏角の変動はIMG13P-1とIMG13P-2、およびIMG06の間でよく一致していた。このことから、一ノ目潟の堆積物は古地磁気永年変化の研究に適したものである。さらに、一ノ目潟の記録は西日本の考古地磁気永年変化曲線(Shibuya, 1980)、琵琶湖のPSV(Ali et al., 1999)とも類似しており、日本の古地磁気永年変化の研究に重要な役割を果たすと考えられる。

キーワード: 古地磁気永年変化, 残留磁化, 初磁化率, 一ノ目潟

Keywords: Paleomagnetic secular variation, remanent magnetization, magnetic susceptibility, Ichinomegata Maar



## 三瓶日影山溶岩の熱磁気特性: Laschamp エクスカーションの探索 Thermomagnetic characteristics in the Hikageyama lava: searching a paleomagnetic record of the Laschamp excursion

西山 洋人<sup>1\*</sup>; 林田 明<sup>2</sup>; 沢田 順弘<sup>3</sup>; 檀原 徹<sup>4</sup>; 河野 重範<sup>5</sup>  
NISHIYAMA, Hiroto<sup>1\*</sup>; HAYASHIDA, Akira<sup>2</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>3</sup>; DANHARA, Tohru<sup>4</sup>; KAWANO, Shigenori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 同志社大・院・理工学研究科・数理環境科学, <sup>2</sup> 同志社大学理工学部環境システム学科, <sup>3</sup> 島根大学, <sup>4</sup>(株) 京都フィッション・トラック, <sup>5</sup> 栃木県立博物館

<sup>1</sup>Sci. Environ. Math. Model., Grad. Sci.&Engi., <sup>2</sup>Dept. Environ. Sys. Sci., Doshisha Univ., <sup>3</sup>Shimane University, <sup>4</sup>Kyoto Fission-Track Co., Ltd., <sup>5</sup>Tochigi Prefectural Museum

2013年の連合大会では、三瓶日影山溶岩における古地磁気学測定の結果を報告した。9地点のなかから日影山東部の4地点で、一致した伏角が浅く偏角が東寄りの方位が確認された。また、これらのサイトの仮想地磁気極(VGP)は地理的北極からずれたアメリカ合衆国北東部約50°N 100°Wであった。これらより、Laschamp エクスカーションの期間に噴出した可能性のある三瓶日影山溶岩が、特異な地球磁場を記録したものであると推定した。これに9地点の段階熱消磁を加えると、上記の4地点で同様の一致した方位が得られた。

そして、熱磁気分析を行ったところ、ほとんどのサンプルは1相のマグネタイトとみられるキュリー温度を示した。さらに、上記の日影山東部の4地点は2つに分類できた。まず、HKG-9, 10は、1相のマグネタイトとみられるキュリー温度を示した。次に、HKG-11, 12は、2相のチタノヘマタイトとヘマタイトとみられるキュリー温度を示した。段階熱消磁の結果より、前者は2つまたは3つの残留磁化成分をもつサンプルであった。後者のサンプルは残留磁化成分が1つであったが、既報である交流磁場のピーク100 mTまででは消磁できないかたい残留磁化であった。これら残留磁化成分と熱磁気分析結果にもとづいて、三瓶日影山溶岩における残留磁化方位の議論を報告する。

キーワード: 岩石磁気, 三瓶日影山溶岩, 地磁気エクスカーション, Laschamp エクスカーション  
Keywords: Rock magnetism, Hikageyama lava, Geomagnetic excursion, Laschamp excursion

## ダイナモモデルにおけるコア-マントル電磁結合と LOD 変動 Electromagnetic core-mantle coupling and length-of-day variation in numerical dynamo models

高橋 太<sup>1\*</sup>  
TAKAHASHI, Futoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学  
<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

Exchange of angular momentum between the core and the mantle is likely to be responsible for the decadal variations in the length-of-day (LOD). If the changes in the angular momentum of the mantle are balanced by the opposite changes of the core, some coupling mechanisms between the core and the mantle should be invoked. Here we examine the electromagnetic (EM) coupling as a possible mechanism of angular momentum exchange. We use numerical dynamo simulations to investigate the mechanism to explain the LOD variations with respect to time including the decadal time scale. In numerical dynamo models, we impose a uniformly electrically conducting layer of about 200 km-thick on the mantle side of the core-mantle boundary corresponding to the D'' layer. The electric current associated with the dynamo-generated magnetic field can flow in the conducting layer and the Lorentz force can yield a net EM torque with respect to the rotation axis. The electrical conductivity of the layer is varied from 200 - 500 S/m in dynamo models. The LOD variations can put some feedback effects on flows in the core through the changes in the angular velocity, which emerge as a change in the effective Ekman number and the Poincare force. Influences of such a feedback are also included in numerical models. The Ekman number adopted as a nominal value is  $10^{-4}$ . We have obtained the EM torque resulting in typical angular velocity variation of the order of  $10^{-6}$  relative to the nominal angular velocity in a time scale of the magnetic diffusion time. Much smaller changes in shorter time scale are also observed. Based on the findings in the present study, it is suggested that the EM core-mantle coupling in a likely range of the conductance within the D'' layer is a promising mechanism to yield LOD variations in decadal to longer time scale.

キーワード: ダイナモ, コア-マントル電磁結合, LOD 変動, D'' 層  
Keywords: dynamo, electromagnetic core-mantle coupling, LOD variation, D'' layer

## ジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れに対する表面変位の影響 Influence of surface displacement on fluid motions induced by Joule heating in the inner core of the Earth

竹広 真一<sup>1\*</sup>  
TAKEHIRO, Shin-ichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学数理解析研究所

<sup>1</sup> Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

地震波観測により示された地球内核の弾性的性質の異方性は、内核の固化における固体組織の整列や内核中の流体運動による塑性変形による組織の整列によるものと考えられてきている。内核の固化では異方性の深さ分布が説明できない一方で、これまでに考察されたさまざまな要因による内核中の流れでは異方性を生み出すに十分なほど決定的ではない。Takehiro (2011) では、内核中の流れを引き起こす要因として、内核外核境界で与えられた磁場が内核中へ貫入し発生するジュール熱を提案した。具体的に、球面調和函数の全波数 2, 方位角波数 0 のトロイダル磁場成分を内核外核境界において与えて計算したところ、赤道域で下降流、極域で上昇流の流れのパターンが得られた。この流れ場は外核との質量交換を伴っており、内核外核境界 (ICB) にて 0 でない速度の動径成分が存在している。このような流れ場が得られた要因は、ICB での境界条件として応力の法線成分が一定であることを用いていることにあり、暗に ICB を通過する物質の相変化が瞬間的であることを仮定している。しかしながら、実際には物質の相変化の速度は有限であり、もしも十分に相変化の速度が遅ければ、流れの動径成分の存在により ICB が変形し凹凸が発達することになるだろう。このような表面変位が存在すると、内外核間の密度差による浮力が働き、内核中の流れを妨げる可能性がある。

そこで本研究では、水平不均一なジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れに対する表面変位の影響を考察し、どの程度の振幅の表面変位が発達し内核中の流れ場がどう変形されるのかを吟味した。

内核外核境界における磁場分布と表面変位分布を与えたときのジュール熱により引き起こされる定常な速度場を数値的に求めた。用いた方程式は磁場の拡散の式、ブシネスク流体の運動方程式および熱の式である。境界条件は内核外核境界において応力の接線成分が 0 に加えて、温度擾乱が融点温度に等しいことと応力法線成分が表面変位による浮力とバランスする式を用いた。球面調和函数の全波数 2, 方位角波数 0, トロイダル磁場成分および表面変位を与え、地球内核中で予想されているパラメータを用いて計算したところ、ICB でのトロイダル磁場振幅が  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  T に応じて表面変位振幅が 0.14 – 14 m 程度で内核表面での速度動径成分が 0 となる結果が得られた。

これに対して、相変化の速度を見積もるために、ICB を通って出てくる固相の鉄を融かすに必要な熱 (あるいは ICB を通って入っていく液相の鉄を凝結させるに必要な熱) が外核中の速度場によって ICB 表面に輸送される熱とのバランスを考えた。ICB における表面変位は断熱温度と融解温度の温度差を生じ、これに伴う熱が外核中の小スケールの速度場によって ICB 表面に輸送されると考えた。

この熱バランスによる式と、上の数値計算結果で得られた表面変位振幅と速度動径成分の関係式を連立させることにより、平衡状態での表面変位振幅と速度動径成分振幅が定められる。外核中の小スケールの速度場の振幅が  $10^{-1}$  m/s 程度に速いときには変位の発達速度に対して相変化の速度が十分に大きく、ICB において  $8 \times 10^{-10}$  ~  $8 \times 10^{-12}$  m/s 程度の速度動径成分が存在し、表面変位振幅が 0.0001 – 0.01 m 程度となる。これに対して、外核中の小スケールの速度場の振幅が  $10^{-5}$  m/s 程度に遅いときには、相変化の速度に対して表面変位の発達速度が十分に速く、ICB における速度動径成分が 0 となり、表面変位が 0.14 – 14 m にまで発達する。

表面変位振幅が大きくなるにつれて、ICB における速度動径成分が小さくなり、ICB 直下に内部領域とは逆向きの流れが現れるようになる。しかし以前として内部領域の流れは表面変位によって妨げられることなく赤道から極へ向けての流れが存在している。このことは、内部領域の流れを定めるバランスが水平不均一のジュール加熱と移流による熱輸送との熱バランスによるものであり、力学的要因でないからである。一方、流れ場の応力の振幅は表面変位振幅が大きくなるにつれて内部領域よりも ICB 付近で大きくなってしまふ。このことは、地球内核の地震波速度異方性を説明するのに表面変位が大きい場合には整合的でないという結論に達する。地震波速度異方性が水平不均一なジュール加熱により引き起こされる地球内核中の流れに由来するのであれば、ICB での相変化の速度が十分に速く、表面変位が小さくならねばならない。

参考文献: Takehiro, S., 2011: Phys. Earth Planet. Inter., 184, 134–142.

キーワード: 地球内核異方性, 地球外核磁場, 地球外核流れ, 内核外核境界, 地球外核ダイナモ作用

Keywords: anisotropy of the Earth's inner core, magnetic fields in the Earth's outer core, flows in the Earth's outer core, inner core boundary of the Earth, dynamo action in the Earth's outer core

本州東部に分布する Znp-Ohta テフラの古地磁気と相対回転運動  
Paleomagnetism of the Znp-Ohta tephra in eastern Honshu: relative tectonic rotations at local and regional scales?

星 博幸<sup>1\*</sup>; 二村 昇<sup>2</sup>  
HOSHI, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; FUTAMURA, Sho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛知教育大学, <sup>2</sup> 豊橋市立二川南小学校  
<sup>1</sup>Aichi University of Education, <sup>2</sup>Futagawa Minami Elementary School

We present paleomagnetic data suggesting relative tectonic rotations in eastern Honshu since 3.9 Ma. Samples were collected from a widespread ash bed, called the Znp-Ohta tephra, at three localities. One is the Tomioka locality located to the east of the Abukuma Mountains, where the ash bed (local name = SF4.5 tephra) was sampled at three sites. The other two are the Miyobara and Kohnsaka localities on the Boso Peninsula, where the ash bed (local name = An85 tephra) was sampled at three sites at each locality. Stepwise demagnetization was performed on all specimens, and the principal component analysis was applied to the demagnetization data to extract characteristic remanent magnetization (ChRM) components. At Tomioka, site-mean ChRM directions were determined at all sites. They are tightly clustered after tilt correction and have a southerly direction of reverse polarity. Interestingly, the direction is deflected significantly counterclockwise with respect to the direction of the correlative tephra at Chita in central Honshu (Hoshi & Deguchi, 2013). At Miyobara and Kohnsaka, the locality-mean ChRM directions are significantly different to each other. The paleodeclination of Miyobara is similar to that of Tomioka, and the paleodeclination of Kohnsaka is almost identical to that of Chita. The difference in paleodeclination between Miyobara and Kohnsaka seems to be related to the difference in the general geological trend of Neogene strata on the Boso Peninsula, suggesting relative rotation on the peninsula. Our results imply that in eastern Honshu, relative rotations have taken place at local and regional scales since the Pliocene.

キーワード: 本州東部, 古地磁気, 鮮新世, 相対回転, テクトニクス, Znp-Ohta テフラ  
Keywords: eastern Honshu, paleomagnetism, Pliocene, relative rotation, tectonics, Znp-Ohta tephra



## GPS から推定される過去の大陸形状の復元 Past continental shape inferred from GPS data

河合 啓悟<sup>2</sup>; 加藤 忠義<sup>2</sup>; 原田 靖<sup>1\*</sup>

KAWAI, Keigo<sup>2</sup>; KATO, Tadayoshi<sup>2</sup>; HARADA, Yasushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東海大学 海洋学部 海洋地球科学科, <sup>2</sup> 東海大学海洋学部海洋資源学科

<sup>1</sup>Department of Marine and Earth Science, Tokai University, <sup>2</sup>Department of Marine Mineral Resources, Tokai University

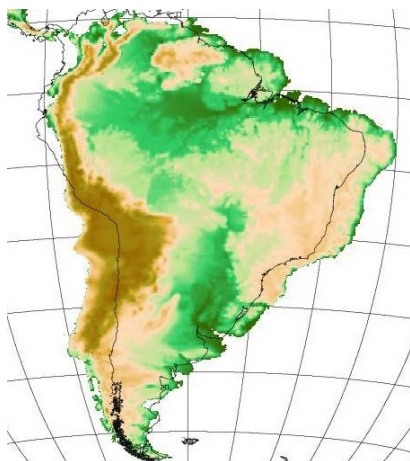
Kono et al.,1985 は古地磁気学的解析から第三紀前期にはアンデス山脈は現在の様に逆くの字型に曲がっていたのでは無く、南北に真直ぐな形状であったことを示した。本研究では現在観測されている GPS のデータによる大陸の内部変形運動を過去に外挿して、この様なアンデス山脈の形状が復元し得るかどうかが検証した。

GPS を含む宇宙測地技術から得られるプレート運動ベクトルが、NUVEL-1A 等の数百万年間の平均のプレート運動と比較し得るかどうかは 1990 年代から議論されており (例えば, Gordon,1993), 両者は良い一致を示すことが分かっている。本研究では, 加藤ら 2012(連合大会) が考案した GPS データから過去や未来の地形形状を推定計算する方法を用いて, 南米大陸の過去の形状を計算したところ約 50Ma の形状ではアンデス山脈が南北に真直ぐな形状に復元され, Kono et al.,1985 の推定する形状に良く一致した (下図)。この結果から数十年スケールの GPS で観測されるプレート内部変形は数千万年スケールの大陸の変形運動と比較し得ることを強く示唆している。またこの計算方法は汎用性が高いので古地磁気データと GPS データがある地域ならばどこでも外挿計算による比較が可能である。

本研究ではさらに 150Ma の Gondwana 大陸の形成時期まで外挿計算を行ったが, Wegener,1915 や Bullard et al.,1965 の行った様な南米大陸東海岸線とアフリカ大陸西海岸線の一致は, 悪くなる傾向がみられた。このことからこのような GPS データの外挿は数千万年程度が限界と考えられる。

キーワード: GPS, 過去の大陸形状, プレート内部変形

Keywords: GPS, Past continental shape, Deformation of plates



## フィリピン海プレートの運動にまつわる諸問題 Problems related to the past motion of the Philippine Sea Plate

高橋 雅紀<sup>1\*</sup>  
TAKAHASHI, Masaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質情報研究部門  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

プレートの過去の運動は、海洋底拡大軸を対称に形成された海洋底地磁気異常に基づく相対運動と、ホットスポットトラックによる絶対運動によって復元することができる。ところが、フィリピン海プレートにはホットスポットトラックが存在しないため、過去の運動を復元することができない。さらに周囲を海溝で囲まれているために、他のプレートとの相対運動も不明である。そこで、フィリピン海プレートの過去の運動は、フィリピン海プレート上の地層や岩石の古地磁気によって推定されてきた。すなわち、古地磁気偏角は回転運動を、古地磁気伏角は緯度方向の移動を表しているとして復元図が提案されてきた。しかしながら、古地磁気に基づくプレート運動の復元は、現実的には不可能であると考えられる。講演では、フィリピン海プレートの過去の運動にまつわる諸問題を整理する。

キーワード: テクトニクス, 古地磁気, フィリピン海プレート  
Keywords: tectonics, paleomagnetism, Philippine Sea Plate

## 新生代の南太平洋赤色粘土の環境磁気学的研究: レアース含有量との関連 Environmental rock-magnetism of red clay in the South Pacific Gyre during the Cenozoic: relation with rare-earth content

下野 貴也<sup>1\*</sup>; 山崎 俊嗣<sup>2</sup>; 鈴木 勝彦<sup>3</sup>

SHIMONO, Takaya<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Toshitsugu<sup>2</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学・生命環境科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>3</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, <sup>2</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

深海底堆積物の約 40% を占める赤色粘土は、年代決定に有効な微化石をほとんど含まないことや堆積速度が数 mm/1000 年と極めて遅いことなどから、これまで古海洋学や古地磁気学の研究対象とされることは少なかった。しかし、Kato et al. (2011) により、太平洋に広く分布する赤色粘土に非常に高濃度のレアースを含む層の存在が明らかとなり、“レアース泥” と呼ばれる新たな海底資源として注目されるようになった。Kato et al. (2011) の中でも特に REY (希土類元素およびイットリウム) 含有量が高い値 (最大値 2110 ppm) を示した DSDP (深海掘削計画) Site 596 は、南太平洋環流の西端に位置し、厚さ約 50 m の赤色粘土からなる。しかし、堆積物コアはかなりの欠損があり、古地磁気・岩石磁気測定は行われなかった。2010 年に IODP (統合国際深海掘削計画) Exp.329 において、Site 596 と同一地点 (Site U1365) で約 76 m の赤色粘土のコア試料が再び採取された。本発表では、Site U1365 の赤色粘土を用いて、REY 含有量と岩石磁気解析 (磁化率,  $S_{-0.1T}$ ,  $S_{-0.3T}$ ,  $\kappa_{ARM}/SIRM$ ) による結果の比較を行う。さらに、古地磁気層序と Site 596 の年代モデルを利用して Site U1365 の年代推定を行い、磁気特性とレアース含有量や新生代以降の長期的な気候変動との関係についての考察を行う。

Site U1365 における主な磁性鉱物は生物起源マグネタイトで、コア上部では陸源と思われる Maghemite の含有量が増加している (Yamazaki and Shimono, 2013)。Site U1365 の REY 含有量は、深さ 8~38 m で平均 1300 ppm、最大値 2470 ppm と非常に高い値を示し、さらに同一地点で採取された Site 596 (Kato et al., 2011) の REY 含有量とよく似た変化パターンを示した。その最大値は、Site 596 よりも約 360 ppm 高く、Site 596 においては、測定間隔が大きかったこと、もしくはコアの欠損により最大値が測定できなかった可能性が考えられる。また、REY と岩石磁気パラメータの  $\kappa_{ARM}/SIRM$ ,  $S_{-0.3T}$  の変化パターンは相関し、REY 含有量が高い部分は、陸源磁性鉱物の割合が少ない部分に相当することがわかった。堆積物の年代は、約 5 Ma までは古地磁気方位により、それ以前は、Site 596 のコバルトの沈積流量を一定と仮定した年代モデル (Zhou and Kyte, 1992) を基に、磁化率と REY のパターンによる Site 596 と U1365 間の対比により推定した。 $\kappa_{ARM}/SIRM$ ,  $S_{-0.3T}$  より、風成塵起源の磁性鉱物の割合は、約 30 Ma から現在にかけて大きく増えていると推定される。この時期には、南極周辺海域で 2 つの海峡 (タスマン海峡・ドレイク海峡) の開口と拡大がおき、南極氷床が拡大したことが知られている。南半球の寒冷化に加え、オーストラリア・プレート北上に伴いオーストラリア大陸が中緯度の乾燥帯へ移動したことにより、南太平洋域で風成塵由来のフラックスが増加したのかもしれない。また、REY が最大値となる年代は Eocene/Oligocene 境界前後にあたり、Hyeong et al. (2013) によって示された太平洋の海山におけるリン酸塩沈積イベントと対応するよう見える。さらに、本研究で確認された REY と磁気特性の関係は、南鳥島近海の赤色粘土にも同様の特徴がみられ、太平洋の広域的な古環境・古海洋イベントを記録している可能性が示唆される。

キーワード: 赤色粘土, REY, 南太平洋環流, 完新世, 環境磁気学

Keywords: Red clay, REY, South Pacific Gyre, Cenozoic, Environmental Magnetism

## 琵琶湖北湖、極表層堆積物における磁気的特性の地域的な違い Regional differences in magnetic properties of topmost sediments of the Northern Lake Biwa

石川 尚人<sup>1\*</sup>; 石川 可奈子<sup>2</sup>

ISHIKAWA, Naoto<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Kanako<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京大・人間環境, <sup>2</sup> 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター

<sup>1</sup> Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto Univ., <sup>2</sup> Lake Biwa Environmental Research Institute

Rock-magnetic investigations have been performed on topmost sediments above about 30 cm below sediment surface (bss) cored in summer (June to July) and winter (November to December) at eight sites with different water depth, where dissolved oxygen (DO) content in bottom water and its seasonal variation are different, in the first depression at the North Basin of Lake Biwa in order to reveal early diagenetic effect on magnetic properties of the sediments.

Low-temperature magnetometric results indicate that a partially-maghemitized magnetite is a principal magnetic mineral in the sediments. Warning curves from 6 to 300K of isothermal remanence (IRM) imparted at 6K in 1T after zero-field cooling show a remarkable decrease of IRM between 90 and 120K, which is regarded as a suppressed Verwey transition of magnetite. The amount of IRM decrease between 90 and 120K increase downcore at all site, implying the dissolution of maghemite skin covering magnetite. The IRM decrease is more slightly remarkable in the sites with shallower water depth. The degree of maghemitization may be lower in the site. Samples from sites with deeper water depth below about 70m show another IRM decrease between 20 and 30K with the inflection point at about 29K. The IRM drop disappears in samples with hydrochloric acid treatments. These low-temperature IRM behaviors may imply the presence of ferro-rhodochrosite. The IRM drop is detected in samples above about 18 cmbss, and the samples in two zones of 0-3 cm-bss and 6-15 cm-bss show the IRM drop more clearly. The IRM drop is more remarkable in samples with deeper water depth. The occurrence of the magnetic mineral with the characteristic low-temperature magnetic behavior seems to be influenced by the DO values and its seasonal change.

As common characteristics in downcore changes of magnetic properties, the downcore decrease of magnetic coercivity is observed in the uppermost sediments above about 10 cm-bss, and the amount and grain size of magnetic minerals subsequently decreases and increases downcore below 10cm-bss, respectively. These changes are considered to be associated with the dissolution of maghemitized magnetite by the early diagenetic effect. The presence of magnetic minerals with finer grain size and higher magnetic coercivity in the sediments above 10 cm-bss is more remarkable in sites with deeper water depth.

キーワード: 岩石磁気特性, 琵琶湖, 表層堆積物, 初期続成

Keywords: rock magnetic property, Lake Biwa, topmost sediment, early diagenesis



広島湾観測地点の海洋浮遊物質と堆積物の磁性  
Magnetic properties of the sediments and suspended solids in the sea surface water at the Hiroshima bay station.

川村 紀子<sup>1\*</sup>

KAWAMURA, Noriko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海上保安大学校

<sup>1</sup> Japan Coast Guard Academy

Suspended solids (SS) in sea water are consisted of planktons and insoluble particles, and are an indicator of transparency. SS particles adsorb and incorporate metallic ions. Iron is a metallic ion, and an essential element for phytoplankton. It is supplied from river to sea as bivalent or trivalent ions, and exists as iron compounds as organic complexes in sea water. Aeolian dusts are consisted of SS, and also consists of iron compounds. They will deposit on seafloor, and be sediments as the climatic record. It is important to investigate the distribution and mode of iron compound in SS for the present and past environmental studies. This study aims to diagnose magnetic minerals in SS. Enough amount of SS sample for magnetic measurements are collected by magnetic separation from seawater at the Hiroshima bay station. 4 L of seawater is filtrated, and the particles above 0.45  $\mu\text{m}$  in diameter are recovered for XRF analysis. The amount of magnetic particles in sea surface water shows relatively high values from April to July in the bay. The maximum value is found at the station, which is located near an iron works (the supply source). The particle is opaque minerals and looks like needle. The values of IRM imparted at 0.3 T and 2.5 T are not stable. It suggests that SS has strong anisotropy. Results of thermo-magnetometry indicate that magnetic carriers of SS samples are mainly magnetite, and goethite and hematite is also recognized. Magnetic minerals in the sediments at the station are magnetite, hematite, and greigite. It is implied that goethite present in the sea surface water and it may be dissolved on sea floor.

Keywords: Suspended solids, Iron compounds, Goethite

## 第二渥美海丘付近におけるタービダイト・コア試料の古地磁気学的研究 Paleomagnetic study of the turbidite sediments around the Daini Atsumi Knoll

玉置 真知子<sup>1\*</sup>; 鈴木 清史<sup>2</sup>; 江川 浩輔<sup>3</sup>  
TAMAKI, Machiko<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Kiyofumi<sup>2</sup>; EGAWA, Kousuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本オイルエンジニアリング株式会社, <sup>2</sup> 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, <sup>3</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Japan Oil Engineering Co., Ltd., <sup>2</sup>Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, <sup>3</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

2012年6~7月、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構は、メタンハイドレート層からのメタンガス産出試験のための事前掘削として、愛知県~三重県沖合の第二渥美海丘付近(ATI-Cサイト)でメタンハイドレートを含む堆積物を対象としたコアリングを実施し、貯留層評価に必要な物性値の取得を行った。本論では、第四紀のタービダイト堆積物のコア試料から古地磁気測定を行った結果について報告する。

定方位化のために測定した残留磁化測定では、特徴的な残留磁化方位が求まり、コアの定方位が得られた。また、残留磁化方位から判定される古地磁気極性は泥質試料で全て正帯磁を示し、ブリュンヌ正磁極期に相当すると考えられ、酸素同位体比に基づく年代層序と調和的であると考えられる。また、帯磁率異方性測定によって得られた異方性パラメータから、堆積物は初生的な堆積構造を保持していると考えられる。また、粒子ファブリックのインプリケーションから古流向解析を行った結果、北東から南西方向に卓越する古流向と、南東から北西へ流れる古流向が得られた。北東から南西方向への古流向は、三次元地震探査データから解釈されているチャンネルの軸方向と概ね整合しており、堆積物はチャンネルの軸流に沿ったタービディティーカーレントによって供給されたことが考えられる。一方、南東から北西方向への古流向については、一つの可能性として、渥美海丘の隆起・削剥に伴う堆積物の運搬を示唆していると考えられる。

本研究は、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)の研究の一環として実施した。本研究の公表許可をいただいた経済産業省ならびにMH21に謝意を表す。

キーワード: 古地磁気学, 古地磁気層序, 帯磁率異方性, 古流向解析, タービダイト堆積物, 第二渥美海丘

Keywords: Paleomagnetic study, Paleomagnetostratigraphy, Anisotropy of magnetic susceptibility, Paleocurrent analysis, turbidite sediments, Dainii Atsumi Knoll

岩石磁気学的手法による火山砕屑性堆積物 (IODP Site U1397, 1398) の堆積過程の検討  
Emplacement mechanism of marine volcanoclastic sediments (IODP Site U1397, 1398) based on rock magnetic properties

齋藤 武士<sup>1\*</sup>; 片岡 香子<sup>2</sup>  
SAITO, Takeshi<sup>1\*</sup>; KATAOKA, Kyoko S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 信州大学理学部, <sup>2</sup> 新潟大学災害・復興科学研究所

<sup>1</sup>Faculty of Science, Shinshu University, <sup>2</sup>Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

Large numbers of marine volcanoclastic sediments with various origins were recovered from the sites U1397 and U1398 during IODP Expedition 340. They were most likely derived from volcanoes on Martinique and possibly from Dominica, Lesser Antilles volcanic arc. Some volcanoclastic units were transported and deposited as turbidites, some were as thin tephra fall deposits and others show both characteristics. They contain various amounts of bioclastic component, pumice and lithic fragments and hemipelagic mud clasts. Therefore, these volcanoclastic sediments are suitable for investigating transport and emplacement mechanisms of volcanic materials and the resultant sedimentary and petro-facies in marine settings. This study focuses on magnetic minerals in the marine volcanoclastic sediments and carried out rock magnetic measurements.

Thermomagnetic measurements showed almost reversible curves and induced magnetization decayed to almost zero below 580 °C, suggesting little contribution of maghemite or hematite. Two Curie temperatures ( $T_c$ ) with 350-400 °C and 500-550 °C indicate that the main magnetic carriers are Ti-rich titanomagnetite and Ti-poor titanomagnetite. The proportion of low- $T_c$  titanomagnetite in central and bottom part of thick turbidite units was larger than that in hemipelagic sediments and in the topmost part of turbidite units, suggesting Ti-rich titanomagnetite is derived from volcanic events. Tephra fall deposits also showed large contributions of Ti-poor titanomagnetite, resulted from large amount of volcanic materials. On the other hand, thin turbidite units showed small contributions of Ti-poor titanomagnetite. This suggests that thin turbidite units are derived from diluted flows which contain few heavy Fe-bearing magnetic minerals.

Magnetic susceptibility and hysteresis measurements showed that heavy and large magnetic minerals in most thick turbidite units were concentrated at the lower part of the unit. Samples from the topmost and bottom part of turbidites showed higher degrees of anisotropy than those from the central part, indicating strong influence of suspension settling at the topmost part and shearing at the bottom part. Bottom parts of fall units contain heavy and large magnetic minerals, whereas upper parts of fall units contain fine magnetic minerals. On the other hand, in thin turbidite units such features cannot be observed and hysteresis parameters and susceptibility values were almost concentrated. Probably thin turbidite units did not experience segregation of specific particles during transportation and settling under the relatively calm condition.

These preliminary results suggest that magnetic minerals are useful indicators of volcanic events and rock magnetic approaches can identify various types of depositional processes about marine volcanoclastic sediments.

キーワード: タービダイト, 降下火砕物, 水中堆積物, チタノマグネタイト, 磁性鉱物

Keywords: turbidite, fall deposit, marine sediment, titanomagnetite, magnetic mineral

## 長野県南部、富草層群の古地磁気方位とテクトニックな意義 Paleomagnetic direction of the Tomikusa Group in southern Nagano Prefecture and its tectonic significance

酒向 和希<sup>1\*</sup>; 星 博幸<sup>1</sup>  
SAKO, Kazuki<sup>1\*</sup>; HOSHI, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛知教育大学  
<sup>1</sup> Aichi University of Education

本発表で筆者らは、長野県南部に分布する富草層群(前期中新世堆積岩)から新たに得られた古地磁気方位を報告し、本州中部の中央構造線(Median Tectonic Line; MTL)が前期中新世にどのような形状であったかについて議論する。

西南日本の帯状地体構造は、伊豆-小笠原弧と本州弧の衝突によって本州中部で屈曲している(関東対曲構造)。衝突以前、MTLを含む帯状地体構造は直線状であったとする仮定や解釈が一般的である。その仮定や解釈の妥当性を定量的に検証するには、信頼できる古地磁気方位を関東対曲構造の各地で取得し、地域間で比較する必要がある。そこで筆者らは、衝突の影響が大きい(MTLが南北に近い)が既報方位の精度が高いとは言えない富草層群に注目し、古地磁気の再検討を行った。

富草層群の24サイトから堆積岩試料を採取した。段階消磁実験の結果、23サイトで信頼できる地点方位が決定された。等温残留磁化を用いた岩石磁気実験から、磁化を担う主要な鉱物はマグネタイトやマグヘマイトと推定される。これらの方位は逆転テストに合格することから、初生磁化の可能性が高い。層群平均方位は北寄りの偏角を示した。この方位は前期中新世の期待される方位(アジア大陸の北中国地塊の古地磁気データから計算)と区別できない。この事実から、富草地域では地層堆積以降にアジア大陸に対する有意な回転運動が起こっていないと考えられる。

富草層群の方位を周辺の4地域(三重県一志、愛知県知多半島、愛知県設楽、埼玉県秩父)と比較した。いずれも前期中新世堆積岩が見られ、MTL近傍に位置する地域である。富草の方位はMTLの一般走向(NNE)に対して約15°反時計回りに偏向している。周辺の4地域においても、誤差を考慮すると古地磁気方位とMTLの間に同様の関係が認められる。よって、古地磁気方位の観点からは、MTLは前期中新世(18-17 Ma頃)には直線状であったと考えられる。

キーワード: 古地磁気, 富草層群, 中央構造線, 中新世, 岩石磁気, テクトニクス

Keywords: paleomagnetism, Tomikusa Group, Median Tectonic Line, Miocene, rock magnetism, tectonics



## 石垣島産化石ハマサンゴ骨格の岩石磁気学的・岩石学的特徴 Rock magnetism and its petrological characterization of fossil *Porites* coral frameworks in Ishigaki island, Japan

熊谷 祐穂<sup>1\*</sup>; 中村 教博<sup>1</sup>; 佐藤 哲郎<sup>1</sup>  
KUMAGAI, Yuhō<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Norihiro<sup>1</sup>; SATO, Tetsuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup> Graduate school of Earth Science, Tohoku University.

Radiocarbon (<sup>14</sup>C) is produced by the cosmic rays in the atmosphere and is utilized for analysis of the past sun activity. But the Earth's geomagnetic field also controls radiocarbon variability, suggesting that a strong field would shield the planet from high energy charged particles. This mimics lower sun activity. Also, the short-term (in decadal or centennial scale) movement of the geomagnetic pole to the low latitude, such as geomagnetic jerk, could lead to an increased cosmic ray flux impinging on the terrestrial atmosphere and thus to a higher <sup>14</sup>C production rate. Therefore, in order to study the past sun activity from the <sup>14</sup>C production rate, we need to know the movement of geomagnetic pole position, its field strength and the variability of radiocarbon production during decadal to centennial periods. Many researches, which aim to reveal the paleomagnetic secular variation (PSV), have been performed using datasets obtained from volcanic rocks, sediment, and fired kilns. The some reconstruction models of geomagnetic dipole moment are also established from these data sets. But there are few recorders that can be used for the reconstruction of PSV in a decadal or centennial scale. Here we propose an alternative candidate of fossil coral frameworks as a possible paleomagnetic recorder for PSV research. The coral framework has an advantage in reconstructing both the radiocarbon variability and the geomagnetic field, although usual corals show extremely weak intensity of remanence and its low stability. However, it is shown that our recently-ceased coral framework samples from Ishigaki island possess a remanence intensity of 10<sup>-5</sup> -10<sup>-4</sup> A/m and a single-domain like stability from Lowrie-Fuller test. We prepared the standard 1-inch core samples cut parallel to the growth direction of coral *Porites*, including coral's growth bands for a ten to several tens of years. Our thermal and AF demagnetization experiments of oriented coral samples show that a characteristic remanence direction is parallel to the present Earth's magnetic field with some fluctuations. On the other hand, some samples exhibit different remanence directions from the present geomagnetic field with a calcite peak of X-ray diffraction analysis. The presence of calcite indicates that the meteoric diagenesis which changes aragonite coral frameworks into calcite affect the direction of initial magnetization. To constrain the remanence carriers, we are conducting a first order reversal curves (FORC) measurement and petrologic observations by a Schottky field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) of acid-treated residuals of our corals. Our results suggest that *Porites* coral framework samples provide a role as a potential use for paleomagnetic recorder for annual to decadal scales with careful examination of calcite content.

キーワード: 化石ハマサンゴ骨格, 古地磁気

Keywords: fossil *Porites* coral frameworks, paleomagnetism

## ネールの単磁区理論における磁鉄鉱の熱膨張の効果と放射性炭素年代との比較 Effect of thermal expansion on Neel's relaxation nomograph of magnetite and its agreement with the radiocarbon age

佐藤 哲郎<sup>1\*</sup>; 中村 教博<sup>1</sup>; 後藤 和久<sup>2</sup>  
SATO, Tetsuro<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Norihiro<sup>1</sup>; GOTO, Kazuhisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所  
<sup>1</sup>Earth Science, Tohoku University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science (IRIDeS), Tohoku University

Age gap between the paleomagnetic viscous dating and the radiocarbon age of tsunamigenic boulders in Ishigaki Island is focused. Recent researchers have conducted radiocarbon dating to label tsunami age, being able to calibrate the paleomagnetic viscous dating. These ages should be the same for the initial tsunami event. In the paleomagnetic viscous dating, time-temperature relation assuming Neel's single domain (SD) theory of magnetite is used. This monograph shows the older remagnetized component in nature can be erased by the higher temperature in the laboratory, and younger is its reverse. Thus, we can predict the age acquired the secondary magnetization by calculating demagnetization temperature and heating time. Our viscous dating results sometimes represented that the unblocking temperature of viscous components for tsunamigenic boulders is higher than the temperature predicted from Neel's relaxation theory of single domain magnetite, suggesting the older age than the one determined from the calibrated radiocarbon age. Previous numerous studies confirmed that the departure from Neel's theory is attributed to the presence of multi-domain magnetite. However, Lowrie-Fuller test, FORC (first order reversal curves) experiments and Low-temperature demagnetization of tsunamigenic boulders confirmed the presence of single domain magnetite. To solve this problem, we consider the thermal expansion of magnetite during stepwise thermal demagnetization process and propose a modified time-temperature relation to be able to fill the age gap. Currently, thermal expansion coefficient of magnetite is reported by some researchers (e.g. Nikolaev and Shipilin, 2000; Levy et al, 2004). If magnetite volume is bigger than initial volume during thermal demagnetization, unblocking temperature should indicate higher value under the assumption of constant coercive force. To confirm this hypothesis, we conducted stepwise thermal demagnetization to a boulder emplaced by 1771 Meiwa tsunami (242 years ago) and compare them to our new modified time-temperature relation.

Keywords: thermal expansion, Neel's theory, single domain, viscous remanence, blocking temperature

## Rock magnetic study of single zircon crystals sampled from river sands Rock magnetic study of single zircon crystals sampled from river sands

佐藤 雅彦<sup>1\*</sup>; 山本 伸次<sup>2</sup>; 山本 裕二<sup>3</sup>; 岡田 吉弘<sup>4</sup>; 大野 正夫<sup>1</sup>; 綱川 秀夫<sup>4</sup>  
SATO, Masahiko<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Shinji<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Yuhji<sup>3</sup>; OKADA, Yoshihiro<sup>4</sup>; OHNO, Masao<sup>1</sup>; TSUNAKAWA, Hideo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>東京大学, <sup>3</sup>高知大学 海洋コア総合研究センター, <sup>4</sup>東京工業大学

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>The University of Tokyo, <sup>3</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, <sup>4</sup>Tokyo Institute of Technology

Geomagnetic field paleointensity data provide critical information such as thermal evolution of the Earth (Stevenson et al., 1983). Also a state of geomagnetic field closely relates to a surface environment (Kulikov et al., 2007). It is pivotal to know the variation of geomagnetic field intensity throughout the history of the Earth. Until now we have not yet obtained, however, enough data to resolve billion-year-scale geomagnetic field variation (Tauxe and Yamazaki, 2007) and need to obtain more paleointensity data.

In this study we focus on a paleointensity experiment using single zircon crystal. Since river sand originates in rocks widely distributed in river basin, detrital zircons in the sand have various ages (Rino et al., 2004). Therefore if the geomagnetic paleointensity can be measured using the single zircon crystal, we will probably obtain paleomagnetic data enough to resolve the long-term geomagnetic field variation.

Zircon crystals used in the present study were sampled from sands of the Nakagawa River, Tanzawa Mountain. The Nakagawa River flows along bodies of tonalite, which is a representative rock of the continental crust. Using coarse-grain single zircon crystals with weight of about 0.1 mg, a suite of rock magnetic measurements were conducted: low-temperature demagnetization (LTD) and stepwise alternating field demagnetization (AFD) of saturation isothermal remanent magnetization (SIRM), and low-temperature cycle using an Magnetic Property Measurement System (MPMS).

SIRM intensities of the single zircon crystals vary four orders of magnitude ranging from  $1 \times 10^{-12}$  -  $2 \times 10^{-9}$  Am<sup>2</sup>, and especially a few percent of the grains have strong SIRM larger than  $1 \times 10^{-10}$  Am<sup>2</sup>. The zircon crystals contain nearly pure magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), and they are in both single-domain (SD) and multidomain (MD) states. The SD magnetite contained in the zircon crystals has the potential to record the paleomagnetic information. The existence of MD magnetite suggests that stepwise-demagnetization after LTD treatment is an efficient approach for paleomagnetic measurement. Taking into account the relation between SIRM intensity and thermoremanent magnetization (TRM) intensity for magnetite (e.g., Yu, 2010), TRM of single zircon crystal may be measured with a high-sensitivity magnetometer such as a SQUID magnetometer.

Now we plan to sample river sand at the Mississippi River and to conduct rock magnetic measurements of the zircon crystal collected from the sand. On the basis of the rock magnetic studies for the zircon crystals from the Nakagawa River and the Mississippi River, we will discuss the feasibility of the paleointensity experiment using single zircon crystal.

Keywords: Zircon, Rock magnetic study, Paleointensity

## 日本考古地磁気データベースの進展 Development of the Japan Archeomagnetism Database

畠山 唯達<sup>1\*</sup>  
HATAKEYAMA, Tadahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学情報処理センター  
<sup>1</sup> Information Processing Center, Okayama University of Science

我々は2012年より日本の考古地磁気データをオンラインデータベース化する作業に取り組んできた。これまでに700ほどのデータをデータベース中に含めているが、バックヤードにはまだ千数百のデータがある。現在はこれらのデータをデータベースに加えるための作業をしている。そのためには、個々のデータにあたって、考古地磁気データの様子のみならず、元文献が載っている考古学の発掘報告書にもあたり年代値がどのように付与されているかも調べなければならない。考古地磁気データのうちかなりの部分が考古地磁気年代推定法として利用されているために年代値が独立でないのである。

また、手元にはないデータを発掘報告書の書庫から探す作業も続けている。日本の考古地磁気データは一次資料が論文ではなく発掘報告書であることがほとんどで、これらは現在検索にかからない。そこで、書庫よりしらみつぶしに探している。現在までに100余のサイトのデータが見つかり、これらを順次データベースに加えていく。

以上のように、考古地磁気データベースの作成は地味な作業が主であるが、このデータベースによって地磁気永年変化モデルがより洗練され、年代推定法にも大きく寄与できることが期待される。

オンラインデータベースサイトではこのほかに、考古地磁気・古地磁気に関するドキュメントも整備しており、さらに、地磁気永年変化モデルをもとにした日本周辺の任意の場所におけるある時期の地磁気方位値の提供も始めた。

本発表では、これらの進捗を報告する。

キーワード: 考古地磁気学, データベース, 地磁気永年変化

Keywords: Archeomagnetism, Database, Geomagnetic secular variations



## 根室・釧路地域の重磁力異常から推定される中規模地帯区分の地質学的な実態解明の研究(2)

### Medium scale crustal structure based on magnetic and gravity anomalies in the eastern part of Hokkaido, Japan. -part 2

森尻 理恵<sup>1\*</sup>; 中川 充<sup>1</sup>  
MORIJI, Rie<sup>1\*</sup>; NAKAGAWA, Mitsuru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研地質情報シームレス地質情報  
<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST

北海道東部太平洋沿岸には極めて特徴的に正の重力異常 (e.g., 森尻ほか, 2000) と正の磁気異常 (e.g., 中塚ほか, 2005; Sugisaki et al., 2001) が見られ認められる。この高重力異常帯と後期白亜系～古第三系根室層群の分布が重なることから、一般には根室層群の存在が高重力異常の原因と考えられてきた (e.g., 山本・石川, 2004)。しかし現在地表に現れている堆積岩主体の根室層群だけで高重力異常を説明することは困難であった (森尻ほか, 2000)。筆者らはこれらの研究を踏まえ、根室層群中に小規模ながら噴出相として産出するアルカリかんらん石粗粒玄武岩に着目して、地質試料の採取を行い、密度測定ならびに自然残留磁化強度、帯磁率の測定を行い 2007 年の連合大会で報告した。今回、落石岬沖海底地質図に付属する重磁力図が公表された (上嶋・駒澤, 2012) ことから、計算モデルの改良を行った。その結果、前回推定された地質構造モデルに重要な変更を迫る必要性が無いことを確認した。

キーワード: 岩石磁気, 磁気異常, 重力異常, 根室, 北海道

Keywords: magnetic property, magnetic anomaly, gravity anomaly, Nemuro, Hokkaido

野島断層ガウジ中の地震性熱乱流について：岩石磁気学的考察  
Seismogenic shear-induced thermal turbulence in Nojima fault gouges: micro-textural  
and rock magnetic considerations

中村 教博<sup>1\*</sup>; 福沢 友彦<sup>1</sup>

NAKAMURA, Norihiro<sup>1\*</sup>; FUKUZAWA, Tomohiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Dep. Earth Science, Tohoku University

Nojima fault gouges exhibit a characteristic flow microtexture of laminated slip zones, billow-like wavy folds and turbulent disordered structures. Power spectral analysis of the wavy folds indicates that the geometry roughly obeys a power-law of -1.9, agreeing well with the previously measured value of Kelvin-Helmholtz (KH) turbulence in natural environments. The well-known example of KH instability is a cloud that the cloud-atmosphere interface becomes an unstable vortex sheet that rolls up into a spiral. The instability occurs at the interface between two fluids of different densities shearing at different velocities (Thorpe 2005). The KH wave in Nojima fault gouges was found along a slip plane in a blackish cohesive gouge (pseudotachylite-like gouge), resulting in the presence of instability at the slip interface during ancient earthquake or creep. Thin section observations showed the blackish cohesive gouge consisted of granular materials for both sides of the interface and the KH wave occurs in a denser granular material along an earthquake-originated sharp slip plane. Our scanning Magneto-Impedance magnetic microscope observation shows the KH wave dense layer is only magnetized in isothermally-magnetized thin section, revealing the production of magnetic mineral in KH wave. Because the Nojima fault gouge contains iron-carbonate (siderite), the thermal decomposition of siderite produces magnetite more than 400 °C. Therefore, we suggest that the KH wave is generated through KH instability in a high-temperature (>400 °C) granular dense layer with different densities and different slip velocities. This result suggests that shear-induced thermal turbulence in the fault gouge plays an important role to weaken a frictional strength during earthquake slip dynamics.

## 伊能忠敬山島方位記に基づく 19 世紀初頭の日本の地磁気偏角の解析第 8 回報告 Analyzing the early 19 century's geomagnetic declination in Japan from Tadataka Inoh's Santou-Houi-Ki.

辻本 元博<sup>1\*</sup>; 面谷 明俊<sup>2</sup>; 乾 隆明<sup>3</sup>; 宮内 敏<sup>4</sup>

TSUJIMOTO, Motohiro<sup>1\*</sup>; OMOTANI, Akitoshi<sup>2</sup>; INUI, Takaaki<sup>3</sup>; MIYAUTI, Satoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 日本地図学会, <sup>2</sup> 山陰システム コンサルタント, <sup>3</sup> 松江市文化財審議員, <sup>4</sup> 伊能忠敬研究会

<sup>1</sup>Japan Cartographers Association, <sup>2</sup>San-in System Consultant, <sup>3</sup>Matsue Municipal comitee of property, <sup>4</sup>Studyies of Inoh's map and writing Assoc

国宝「山島方位記」は伊能忠敬による 1800 年から 1816 年迄の北海道東岸から屋久島迄の推計約 20 万件の精度 0° 05' の陸上磁針測量方位角を記録した 67 巻でなる台帳である。1917 年に既知の江戸 (東京) 深川伊能隠宅での 1802 年、1803 年の測量方位角からの唯一の地磁気偏角の解析後に頓挫した解析作業を進めている。(1)「山島方位記」の解析で 19 世紀初頭に遡り日本を地磁気偏角データの過疎地域から正確な地磁気偏角データの集中地域に変え、北東アジアに新しいデータを提供する。解析済み地点数は 178 を超え、当時の日本列島の等偏角線の概要と西日本沿岸の 15' 毎の偏角の分布が現れ始めた。

(2) 1828~1832 年の観測値で描かれたガウスとウエーバーの等偏角線世界地図 (以下ガウス図という) と「山島方位記」から解析した日本列島の等偏角線を比べると概ね同じであるが、九州北部や対馬では相違が見られる。ガウス図の附帯表には日本での観測データは無い。ガウス図に記された東アジアの観測データは内陸の北京、東シベリア、オホーツク、カムチャツカ等であり、山島方位記の解析結果から北海道東部南岸に地域的磁気異常と考えられる地磁気偏角が見られる。ガウス図の日本周辺の等偏角線は緯度 5°、経度 10° の 500km 四角での推定計算値で描かれている。それ故に山島方位記の解析値による補足が重要になる。今後はアメリカ海洋大気庁作成の Andrew Jackson et al Gufml の等偏角線図 (1800-1815) との照合が重要になる。

(3) 地磁気学、地図学、郷土史横断の学際同時解析の手順と優位性 ①伊能図、伊能忠敬測量日記、現代の測量地図だけでなく新たに、郷土史料、郷土の古地図、明治初期の陸軍測量地図等を「山島方位記」の測量実施地点と測量対象地点に付された地名、位置説明記述、磁針測量方位角の照合に加えると正確な証拠を増やすことができる。②景観再現ソフトカシミールと電子国土地図で測量実施基点と測量対象地点の概略の緯度経度と真方位角とを把握する。③測量実施基点の詳細位置を複数の各測量対象への真方位角から「山島方位記」記載の磁針測量方位角を差し引いた平均値を偏角とする。④重要なことは異なる測量対象地点への全ての偏角の値がより近似になる位置を測量実施基点詳細位置としてエクセルの連続式で早く正確に求めることである。⑤現地で実景と GPS 送受信機で測量実施基点詳細位置の緯度経度で秒単位以下の位置を確かめて計算しなおし、従来の研究よりも詳細且つ正確に伊能測量日の測量実施地点の分単位の地磁気偏角を求める。⑥磁気異常の地域や地点も見つけ、表現でき且つ郷土史で価値を有する現存しない建造物、大樹等を含む緯度経度秒単位以下の伊能忠敬測量実施基点詳細位置と秒単位の測量対象地点の位置が復元可能になる。

キーワード: 地磁気偏角, 伊能忠敬, 山島方位記, 基点, 学際

Keywords: declination, Inoh, SantouHouiKI, Reference point, interdisciplinary

## スラブ脱水, 稍深発地震, 島弧マグマ活動 Slab dehydration, intermediate-depth earthquakes, and arc magmatism: A review of seismological observations

中島 淳一<sup>1\*</sup>

NAKAJIMA, Junichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> RCPEV, Graduate School of Sci., Tohoku Univ.

We review recent seismological observations beneath the Japanese Islands and show important roles of geofluids on seismogenesis at intermediate depths and arc magmatism.

Seismicity in the subducting crust of cold slabs is most active at depths of 70-90 km, where seismic velocity in the crust abruptly increases, suggesting that high pore pressures generated as a result of dehydration reactions in the crust facilitate intermediate-depth seismicity. In contrast, seismicity is almost absent in the subducting crust of warm slabs like Cascadia and Nankai. The aseismic crust may be explained by slow dehydration rates in warm slabs, which cannot increase pore pressures effectively.

Magmatism beneath the arc has been discussed in terms of the heterogeneities in seismic velocities together with geochemical and petrological constraints. We recently developed simple but useful method to estimate seismic attenuation structures and applied it to waveform data in NE Japan. Seismic attenuation provides additional insights into ongoing magmatic processes in subduction zones, because higher-temperature environments or the existence of fluids may have different effects on seismic attenuation from on seismic velocity. The obtained results show that a depth profile of  $Q_p^{-1}$  in the back-arc mantle is explained by attenuation expected for a two-dimensional (2-D) thermal model. However, an inclined high-attenuation zone observed in the back-arc mantle wedge, which is interpreted as an upwelling flow, shows higher attenuation than that calculated from the 2-D thermal model. The higher seismic attenuation is probably caused by the concentration of partial melt in the upwelling flow. Our results further imply the breakdown of hydrous minerals in a hydrous layer above the Pacific plate at a depth of ~120 km.

Keywords: dehydration, pore pressure, eclogitization, seismic attenuation



## Imaging mantle melting processes and the effect of water beneath island arcs and backarc spreading centers Imaging mantle melting processes and the effect of water beneath island arcs and backarc spreading centers

Wiens Douglas<sup>1\*</sup> ; WEI S. Shawn<sup>1</sup>  
WIENS, Douglas<sup>1\*</sup> ; WEI, S. shawn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Washington University, St Louis, MO, USA

<sup>1</sup>Washington University, St Louis, MO, USA

We use arrays of land and ocean bottom seismographs to image melting processes in the Mariana and Tonga-Lau mantle wedges. Both regions show arc volcanism, active backarc spreading, and a gradient in mantle water content going from slab to backarc spreading center. The Lau backarc in particular shows a gradient in inferred mantle water content as the spreading centers approach the arc and slab in the south. Water contents range from near-MORB conditions in the Central Lau Spreading Center (CLSC) to high water content for the Eastern Lau Spreading Center (ELSC) and nearly arc-like for the Valu Fa Ridge (VFR).

For both Mariana and Lau we find significant slow velocity and high attenuation anomalies in the upper 100 km of the mantle beneath the volcanic arc and the spreading center. In the Mariana region, the anomalies are separated by a high velocity, low attenuation region at shallow depths (<80 km), implying distinct arc and backarc melting regions, with the anomalies coalescing and possibly allowing material interchange at greater depths. The maximum anomaly in the backarc is shallower (~30 km) than in the arc (~65 km), consistent with geochemical indications on the depth of melt production in these regions. The strongest anomaly beneath the backarc spreading center is narrow (~70 km) and extends from close to the mocho to 80 km depth. Data analyses for the Tonga-Lau project are preliminary, but show similarities to the Mariana images. Extremely low seismic velocity and high attenuation are found in a 100 km wide region beneath the spreading center in the upper 80 km. At deeper depths the anomaly is displaced westward in both velocity and attenuation images, suggesting that partial melting occurs along an upwelling limb of mantle flow originating west of the backarc. 3-D images from Rayleigh wave tomography show a much stronger anomaly along the CLSC when compared to the southern ELSC and VFR. The backarc velocity and attenuation anomalies are stronger in the Lau basin than in the Mariana backarc, perhaps due to higher mantle temperatures inferred from petrology.

Both Q and velocity anomalies are larger than expected for temperature effects based on laboratory-derived relationships, and their configuration is inconsistent with the expected temperature field. In addition, the observed anomalies are roughly inversely proportional to inferred mantle water content, suggesting that water content does not cause the observed large seismic anomalies. However, experimental results suggest that seismic attenuation and velocity are highly sensitive to the presence of even very small amounts of partial melt. Therefore we suggest the high attenuation and low velocity anomalies delineate the melt production regions beneath the ridge axis and volcanic arc, but that only small melt fractions (<1 %) are required to explain the seismic data. Smaller amplitude anomalies beneath the VFR, where large amounts of subduction-derived water are incorporated into the melt, may indicate lower mantle melt porosity due to low melt viscosity and more efficient transport of the water-rich melt, or a different topology of melt in the matrix. A lower melt porosity for aqueous melts is also consistent with the smaller seismic anomaly seen for the water-rich volcanic arc melting regions compared to the backarc melt production zone for both regions.

キーワード: seismic tomography, island arcs, backarc spreading centers, seismic attenuation, mantle fluids, melt generation  
Keywords: seismic tomography, island arcs, backarc spreading centers, seismic attenuation, mantle fluids, melt generation

## Slab Melting in Subduction Zones Slab Melting in Subduction Zones

SCHMIDT, Max<sup>1\*</sup> ; MANN, Ute<sup>1</sup>  
SCHMIDT, Max<sup>1\*</sup> ; MANN, Ute<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ETH Zurich, Switzerland

<sup>1</sup>ETH Zurich, Switzerland

Depending on temperature, slab-to-mantle element transfer in the subarc region may either occur through fluids or melts. In this contribution we present pelite melting experiments systematically varying H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents and review the presently available information on slab melting. Synthetic pelite model compositions containing variable proportions of H<sub>2</sub>O (0.7-4.4 wt%) and CO<sub>2</sub> (0-4 wt%) was melted at 3-4.5 GPa and 750-1200 °C. The fluid-saturation concentration at 3-8 GPa (i.e. the H<sub>2</sub>O stored in phengite as the only hydrous phase) is 0.8-0.9 wt% H<sub>2</sub>O. We locate the fluid-absent solidus of the H<sub>2</sub>O-pelite system at 3 to 4.5 GPa at 880 °C to 1050 °C about 150-200 °C higher than the wet solidus (3 to 4.5 GPa, 730 to 860 °C). CO<sub>2</sub> increases the fluid-saturated solidus temperature by ~30 °C but leaves the fluid-absent solidus temperature unchanged. For all systems considered, the onset of melting is controlled by phengite and only in the fluid-absent experiments K-feldspar becomes a product of melting (at 3 GPa).

Compiling all available information, we parameterize the amount of melt to be formed as a function of temperature for fluid-saturated and fluid-undersaturated conditions. Melt compositions themselves are meta- to peraluminous high Si-granites (71-77 wt% SiO<sub>2</sub> on a volatile free basis) with low Fe, Mg, and Ca contents and are uniform to ~50% melting when plotted as a function of melt fraction (but not temperature), almost independent of starting compositions. At >2 wt% bulk H<sub>2</sub>O melts are sodic (K/Na = 0.2-0.4), while at <1.5 wt% melts are mostly potassic (K/Na = 0.9-1.7). Only the fluid-poor H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> and the CO<sub>2</sub>-only experiments of Thomsen and Schmidt (2008, EPSL) and Tsuno and Dasgupta (2011, CMP) produce significantly different melts i.e. rather potassic phonolites (Na being increasingly retained in jadeitic cpx with pressure). Near 5 GPa a fundamental change occurs: the H<sub>2</sub>O-silicate solidus comes to an endpoint while in CO<sub>2</sub>-rich systems a carbonatite replaces the silicate melt lowering the solidus temperature by more than 100 °C to 9 GPa.

Regarding the likelihood of sediment melting in the subarc region, only the wet solidus is within reach of the hottest geotherms of the thermal models that predict the highest slab-surface temperatures, i.e. none of the Arcay et al (2007, EPSL) slab surface P-T paths cross the solidus while for Syracuse et al. (2010, G3) about 7 out of 56 modeled slab segments have P-T-paths that may lead to significant melting for H<sub>2</sub>O-saturated pelites at 3-4 GPa. As retention of significant amounts of fluids within a subducting lithology is not an option, flushing with fluids from dehydrating serpentinites would be the only option for achieving significant melting in the hottest subduction zones (at the required P-T conditions, there are no suitable reactions in the mafic crust or the sediments themselves). An alternative option to reach widespread pelite melting would be to dismiss the rigid slab surface concept and allow for sediment diapirs to rise into the hot mantle (Gerya and Yuen, 2003, EPSL; Behn et al, 2011, Nature Geosci.) in which case the pelites could bleed out their incompatible elements completely. Nevertheless, these diapirs are propelled by a density contrast resulting from partial melting and it remains unclear whether they could start rising without melting in the first place.

In conclusion, combining P-T paths, phase diagrams and degrees of melting suggests that significant pelite melting at a rigid slab-mantle interface appears to be a rather rare on present day Earth (and hence much more so for mafic materials), the only option for widespread pelite melting appears to be entrainment of the sediments into the mantle wedge. Removal of CO<sub>2</sub> through melting is utterly inefficient and as subsolidus metamorphic reactions lead to low X<sub>CO2</sub> fluids, most of the subducted CO<sub>2</sub> will be fed into the deep beyond-arc C-cycle.

キーワード: slab melting, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, pelite  
Keywords: slab melting, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, pelite

西南日本における高温スラブ沈み込みによる様々なマグマの生成：フォワードモデルによる検討  
Diverse magmatic effects of subducting a hot slab in SW Japan: results from forward modeling

木村 純一<sup>1\*</sup>; ギル ジェームズ<sup>2</sup>  
KIMURA, Jun-ichi<sup>1\*</sup>; GILL, James<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> カリフォルニア大学サンタクルツ校  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>University of California Santa Cruz

In response to the subduction of the young Shikoku Basin of the Philippine Sea Plate, arc magmas erupted in SW Japan throughout the late Cenozoic. Many magma types are present including ocean island basalt (OIB), shoshonite (SHO), arc-type alkali basalt (AB), typical sub-alkalic arc basalt (SAB), high-Mg andesite (HMA), and adakite (ADK). OIB erupted since the Japan Sea back-arc basin opened, whereas subsequent arc magmas accompanied subduction of the Shikoku Basin. However, there the origin of the magmas in relation to hot subduction is debated. Using new major and trace element and Sr-Nd-Pb-Hf isotope analyses of 324 lava samples from seven Quaternary volcanoes, we investigated the genetic conditions of the magma suites using a geochemical mass balance model, Arc Basalt Simulator version 4 (ABS4), that uses these data to solve for the parameters such as pressure/temperature of slab dehydration/melting and slab flux fraction, pressure, and temperature of mantle melting. The calculations suggest that those magmas originated from slab melts that induced flux-melting of mantle peridotite. The suites differ mostly in the mass fraction of slab melt flux, increasing from SHO through AB, SAB, HMA, to ADK. The pressure and temperature of mantle melting decreases in the same order. The suites differ secondarily in the ratio of altered oceanic crust to sediment in the source of the slab melt. The atypical suites associated with hot subduction result from unusually large mass fractions of slab melt and unusually cool mantle temperatures.

キーワード: 西南日本, 火山岩, 地球化学, フォワードモデル  
Keywords: SW Japan, Volcanic rocks, Geochemistry, Forward model

## 日本沈み込み帯の流体と地震 Fluids and earthquakes in the Japan subduction zone

趙 大鵬<sup>1\*</sup>  
ZHAO, Dapeng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理  
<sup>1</sup>Tohoku University, Department of Geophysics

Detailed tomographic images are determined for the source areas of large crustal and megathrust earthquakes that occurred in the Japan subduction zone during 1995-2013, thanks to the availability of the dense Japanese seismic network that could locate accurately the mainshocks and aftershocks of those large earthquakes and provide high-quality arrival-time data for tomographic imaging. Suboceanic events are relocated precisely using sP depth phase. Large crustal earthquakes in the forearc region such as the 1995 Kobe earthquake (M 7.2) and the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) might be triggered by fluids that are released from the dehydration of the subducting slab and directly ascend to the crust and enter an active fault zone. In contrast, along the volcanic front and in back-arc areas, the seismogenic layer in the upper crust is thinned and its mechanical strength is weakened because of ascending hot magmas and fluids which are produced by a combination of slab dehydration and corner flow in the mantle wedge. Large crustal earthquakes are apt to take place at the edge portion of the thinned seismogenic layer which exhibits low velocity, high Poisson's ratio, and high electrical conductivity. To clarify the generating mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and the induced tsunami, we determined high-resolution tomographic images of the Northeast Japan forearc. Significant lateral variations of seismic velocity are visible in the megathrust zone, and most large interplate thrust earthquakes are found to occur in high-velocity (high-V) areas. These high-V zones may represent high-strength asperities at the plate interface where the subducting Pacific plate and the overriding Okhotsk plate are coupled strongly. A shallow high-V zone with large coseismic slip near the Japan Trench may account for the mainshock asperity of the 2011 Tohoku-oki earthquake. Because it is an isolated asperity surrounded by low-velocity patches, most stress on it was released in a short time and the plate interface became decoupled after the Mw 9.0 earthquake. Thus the overriding Okhotsk plate there was shot out toward the Japan Trench and caused the huge tsunami. Further details of the role of arc magma and fluids in the nucleation process of a large earthquake can be clarified by high-resolution geophysical imaging and multidisciplinary studies of the earthquake fault zones.

### References

- Huang, Z., D. Zhao (2013) Relocating the 2011 Tohoku-oki earthquakes (M 6.0-9.0). *Tectonophysics* 586, 35-45.
- Huang, Z., D. Zhao (2013) Mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0) and tsunami: Insight from seismic tomography. *J. Asian Earth Sci.* 70, 160-168.
- Tong, P., D. Zhao, D. Yang (2012) Tomography of the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) and Fukushima nuclear power plant area. *Solid Earth* 3, 43-51.
- Zhao, D., H. Kanamori, H. Negishi, D. Wiens (1996) Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter? *Science* 274, 1891-1894.
- Zhao, D., O. Mishra, R. Sanda (2002) Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence. *Phys. Earth Planet. Inter.* 132, 249-267.
- Zhao, D., M. Santosh, A. Yamada (2010) Dissecting large earthquakes in Japan: Role of arc magma and fluids. *Island Arc* 19, 4-16.
- Zhao, D. et al. (2011) Structural heterogeneity in the megathrust zone and mechanism of the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). *Geophys. Res. Lett.* 38, L17308.

キーワード: 流体, 地震, 日本列島, 沈み込み帯, マグマ, スラブ  
Keywords: fluids, earthquakes, Japan Islands, subduction zones, magma, slab



## Silicate solute in aqueous fluids governs trace element and stable isotope behavior in subduction zones

Mysen Bjorn<sup>1\*</sup>  
MYSEN, Bjorn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, CIW, USA

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, CIW, USA

Physical and chemical properties of fluids equilibrated with subducting deep crust and overlying upper mantle are saturated in silicate components [1]. These components govern physical and chemical properties of the fluids. For example, the solution behavior of volatile components such as hydrogen, carbon, and nitrogen, which form bonding with silicate components in fluids, will differ from the behavior in pure H<sub>2</sub>O fluids [2]. This can also affect isotope fractionation between fluids and condensed silicate materials.

In pure H<sub>2</sub>O, hydrogen bonding plays a role to temperatures <600 °C at pressures in the 1 GPa-range with a  $\Delta H$  for hydrogen bond formation near 20 kJ/mol. At temperatures less than 600 °C, physical properties of fluids, including density, compressibility, and viscosity, are non-linear functions of temperature, whereas at higher temperature and in the absence of hydrogen bonding, these properties tend to become linear functions of temperature. Solution of silicate components in aqueous fluids changes these relationship. The silica solubility in equilibrium with quartz/coesite reaches >5 mol/kg near 5 GPa and 900 °C with polymerized silicate species, SiO<sub>4</sub>, Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, and SiO<sub>3</sub> in the fluid. In equilibrium with enstatite and forsterite, the silicate solubility is ~50% less and only SiO<sub>4</sub> and Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> species exist in the fluids. Those variables affect D/H isotope ratios. For example, the fluid/melt partition coefficients for hydrogen, KH, varies by ~40% as a function of variable silicate speciation in fluids in the 500 °C-800 °C/0.5-1 GPa temperature and pressure range. The hydrogen fluid/melt partition coefficient exceeds that of deuterium. Their temperature-dependence also differs so that for the exchange equilibrium of D and H between coexisting water-saturated melt and silicate-saturated aqueous fluid, the  $\Delta H$  is between -4 and -6 kJ/mol. This difference is because in the more silicate-rich fluids (higher proportion of polymerized silicate species), the abundance ratio, OD/OH, is higher in the more polymerized silicate species in the fluid. As a result, increasing pressure, which leads to increasingly polymerization of silicate, will cause the D/H ratio of the fluid will increase. This also means that D/H fractionation between aqueous fluid and condensed silicate increases with increasing pressure.

Interaction between dissolved silicate components and other elements can also affect their solubility and, therefore, their roles as geochemical tracers. For example, in the system rutile+H<sub>2</sub>O, the Ti solubility in the few-GPa-range at ~1000 °C is on the order of 1-100 ppm as compared with thousands of ppm in silicate-saturated aqueous solution [3]. This difference between pure H<sub>2</sub>O and silicate-saturated fluid is related to interaction with the silicate species dissolved in the fluid, 2M<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> + 4H<sub>2</sub>O + TiO<sub>2</sub> = 4(MH)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> + M<sub>4</sub>TiO<sub>4</sub>, where M is a metal cation. Similar situation likely exist for other nominally insoluble, highly charged elements (e.g., Al<sup>3+</sup>, Zr<sup>4+</sup>, Hf<sup>4+</sup>, P<sup>5+</sup>).

When modeling isotope fractionation and partitioning of nominally insoluble elements between fluid and condensed phases (melts and minerals) in the deep crust and upper mantle of the Earth, the silicate solute concentration and structure in the fluid and the water concentration and structure of silicate melts both can have major effects on the fractionation factors. These factors depend on the element or isotope ratio in question. They also vary with pressure (and likely temperature) because the structure of dissolved silicate in aqueous fluids varies with pressure and temperature.

[1] C. E. Manning, *Eart Planet. Sci. Lett.* 2004, 223, 1-16.

[2] B. O. Mysen, *Lithos* 2012, 148, 228-246.

[3] A. Antignano and C. E. Manning, *Chemical Geology* 2008, 255, 283-293.

キーワード: aqueous fluid, solubility, subduction, stable isotope, structure, fluid property

Keywords: aqueous fluid, solubility, subduction, stable isotope, structure, fluid property

## D/H intramolecular partitioning in alkali silicate melts: with implications for tracing subduction processes

## D/H intramolecular partitioning in alkali silicate melts: with implications for tracing subduction processes

LE LOSQ, Charles<sup>1\*</sup>; CODY, George<sup>1</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>  
LE LOSQ, Charles<sup>1\*</sup>; CODY, George<sup>1</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>

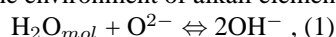
<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

The D/H ratio is an important probe for studying the cycle of water in the Earth interior in general, and in subduction zones in particular. Indeed, D/H ratios in melt inclusions (MIs) of arc magmas for instance indicate that the  $\delta D$  of subduction fluids is high, near -30 ‰, compared to the  $\delta D$  of the mantle that is near -80 ‰. A possible explanation for these different values is that D/H fractionation during dehydration of the slab in subduction zones enriches the subduction fluids in D, leading to high  $\delta D$  values in subduction magmas. This might be accomplished with hydrogen exchange between the melt and another source enriched in D before entrapment of MIs or a diffusive loss of H from within the inclusion leading to D/H fractionation. However, chemical effects affecting the  $\delta D$  ratio have not been considered because it is usually assumed that D and H have the same chemical and structural properties in silicate melts and glasses.

However, recent results from <sup>2</sup>H and <sup>1</sup>H MAS NMR of Na<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub> glasses quenched from melt (equilibrated with fluid at 1400°C and 1.5 GPa) with various amounts of (D<sub>x</sub>H<sub>(1-x)</sub>)<sub>2</sub>O (x = D/[D+H]) lead to the conclusion that D and H isotopes occupy different structural positions in the network. From the <sup>1</sup>H MAS NMR spectra OH<sup>-</sup> groups are distributed in two environments with mean O ··· O distances close to 0.26 and 0.29 nm in the Na<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub> glass. These environments give rise to two strong NMR lines at 16 and 5 ppm respectively. By contrary, <sup>2</sup>H MAS NMR spectra of the same glasses display a strong line at 16 ppm accompanied by a small band near 5 ppm regardless of D/H ratio and total water concentration. This observation leads to the suggestion that OD<sup>-</sup> groups are mainly present in an environment with small O ··· O distances. In other words, the structural behavior of OH<sup>-</sup> and OD<sup>-</sup> groups in the quenched silicate melts (glasses) differs.

In M<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub> glasses, (M = Li, Na or K) with different concentrations of pure H<sub>2</sub>O or D<sub>2</sub>O (from 3.3 up to 17.6 mol%), <sup>2</sup>H and <sup>1</sup>H MAS NMR spectra confirm that by exchanging H with D the intensity of the 16 ppm NMR line increases greatly, whereas the intensity of the 5 ppm line decreases drastically. Interestingly, such a spectral evolution is also observed when increasing the size of the alkali element in the network of hydrous alkali silicate glass. These effects are attributed to steric and electronic effects in the environment of alkali elements, which cause shifts in the equilibrium between H<sub>2</sub>O the O<sup>2-</sup> of the silicate network:



The specific preference of OD<sup>-</sup> groups for small O ··· O sites is in this mind intriguing, but is not in conflict with previous observations. Indeed, increasing the ionic size of alkali elements lead to promote OH<sup>-</sup> in the small O ··· O environment. Similarly, it appears that increasing the size of the proton (by substituting H by D) promotes their existence in this small O ··· O environment. On this basis, we propose that those two observations have a common origin, maybe related to the probability of interaction between H/D and alkali elements depending of their ionic size and/or to molar volume effects related to those ionic sizes.

This large structural-controlled partitioning of D and H in melts, which depends on the melt composition, might be another fractionation process affecting the  $\delta D$  of subduction melts. Consequently,  $\delta D$  values recorded in MIs might be the result of such a structural process and might not reflect the  $\delta D$  of released fluids in the mantle wedge during slab subduction.

キーワード: D/H isotopes, silicate glass, NMR spectroscopy, Raman spectroscopy, Subduction fluids

Keywords: D/H isotopes, silicate glass, NMR spectroscopy, Raman spectroscopy, Subduction fluids

Speciation and solubility of F and Cl in coexisting fluids and silicate melts: implications for F and Cl signature in arc  
Speciation and solubility of F and Cl in coexisting fluids and silicate melts: implications for F and Cl signature in arc

DALOU, Celia<sup>1\*</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>2</sup>; FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>2</sup>  
DALOU, Celia<sup>1\*</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>2</sup>; FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, <sup>2</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

<sup>1</sup>Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, <sup>2</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

The effect of pressure and temperature on the structure of silicate melts coexisting with silica-saturated aqueous electrolyte solutions enriched in fluorine or chlorine in the Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system has been determined. In-situ measurements were conducted with the samples at desired temperatures and pressures in a hydrothermal diamond anvil cell (HDAC) by using microRaman and FTIR spectroscopy techniques. The data were acquired at high temperature and pressure (up to 800°C and 1264 MPa, respectively), and during cooling/decompression to ambient conditions.

The intensity of the Raman bands assigned to stretch vibration of the OH-groups relative to those of coexisting molecular H<sub>2</sub>O in silicate melts is lower in the presence of F and Cl. This difference reflects the interaction of F or Cl with H<sub>2</sub>O in the melts. With decreasing pressure and temperature (P-T) conditions, SiF complexes are favored in the melt rather than in the fluid, perhaps because of decreasing silicate concentration in fluids with decreasing temperature and pressure. In melts, the solubility of Cl, likely in the form of NaCl<sub>(aq)</sub>, increases with decreasing P-T conditions, whereas the abundance of such complexes in coexisting fluids decreases.

Our experiments data were employed to help model the ascent of a magma-fluid system from the upper mantle to the shallow crust. The information offers particular insights into F and Cl partitioning between and the speciation of F and Cl in melts and magmatic fluids. We suggest that the formation of stable SiF and NaCl complexes and their increasing solubilities during magma ascent explain the late volcanic degassing of F and Cl, compared to other volatile species.

It explains why F and Cl are often undersaturated in arc basaltic magmas (Carroll and Webster, 1994), indicating that they often do not experience a significant degassing event. In contrast to H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and S, F and Cl signature in primary arc magmas (arc melt inclusions) can be considered as primary and likely retain information on arc magma sources.

Those results also imply that, while Cl is enriched in aqueous fluids from slab dehydration, F preferentially dissolves in slab melts or supercritical fluids, during flows from the subducted slab into the zone of melting in the mantle wedge. It is therefore expected that at given pressure and temperature, the Cl/F ratio is significantly lower in slab melt and supercritical fluids, than in aqueous fluids. This difference in Cl/F signatures decrease when slab components are dragged down to the deep mantle.

キーワード: Fluorine, Chlorine, silicate melt, aqueous fluid, speciation, HDAC  
Keywords: Fluorine, Chlorine, silicate melt, aqueous fluid, speciation, HDAC

## The Structure of Water-Saturated Carbonate Melts The Structure of Water-Saturated Carbonate Melts

FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>1\*</sup>; MYSEN, Bjorn O.<sup>1</sup>  
FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>1\*</sup>; MYSEN, Bjorn O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, USA

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, USA

The structure of water-saturated Ca- and Mg-bearing carbonate melts under reducing and oxidizing conditions was investigated in a series of hydrothermal anvil cell experiments conducted at 400 - 1100 °C and 442 - 2839 MPa. Equilibria were investigated in the calcite-H<sub>2</sub>O, calcite-CaO-H<sub>2</sub>O, magnesite-H<sub>2</sub>O and magnesite-MgO-H<sub>2</sub>O systems, with redox conditions controlled by Re/ReO<sub>2</sub> and Ti/TiO<sub>2</sub> assemblages. Melting relationships and the C-O-H speciation of the coexisting aqueous fluid and melt were assessed in-situ by Raman vibrational spectroscopy. Hydrous melting of MgCO<sub>3</sub>-MgO occurred at ~850 °C, 1.5 - 2 GPa. In the CaCO<sub>3</sub>-CaO-H<sub>2</sub>O system, melt was formed at 600 - 900 °C and pressures of 0.5 - 1.5 GPa because of melting-point depression imposed by the presence of CaO. The C-O-H speciation of the carbonate melts and coexisting supercritical aqueous solutions was mainly H<sub>2</sub>O and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, with traces of CO<sub>2(aq)</sub> and CH<sub>4(aq)</sub> in the fluid phase. The melt-fluid H<sub>2</sub>O partition coefficients attained in the Mg-bearing melt (median 0.5) were higher than in the Ca-bearing melt (median 0.3). Under oxidizing redox conditions, dissolved ReO<sub>4</sub><sup>-</sup> was present in all phases, underscoring the enhanced solubility of trace elements and metals in carbonate-bearing melts and carbonatites. In effect, the enhanced solubility of H<sub>2</sub>O along with the ionic nature of the carbonate melts may promote the solvation of ionic species in the melt structure.

From in-situ vibrational spectroscopy, the  $\nu_1$ -CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> vibration recorded in the melt spectra suggests the presence of intermolecular interactions between the oxygen of the carbonate ion with water dissolved in the melt. The thermodynamic properties of this water appear to be similar to the supercritical aqueous phase. For example, the estimated enthalpy for the breakage of the hydrogen bonding between water molecules attained values of  $6.8 \pm 1.5$  kcal/mol and  $8.4 \pm 1.3$  kcal/mol in the melt and fluid phase, respectively. The calculated partial molar volume of H<sub>2</sub>O in the melt ( $\sim 48 \pm 6$  cm<sup>3</sup>/mol) is also comparable to the partial molar volume of supercritical water at similar conditions. Interestingly, this value is considerably greater than published partial molar volume values for H<sub>2</sub>O in silicate melts (10-12 cm<sup>3</sup>/mol).

The pressure-temperature melting relationships of the CaO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O systems highlight the important role of water and alkali earth oxides on the hydrous melting of the carbonate-bearing subducting oceanic crust. Carbonates present in marine sediments or serpentinized peridotites may melt before complete dehydration at the slab-mantle wedge transition zone, and thus, never reach sub-arc depths. To this end, melting of carbonate minerals at crustal temperatures and pressure can contribute to the volcanic CO<sub>2</sub> flux at the arc through melt/fluid interactions.

キーワード: carbonate melt, aqueous solutions, hydrothermal diamond anvil cell, raman vibrational spectroscopy  
Keywords: carbonate melt, aqueous solutions, hydrothermal diamond anvil cell, raman vibrational spectroscopy



## 北海道で観測されるスラブ内地震の後続波と海洋性地殻の構造 (その2) Later phase observations and seismic velocity structure in the subducting crust of the Pacific slab beneath Hokkaido

椎名 高裕<sup>1\*</sup>; 中島 淳一<sup>1</sup>; 豊国 源知<sup>1</sup>; 松澤 暢<sup>1</sup>; 北 佐枝子<sup>2</sup>

SHIINA, Takahiro<sup>1\*</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>1</sup>; TOYOKUNI, Genti<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Toru<sup>1</sup>; KITA, Saeko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ, <sup>2</sup> 防災科研

<sup>1</sup> RCPEV, Grad. Sch. of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup> NIED

海洋プレートの沈み込みに伴い地球内部に供給された水は、沈み込み帯における地震活動や島弧マグマ活動と密接に関係していると考えられている (e.g., Kirby et al., 1996; Nakajima et al., 2013). 特にスラブ最上部に存在し、地震波速度の遅い海洋性地殻は含水鉱物として多量の水を保持しており、これらの鉱物の脱水反応や相転移の進行が海洋性地殻の地震波速度やスラブ内の水の分布に影響していると考えられている (e.g., Hacker et al., 2003). したがって、海洋性地殻の詳細な構造を明らかにすることは、沈み込み帯における水循環やスラブ内地震の発生メカニズムを理解する上で非常に重要である。

しかしながら、海洋性地殻の厚さは 7 km 程度であり、初動走時解析などの従来の手法では、地殻の構造不均質を詳細に推定することは困難である。一方で、スラブ内地震で観測される後続波 (PS 変換波や guided wave など) は海洋性地殻やスラブマントルを長い距離伝播するため、スラブの構造不均質により敏感であることが知られている (e.g., Matsuzawa et al., 1986; Abers, 2005)。

本研究では、北海道の日高山脈西部で観測される後続波 (e.g., 清水・前田, 1980) を解析し、北海道東部下に沈み込む海洋性地殻の地震波速度を推定することを試みる。本研究で注目する後続波は、P 波初動の 2-10 秒後に P 波初動よりも大きな振幅を持つ波群として観測される。椎名・他 (2013, 地震学会) ではフォワードモデリングにより後続波の伝播過程を検討し、海洋性地殻内を伝播する guided P-wave であると再解釈した。本解析では彼らの解釈に基づき、guided P-wave の同定と走時の読み取りを行い、海洋性地殻の P 波速度を推定した。加えて、guided P-wave が観測される観測点とイベントのペアに対して、初動 S 波の理論走時より数秒遅れて S 波的な振動を持つ振幅の大きな波群が到着することが確認された。この波群 (Xs phase) に対してもフォワードモデリングにより伝播過程を検討し、観測される走時などを guided P-wave と比較した結果、Xs phase は海洋性地殻内を S 波として伝播した波群、すなわち guided S-wave として解釈できることがわかった。

P 波と S 波、それぞれに対応する guided wave は、地震波速度の遅い海洋性地殻内部を伝播し、海洋性地殻と日高山脈下でスラブ直上まで分布する低速度域 (大陸地殻物質; Kita et al., 2010, 2012) の接触により地表へ放出されると考えられる。このため、同一観測点で観測された guided wave の走時差をとることで、イベント間の海洋性地殻の地震波速度を見積もることができる。本研究では北海道日高山脈西部で観測された太平洋スラブ内地震の観測波形記録から guided wave の読み取りを行い、それぞれ guided P-wave で 117 個、guided S-wave で 56 個の走時から海洋性地殻の地震波速度を推定した。その結果、北海道東部下に沈み込む海洋性地殻に対して、深さ 50-100 km 程度の範囲で、P 波で 6.8-7.7 km/s、S 波で 3.5-4.0 km/s の速度が得られた。深さ 100 km 以浅で得られた P 波速度は東北地方下で推定された海洋性地殻の P 波速度 (Shiina et al., 2013) と同様に、MORB などの含水鉱物から期待される P 波速度 (約 7.2 km/s) よりも小さい。このことは北海道東部下でも海洋性地殻内で流体の水と含水鉱物が共存して存在している可能性を示している。一方で、海洋性地殻の S 波速度に関しては、読み取った走時のデータ数も十分でなく、読み取りの精度も P 波に比べて低いという問題がある。このため、今後、guided wave の読み取りを増やすなどして、S 波速度の推定精度向上させる必要がある。

キーワード: 海洋性地殻, 後続波, guided wave, 太平洋スラブ

Keywords: subducting crust, later phase, guided wave, the Pacific slab

## Pore fluid geochemistry and carbonates in cores and cuttings from the Nankai accretionary prism

### Pore fluid geochemistry and carbonates in cores and cuttings from the Nankai accretionary prism

EVEN, Emilie<sup>1\*</sup>; SAMPLE, James C.<sup>2</sup>; FUCHIDA, Shigeshi<sup>1</sup>; IODP EXPEDITION 348, Shipboard scientists<sup>3</sup>  
EVEN, Emilie<sup>1\*</sup>; SAMPLE, James C.<sup>2</sup>; FUCHIDA, Shigeshi<sup>1</sup>; IODP EXPEDITION 348, Shipboard scientists<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka City University, <sup>2</sup>School of Earth Sciences and Environmental Sustainability, Northern Arizona University, <sup>3</sup>IODP Expedition 348

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka City University, <sup>2</sup>School of Earth Sciences and Environmental Sustainability, Northern Arizona University, <sup>3</sup>IODP Expedition 348

The recent IODP Exp 348 at Site C0002 has successfully deepened Hole C0002F (Exp 338) down to 3058.5 mbsf, deep into the accretionary prism of the Nankai Trough. During Exp 348, cuttings were collected and analysed from drilled interval of Holes C0002N (875 mbsf- 2325 mbsf) and C0002P (1965 mbsf- 3059 bsf) and limited coring was performed from 2163 to 2218 mbsf in Hole C0002P. The major-element composition of the solid cuttings and the geochemistry of interstitial water in cores was determined. Results provide insights into exchange of elements between minerals and pore water phases, and into geochemical signatures related to lithological changes within the prism. This study reports the main geochemical results from IODP Exp 348.

Interstitial waters were collected using the GRIND method (Wheat et al., 1994), in which core sediments were ground in an agate mill with ultra-pure water. The interstitial water percentage was determined by drying sediments at 60 °C and 105 °C, the former to minimize loss of clay-bound water, and the latter to follow the GRIND procedure used in previous expeditions. Concentrations were interpreted with data corrected for dilution at 60 °C, 105 °C and normalised to chlorinity values. Profiles of carbonates (as CaCO<sub>3</sub>), organic carbon and total nitrogen were determined from cuttings of 1-4 mm and >4 mm sizes and are compared with the observed lithological boundaries. Carbonate veins were observed in a core sample exhibiting a fault zone at 2205 mbsf, but no increase was observed at the same depth in the carbonates profile.

The GRIND method has limitations in recovering absolute values of dissolved ions in interstitial waters, and yielded very high dissolved-ion concentrations in some samples. But comparison of ions normalized to chlorinity yielded results comparable to what was observed in pore waters at shallower depths of Site C0002. Some of the trend variations in the cuttings profiles of carbonates, organic carbon and nitrogen match the unit boundaries determined by observation of lithological changes in the cuttings. Therefore, it can be suggested to integrate these data when defining geological units.

*Wheat, Boulegue and Mottl (1994) Proc. ODP, Sci. Results, 139: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 429-437*

キーワード: Accretionary prism, GRIND method, IODP Expedition 348, Nankai Trough, Pore water

Keywords: Accretionary prism, GRIND method, IODP Expedition 348, Nankai Trough, Pore water

## Solution mechanism of water in depolymerized silicate melts Solution mechanism of water in depolymerized silicate melts

Chertkova Nadezda<sup>1\*</sup>; 山下 茂<sup>1</sup>  
CHERTKOVA, Nadezda<sup>1\*</sup>; YAMASHITA, Shigeru<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Okayama University, ISEI

<sup>1</sup>Okayama University, ISEI

It is known that the effect of dissolved water on the viscosity of silicate melts is larger for polymerized melts than for depolymerized melts [e.g., 1, 2]. Direct spectroscopic measurements of melt structure and water speciation at high temperature provide information about the mechanism of water dissolution and its influence on the physical properties of the melts. While *in situ* measurements of water speciation were widely conducted for rhyolitic melts and their analogues [e.g., 3, 4, 5], only limited data are available for depolymerized silicate melts.

We performed high-temperature near-infrared and Raman spectroscopic measurements of hydrous Na<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub> melts (2.3-8.1wt% H<sub>2</sub>O) using externally heated diamond anvil cell (HDAC). Na<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub> composition was chosen as a structural analogue of basaltic melt (anhydrous NBO/T = 1). Experimental pressure was monitored with the pressure- and temperature-dependent Raman shift of <sup>13</sup>C diamond [6]. Near-infrared spectra of the homogeneous liquid phase, observed above 820 degree C, 1.7GPa in the Na<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+2.3wt%H<sub>2</sub>O system and above 700 degree C, 1.6GPa in the Na<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+8.1wt%H<sub>2</sub>O system, contain absorption peaks corresponding to molecular H<sub>2</sub>O (at ~5200 cm<sup>-1</sup>) and structurally bound OH groups (at ~4500 cm<sup>-1</sup>). At 900 degree C and 1.6-1.9GPa the ratio of these peaks height remains approximately constant (2.6-2.2), implying a constant (structurally bound OH)/(molecular H<sub>2</sub>O) ratio for this range of water contents. This observation differs from the regularities reported for more polymerized melts (rapid decrease of OH/H<sub>2</sub>O with total water content) [e.g., 4, 7]. At the same time no pressure effect on the ratio of 4500 cm<sup>-1</sup> peak height to 5200 cm<sup>-1</sup> peak was observed below 2.4 GPa.

### References

- [1] Whittington A., Richet P., Holtz F. (2000) *Geochim Cosmochim Acta* 64, 3725-3736.
- [2] Giordano D., Russell J.K., Dingwell D.B. (2008) *Earth. Planet. Sci. Lett.* 271, 123-134.
- [3] Sowerby J.R., Keppler H. (1999) *Am. Mineral.* 84, 1843-1849.
- [4] Nowak M., Behrens H. (2001) *Earth. Planet. Sci. Lett.* 184, 515-522.
- [5] Shen A.H., Keppler H. (1995) *Am. Mineral.* 80, 1335-1338.
- [6] Mysen B.O., Yamashita S. (2010) *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4577-4588.
- [6] Mysen B.O. (2010) *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4123-4139.
- [7] Botcharnikov R.E., Behrens H., Holtz F. (2006) *Chem. Geol.* 229, 125-143.

キーワード: water speciation, hydrothermal diamond anvil cell, near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy  
Keywords: water speciation, hydrothermal diamond anvil cell, near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy

## Effect of the upper mantle structure on the Moho geometry Effect of the upper mantle structure on the Moho geometry

TENZER, Robert<sup>1\*</sup> ; CHEN, Wenjin<sup>1</sup>  
TENZER, Robert<sup>1\*</sup> ; CHEN, Wenjin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

<sup>1</sup>School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

We investigate the effect of the lateral density structure within the upper (most) mantle on the Moho geometry. The gravimetric forward and inverse modeling methods are applied to determine the Moho depths using the gravity data corrected for major known anomalous density structures within the Earth crust. In our numerical experiment we compute and compare the Moho geometry determined using uniform and laterally varying models of the Moho density contrast. The laterally varying model of the Moho density contrast incorporates the information on the upper mantle lateral density structure taken from the CRUST1.0 global crustal model. For the uniform density contrast model, the constant value of the Moho density contrast is determined based on minimizing the spatial correlation between the gravity data and the Moho geometry. Except for the upper (most) mantle, the deeper heterogeneous mantle density structures including the core-mantle boundary zone are not taken into consideration due to the absence of a reliable 3-D density model of the whole mantle. The numerical results revealed that the consideration of the upper mantle density structure improves the fit of the gravimetric solution with the seismic Moho model.

キーワード: crust, density, gravity, mantle, Moho  
Keywords: crust, density, gravity, mantle, Moho



## 剪断変形による部分溶融ペリドタイトの電気伝導度異方性 Conductivity anisotropy of partial molten peridotite under shear deformation

Zhang Baohua<sup>1</sup>; 芳野 極<sup>1\*</sup>; 山崎 大輔<sup>1</sup>  
ZHANG, Baohua<sup>1</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama Univ.

Recent ocean bottom magnetotelluric investigations have revealed a high-conductivity layer (HCL) with high anisotropy characterized by higher conductivity values in the direction parallel to the plate motion beneath the southern East Pacific Rise (Evans et al., 2005) and beneath the edge of the Cocos plate at the Middle America trench offshore of Nicaragua (Naif et al., 2013). These geophysical observations have been attributed to either hydration (water) of mantle minerals or the presence of partial melt. Currently, aligned partial melt has been regarded as the most preferable candidate for explaining the conductivity anisotropy because of the implausibility of proton conduction (Yoshino et al., 2006).

In this study, we report development of the conductivity anisotropy of partial molten peridotite in three directions parallel and normal to shear on the shear plane, and perpendicular to the shear plane as a function of time and shear strain. Starting samples were pre-synthesized partial molten peridotite (Fe-free and Fe-bearing systems), showing homogeneous melt distribution. The Fe-free and Fe-bearing partially molten peridotite samples were deformed in simple shear geometry at 1 GPa and 1523 and 1723 K, respectively, in a DIA-type apparatus with uniaxial deformation facility. Conductivity of the partially molten peridotite parallel to the shear direction was initially identical to that normal to shear. However, shear-parallel conductivity increased by more than one order of magnitude after the initiation of shear by piston advancement. Shear-parallel conductivity then stayed constant for the duration of the experimental run. On the other hand, conductivity normal to the shear direction on the shear plane remained constant, whereas conductivity perpendicular to the shear plane decreased gradually after initiation of shear and finally close to that of olivine. Conductivity difference between parallel and normal to shear direction reached one order, which is equivalent to that observed beneath asthenosphere. In contrast, such anisotropic behavior was not found in the melt-free samples, suggesting that development of the conductivity anisotropy was generated under shear stress.

Microstructure of the deformed partial molten peridotite shows partial melt tends to preferentially locate grain boundaries parallel to shear direction, and forms continuously thin melt layer sub-parallel to the shear direction, whereas apparently isolated distribution was observed on the section perpendicular to the shear direction. The resultant melt morphology can be approximated by tube like geometry parallel to the shear direction. This observation suggests that the development of conductivity anisotropy is caused by the realignment of partial melt (forming tube-like melt) parallel to shear direction in the silicate matrix.

In conclusion, the high anisotropy of conductivity in the direction of plate motion can be well explained by anisotropic interconnection of melt in partially molten rocks at the top of asthenosphere, but not hydration of nominally anhydrous minerals. Therefore, our results provide the direct experimental evidence for supporting these geophysically observed high-conductivity anisotropy at the LAB and verify the validity of partial melting hypothesis (Yoshino et al., 2006; Naif et al., 2013).

### References

- Evans, R. L. et al. Geophysical evidence from the MELT area for compositional controls on oceanic plates. *Nature* 437, 249-252 (2005).
- Naif, S., Key, K., Constable, S. & Evans, R. L. Melt-rich channel observed at the lithosphere-asthenosphere boundary. *Nature* 495, 356-359 (2013).
- Yoshino, T., Matsuzaki, T., Yamashita, S. & Katsura, T. Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere. *Nature* 443, 973-976 (2006).

キーワード: 部分溶融, アセノスフェア, 電気伝導度, 上部マントル, 異方性, 剪断変形

Keywords: partial melting, asthenosphere, electrical conductivity, upper mantle, anisotropy, shear deformation

## 2点間波形解析による北米大陸の表面波位相速度マップの復元 Surface-wave phase velocity maps of North America with inter-station waveform analysis

浜田 広太<sup>1\*</sup>; 吉澤 和範<sup>2</sup>

HAMADA, Kouta<sup>1\*</sup>; YOSHIZAWA, Kazunori<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学院, <sup>2</sup>北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Hokkaido University

The western United States encompasses a variety of tectonic features, including regions with east-west extension, volcanic areas and relatively stable cratonic regions.

In the last decade, the Transportable Array (USArray) has been installed throughout the U.S, and these waveform data have facilitated a variety of tomographic studies in this region using body and surface waves, and ambient noise analysis making the most of the high-density seismic network.

In this study, we have developed a new method of fully non-linear waveform fitting to measure inter-station phase velocities, using the Neighborhood Algorithm (NA) as a global optimizer. This algorithm searches for model parameters to fit two observed waveforms on a common great-circle path by perturbing the phase term of the fundamental-mode Love and Rayleigh waves. We have employed the reliability parameter, which represents how well the waveforms at two stations can be fitted in a time-frequency domain. This parameter is used as a data selection criterion for the subsequent step of phase velocity mapping.

The method has been applied to observed waveform data of the USArray from 2007 to 2010, and we could collect a large-number of phase speed data (over 45000 for Rayleigh and 15000 for Love) in a period range from 30 and 200 seconds, at short distances less than 1000 km. The phase velocity models for Rayleigh and Love waves indicate good correlation on large scales with the recent tomographic maps derived from different approaches for inter-station phase velocity measurements (Foster et al., 2013); e.g., significant slow velocity anomaly in volcanic regions in western Unites States and extremely fast anomaly in the cratonic region in the longer period range, which implies the robustness of such tectonic features as well as the validity of our new measurement technique. The current method can be expanded for the measurements of inter-station higher-mode phase velocities, which will be of great help in enhancing the vertical resolution of the 3-D shear wave models.

Keywords: surface wave, phase velocity, tomography, North America

## Diffusion to dislocation creep transition in the upper mantle inferred from silicon grain boundary diffusion rates

### Diffusion to dislocation creep transition in the upper mantle inferred from silicon grain boundary diffusion rates

FEI, Hongzhan<sup>1\*</sup>; KATSURA, Tomoo<sup>2</sup>; KOIZUMI, Sanae<sup>3</sup>; SAKAMOTO, Naoya<sup>4</sup>; HASHIGUCHI, Minako<sup>5</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>5</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>  
FEI, Hongzhan<sup>1\*</sup>; KATSURA, Tomoo<sup>2</sup>; KOIZUMI, Sanae<sup>3</sup>; SAKAMOTO, Naoya<sup>4</sup>; HASHIGUCHI, Minako<sup>5</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>5</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Japan, <sup>2</sup>Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, Germany, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan, <sup>4</sup>Isotope Imaging Laboratory, CRI, Hokkaido University, Japan, <sup>5</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, Japan

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Japan, <sup>2</sup>Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, Germany, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan, <sup>4</sup>Isotope Imaging Laboratory, CRI, Hokkaido University, Japan, <sup>5</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, Japan

The majority of the dynamical processes in the upper mantle are controlled by creep of minerals. Dislocation creep causes non-Newtonian viscosity and seismic anisotropy whereas diffusion creep causes Newtonian viscosity and no seismic anisotropy. Determination of deformation mechanism in the upper interior is thus essential to understand mantle dynamics. Previous deformation studies on olivine suggested that the shallow regions of the upper mantle should be dominated by dislocation creep and the deeper regions dominated by diffusion creep [Karato, 1992; Karato and Wu, 1993; Hirth and Kohlstedt, 2003]. However, recent study [Fei et al., 2013] demonstrated that those deformation experiments largely misunderstood the creep rate due to the experimental difficulties. Since the creep of olivine is controlled by silicon diffusion, we measured silicon grain-boundary diffusion coefficient in Mg-olivine aggregates as a function of pressure, temperature, and water content. The activation energy, activation volume, and water content exponent are found to be 240-260 kJ/mol,  $1.8 \pm 0.2 \text{ cm}^3/\text{mol}$ , and  $0.22 \pm 0.05$ , respectively. Together with the silicon lattice diffusion data [Fei et al., 2012; 2013], our results predict the diffusion to dislocation creep transition in the upper mantle, which is in contrast with the previously considered model. In the asthenosphere, dislocation creep should dominate because of the high temperature. In the lithosphere, diffusion creep dominates in shallow regions and dislocation creep dominates in deeper parts. The seismic anisotropy jumps at mid-lithosphere discontinuity beneath continents and at Gutenberg discontinuity beneath oceans are caused by the transition from diffusion to dislocation creep. The weak anisotropy in cold lithospheres could be attributed to the fossil anisotropy formed at the spreading ridges. Dominance of diffusion creep in upper lithosphere accounts for the Newtonian rheology suggested by postglacial rebound.

Fei et al., *EPSL* **345**, 95-103 (2012).

Fei et al., *Nature* **498**, 213-215 (2013).

Hirth and Kohlstedt, *Geophys. Monogr.* **138**, 83-105 (2003).

Karato, *JGR* **19**, 2255-2258 (1992).

Karato and Wu, *Science* **260**, 771-778 (1993).

キーワード: diffusion creep, dislocation creep, upper mantle, silicon, grain boundary diffusion, deformation mechanism  
Keywords: diffusion creep, dislocation creep, upper mantle, silicon, grain boundary diffusion, deformation mechanism

## Aluminum incorporation into phase A - a new hydrous silicate in the deep upper mantle Aluminum incorporation into phase A - a new hydrous silicate in the deep upper mantle

蔡 鬧<sup>1\*</sup>; 井上 徹<sup>1</sup>; 藤野 清志<sup>1</sup>; 大藤 弘明<sup>1</sup>; 栗林 貴弘<sup>2</sup>; 冢本 尚義<sup>3</sup>

CAI, Nao<sup>1\*</sup>; INOUE, Toru<sup>1</sup>; FUJINO, Kiyoshi<sup>1</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>1</sup>; KURIBAYASHI, Takahiro<sup>2</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>3</sup> 北海道大学理学研究院

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Hokaido University

A new aluminum bearing hydrous silicate was found in the experiments under the deep upper mantle conditions, using phase A ( $\text{Mg}_7\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_6$ ) and  $\text{Al}(\text{OH})_3$  as the starting materials. Using electron probe micro analysis (EPMA) and secondary ion mass spectrometry (SIMS), the composition was determined to be very close to  $\text{Mg}_{5.5}\text{AlSi}_2\text{O}_8(\text{OH})_6$ , which contained about 12 wt % of water. Almost pure phase was obtained in the subsequent experiments. The powder x-ray diffraction pattern and transmission electron diffraction patterns showed a hexagonal structure, with an abnormal large c axis. This new phase has similar stability region with phase A. At lower pressure and higher temperature, it breaks down into Chondrodite + Garnet + Brucite + Fluid, while at higher pressure and higher temperature, it breaks down into Al-superhydrous phase B + Garnet + Brucite + Fluid.

Besides, present study shows that phase A coexists with this aluminum bearing hydrous phase, with a small amount of aluminum (<1 wt%) incorporated into phase A structure, which predicts that phase A can preserve only trace of aluminum.

According to Inoue's unpublished data, aluminum can easily incorporate into some dense hydrous magnesium silicates and form aluminum bearing hydrous phases such as phase B, superhydrous phase B, and even perovskite. However, rather than aluminum bearing phase A, the present study shows a small amount of aluminum incorporation into phase A structure, and an appearance of a new aluminum bearing hydrous phase, with the composition very similar to phase A but structure very different from it. Further investigations are needed to clarify these two phases.

キーワード: Phase A, Aluminum incorporation, hydrous phase, upper mantle

Keywords: Phase A, Aluminum incorporation, hydrous phase, upper mantle



## 長白山火山とその付近の深発地震との関係 Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in Northeast Asia

趙 大鵬<sup>1\*</sup>; Tian You<sup>1</sup>  
ZHAO, Dapeng<sup>1\*</sup>; TIAN, You<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理

<sup>1</sup>Tohoku University, Department of Geophysics

The origin of the intraplate volcanoes in Northeast Asia is considered to be associated with upwelling of hot and wet asthenospheric materials in the big mantle wedge above the stagnant Pacific slab in the mantle transition zone. Among these intraplate volcanoes, Changbai is the largest and most active one, and very deep earthquakes (500-600 km depths) in the Pacific slab under East Asia occur ~300 km to the east of the Changbai volcano. Integrating the findings of geophysical, geochemical and petrologic studies so far, we suggest a link between the Changbai volcanism and the deep earthquakes in the Pacific slab. Many large shallow earthquakes occurred in the Pacific plate in the outer-rise areas close to the oceanic trench, and seawater may enter down to the deep portion of the oceanic lithosphere through the active normal faults which generated the large outer-rise earthquakes. The seawater or fluids may be preserved in the active faults even after the Pacific plate subducts into the mantle. Many large deep earthquakes are observed that took place in the subducting Pacific slab under the Japan Sea and the East Asian margin. At least some of the large deep earthquakes are caused by the reactivation of the faults preserved in the subducting slab, and the fluids preserved in the faults within the slab may cause the observed non-double-couple components in the deep earthquake faulting. The fluids preserved in the slab may be released to the overlying mantle wedge through the large deep earthquakes. Because large deep earthquakes occur frequently in the vicinity of the Changbai volcano, much more fluids could be supplied to this volcano than other areas in Northeast Asia, making Changbai the largest and most active intraplate volcano in the region.

### Reference

Zhao, D., Y. Tian (2013) Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: A possible link? *Geophys. J. Int.* 195, 706-724.

キーワード: 火山, 深発地震, アジア, スラブ

Keywords: volcanoes, deep earthquakes, Asia, slab

## Semiconductor diamond heater (SCD): An innovation for ultrahigh temperature experiments in the Kawai cell

### Semiconductor diamond heater (SCD): An innovation for ultrahigh temperature experiments in the Kawai cell

XIE, Longjian<sup>1\*</sup> ; ITO, Eiji<sup>1</sup> ; YONENDA, Akira<sup>1</sup>  
XIE, Longjian<sup>1\*</sup> ; ITO, Eiji<sup>1</sup> ; YONENDA, Akira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth Interior , Okayama University

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth Interior , Okayama University

We developed the semi-conductor diamond heater in the Kawai high pressure cell. The starting material of the semi-conductor diamond heater is born(B)-doped burned-graphite. We succeeded to improve the machinability of the B-doped burned-graphite by decreasing porosity. Following is the motivation and the background of the semi-conductor diamond heater project.

It is important to generate extremely high temperature ( $\sim 3000$  °C) in a large sample volume ( $\sim 0.1\text{mm}^3$ ) in the Kawai apparatus. X-ray transparency is also desirable for in-situ synchrotron analysis. However, any traditional heater used in the Kawai apparatus so far does not satisfy the both requirements simultaneously.

Semiconductor diamond is a candidate material to generate temperatures higher than  $3000$  °C with low x-ray absorption. Anton Shatskiy (2009) have generated a temperature of  $3500$  °C by using the semiconductor diamond heater in a large-volume Kawai-type high-pressure apparatus, although their temperature measurement is questionable from a viewpoint of the power-temperature relation. Furthermore, their semi-conducted diamond heater, made of boron and graphite powders, was not machinable and difficult to control the temperatures. It often became unstable at around  $1000\sim 1300$  °C and impossible to generate higher temperature.

Systematic experiments have done to improve the performance of the semiconductor heater. We used a machinable block of graphite contain 3 wt.% boron as the starting material for the semi-conductor diamond heater. The graphite-diamond transformation started at  $\sim 1000\sim 1200$  °C at 15 GPa in the Kawai apparatus. After the transformation, we stably generated temperature to  $2000$  °C. Activation energy of B-doped diamond is about 0.1 eV, which is much lower than that of pure diamond (5.45eV).

#### References:

Anton Shatskiy, Daisuke Yamazaki, Guillaume Morard, Titus Cooray, Takuya Matsuzaki et al. , Review of Scientific Instruments 80, 023907 (2009).

キーワード: Semiconductor Diamond Heater, Ultrahigh Temperature, Kawai Cell

Keywords: Semiconductor Diamond Heater, Ultrahigh Temperature, Kawai Cell

## 最近のグローバルトモグラフィモデル：我々はどこに向かっているのか？ Recent Global Tomography Models: Where are We Heading for?

竹内 希<sup>1\*</sup>  
TAKEUCHI, Nozomu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Many high-resolution global tomography models have been obtained and we now have consensus about overall features of 3-D heterogeneous structure in the Earth. Majority of models have been obtained by using conventional ray theory which assumes that scale length of lateral heterogeneities is sufficiently large compared with wavelength of seismic waves analyzed.

Primary efforts in recent studies appear to introduce better theories to overcome resolution limits caused by the above-mentioned assumption. The efforts include delay time tomography with finite frequency kernels (e.g., Montelli et al. 2004, Science; Obayashi et al. 2013, GRL) and waveform tomography with 2-D (e.g, Li and Romanowicz 1996, GJI, Panning and Romanowicz 2004, Science) or 3-D (e.g, Takeuchi 2007, GJI; Takeuchi 2012, EPSL) finite frequency kernels. Waveform tomography with further better theories is also becoming feasible (e.g., Lekic and Romanowicz 2011, GJI; French et al. 2013, Science).

In this presentation, I want to propose another direction to improve resolution: use of a new type of dataset. I will propose to use incoherent part of seismic signals (i.e., scattering waves or coda waves). Scattering waves are sensitive to heterogeneities whose scale length is comparable with wavelength of seismic waves analyzed. Use of such waves therefore should provide new information beyond resolution limit of ray theory. At the time of the presentation, I plan to show feasibility and examples of such analyses to reveal distribution of smaller scale heterogeneities in the subduction zone around Japan.

キーワード: tomography, scattering wave, seismology  
Keywords: tomography, scattering wave, seismology

## Lattice preferred orientation of stishovite in deformation experiment Lattice preferred orientation of stishovite in deformation experiment

XU, Fang<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>; TSUJINO, Noriyoshi<sup>1</sup>  
XU, Fang<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>; TSUJINO, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISEI, Okayama University

<sup>1</sup>ISEI, Okayama University

Seismic observations reveal strong negative anisotropy ( $V_{SV} > V_{SH}$ ) at around 550 km depth in the lower part of mantle transition zone (Visser et al., 2008). The mantle tomography indicates the obvious association of this negative anisotropy with the subduction zones (Panning and Romanowicz., 2006). The observed anisotropy can be caused by lattice preferred orientation (LPO) of constituting material when the material is elastically anisotropic. Majorite and ringwoodite, which are the dominant minerals in this region, are nearly isotropic (Chai et al., 1997; Weidner et al., 1984). On the other hand, stishovite, which may occur in significant amounts in this region derived from the delaminated subducting basaltic layer (Karato et al., 1997) and continental crust (Kawai et al., 2012), shows strong elastic anisotropy ( $V_{SV}/V_{SH}$  is as large as 150%) indicated by the acoustic velocities study (Yoneda et al., 2012) on single crystal of stishovite. Therefore, the LPO of stishovite has a high potential to interpret the seismic anisotropy in the lower part of the transition zone and indicate the geometry of mantle flow.

To investigate the LPO of stishovite, deformation experiments on stishovite were conducted in both simple shear and uni-axial geometry. We prepared starting material of polycrystalline stishovite with grain size of  $\sim 10 \mu\text{m}$  at 12 GPa and 1450 °C in a Kawai-type high-pressure apparatus. Then deformation experiments were carried out at 12 GPa and 1600 °C by Kawai-type apparatus for tri-axial deformation (KATD installed at Tokyo Institute of Technology) and deformation-DIA apparatus (SPEED-Mk. II installed at SPring-8). Sintered diamond piston was used in the uni-axial deformation experiment. Shear strain was  $\sim 1.0$  estimated from the rotation of platinum strain marker after deformation. From the change of sample length, uni-axial tension and compression strain were 0.4 and 0.1 respectively. The microstructure and crystallographic orientation of the deformed samples were investigated by SEM with EBSD.

The EBSD results reveal that the [001] direction of stishovite tends to be parallel to the shear direction. (100) plane, though not so obvious, tends to be parallel to the shear plane. The slip system is consistent with rutile  $\text{TiO}_2$  (Blanchin and Faisant., 1979), which has the same structure with stishovite. The calculated seismic anisotropy indicates a fast shear wave along shear direction. Polarization anisotropy reported by Visser et al. (2008) can be attributed by a vertical flow and LPO of stishovite in the transition zone. The negative anisotropy along subduction zones in Panning and Romanowicz. (2006) indicates the type A slabs (slabs which penetrate directly into the lower mantle without much deflection in the transition zone) (Karato et al., 2001).

キーワード: stishovite, deformation, LPO

Keywords: stishovite, deformation, LPO



## 1600~2200 °Cにおける 660 km 地震波不連続面付近のパイロライトの相転移と鉱物化学 Phase transitions and mineral chemistry in pyrolite at 1600-2200C across 660-km seismic discontinuity

石井 貴之<sup>1\*</sup>; 糞谷 浩<sup>1</sup>; 赤荻 正樹<sup>1</sup>  
ISHII, Takayuki<sup>1\*</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1</sup>; AKAOGI, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大学理学部

<sup>1</sup>Department of chemistry, Gakushuin University

It is widely accepted that pyrolite is a model rock which represents the chemical composition of the Earth's upper mantle. Because the post-spinel transition in pyrolite occurs at about 23 GPa along mantle geotherm (e.g. Litasov et al. 2005), it has been accepted that the transition is responsible for the seismic 660-km discontinuity. Slow velocity anomalies by global seismic tomography which may indicate mantle upwelling have been found in the transition zone and the lower mantle, and these regions are higher in temperature than average mantle. To elucidate the origin and dynamics of the mantle plume, informations on phase relations in pyrolite are essential. However, few investigations on phase relations in pyrolite have been made at hot-plume temperatures (1800-2200C) (Hirose, 2002; Nishiyama and Yagi, 2003). In this study, we demonstrated detailed phase equilibrium experiments in pyrolite composition at hot plume conditions.

The starting material was prepared as the oxide mixture in pyrolite composition after McDonough and Sun (1995) excluding minor components (MnO, K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Quench experiments were made at about 20-28 GPa and 1600-2200C for 2-10 hours using a Kawai-type 6-8 multianvil high-pressure apparatus at Gakushuin University. The starting material was packed with pressure calibrants (MgSiO<sub>3</sub> and pyrope) in a Re multi-sample capsule. A LaCrO<sub>3</sub> heater and a W5%Re-W26%Re thermocouple were inserted in a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped MgO pressure medium. Phases of recovered samples were identified with microfocus-Xray diffractometer and SEM-EDS.

The mineral assemblages of MgSiO<sub>3</sub>-rich perovskite (Mpv) + magnesiowustite (Mw) + garnet (Gt) + CaSiO<sub>3</sub>-perovskite (Cpv) and Mpv + Mw + Cpv at 1600-2200C are stable at pressure range of 22-24 GPa and above 24 GPa, respectively. The mineral assemblage of ringwoodite (Rw) + Gt + Cpv at 1600C changes to that of Rw + Mw + Gt + Cpv at 1800-2000C, and Rw disappears perfectly above 2200C. From mass balance calculation of analyzed compositions of the phases, we found that Gt content increases with increasing temperature before and after formation of Mpv. We also calculated the densities in pyrolite at each temperature. The density of average pyrolite mantle (1600C) is higher than pyrolite plume (1800-2200C) across 660-km discontinuity due to increase in Gt content with increasing temperature. Therefore, we conclude that hot-plume ascending nearby 660-km discontinuity has positive buoyancy by the phase transitions.

キーワード: ポストスピネル転移, 660 km 地震波不連続面, マントルプルーム, パイロライト, ポストガーネット転移  
Keywords: post-spinel transition, 660-km seismic discontinuity, mantle plume, pyrolite, post-garnet transition

## 高圧力条件下での $\delta$ -AlOOH の弾性的性質: マントル遷移層における高 $V_S$ 異常への影響

## Elastic properties of delta-AlOOH under high-pressure: Implications for high $V_S$ anomaly in the mantle transition zone

増野 いづみ<sup>1\*</sup>; 村上 元彦<sup>1</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>  
MASHINO, Izumi<sup>1\*</sup>; MURAKAMI, Motohiko<sup>1</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Tohoku University

delta-AlOOH is a high-pressure polymorph of diaspore (alpha-AlOOH) and boehmite (gamma-AlOOH) (Suzuki *et al.*, 2000). Since delta-AlOOH is identified to be stable from 20 to 120 GPa, and temperatures up to 2300 K, this phase is considered to be a possible carrier and reservoir of water in subducting cold slab into the deep mantle (Ohtani *et al.*, 2001; Sano *et al.*, 2004; 2008). In order to investigate the effect of composition on seismic velocities in subducting slab, it is important to measure the elastic properties of delta-AlOOH at high pressure.

We have conducted high-pressure acoustic-wave velocity measurements of delta-AlOOH using Brillouin spectroscopy and also explored the chemical bonding of delta-AlOOH by Raman spectroscopy at high pressure in a diamond anvil cell. We obtained sharp peaks from transverse acoustic mode ( $V_S$ ) of delta-AlOOH over the entire pressure range explored up to a pressure of 89 GPa. The peaks from longitudinal acoustic mode ( $V_P$ ) of delta-AlOOH were masked by the diamond shear acoustic modes from 35 GPa. The pressure dependence of the aggregate velocities for the delta-AlOOH at 300 K suggests that the hydrogen-bonding symmetrization with the space group changes from  $P2_1nm$  to  $Pnmm$  occurs during compression above 7 GPa. The shear and adiabatic bulk moduli and their pressure derivatives at zero pressure were determined to be  $K_0 = 192.2(8)$  (GPa),  $G_0 = 158.8(3)$  (GPa),  $(dK/dP)_0 = 3.63(6)$ , and  $(dG/dP)_0 = 1.35(6)$  for the pressures above 15 GPa. Raman spectroscopic measurements have shown that the  $B_1$  mode frequencies of  $P2_1nm$  disappeared around 6 GPa and  $A_g$  mode frequencies of  $Pnmm$  appeared above 5.6 GPa, which also indicates the hydrogen-bonding symmetrization around 6 GPa. These results indicate that delta-AlOOH becomes harder by the hydrogen-bonding symmetrization and probably exists as a phase ( $Pnmm$ ) with the symmetric hydrogen bonding in the mantle transition zone and lower mantle.

Shear wave velocities for delta-AlOOH are larger than those of hydrous wadsleyite (by 30 %), hydrous ringwoodite (by 29 %), and majorite (by 29 %). Those of delta-AlOOH are approximately 7 % below those of stishovite. The delta-AlOOH phase thus found to be one of the hardest phases compared to the minerals of mantle transition zone. The existence of delta-AlOOH may contribute to the cause of high  $V_S$  and  $V_P$  anomalies. Shear velocities for sediment containing delta-AlOOH phase are larger than those of pyrolite (by 10 %) and MORB (by 5 %). The subducting slabs often stagnate at the transition zone before reaching the lower mantle. Particularly beneath Korean peninsula, there is a high  $V_S$  anomaly (~2 %) in the lower part of the transition zone (Zhang *et al.*, 2012). The seismic data under the eastern part of northeast China (NEC) also indicates a slight positive anomaly of  $V_S$  (~1 %), but the  $V_S$  value observed around 600 km depth under NEC is ~1 % lower than that beneath Korea. We explain the difference in the  $V_S$  anomalies beneath the NEC and Korea by the amount of sediment containing the delta-AlOOH phase and the stagnating duration. If sediments stagnate at the transition zone before reaching the lower mantle in this region, we can estimate that the higher  $V_S$  anomaly (~1 %) than NEC would correspond to sediments with 13.4 vol% in stagnant slab. The average oceanic crust subduction rate is estimated to be about 8 cm/yr around Japan. Assuming this estimated rate of subduction, the slab stagnation has lasted for at least 30 million years.

Keywords: delta-AlOOH, Brillouin scattering, Raman spectroscopy, subducting slab, high pressure

## 660-km 不連続面を貫通するスラブ内の極深発地震 ( $h > 660\text{km}$ ) のメカニズム Mechanisms of ultra-deep earthquakes ( $h > 660\text{km}$ ) in a slab penetrating the 660-km discontinuity

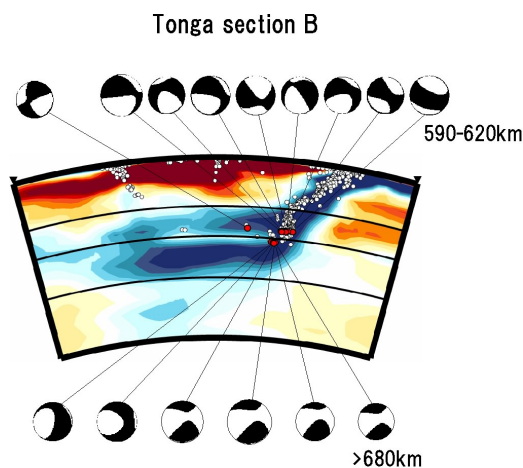
深尾 良夫<sup>1\*</sup>; 大林 政行<sup>1</sup>; 吉光 順子<sup>1</sup>  
FUKAO, Yoshio<sup>1\*</sup>; OBAYASHI, Masayuki<sup>1</sup>; YOSHIMITSU, Junko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>IFREE/JAMSTEC

Recent mantle tomography has begun to reveal the characteristic differences between the deep hypocentral distributions associated with stagnant slabs and those associated with penetrating slabs (e.g., Fukao and Obayashi, 2014). We here show that there are differences in focal mechanism as well. Mechanisms of deep shocks within tomographically imaged stagnant slabs (typically in Bonin and Tonga) are characterized by horizontal compression (e.g., Bonnardot et al., 2009). Those within tomographically imaged penetrating slabs (typically in Java and Tonga) are characterized by very steeply dipping compressional axes (e.g., Alpert et al., 2010).

The deepest seismicity is especially active in Tonga, where many shocks occur at depths greater than 660km. Such ultra-deep shocks show in general very unusual mechanisms, typified by nearly vertical tensional axes with a large amount of CLVD component, as demonstrated in Figure 1 (Mechanisms viewd from the side). This figure also shows a remarkable contrast of mechanisms of deepest shocks just above and below the 660km depth. The source region of these ultra-deep shocks ( $h > 660\text{km}$ ) is underlain by the greatly deepened post-spinel phase boundary (Niu and Kawakatsu, 1995) so that the source region is at the pre-spinel state while the underlying portion is at the post-spinel state. This situation along with contortion of the slab associated with its interaction with the post-spinel phase boundary (e.g., Cizkova and Bina, 2013) may explain the mechanism change across the 660km depth as observed in Figure 1. We explore the finer velocity structure and hypocentral distribution in the source region by a technique of differential travel time tomography.

キーワード: マントルダイナミクス, トモグラフィー, 深発地震  
Keywords: mantle dynamics, tomography, deep earthquakes



## A pyrolitic lower mantle with $(\text{Mg,Fe}^{3+})(\text{Si,Al}^{3+})\text{O}_3$ perovskite A pyrolitic lower mantle with $(\text{Mg,Fe}^{3+})(\text{Si,Al}^{3+})\text{O}_3$ perovskite

WANG, Xianlong<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>

WANG, Xianlong<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology

<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology

To better understand the Earth's lower mantle (LM), thermodynamic properties (TDPs) of LM minerals with Fe and Al dopant should be illustrated more clearly. We have so far reported the TDPs of Fe-bearing MgO, MgSiO<sub>3</sub> perovskite (Pv) and post perovskite. [1-4] We furthermore study the TDPs of Fe- and Al-bearing Pv, where the internally consistent LSDA+*U* method and the lattice dynamics method are applied. Two spin states, high (HS) and low spin state, two substitution sites, Mg and Si site, and several possible distribution configurations are considered. In the LM pressure range, HS Fe<sup>3+</sup> substituted at the Mg site with Al<sup>3+</sup> at the adjacent Si site (Fe-Al pair) is the most stable configuration and tends to distribute homogeneously in LM. Furthermore, negative frequency cannot be observed in the Fe-Al pair-bearing Pv, and Al contributes to middle frequency while Fe mainly to low part due to its heavy mass. This indicates that the Fe-Al pair is vibrationally stable. Incorporation of the pair for geophysically relevant concentrations can increase volume of Pv a little and has marginal effects on the TDPs of Pv except for thermal expansivity and Gruneisen parameter. Simulated densities, adiabatic bulk moduli, and bulk sound velocities show that a composition close to pyrolite is accountable for the reference Earth model.

### References:

[1] A. Metsue, and T. Tsuchiya, J. Geophys. Res. 116, B08207 (2011).

[2] A. Metsue, and T. Tsuchiya, Geophys. J. Int. 190, 310 (2012).

[3] H. Fukui, T. Tsuchiya, and A. Q. R. Baron, J. Geophys. Res. 117, B12202 (2012).

[4] T. Tsuchiya, and X. Wang, J. Geophys. 118, 83 (2013).

キーワード: First-principles method, Internally consistent LSDA+*U*, Perovskite, Thermodynamic properties, Pyrolite

Keywords: First-principles method, Internally consistent LSDA+*U*, Perovskite, Thermodynamic properties, Pyrolite



## 強い圧縮性を持つ流体中の熱対流に関する線形解析 Linear analysis on the onset of thermal convection of highly compressible fluids

亀山 真典<sup>1\*</sup>  
KAMEYAMA, Masanori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学・地球深部研  
<sup>1</sup>GRC, Ehime University

A series of linear stability analysis was performed on the onset of thermal convection in a highly compressible fluid, in order to study the fundamental nature of mantle convection of massive super-Earths in the presence of strong adiabatic compression. We consider the temporal evolution (growth or decay) of an infinitesimal perturbation superimposed to a highly compressible fluid which is in a hydrostatic (motionless) and conductive state in a basally-heated horizontal layer. As a model of pressure-dependence in material properties, we employed an exponential decrease in thermal expansivity and exponential increase in (reference) density with depth. The linearized equations for conservation of mass, momentum and internal (thermal) energy are numerically solved for the critical Rayleigh number as well as the vertical profiles of eigenfunctions for infinitesimal perturbations. The above calculations are repeatedly carried out by systematically varying (i) the dissipation number which measures the effect of adiabatic compression, (ii) the temperature at the top surface and (iii) the magnitude of pressure-dependence in thermal expansivity and reference density.

Our analysis demonstrated that the onset of thermal convection is strongly affected by the adiabatic compression, through modulating the static stability of thermal stratification in the fluid layer. For sufficiently strong adiabatic compression where a sufficiently thick “stratosphere” of stable stratification develops in the layer, for example, the critical Rayleigh number explosively increases with the dissipation number. The explosive changes in the critical Rayleigh number are associated with drastic decreases in the length scales of perturbations both in vertical and horizontal directions. In particular, for very strong adiabatic compression, the vertical motion of fluid is significantly suppressed in a thick “stratosphere”, which narrows the incipient convection in a thin sublayer of unstable thermal stratification. In addition, when the effect of adiabatic compression is extremely strong so that the thermal stratification becomes stable in the entire layer, no perturbation is allowed to grow with time regardless of the Rayleigh number and/or the horizontal wavelength. We also found that the effect of adiabatic compression becomes prominent for higher temperature at the top surface of the fluid layer. These findings may imply the crucial importance of adiabatic compression in understanding the dynamics and evolution of the mantles of massive super-Earths, particularly for those orbiting their parent stars very closely.

キーワード: スーパー地球, マントル対流, 断熱圧縮, 熱膨張率

Keywords: super-Earths, mantle convection, adiabatic compression, thermal expansivity

部分融解したケイ酸塩から溶融鉄が分離する過程の高温高压下におけるX線透視を用いたその場観察  
In Situ observation of the Segregation Process of Molten Iron from Partially Molten Silicate using X-ray Radiography

八木 健彦<sup>1\*</sup>; 後藤 弘匡<sup>2</sup>; 飯塚 理子<sup>1</sup>; 鈴木 昭夫<sup>3</sup>  
YAGI, Takehiko<sup>1\*</sup>; GOTOU, Hirotsada<sup>2</sup>; IIZUKA, Riko<sup>1</sup>; SUZUKI, Akio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 東京大学物性研究所, <sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻  
<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Earth Science, Tohoku University

溶融鉄が部分融解したケイ酸塩から分離する過程を、5GPa, 1800K までの高温高压下でX線透過法によりその場観察を行った。地球のコアは同様の過程によって生成初期に形成されたと考えられており、その過程の詳細については溶融ケイ酸塩中を液滴が落下するモデルや、固液が混じったケイ酸塩中を浸透流となって溶けた鉄が落下するモデルなどが提案されている。しかし今までの実験では種々異なる結果が示されて、まだ統一的理解には至っていない。本研究では Mg(OH)<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、Fe の粉末の様な混合体を出発物質として、室温で 5GPa まで加圧してから、1800K まで昇温する過程でX線透視によるその場観察を行った。その結果、鉄が凝集して球状になった液滴が落下し、最終的にひとつの大きな玉になる過程が観察された。この観察方法がこの様な研究に有力な手段となることが明らかにされた。

キーワード: コア形成過程, 溶融鉄, X線, 高温高压

Keywords: core formation process, molten iron, x-ray, high pressure and temperature

## メジャーライト相がマンテル対流に与える影響 Influence of majorite on mantle convection

市川 浩樹<sup>1\*</sup>; 亀山 真典<sup>2</sup>; 千秋 博紀<sup>3</sup>; 河合 研志<sup>4</sup>; 丸山 茂徳<sup>5</sup>  
ICHIKAWA, Hiroki<sup>1\*</sup>; KAMEYAMA, Masanori<sup>2</sup>; SENSHU, Hiroki<sup>3</sup>; KAWAI, Kenji<sup>4</sup>; MARUYAMA, Shigenori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター及び東京工業大学地球生命研究所, <sup>2</sup> 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 千葉工業大学 惑星探査研究センター, <sup>4</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>5</sup> 東京工業大学 地球生命研究所  
<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>3</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, <sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>5</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

Influence of  $\text{MgSiO}_3$  majorite on the mantle convection has been investigated by using numerical simulations. According to a first principles study (Yu et al., 2011), wadsleyite decomposes to an assemblage of majorite plus periclase with a large negative Clapeyron slope. Since stability field of majorite is limited at high temperature, downwellings are considered to be unaffected by this phase boundary. On the contrary, the upwelling plumes may be significantly modified by this phase boundary. The asymmetry on upwelling and downwelling caused by the phase transitions may induce strong effects on the thermal evolution and the thermal structure of the mantle.

In this study, we performed 2-D numerical simulations on thermal convection of the mantle incorporating majorite stability field. According to our numerical results, very hot upwelling plumes are strongly influenced by the phase transitions related to majorite. The dynamics of these upwellings are controlled by the release and the absorption of latent heat induced by the transitions as well as interruption of currents due to the large negative Clapeyron slope of the transition between wadsleyite and majorite plus periclase.

キーワード: マンテル対流, メジャーライト, 相転移  
Keywords: Mantle convection, Majorite, Phase transition

## Rapid lateral variation of P-wave velocity at the base of the mantle beneath the Western Pacific

### Rapid lateral variation of P-wave velocity at the base of the mantle beneath the Western Pacific

田中 聡<sup>1\*</sup>; 川勝 均<sup>2</sup>; 大林 政行<sup>1</sup>; NECESSArray プロジェクトチーム<sup>2</sup>  
TANAKA, Satoru<sup>1\*</sup>; KAWAKATSU, Hotoshi<sup>2</sup>; OBAYASHI, Masayuki<sup>1</sup>; NECESSARRAY, Project team<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. Tokyo

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. Tokyo

We examine P-wave velocity structure at the base of the mantle beneath the Western Pacific, where is the western edge of the Pacific Large-Low Velocity Province (LLVP), by using high-quality seismograms that are provided by the NECESSArray project. Forward modeling with the reflectivity method is conducted to explain the variation of P-wave travel times as function of epicentral distance near the core shadow zone after station and ellipticity corrections are applied. Additionally PcP-P travel times are also examined to enlarge the survey area. As a result, a rapid variation of P-wave velocity structure at the base of the mantle is detected. Thin (10 to 60 km thickness) and very low velocity (-2 to -6 %) layers at the base of the mantle are intersected with a 100 km thickness and high velocity (+3%) layer, and a slightly fast layer exists at the north of the region with the thin and low velocity layers. Their spatial separations are typically several hundred kilometers and it would be difficult to explain by only a thermal effect. These observations suggest that very complicated thermo-chemical reactions occur near the edge of Pacific LLVP.

キーワード: P-wave velocity, the base of the mantle, the Western Pacific

Keywords: P-wave velocity, the base of the mantle, the Western Pacific



局所的3次元詳細構造のための波形インバージョン手法の開発およびその応用  
Methods for inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D”

河合 研志<sup>1\*</sup>; 小西 健介<sup>2</sup>; ゲラー ロバート<sup>3</sup>; 富士 延章<sup>4</sup>  
KAWAI, Kenji<sup>1\*</sup>; KONISHI, Kensuke<sup>2</sup>; GELLER, Robert J.<sup>3</sup>; FUJI, Nobuaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> ソウル大学, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>4</sup> パリ地球物理研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>4</sup>Institut de Physique du Globe de Paris

We formulate the inverse problem of waveform inversion for localized 3-D seismic structure, computing partial derivatives of waveforms with respect to the elastic moduli at arbitrary points in space for anisotropic and anelastic media. In this study we minimize computational requirements by using the Born approximation with respect to a laterally homogeneous model, but this is not an inherent limitation of our approach. We solve the inverse problem using the conjugate gradient (CG) method, using Akaike's Information Criterion (AIC) to truncate the CG expansion. We apply our method to invert for three-dimensional shear wave structure in the lowermost mantle beneath Central America using a total of 2154 waveforms at periods from 12.5 to 200 s recorded at stations near the Pacific coast of North America for 29 deep and intermediate-depth events beneath South America. The resulting model shows lateral heterogeneity in the E-W direction which may be associated with a subducted cold slab surrounded by hotter materials with slower velocities. Various tests show that our model is robust.

キーワード: 最下部マントル, 波形インバージョン法, ファラロンプレート  
Keywords: Lowermost mantle, Waveform inversion, Farallon plate

## 磁場でさぐる地球のコアと深部マンツルのダイナミクス A magnetic probe into Earth's core and deep-mantle dynamics

櫻庭 中<sup>1\*</sup>  
SAKURABA, Ataru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

It is widely recognized that Earth's core dynamics is an important research subject in understanding the past, present and future states of our planet, firstly because the metallic core is a vast domain accounting for one thirds of Earth's mass and plays a significant role in thermal history, and secondly because it dynamically generates the main geomagnetic field that has historically been observed for several hundred years and geologically recorded in rocks since more than a billion years ago. This review attempts to cover this subject with an attention to general questions: how geomagnetic-field data can be used to advance the deep-Earth science, and what theoretical progresses have been made and could be made. I will deal with some of the following particular topics: (1) various driving sources of convection, such as thermal and compositional buoyancy and inertial forcing (e.g., luni-solar precession); (2) a dynamo without a solid inner core; (3) a dynamo that operates in a part (e.g., an inner part) of the outer core; (4) sensitivity of the geomagnetic field structure (e.g., dipolarity), intensity, and time variations (e.g., reversal frequency) to the above mentioned various parameters.

## 高圧下における合金融体の音速と密度の関係 Relationship between sound velocity and density of liquid alloy under pressure

寺崎 英紀<sup>1\*</sup>; 西田 圭佑<sup>2</sup>; 浦川 啓<sup>3</sup>; 桑原 荘馬<sup>1</sup>; 田窪 勇作<sup>1</sup>; 下山 裕太<sup>1</sup>; 上杉 健太朗<sup>4</sup>; 竹内 晃久<sup>4</sup>; 鈴木 芳生<sup>4</sup>; 河野 義生<sup>5</sup>; 肥後 祐司<sup>4</sup>; 近藤 忠<sup>1</sup>  
TERASAKI, Hidenori<sup>1\*</sup>; NISHIDA, Keisuke<sup>2</sup>; URAKAWA, Satoru<sup>3</sup>; KUWABARA, Souma<sup>1</sup>; TAKUBO, Yusaku<sup>1</sup>; SHI-MOYAMA, Yuta<sup>1</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>4</sup>; TAKEUCHI, Akihisa<sup>4</sup>; SUZUKI, Yoshio<sup>4</sup>; KONO, Yoshio<sup>5</sup>; HIGO, Yuji<sup>4</sup>; KONDO, Tadashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Osaka Univ., <sup>2</sup>Univ. Tokyo, <sup>3</sup>Okayama Univ., <sup>4</sup>JASRI, <sup>5</sup>HPCAT

<sup>1</sup>Osaka Univ., <sup>2</sup>Univ. Tokyo, <sup>3</sup>Okayama Univ., <sup>4</sup>JASRI, <sup>5</sup>HPCAT

It is important to understand the relationship between sound velocity and density of liquid Fe-alloys under high pressure for obtaining a constraint of the composition of the molten outer core from observed seismic data. We have studied a relationship between sound velocity and density of liquid alloy based on simultaneous measurement of these properties under high pressure and high temperature. Sound velocity was measured using ultrasonic pulse-echo overlapping method and density was measured employing X-ray absorption method combined with X-ray tomography technique. The measured P-wave velocity and density of liquid Ni<sub>75</sub>S both increase with pressure. From these data, adiabatic bulk modulus ( $K_{S0}$ ) of the liquid sample can be well constrained to 29 GPa. It is note that the measured P-wave velocity is found to increase linearly with increasing density. This result provides an important issue in terms of Birch's law for liquid material.

キーワード: 音速, 密度, 液体, 高圧

Keywords: Sound velocity, density, liquid, high pressure

## 対流駆動型ダイナモにおける回転磁気流体波 Magnetic-Coriolis waves in convection-driven dynamos: Implications for geomagnetic westward drift

堀 久美子<sup>1\*</sup>; Jones Chris<sup>2</sup>; Wicht Johannes<sup>3</sup>; 清水 久芳<sup>1</sup>  
HORI, Kumiko<sup>1\*</sup>; JONES, Chris<sup>2</sup>; WICHT, Johannes<sup>3</sup>; SHIMIZU, Hisayoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> リーズ大学, <sup>3</sup> マックスプランク太陽系科学研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>University of Leeds, UK, <sup>3</sup>Max-Planck Institute for Solar System Research, Germany

A prominent feature of the geomagnetic secular variation is the westward motion of the non-dipole part of the field, which is significant in the Atlantic hemisphere with timescales of a few hundred years. Potential mechanisms to account for longitudinal geomagnetic drifts are advection due to large-scale zonal flows in the Earth's core as well as propagation of rotating magnetohydrodynamic (MHD) waves, particularly of slow Magnetic-Coriolis (MC) Rossby waves. More commonly the westward motion is thought to reflect zonal flow advection, an assumption that is used when inverting the secular variation signal for the flow at the top of the core. However, recent geodynamo simulations have successfully reproduced longitudinal magnetic drifts and some authors reported that the drift is at least partly a wave propagation.

To assess to what extent waves could play a role in geomagnetic drift, we explore nonlinear simulations of convection-driven MHD dynamos in rotating spherical shells. By performing a tempo-spatial spectral analysis of simulation data, we identify a slow MC-Rossby mode, that follows the dispersion curve predicted by a quasi-geostrophic linear theory. The result indicates that such waves can be excited in the planetary fluid core and that wave propagation may indeed play a role in the magnetic drifts. This gives a framework for further exploration of different wave types, which can provide valuable information about the physical properties in the deep interior fluid core.



## 地磁気移動性磁場の生成過程 A generating process of the geomagnetic drifting field

行武 毅<sup>1\*</sup>; 清水 久芳<sup>2</sup>  
YUKUTAKE, Takesi<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Hisayoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>None, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地球磁場には数百年にわたりほぼ  $0.3^\circ$  /年の速度で西方移動する移動性磁場と同一場所に停滞して変化する停滞性磁場とが存在する。ここでは移動性磁場の生成過程についてひとつのモデルを提案する。

移動性磁場には二つの大きな特徴が存在する。地球磁場を球関数で展開すると、第一に移動性磁場は主として階数と次数が等しい sectorial 項から構成されている。第二に移動速度が階数次数によらずほぼ同じである。つまり分散性がない。

移動速度に分散性がない事から移動性磁場はあたかも核内の流体運動に凍結されたような状態で西向きの核内流体の流れの中で生成されていると考える。さらに核表層部の現象であるとする、表層部で圧倒的に卓越する双極子磁場と流体運動の相互作用によって sectorial 項が卓越した移動性磁場が生成される。

単純化して核を3層のモデルで近似する。第1層は核マントル境界に接する薄層でマントルに固着している。第2層は第1層の内側で西向きに回転する層で内部で流体運動により問題の移動性磁場を発生する。第3層は静止流体とする。流体は核内全体で粘性ゼロ、第1層と第3層で電気伝導度有限、第2層で無限大として双極子磁場のもと回転系での計算を行った。さらにマントルの電気伝導度はゼロとする。

肝心なのは第2層内の流体運動でトロイダル流、ポロイダル流に分けて検討した。マントルが絶縁体であるから核マントル境界で電流の鉛直成分がゼロでなければならない。そのためにはトロイダル流は sectorial な流れ、ポロイダル流は meridional な流れに限られる。双極子磁場に作用して sectorial なトロイダル流は sectorial なポロイダル磁場を、meridional なポロイダル流は meridional なポロイダル磁場を誘導する。これらの磁場は第2層全体の西向きの回転に重畳して西向きに回転する西方移動磁場となる。さらにこれらのポロイダル磁場は第1層で減衰を受けた後マントルを通して地表で観測されることになるが、meridional な磁場の回転は回転していると認識されないため移動性磁場として観測されるのは sectorial な磁場だけとなる。

キーワード: 地磁気永年変化, 西方移動, 移動性磁場, 核表面流

Keywords: geomagnetic secular variation, westward drift, drifting field, core surface flow

## 地球中心核条件における純鉄の電気抵抗率 Electrical resistivity of hcp-Fe under Earth's core conditions

太田 健二<sup>1\*</sup>; 桑山 靖弘<sup>2</sup>; 廣瀬 敬<sup>3</sup>; 大石 泰生<sup>4</sup>  
OHTA, Kenji<sup>1\*</sup>; KUWAYAMA, Yasuhiro<sup>2</sup>; HIROSE, Kei<sup>3</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 東京工業大学 地球生命研究所, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>3</sup>Earth-Life Research Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Japan Synchrotron Radiation Institute

Iron is the primary component of the Earth's core. Convection of the conductive liquid outer core generates the geomagnetic field, and secular cooling of the core induces growth of the solid inner core and dynamics in the Earth's inside. Synchrotron x-ray diffraction study suggests that iron crystallizes in the hexagonal close-packed structure at the inner core conditions (Tateno et al., 2010). Thus, the electrical resistivity of hexagonal close-packed iron (hcp-Fe) is a key piece of information for estimating the transport properties of the core. We report high temperature electrical resistivity for hcp-Fe to 185 GPa measured in a laser-heated diamond anvil cell. We observed resistivity saturation in hcp-Fe under high pressure and high temperature conditions as predicted in a recent laboratory-based model for the conductivity of the Earth's core (Gomi et al., 2013). The saturation effect is significant in estimating electrical and thermal conductivity of the core, which strongly affect the dynamics and thermal evolution of the Earth.

### References

Gomi, H. et al. The high conductivity of iron and thermal evolution of the Earth's core. *Phys. Earth Planet. Inter.* 224, 88-103 (2013).

Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y., & Tatsumi, Y. The structure of iron in Earth's inner core. *Science* 330, 359-361 (2010).  
Keywords: Electrical resistivity, Earth's core, hcp iron

## 非等方熱拡散の空間依存性とその地球コアダイナミクスへの影響 Spatial dependence of anisotropic thermal diffusivity and its influence on dynamics in the Earth's core

松島 政貴<sup>1\*</sup>  
MATSUSHIMA, Masaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学  
<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

Small-scale fluid motions in the Earth's core are likely to be highly anisotropic because of rapid rotation of the Earth and a strong magnetic field in the core. We have carried out direct numerical simulations of rotating magnetoconvection to investigate the effect of anisotropic diffusivity on dynamics in the Earth's core, as one of pilot studies. When a computational region is expressed in terms of a rectangular box with periodic boundaries in the three-directions, the prescribed anisotropic thermal diffusivities were found not to influence the character of rotating magnetoconvection, such as kinetic and magnetic energies averaged over the computational region. When a computational region is expressed in terms of a rectangular box with rigid boundary surfaces perpendicular to the gravitational direction, the prescribed anisotropic thermal diffusivities have a significant effect on the character of rotating magnetoconvection; that is, kinetic and magnetic energies can be increased even by a small anisotropy. The degree of increase depends on the direction of anisotropy and the direction of gravity corresponding to location of the computational region. These results suggest that anisotropic thermal diffusivity insignificantly influences dynamics in the bulk of the core, but that it should be effective near rigid boundary surfaces. Therefore, it is likely that anisotropic diffusivity has a more significant effect on MHD dynamos in rotating thin spherical shells. Such an implication can be examined through global numerical simulations of MHD dynamo models with anisotropic diffusivity being variable in the core.

Instead of such a study, we perform further direct numerical simulations of rotating magnetoconvection by prescribing anisotropic thermal diffusivities with spatial dependence; for example, in one case, anisotropic thermal diffusivities are presumed to be effective only near rigid boundary surfaces; in another case, anisotropic thermal diffusivities are presumed to be effective only far from rigid boundary surfaces. Hence this is another pilot study. Kinetic and magnetic energies in the former case seem to be larger than those in the latter case. The result is consistent with that obtained in our previous studies.

キーワード: 非等方性熱拡散, コアダイナミクス  
Keywords: anisotropic thermal diffusivity, core dynamics

## Can a stably stratified layer interrupt the top-down dynamics of Earth's core? Can a stably stratified layer interrupt the top-down dynamics of Earth's core?

中川 貴司<sup>1\*</sup>  
NAKAGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC

Takashi Nakagawa

In some of previous studies of numerical dynamo simulation with a stably stratified region below the outer boundary, the long-wavelength feature of radial magnetic field can be only found on the outer boundary because a stratified layer can filter small-scale features of radial magnetic field generated in the convective region below the stratified boundary [Christensen, 2006; Nakagawa, 2011]. The existence of stably stratified region below the core-mantle boundary (CMB) is recently exposed from high pressure mineral physics [e.g. Pozzo et al., 2012] and seismological data analysis [e.g. Helffrich and Kaneshima, 2013].

Regarding the modeling on geomagnetic secular variation from numerical dynamo simulations, the heterogeneous thermal/chemical anomalies at the core-mantle boundary is important for understanding the time-scale of secular variation such as polarity reversals and excursions suggested from paleomagnetic observations [e.g. Olson et al., 2011; Olson et al., 2013] and current observational magnetic field [Aubert et al., 2013]. However, their investigation was not included in the effects of stably stratified region below the CMB in their dynamo simulations.

Here we introduce several examples of numerical dynamo simulations with both heterogeneous outer boundary prescribed by the CMB heat flux calculated from numerical mantle convection simulations and a stably stratified layer. Preliminary results are found that the large-scale and amplitude of thermal/chemical anomalies induced by the heterogeneous boundary condition, that is, thermal wind type flow, may be trapped at the imposed stratified boundary. This may imply that the geomagnetic secular variations related to the core-mantle coupling may be suggested that the core surface flow would be a key physics.

キーワード: Earth's core, heterogeneity, core-mantle boundary, stably stratified layer, thermal wind  
Keywords: Earth's core, heterogeneity, core-mantle boundary, stably stratified layer, thermal wind



## 高温高圧下における液体鉄ニッケル硫黄合金の弾性波速度測定 Sound velocity measurements of liquid Fe-Ni-S alloy at high pressure and temperature via inelastic X-ray scattering

今田 沙織<sup>1\*</sup>; 中島 陽一<sup>2</sup>; 駒林 鉄也<sup>3</sup>; 廣瀬 敬<sup>4</sup>; 筒井 智嗣<sup>5</sup>; 内山 裕士<sup>5</sup>; 石川 大介<sup>5</sup>; Alfred Baron<sup>2</sup>  
IMADA, Saori<sup>1\*</sup>; NAKAJIMA, Yoichi<sup>2</sup>; KOMABAYASHI, Tetsuya<sup>3</sup>; HIROSE, Kei<sup>4</sup>; TSUTSUI, Satoshi<sup>5</sup>; UCHIYAMA,  
Hiroshi<sup>5</sup>; ISHIKAWA, Daisuke<sup>5</sup>; ALFRED, Baron<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 理化学研究所 理化学研究所, <sup>3</sup> エジンバラ大学, <sup>4</sup> 地球生命研究所, <sup>5</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Material Dynamics Laboratory, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN, <sup>3</sup>School of Geosciences, The University of Edinburgh, <sup>4</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>5</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

液体 Fe-Ni 合金で構成されている外核には、水素 (H)、炭素 (C)、酸素 (O)、ケイ素 (Si)、硫黄 (S) 等の軽元素が含まれると考えられてきたが、含有される軽元素の種類、含有量は未だ明らかにされていない (e.g. Poirier 1994, Li and Fei 2003, McDonough 2003)。また、近年の観測により、火星や水星にも液体核が存在する可能性があることが報告された (Dehant, Science, Margot et al. 2007)

地震波速度は地球深部の観測として最も信頼性が高い。液体 Fe 合金の弾性波速度のデータは、観測により得られた地震波速度と直接比較することが出来、外核組成決定に強い制約を与える。しかし実験的困難さから、5 GPa 以上の高圧下において液体 Fe 合金の弾性波速度を測定した例は無い (Nishida et al., 2012)。本研究では、地球、火星、水星外核に含まれる軽元素の候補の一つである硫黄に着目し、高圧発生装置ダイヤモンドアンビルセルと SPring-8 BL35XU、BL43XU 高分解能 X 線非弾性散乱装置を組み合わせ、高圧下における液体 Fe-Ni-S 合金の弾性波速度測定を、10-30 万気圧までの圧力範囲にて行った。出発試料として、 $(\text{Fe}_{0.83}\text{Ni}_{0.17})_3\text{S}$ 、 $(\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36})_3\text{S}$  の組成をもつ粉末混合物、もしくはマルチアンビル型高圧発生装置を用い、合成した試料を用いた。

今学会では、得られた弾性波速度データを用い、火星核、水星核について議論を行う。

キーワード: 弾性波速度, 非弾性散乱法, 外核, 液体鉄合金, 高温高圧実験

Keywords: sound velocity, inelastic X-ray scattering, planetary outer core, liquid iron alloy, High-PT experiment

## Experimental approach to the core-mantle boundary region of Mercury Experimental approach to the core-mantle boundary region of Mercury

岡本 美宝<sup>1</sup>; 浦川 啓<sup>1\*</sup>  
OKAMOTO, Miho<sup>1</sup>; URAKAWA, Satoru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学 自然科学研究科  
<sup>1</sup>Dept Earth Sci, Okayama Univ

MESSENGER mission revealed precise moment of inertia parameters of Mercury and its surface chemistry [1, 2]. These data allow to model the internal structure of Mercury, which has a large liquid core with ~2000 km radius and a solid outer shell with ~400 km thickness [3, 4]. As density of solid outer portion is apparently higher than that of the expected mantle silicate, the solid outer layer must include dense materials. Recent models [3, 4] showed that the Mercury's core contains sulfur and silicon as light elements due to high S fugacity and low oxygen fugacity of its interior. Those models presented a solid FeS layer at bottom of solid outer shell of Mercury as a dense layer, which separated from liquid outer core as a FeS-rich liquid due to liquid immiscibility of the Fe-S-Si ternary system. To investigate the FeS-rich layer at the top of Mercury's core, we performed the high-pressure experiments on the Fe-S-Si system using a KAWAI-type multi-anvil apparatus.

Pressure is fixed at 5 GPa corresponding to the CMB of Mercury and temperature is 1800 K, which is 200 K above the liquidus of Fe-S-Si system reported by Sanloup and Fei [5]. Fe-S-Si sample was kept for 30 min at this condition, and then it was quenched into room temperature. Oxygen fugacity of run charges was maintained around 3 log unit below IW buffer. Texture and chemistry of recovered samples were examined by electron microprobe.

We found two immiscible liquids in one run charge, which consist of Fe,Si-rich metallic liquid and FeS-rich sulfide liquid. Sulfur content of metallic liquid ranges 6 to 9 at%, which is higher by ~5 at% than those reported by Morard and Katsura [6]. Differences in texture of recovered samples and run duration between this study and Morard and Katsura [6] suggest that the latter experiments were in disequilibrium state. Our data shows the liquid immiscible region has a narrower extent than the previous estimation and the Mercury immiscible Fe-S-Si core must contain at least 6-9 at% sulfur. The quenched FeS-rich liquid phase consists mainly of crystalline FeS (~90 vol%) and Fe-Si alloy. In the case that FeS-rich liquid contacted with MgO sample container, (Mg<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)S crystalline phase coexisted with FeS-rich liquid. Mg-sulfide phase could be made by Fe-Mg exchange reaction between MgO and FeS-rich liquid. In the Mercury core, when FeS-rich liquid ascends to add the bottom of the CMB due to its buoyancy, it makes a stable low density layer. Mg-sulfide phase is produced under low oxygen fugacity and high sulfur fugacity at CMB, and then it incorporates into mantle. This is consistent with the results of X-ray fluorescence spectrometry on the Mercury's surface, which indicates the presence of Mg and Ca sulfides [2].

### References

- [1] Margot JL et al., *J. Geophys. Res.*, 117, E00L09, 2012.
- [2] Nittler LR et al., *Science*, 333, 1847, 2011.
- [3] Smith DE et al., *Science*, 336, 214, 2012.
- [4] Hauck II SA et al., *J. Geophys. Res.: Planets*, 118, 1204, 2013.
- [5] Sanloup C and Fei Y, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 147, 57, 2004.
- [6] Morard G and Katsura T, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 74, 3659, 2010.

キーワード: 核, 核マントル境界, 水星  
Keywords: core, CMB, Mercury

## GHz 音速法とブリリユアン散乱法の併用による マントル鉱物のその場弾性測定 II Single crystal elasticity by means of GHz ultrasonics and Brillouin scattering in DAC II

米田 明<sup>1\*</sup>; 村上 元彦<sup>2</sup>

YONEDA, Akira<sup>1\*</sup>; MURAKAMI, Motohiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>2</sup> 東北大学理学部

<sup>1</sup>ISEI, Okayama Univ., <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University

マントル鉱物の弾性はブリリユアン (BS) 散乱法により測定されてきたが、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) で測定する場合、約 100GPa の高圧下になると試料鉱物の P 波速度がダイヤモンドの S 波速度と同程度になり測定できなくなるという問題があった (試料の S 波速度は測定可能)。この問題を解決するための方法として、P 波速度は GHz 音速法で測定し S 波速度はブリリユアン散乱法で測定するという単純なアイデアを着想し開発を行ってきた。昨年度の連合大会では、GHz 音速法の基本的技術開発の状況を発表した。今年度は、その後の進歩を発表する。発表までに、実際に DAC 中で加圧した試料からの GHz z シグナルを取得を目指している段階である。

キーワード: マントル, DAC, 結晶弾性, GHz z 音速法

Keywords: mantle, DAC, single crystal elasticity, GHz ultrasonics

## ケイ酸塩ペロブスカイトの単結晶弾性 Single-crystal elastic property of silicate perovskites

福井 宏之<sup>1\*</sup>; 米田 明<sup>3</sup>; Shatskiy Anton<sup>4</sup>; 筒井 智嗣<sup>5</sup>; Baron Alfred<sup>2</sup>  
FUKUI, Hiroshi<sup>1\*</sup>; YONEDA, Akira<sup>3</sup>; SHATSKIY, Anton<sup>4</sup>; TSUTSUI, Satoshi<sup>5</sup>; BARON, Alfred<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 兵庫県立大学大学院物質理学研究科, <sup>2</sup> 理化学研究所バロン物質ダイナミクス研究室, <sup>3</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>4</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Science, Siberian Branch, <sup>5</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup> Graduate School of Material Science, University of Hyogo, <sup>2</sup> Materials Dynamics Laboratory, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN, <sup>3</sup> Institute for the Earth's Interior, Okayama University, <sup>4</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Science, Siberian Branch, <sup>5</sup> Research and Utilization Division, SPring-8/JASRI

Information of single-crystal elasticity of silicate perovskite is essential for comprehensive understanding of the lower mantle. We have measured single-crystal elastic property of  $\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x\text{SiO}_3$  perovskite ( $x = 0$  or  $0.035$ ) by means of inelastic x-ray scattering at the ambient condition. The present results show relatively low values compared to previous reports for the iron free sample. The effect of iron increases both adiabatic bulk modulus and shear modulus. Combining the present results with pressure and temperature derivatives reported in literature, the chemical composition of the lower mantle will be discussed.

Keywords: silicate perovskite, single-crystal elasticity, the lower mantle, inelastic x-ray scattering



## 遷移層から下部マントルに至る圧力での高圧鉱物の熱伝導測定 Measurement of thermal conduction of high-pressure minerals at pressures of the transition zone and to the lower mantle

大迫 正弘<sup>1\*</sup>; 米田 明<sup>2</sup>; 芳野 極<sup>2</sup>  
OSAKO, Masahiro<sup>1\*</sup>; YONEDA, Akira<sup>2</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立科学博物館理工学研究部, <sup>2</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター  
<sup>1</sup>National Museum of Nature and Science, <sup>2</sup>Institute for study of the Earth's interior

Knowledge of thermal diffusivity or thermal conductivity of the mantle is vital for study of the dynamics of the Earth. So far thermal diffusivity and thermal conductivity of mantle minerals were measured under high pressure using a pulse-heating method of one-dimensional heat flow. This method is a predominant one for study in deep Earth's materials under pressure because it requires comparatively small amount of samples. It is also applicable to materials with anisotropy in thermal conduction. In addition its measurement yields heat capacity data under pressure.

Thermal conductivity or thermal diffusivity of olivine and garnet increases 3-4 % per 1 GPa, and olivine still reveals anisotropy in thermal conduction under the conditions of the upper mantle. Antigorite, a high-temperature form of serpentine, has low thermal diffusivity and low thermal conductivity which are much lower than those of olivine, whereas talc has high thermal diffusivity and thermal conductivity comparable to those of olivine. All those data were obtained from the measurements at pressures up to 10 GPa and temperatures to 1100 K. An advanced cell assembly was needed to expand the pressure range of measurement.

A new pressure-cell assembly similar to our previous one is designed for a sample of 3 mm in diameter and 0.7 mm in thickness. This smaller cell was applied to pyroxene samples of which sizes were necessarily limited. The measurements were conducted using the Kawai-type apparatus at the Institute for study of the Earth's interior, Misasa. This cell enabled to make measurements of thermal properties at pressures exceeding 15 GPa, which will covers the condition in the mantle transition zone.

We made preliminary measurements by this cell for the garnet sample as a test material. The thermal diffusivity showed slightly lower value (5~10 %) and the thermal conductivity was slightly high (0~10 %) value compared with the previous results by the large cell. The precision of measurements should be improved by well-controlled machining of the cell assembly and by refining the data acquisition system. After that this cell will be used for measurements of wadsleyite, ringwoodite and majorite. A cell assembly of more reduced in size is planned. This cell will be used for measurements of MgSiO<sub>3</sub> perovskite.

キーワード: マントル鉱物, 熱拡散率, 熱伝導率, 高圧力

Keywords: mantle minerals, thermal diffusivity, thermal conductivity, high-pressure

## 高温高圧下における Fe-S-Si 系の元素分配：地球核への応用 Elemental partitioning in the Fe-S-Si system at high pressure and temperature: Implications for the Earth's core

坂入 崇紀<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 境 毅<sup>2</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 宮原 正明<sup>3</sup>; 平尾 直久<sup>4</sup>  
SAKAIRI, Takanori<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; SAKAI, Takeshi<sup>2</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; MIYAHARA, Masaaki<sup>3</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>4</sup> 財団法人高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth science, Tohku University, <sup>2</sup>Geodynamics Reserch Center, Ehime University, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>4</sup>JASRI

It is widely accepted that the Earth's core is mainly composed of iron and contains light elements to account for the core's density deficit. Alloying with light elements significantly affects the physical properties of iron and the arguments on the chemical structure of the Earth's core. Therefore, the melting relation of the Fe-light elements system is the key to clarifying the chemical structure of the core because the inner core has formed by crystallization of the molten outer core. Although there are many candidates for light elements in the core, based on geochemical modeling and high-pressure partitioning experiments, sulfur and silicon are considered to be the major light elements. Despite the importance of the effect of sulfur and silicon on the physical properties of iron, previous studies, including high-pressure melting experiments in the Fe-S-Si system, did not cover the pressure conditions of the core. To better understand the properties of the core, we investigated the melting relations of the Fe-S-Si system under high-pressure conditions corresponding to the Earth's core.

We report on the melting relations in the Fe-S-Si system up to 135 GPa. Melting experiments were performed in the pressure range of 37-135 GPa and the temperature range of 1800-2400 K using a double-sided laser-heated diamond anvil cell. The composition of the starting material was Fe<sub>80.1</sub>S<sub>12.7</sub>Si<sub>7.2</sub> (Fe-8 wt.% S-4 wt.% Si). Melting relations were examined on the basis of quenched textures of the recovered samples and chemical analysis of observed phases. The chemical composition of the coexisting phases in the samples was obtained with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system attached to the FEG-SEM. We determined the compositions of the coexisting phases and investigated the partitioning behavior of sulfur and silicon between the metallic melt and the coexisting iron alloy.

We consistently found that a quenched melt with a dendritic texture coexists with a solid Fe alloy in the recovered samples, implying that the samples were partially melted under the experimental pressure and temperature conditions. Based on the present results, the partition coefficients of sulfur and silicon between the liquid and solid Fe alloy were determined in the pressure range from 37 to 135 GPa. The value obtained for  $D_{sulfur}$  at 37 GPa was 0.032(28), whereas  $D_{silicon}$  was 4.53(73), which is significantly higher than  $D_{sulfur}$ . The obtained values of  $D_{sulfur}$  were between 0.032(28) and 0.135(35) and those of  $D_{silicon}$  were between 2.63(12) and 5.58(56) in this study. The present results indicate that the solid Fe alloy is silicon rich whereas the metallic melt is enriched in sulfur. We can find that this trend continues up to the core-mantle boundary (CMB) pressure.

The information on partitioning of light elements between the metallic melt and hcp-Fe is the key for clarifying the chemical structure of the Earth's core because the inner core is considered to have crystallized from the liquid outer core during cooling of the Earth. Moreover, previous studies strongly implied that both sulfur and silicon were the plausible candidates for the light elements in the core. Therefore, our experimental results in the Fe-S-Si system offer important clues for understanding the composition of the Earth's core. Based on the present results, if the Earth's core cools down below the melting temperature of the core material, silicon could be preferentially partitioned into hcp-Fe from the Fe-S-Si liquid during crystallization of the inner core. The present data demonstrated that if the Earth's core contains both sulfur and silicon as light elements, the present-day Earth has a sulfur-rich outer core and a silicon-rich inner core.

キーワード: 地球核, 軽元素, 元素分配, 結晶化

Keywords: Earth's core, light element, elemental partitioning, crystallization

**CMB 電気伝導度不均質と非双極子磁場**  
**Influence of the electrical conductivity heterogeneity at the CMB on the flow and magnetic field in the core**

清水 久芳<sup>1\*</sup>  
SHIMIZU, Hisayoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The effects of electromagnetic induction in the heterogeneous mantle on the observed electromagnetic fields have been studied numerically to investigate possible causes of short time-scale variation known as the geomagnetic jerk. We found previously that the jerk-like magnetic and electric field variations observed at the surface of Earth can be explained by an input of a sudden variation of the toroidal field at the top of the core and large-scale conductivity heterogeneity of which conductivity is about 100 times higher than the background electrical conductivity. In this study, the effect of the heterogeneity on the flow in the core and magnetic field is evaluated by using a simple plane model of a heterogeneous mantle. Preliminary results suggest that the signature of the magnetic field may be detected as a stationary field at the Earth's surface if the heterogeneity is planetary scale, but the penetration length of its effect in the core is much shorter than the length scale of the heterogeneity.

キーワード: 地磁気, CMB  
Keywords: geomagnetic field, CMB

## マグマオーシャン最深部における地球核へのカリウム分配量 —地球核の熱源への応用

### Potassium solubility into the Earth's core at the base of the magma ocean -Implication for the heat source of the core

渡邊 虹水<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 坂巻 竜也<sup>1</sup>; 宮原 正明<sup>2</sup>

WATANABE, Kosui<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1</sup>; MIYAHARA, Masaaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate school of Science, Hiroshima University

Since the densities of the Earth's inner/outer cores are smaller than pure iron at the core conditions, the core has been thought to include light elements, such as H, C, S, O, Si (e.g., Poirier, 1994). Although the light element(s) in the core has not been decided yet, high-pressure experiments and cosmochemical estimations suggested that Si and O are plausible light elements. The energy causing the geodynamo is derived from the accretion energy at the early stage of the Earth, the latent heat of crystallization of the inner core, the gravitation energy associated with the exclusion of light materials from the inner core, and the radioactive decay of radioactive elements which are potentially present in the core. The Earth's core might contain long-lived radioactive elements such as U, Th, and K. In particular, potassium (K) is more depleted in the mantle than other volatile elements. Thus, potassium may be included in the core. In order to verify the amount of potassium in the core, we have performed potassium partitioning experiments under high pressure and temperature.

We studied partitioning of potassium between aluminosilicate (adularia,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) and metal containing oxygen and silicon, and partitioning of potassium without light elements (Fe-O, Fe-Si, pure Fe) at pressures up to 50 GPa and 3500 K using a double-sided laser-heated diamond anvil cell. Our results for the pressure, temperature, and compositional effects on the partitioning coefficient of potassium,  $D_K$  (i.e., the content of potassium in metal [wt%] divided by the content of potassium in silicate [wt%]), reveal that the temperature effect is slightly positive but weaker than that reported previously, whereas the pressure effect is negative and oxygen in metal increases the potassium content in metal, although silicon in metal has the opposite effect. According to the effects on potassium partitioning, we estimated that the amount of potassium in the core is less than 32 ppm and that it generates less than 0.14 TW heat in the core. This amount of heat is small compared with the heat flux at the core-mantle boundary (5-15 TW).

Keywords: Potassium, magma ocean, high pressure, high temperature, Earth's core



## 北海道・東北日本沈み込み帯における温度構造：スラブの形状と斜め沈み込みの影響

### Thermal structure of the NE Japan-Hokkaido subduction system: The effects of 3-D slab geometry and oblique subduction

和田 育子<sup>1\*</sup>; Jiangheng He<sup>2</sup>; 長谷川 昭<sup>3</sup>; 田村 芳彦<sup>4</sup>; 中島 淳一<sup>3</sup>

WADA, Ikuko<sup>1\*</sup>; JIANGHENG, He<sup>2</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>3</sup>; TAMURA, Yoshihiko<sup>4</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> パシフィック地球科学センター, <sup>3</sup> 東北大学地震・噴火予知研究観測センター, <sup>4</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>IRIDeS, Tohoku University, <sup>2</sup>Pacific Geoscience Centre, Canada, <sup>3</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4</sup>Japan Agency for marine-Earth Science and Technology

In this study, we first examine the effects of along-strike variation in slab geometry and oblique subduction on subduction zone thermal structures by comparing 3-D numerical thermal models with a range of generic subduction geometries and parameters with a 2-D reference model. We found that changes in slab dip along a straight margin have modest effects on the mantle flow pattern and thus the thermal field. However, concave and convex ocean-ward margins result in cooler and warmer mantle wedges, respectively, and oblique subduction results in a warmer mantle wedge, compared to the 2-D reference model. We developed a 3-D thermal model for the NE Japan-Hokkaido margin, using a well-constrained 3-D slab geometry model. In general, there is little 3-D effect on the thermal structure of the shallow part (<70 km depth) of the subduction system, where the mantle does not participate in the slab-driven wedge flow. We also found that the 3-D effect is small in the deeper part of the southern half of the system, where the margin is relatively straight and the slab dip does not vary significantly along the margin. These results indicate that 2-D models provide excellent approximations for the thermal structures of the shallow part and the southern part of the subduction system. However, from the northern part of NE Japan to Hokkaido, the mantle flow pattern is affected by the concave ocean-ward margin and oblique subduction, and the wedge is cooler near the NE Japan-Hokkaido junction and warmer in Hokkaido than the 2-D thermal models for the respective regions. We compare the 3-D thermal modeling results with along-strike variations in surface heat flow, arc magma geochemistry, and earthquake distribution in NE Japan and Hokkaido.

キーワード: Tohoku-Hokkaido subduction system, 3-D thermal model, slab geometry, oblique subduction, mantle wedge flow, earthquakes and volcanism

Keywords: Tohoku-Hokkaido subduction system, 3-D thermal model, slab geometry, oblique subduction, mantle wedge flow, earthquakes and volcanism

スラブとマントルがデカップリングする深さの空間変化がスラブ表面温度に与える影響  
Effects of a local deepening of slab-mantle decoupling depth on slab surface temperature

森重 学<sup>1\*</sup>; van Keken Peter<sup>2</sup>  
MORISHIGE, Manabu<sup>1\*</sup>; VAN KEKEN, Peter E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>2</sup> ミシガン大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>University of Michigan

In the subduction zone, we generally observe low seismic attenuation in the forearc mantle. In addition, surface heat flow shows low value in the forearc and a sudden transition to high value in the arc. These observations suggest that the forearc mantle is cold and is not involved in the corner flow in the mantle wedge. We can understand it in terms of slab-mantle decoupling depth ( $D_{dec}$ ). Above  $D_{dec}$ , the mantle does not move with the slab just beneath it. Therefore, it becomes cold quickly due to the cooling from the overriding plate and the slab. Below  $D_{dec}$ , on the other hand, the mantle moves with the slab. It keeps this part of mantle warm by advection of hot material due to the corner flow. Thus,  $D_{dec}$  is a key parameter which strongly affects thermal structure in the subduction zone. Comparison of the observed surface heat flow and the one predicted with 2D numerical model suggests that  $D_{dec}$  does not vary much for each subduction zone and is 70-80km, but in each subduction zone  $D_{dec}$  may show some degree of along-arc variation. One such example is the junction between Japan and Kurile arcs, where the down-dip limit of thrust type earthquake is locally deepened by around 15km. In this presentation, we investigate the effects of a local deepening of  $D_{dec}$  on slab surface temperature.

Toward the goal, we use time-dependent 3D finite element models to compute mantle flow and temperature. Only mantle wedge is treated as a dynamic entity. We use a simple slab geometry and assume a local deepening of  $D_{dec}$  to see its effects. We find that the increase in slab surface temperature at  $D_{dec}$  is larger where we assume a deepening of  $D_{dec}$ , which produces a warmer region there. It is caused by 3D flow in the mantle wedge due to along-arc variation of  $D_{dec}$ . We also calculate surface heat flow from obtained thermal structure, but it does not show significant along-arc variation. These results do not change even when we use a realistic slab geometry which is similar to that of the junction between Japan and Kurile arcs. While the surface heat flow anomaly and deepening of the seismic belt in S. Hokkaido cannot be easily explained by these models, the temperature excursions at the slab surface are significant. These models predict potentially strong variations in the conditions that the fluids leave the slab, which may be visible by various new geothermometers, such as those based on the H<sub>2</sub>O/Ce ratio.

Keywords: subduction zone, slab-mantle decoupling depth, slab surface temperature

## 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度モデリング Thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate in southwest Japan

吉岡 祥一<sup>1\*</sup>; 季 穎鋒<sup>1</sup>; 松本 拓己<sup>2</sup>  
YOSHIOKA, Shoichi<sup>1\*</sup>; JI, Yingfeng<sup>1</sup>; MATSUMOTO, Takumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学都市安全研究センター, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>RCUSS, Kobe University, <sup>2</sup>NIED

By constructing a parallelepiped three-dimensional thermal convection model, we investigated temperature, mantle flow and heat flow distributions associated with subduction of the Philippine Sea (PHS) plate in southwest Japan. We proposed new, realistic, and high-resolution temperature field on the plate interface, and attempted to clarify its relationships with the occurrences of megathrust earthquakes, long-term slow slip events (SSE), and low frequency tremors (LFEs). For this purpose, we newly developed a numerical model to deal with subduction of an oceanic plate with 3D arbitrary geometry. We modeled subduction of the PHS plate by using the up-to-date three-dimensional slab geometry, referring to high resolution P-wave seismic tomography and seismic reflection studies. We also used large number of heat flow data such as BSRs, borehole, heat probe, and Hi-net to constrain calculated temperature field, and took account of complicated subduction history in southwest Japan. The results showed that the interplate temperature was lower by approximately 100 °C in western Shikoku where a larger true subduction angle exists than eastern Shikoku. Temperature change due to erosion and sedimentation affected surface heat flow with short wavelength. We also found that the obtained interplate temperature in the Nankai seismogenic zone was wider than that in the Tonankai seismogenic zone. The LFEs occurred near the plate interface with temperatures ranging from 350 °C to 450 °C at depths of 30 to 40 km. The existence of large temperature gradients from the surface to the inside of the PHS plate was considered to be related to the occurrence of long-term slow slip events beneath the Bungo Channel.

SIT04-04

会場:414

時間:4月28日 10:05-10:20

## Slab-wedge mantle boundary preserved in the Sanbagawa belt, SW Japan Slab-wedge mantle boundary preserved in the Sanbagawa belt, SW Japan

ウォリス サイモン<sup>1\*</sup>; 森 宏<sup>1</sup>; 永治 方敬<sup>1</sup>; 河原 弘和<sup>1</sup>

WALLIS, Simon<sup>1\*</sup>; MORI, Hiroshi<sup>1</sup>; NAGAYA, Takayoshi<sup>1</sup>; KAWAHARA, Hirokazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. Earth & Planetary Sci., Nagoya Uni.

<sup>1</sup>Dept. Earth & Planetary Sci., Nagoya Uni.

The Sanbagawa belt of SW Japan is a high-pressure low-temperature subduction type metamorphic belt. The rock types consists of mafic, siliceous and pelitic schists derived from the subducted slab. There are also a series of ultramafic bodies whose origin is disputed: both a slab and wedge mantle origin have been proposed. However, the clear relationship between the distribution of the mantle rocks and metamorphic grade provides strong evidence that they were derived from the wedge mantle. We carried out a detailed study of the Shiragayama body as an example of serpentized mantle from close to the corner of the wedge. Studies of this region can contribute to our understanding of non-volcanic tremor and fluid flow that occurs in these otherwise inaccessible parts of subduction zones.

Keywords: fore arc mantle, subduction metamorphism, slab mantle boundary



## Phenomenology of Episodic Tremor and Slip Phenomenology of Episodic Tremor and Slip

小原 一成<sup>1\*</sup>  
OBARA, Kazushige<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, UTokyo

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, UTokyo

Episodic Tremor and Slip (ETS) is a coupling phenomenon composed of continuous weak seismic events and geodetic short-term slow slip event (SSE) in the transition zone between the brittle seismogenic zone and stable sliding regime recognized in southwest Japan and Cascadia. This paper reviews characteristics of ETS and related phenomena to contribute to discussion for subduction process.

ETS is interpreted as a stick slip on the plate interface accompanied by seismic swarm at small patches surrounded by the SSE plane because of coincidence of their sources and linear relationship between the duration of tremor episode and the moment of SSE estimated geodetically for each episode. ETS is distributed in a narrow belt-like zone along the strike of the subducting plate. ETS zone is divided into several segments in which episodes recur at each regular recurrence interval. However ETS is not "characteristic earthquake" because the rupture area and recurrence interval are fluctuated. Sometimes we observe rupture propagation through a couple of segments. The segment is usually bounded by gap which is considered as not a barrier but an easily sliding portion because of the existence of multi-segment migration.

ETS activity has depth dependent property. At the deeper part of the ETS zone minor episode frequently occurs, on the other hand major episode occurs infrequently at the shallower part. Large ETS usually initiates from the deeper part and migrates upward then activates at the shallower part. This might be caused by gradual change in frictional property with increasing the depth. At the downdip edge of the ETS zone tremor episode easily occur due to weak strength and stress concentration from stable sliding zone. Each small episode transfers the stress to the updip side. Finally a small episode can propagate to the updip edge then develop as a large ETS episode.

The activity style of ETS in southwest Japan and Cascadia is very similar; however there are some differences. One is the existence of deep very low frequency earthquake (VLF). In Japan the VLF earthquake is usually associated with ETS but has not been detected in Cascadia. It might depend on the detection capability or difference in inhomogeneity of the plate interface because the distribution of VLF earthquake in southwest Japan is more localized compared to that of tremor.

The other difference is the existence of long-term SSE. It is detected at the updip side of ETS zone in the Bungo Channel and Tokai in southwest Japan but not detected in Cascadia. The long-term SSE with duration from several months to years activates tremor at the adjacent limited region in the ETS zone. On the other hand, the tremor activity at the downdip part is not affected. Similar long-term SSE has been detected in Alaska and Mexico, where tremor activity was recently detected at the downdip side of the source fault of the long-term SSE. The tremor is seems to be activated during the SSE period like as in southwest Japan. The long-term SSE in Tokai is located above the anomalously high  $V_p/V_s$  region in the slab. In Mexico, a ultra slow speed layer was found in the long-term SSE source region. Therefore, the anomalous structure might be a cause of the long-term SSE. ETS and long-term SSE are quite different in the slip velocity. It might reflect the difference in the frictional property. In Tokai, the source region of the long-term SSE and ETS is bounded by the inland Moho discontinuity. Therefore, ETS occurs at the interface between the subducting plate and overlying mantle wedge.

ETS has not been recognized besides in southwest Japan and Cascadia; however ambient tremor has been detected in some regions. We expect that the ambient tremor is triggered by small SSE which is not detected by the current observation. Understanding detail relationship between tremor and SSE based on improvement detection capability is important to reveal the mechanism of ETS.

Keywords: slow earthquake, non-volcanic tremor, slow slip event, subduction zone, plate interface

## Enhancement of slow earthquakes by geometrical irregularity of subducting oceanic crust Enhancement of slow earthquakes by geometrical irregularity of subducting oceanic crust

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 武田 哲也<sup>2</sup>  
KATO, Aitaro<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>ERI University of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

Along the worldwide subduction zones, slow earthquakes commonly occur on the deep extension of major tectonic boundary which hosts megathrust earthquake rupture. Slow earthquakes silently release stress to the adjacent seismogenic zone, raising the likelihood of promoting unstable fast slip. However, what controls the transitional variations in fault-slip behaviors from fast to slow modes on the deep extension of megathrust fault remains controversial. Here we use a high-resolution receiver function and seismic tomography illustrated by dense seismic arrays to analyze the structural elements in the subduction complex and fore-arc mantle wedge beneath the Shikoku Island, Japan, where episodic tremor and slow-slip events (ETS) have been most intensive for over a decade.

We find out that deformed oceanic crust with irregularity of surface geometry horizontally lies in the ETS zone, where low seismic velocity zone with high Poisson's ratio that we interpret as high pore-fluid pressure. Step-like discontinuous alignments of intra-slab seismicity support the flat-subduction of the oceanic crust with faulting structure. In contrast, at depths shallower than the ETS zone, the low velocity anomaly within the oceanic crust is weak and dipping towards the NW, implying less amount of high-pressured fluid in the tilting oceanic crust. In addition, lithology of the overlying plate changes to partially serpentinized mantle wedge in the ETS zone. Locally flat-geometry of the subducting oceanic crust combined with the contact of serpentine enhances accumulation of high-pressurized fluids along the plate interface, leading to segregation between slow and fast slip modes at the deep transition zone of mega-thrust fault.

## 蛇紋岩の高温高圧変形実験によるスロー地震発生機構に関する考察 Deformation experiments on serpentinite at high PT conditions with implications for the mechanisms of slow earthquakes

岡崎 啓史<sup>1\*</sup>; Hirth Greg<sup>1</sup>; Proctor Brooks<sup>1</sup>; 片山 郁夫<sup>2</sup>; 高橋 美紀<sup>3</sup>  
OKAZAKI, Keishi<sup>1\*</sup>; HIRTH, Greg<sup>1</sup>; PROCTOR, Brooks<sup>1</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Miki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geological Sciences, Brown University, <sup>2</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Department of Geological Sciences, Brown University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan, AIST

To understand the spatial and temporal distribution of earthquakes and deformation in subduction zones, it is important to constrain the rheological properties of metamorphic rocks (i.e., altered mantle, oceanic crust and sediments), and how they evolve during metamorphic reactions following hydration, carbonation and dehydration of the down-going slab. Especially, antigorite (the high-temperature serpentine polytype) serpentinite, the dominant metamorphic phase in hydrated mantle material at the condition of mantle wedge, is the key metamorphic rock to understand the generation mechanism of slow earthquakes and slab-mantle coupling at the plate interface in subduction zones.

Deformation experiments on antigorite serpentinite were conducted within and above the thermal stability field of antigorite using a gas pressure-medium apparatus and a solid pressure-medium apparatus to understand how dehydration reactions influence the mechanical behavior of antigorite serpentinite. At 400 °C, within the stability field of antigorite, antigorite serpentinite shows stable sliding and a positive velocity dependence of shear stress (i.e., friction coefficient). Shear stress increased with increasing confining pressure, while the friction coefficient decreases from 0.55 to 0.37 with increasing confining pressure from 200 MPa to 1500 MPa. These results indicate that antigorite serpentinite deforms by brittle and semi-brittle processes in subduction zones.

During the experiments using a gas pressure-medium apparatus at a confining pressure of 200 MPa and temperatures close to the dehydration temperature of antigorite (450-550 °C), antigorite serpentinite shows a slow stick-slip behaviour, which is characterised by relatively long durations and small stress drops during slip, while this type of behaviour was not observed at higher temperatures when the antigorite becomes completely dehydrated. Stick-slip in this temperature range is consistent with the temperature range where slow earthquakes occur at the corner of the mantle wedge in southwest Japan and Cascadia. The scaling law of slow stick-slip in the antigorite serpentinite gouge is distinct from that of regular earthquakes and a theoretical duration estimated from the apparatus stiffness, but similar to that of slow earthquakes.

We also conducted deformation experiments in which temperature was increased above the thermal stability of antigorite to simulate a prograde metamorphism in subduction zones, similar to the experiments by Chernak and Hirth (2011) but with a general-shear geometry. With increasing temperature from 400 °C to 700 °C during deformation, differential stress decreased and reached 120 MPa. Recovered sample suggest that the strain localizes within shear fractures and limited dehydration occurred during the experiments.

These results suggest that the dehydration of antigorite can form weak zones within the mantle wedge along the plate interface in subduction zones, even if the extent of the dehydration reaction is limited. In addition, slow instabilities of the slip interface can be caused by the dehydration of antigorite within the weak zone in the antigorite serpentinite layer, which can result slow earthquakes.

Keywords: antigorite, serpentinite, semi-brittle flow, slow earthquakes, dehydration, hydrothermal condition

## 交代作用を伴う沈み込みプレート境界断層の弱化 Metasomatic fault-zone weakening of subduction plate boundary faults

平内 健一<sup>1\*</sup>; スパイアーズ クリストファー<sup>2</sup>  
HIRAUCHI, Ken-ichi<sup>1\*</sup>; SPIERS, Christopher<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学, <sup>2</sup> ユトレヒト大学

<sup>1</sup>Shizuoka University, <sup>2</sup>Utrecht University

Fluid influx along faults triggers stress-induced dissolution and precipitation processes, leading to syntectonic growth of weak phyllosilicates. In subduction zones, slab-derived Si-rich fluids may infiltrate into the forearc wedge and transform primary mantle minerals into hydrous phases such as serpentines and talc, changing the mechanical and seismogenic properties of subduction plate boundary faults. However, it remains unclear how frictional strength and sliding stability of the plate boundary faults evolve via Si-metasomatism.

Hirauchi et al. (2013, *Geology*) performed frictional sliding experiments on antigorite (70%) plus quartz (30%) gouges at a pore fluid pressure ( $P_f$ ) of 200 MPa, an effective normal stress ( $\sigma_{eff}$ ) of 200 MPa, temperatures ( $T$ ) of 20, 300, 400, and 500 °C, and sliding velocities ( $V$ ) of 0.1-30  $\mu\text{m/s}$ , using a hydrothermal ring shear machine. At temperatures of 300-500°C, the gouges exhibited a peak friction coefficient ( $\mu$ ) of 0.40-0.62, followed by strain weakening towards a quasi-steady-state  $\mu$  of 0.25-0.47. The weakening was mainly due to the development of through-going, talc-rich boundary shears. The steady-state  $\mu$  of the gouges decreased systematically as the talc-rich layer widened.

At central California, there are several boundary faults that separate serpentinite bodies from shale-matrix melanges of the Franciscan accretionary complex. The serpentinite body is overprinted by anastomosing development of crack-seal veins of talc, serpentine, and calcite, suggesting that intense water-rock interaction took place in connection with faulting. The serpentinite along the faults represents a cataclastic shear zone that records brittle deformation, consisting of angular fragments that are suspended in fine-grained, randomly-oriented talc matrix. Frictional sliding experiments conducted at  $P_f = 40, 80, \text{ and } 120$  MPa,  $\sigma_{eff} = 60, 120, \text{ and } 180$  MPa,  $T = 20, 150, \text{ and } 300$  °C, and  $V = 0.3-100$   $\mu\text{m/s}$  showed that the serpentinite has friction coefficients that agree with Byerlee's law ( $\mu$  0.6), while the cataclasite is much weaker with friction coefficients as low as 0.2. Examination of the velocity dependence of friction revealed that the serpentinite exhibits both velocity-weakening and velocity-strengthening behavior, whereas the cataclasite is velocity strengthening under all conditions investigated.

Our results demonstrate that in the lowermost part of the forearc wedge, where silica-saturated fluids infiltrate from the dehydrating slab, metasomatically produced talc will form in the intensely sheared serpentinite, causing a much larger weakening effect than expected for serpentines, even if the total amount of talc formed is minor (<10 vol%). The continued reaction with Si-rich fluid will also result in a transition from seismic to aseismic behavior of the plate boundary faults.

キーワード: 沈み込み帯, 蛇紋岩, 交代作用, 断層

Keywords: subduction zone, serpentinite, metasomatism, fault



## 水熱実験からみるマントル-地殻境界における物質移動と蛇紋岩化作用のカップリング Coupled mass transport and serpentinization at crust/mantle boundary: Insights from hydrothermal experiments

岡本 敦<sup>1\*</sup>; 大柳 良介<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
OKAMOTO, Atsushi<sup>1\*</sup>; OYANAGI, Ryosuke<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of environmental Studies, Tohoku University

Serpentinization commonly proceeds by a supply of water passing through crust, and thus a large mass transport could occur during serpentinization reactions. Especially, silica activity is known as a control of the reaction paths and rate during the hydrothermal alteration of peridotites [1, 2]. However, it is still unclear the role of mass transport on reaction paths, overall hydration rate and volume change during serpentinization. In this study, we conducted two types of hydrothermal experiments on serpentinization. First one is the metasomatic-reaction experiments between olivine (Ol) + quartz (Qtz) zones as analogue of boundary of mantle and crustal rocks. Second one is the hydrothermal experiments with sintered olivine (analogue of low porosity rock). Both types of experiments were carried out at 250 °C and vapor-saturated pressure (= 3.98 MPa) in alkaline aqueous solution.

In the Ol-Qtz metasomatic experiments (up to 46 days.), composite powders, which was composed of Qtz zone and Ol zone was set in inner tubes and then loaded into autoclave. After the experiments, the mineralogy and H<sub>2</sub>O content of the products were evaluated as a function of the distance from Ol/Qtz boundary. The reaction products after olivine are serpentine (Srp), brucite (Brc), magnetite (Mgt) and smectite (Smc) (instead of talc). The products systematically change from the Smc+Srp to Srp+Brc+Mgt with increasing the distance from the Ol/Qtz boundary. The H<sub>2</sub>O content of the products is low at the Ol/Qtz boundary (i.e., 3.9 wt.% after 46 days), and increases toward the margin of the tube (12 wt.% at ~30 mm from the Ol/Qtz boundary).

The detailed mass balance calculation between 25 to 46 days reveals the characteristic nature of the metasomatic reactions and porosity change as follows. Near Ol/Qtz boundary (Smc+Srp zone), smectite was formed by supply of silica in two ways; hydration of olivine and dehydration of serpentine. In contrast, at the zone far from the boundary (Srp+Brc zone; >20 mm from O/Qtz), the production rate of serpentine and brucite are constant without any silica supply. At the transition zone between Smc+Srp and Srp+Brc zones, a large amount of serpentine is formed by consumption of both brucite and olivine, which results in a largest porosity reduction (~30 %). In the Smc+Srp zone, dehydration and porosity reduction occurs simultaneously, implying a possible raise of fluid pressure. Silica metasomatic reactions causes a significant variation not only in mineral assemblage but also in porosity and fluid pressure, which will characterize the dynamic change of mechanical properties at crust/mantle boundary.

In the hydrothermal experiments of the sintered olivine, the starting olivine aggregate (initial porosity <~10 %, covered by Pt jacket), which was made by hot press at 1200 degreeC, 1 GPa and 4 days, was emplaced in the alkaline water. After 3 days, we recognized the progress of serpentinization reaction to produce serpentine and brucite. An interesting finding of this experiment is that brucite did not formed in pores of the core sample, but it was formed only at the top of the cylindrical core of the sample. This result is quite different from with our previous experiments with using olivine powder (initial porosity is ~50 %) [3], in which brucite and serpentine was formed uniformly. The result of our present study of the sintered olivine suggests that, when the rock porosity is low and volume expansion is difficult, brucite is segregated into open space (c.a. open fracture) during serpentinization; which may also affects on the formation of the local weak zone within the mantle peridotite.

[1] Frost, B. R., & Beard, J. S., 2007. *Journal of Petrology*, 48, 1351-1368.

[2] Ogasawara, Y., Okamoto, A., Hirano, N., & Tsuchiya, N., 2013. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 119, 212-230.

[3] Okamoto, A., Ogasawara, Y., Ogawa, Y. and Tsuchiya, N., 2011. *Chemical Geology*, 289, 245-255.

Keywords: serpentinization, hydrothermal experiments, silica metasomatism, porosity change, hydration, mass transport

## 西南日本の沈み込み帯メランジュ中のヒスイ輝石岩に記録された塩水 Saline fluids recorded in jadeitites in subduction-zone melanges of southwest Japan

森 康<sup>1\*</sup>; 重野 未来<sup>1</sup>; 川本 竜彦<sup>2</sup>; 西山 忠男<sup>3</sup>

MORI, Yasushi<sup>1\*</sup>; SHIGENO, Miki<sup>1</sup>; KAWAMOTO, Tatsuhiko<sup>2</sup>; NISHIYAMA, Tadao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北九州市立自然史・歴史博物館, <sup>2</sup>京都大学地球熱学研究施設, <sup>3</sup>熊本大学自然科学研究科

<sup>1</sup>Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist., <sup>2</sup>Inst. Geotherm. Sci., Kyoto Univ., <sup>3</sup>Grad. Sch. Sci. Tech., Kumamoto Univ.

Slab-derived fluids play essential roles in mass transfer along subduction-zone channels between the subducting slab and mantle wedge (e.g., Bebout 2013 Metasomatism and the chemical transformation of rocks; Spandler and Pirard 2013 Lithos). Salinity of such slab-fluids probably affects solubility and fluid-rock partitioning of elements; therefore, it remains to be investigated in various rocks. Jadeitite is a rock composed mainly of jadeite (sodium pyroxene, NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) and occurs typically in serpentinite mélanges intercalated to high-pressure and low-temperature metamorphic belts. This curious rock is thought to be the product of direct precipitation from aqueous fluids and/or of fluid-induced metasomatism of a protolith (Harlow *et al.* 2007 Geology of gem deposits, Tsujimori and Harlow 2012 Eur J Mineral, and references therein). Fluid inclusions are commonly observed in jadeitites, and they may provide information about the fluid composition in subduction-zone mélanges. We determined major components and salinity of fluid inclusions in the jadeitites collected from eight localities in Japan: Omi-Itoigawa (Omi-Renge belt), Oya and Osa (Suo belt), Kochi (Kurosegawa belt), Mie and Tone (Nishisonogi metamorphic rocks), and Shimonita and Yorii (the origin unclear). In all of the studied rocks, primary fluid inclusions consist of a liquid phase and a gas bubble. Raman spectra show the presence of H<sub>2</sub>O liquid and vapor with or without minor CH<sub>4</sub> gas. The freezing point of the liquid phase indicates high-salinity (up to 8 wt% NaCl equivalent) of the primary fluid inclusions. The salinity varies among the localities of the jadeitite. For example, the salinity of the primary fluid inclusions is about 7.1 ± 0.1 wt% NaCl equivalent in the albite jadeitite from Oya and about 4.6 ± 1.2 wt% NaCl equivalent in quartz inclusions bearing jadeitite from Tone. Some jadeitite samples contain secondary CH<sub>4</sub>-rich fluid inclusions along healed microcracks. The presence of minor CH<sub>4</sub> is also reported in the saline fluids inclusions with 5.1 ± 1.9 wt% NaCl equivalent from the Myanmar jadeitite (Shi *et al.*, 2005 Geochem J). The present findings suggest that saline fluids with or without CH<sub>4</sub> are common in subduction-zone mélanges in Japan as well as in Myanmar. The reduced conditions can be caused by serpentinitization processes. This is contrast to the CO<sub>2</sub>-bearing saline fluids in the peridotite xenoliths from fore-arc mantle wedge (Kawamoto *et al.*, 2013 PNAS). The high-salinity of the slab-fluids probably enhances the mobility of elements such as Pb in subduction-zone channels (Keppler, 1996 Nature, Shigeno *et al.*, 2012 Eur J Mineral).

キーワード: 塩水, ヒスイ輝石岩, 流体包有物, 蛇紋岩メランジュ, 沈み込み帯

Keywords: saline fluid, jadeitite, fluid inclusion, serpentinite mélange, subduction zone

## 沈み込み境界上盤の蛇紋岩構造：三波川帯の天然の例 Serpentinite structure above subduction surface: Analysis of a natural example in Sanbagawa metamorphic belt

水上 知行<sup>1\*</sup>; 曾田 祐介<sup>1</sup>; 横山 寛紀<sup>1</sup>; 平松 良浩<sup>1</sup>

MIZUKAMI, Tomoyuki<sup>1\*</sup>; SODA, Yusuke<sup>1</sup>; YOKOYAMA, Hironori<sup>1</sup>; HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学

<sup>1</sup> Kanazawa University

Serpentinization is a key reaction in forearc mantle. Formation of strong schistosity and shear zones under high differential stresses provides anastomosing networks of fluid pathways as well as seismically anisotropic nature in the mantle. Understanding of such structural development is important for both interpretation of seismic analyses and forward modelling of subduction system including thermal structure, material circulation, magma process and slip behaviours of subduction boundaries.

We report results of petrological and structural analyses of layered antigorite (Atg) serpentinite in the marginal part of the Higashi-akaishi ultramafic unit in the Sanbagawa belt. This is a product of hydration of dunite (a rock consisting of almost 100% olivine (Ol)) due to metamorphic fluid from the underlying meta-sediments and meta-basites. Strong shape preferred orientation of Atg and existence of boudinaged layers indicate fluid-rock reaction under extensional deformation.

The layered structure is defined by a centimeter to meter-scale interlayering between Ol-rich and Atg-rich units. The modal amounts of Atg in these units form peaks at 15 vol% and 50 vol%, respectively, showing a bi-modal distribution as a whole. Effects of initial microstructures on the extent of serpentinization are limited: Porphyroclastic and fine-grained dunite, that occupy a large part of the outcrop, are transformed to both Ol-rich and Atg-rich layers although dunite with more than 50% of coarse Ol grains has been poorly serpentinized. Each Atg layer shows millimeter-scale spaced foliations defined by amounts of Ol and Atg and locally shows a diffusive variation in millimeter to centimeter-scales. Thickness and proportion of Atg-rich layers increase near the contact with crustal rocks.

Reaction for the Atg formation is constrained based on re-distribution of elements among Ol, Atg and opaque minerals. As serpentinization proceeds, Ol is enriched in Fe and Ni owing to their incompatibility in Atg. Taking concomitant formations of minor amounts of magnetite and sulfides into account, the variation of the Ol composition and modal amounts of serpentinization products are quantitatively explained by the following reaction:  $Ol + SiO_{2,aq} + H_2O \Rightarrow Atg$ . This indicates that the development of Atg has been controlled by a supply of silica in aqueous fluids.

We measured thickness of 70 layers for each and, taking the layers with the thickness lower than 200 centimeters, we found exponential relationships in cumulative frequency distributions both for Ol-rich and Atg-rich layers. Relative thickness between neighbouring units  $[d(Ol)/d(Atg)]$  also shows an exponential distribution. We could not find any regular relationships among width and spacing like Liesegang patterns.

It is known that pattern structures appear in reaction-diffusion systems. The above observations strongly suggest that the development of layered structures in Atg serpentinite is controlled by interaction between reaction and material transfer. In this case, potential causes of heterogeneous serpentinization may be diffusional contrast between  $H_2O$  and  $SiO_2$  or permeability contrast between Ol-rich and Atg-rich layers. Scaling analyses of deep low frequency tremors showed that duration-amplitude and size-frequency distributions of tremors in SW Japan can be fit with exponential models rather than power-law models. The seismological observations imply structural heterogeneity with unique scale length. Further examination on the exponential relationships developed in serpentinite may contribute to understand the slip phenomena on plate interfaces.

Keywords: serpentinite, layered structure, reaction-diffusion, exponential frequency distribution, deep low frequency tremor

## 福島県大島半島に産する蛇紋岩中のアワルワ鉱 Awaruite in serpentinites from Oshima Peninsula, Fukui Prefecture, Japan

山口 海<sup>1\*</sup>; 上原 誠一郎<sup>2</sup>  
YAMAGUCHI, Kai<sup>1\*</sup>; UEHARA, Seiichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

Awaruite is one of native Ni-Fe alloys, and the compositional range is Ni<sub>2</sub>Fe to Ni<sub>3</sub>Fe. The space group is *Fm3m* or *Pm3m* (e.g., Williams, 1960; Ahmed et al., 1981). Typical grain sizes are 10-300 μm, and grain shapes are typically irregular, anhedral or skeletal. It is found only in the serpentinized peridotites and chondritic meteorites (e.g., Ramdohr, 1967; Clarke et al., 1970). In general, awaruite is observed in serpentine vein (Sakai and Kuroda, 1983), and coexist with other metal minerals (Kanehira et al., 1975). This study deals with the characteristic occurrence of awaruite in pseudomorph texture in the Oshima serpentinites from Oshima peninsula, Fukui prefecture, Japan.

All samples were examined with polarizing microscope observation, X-ray diffraction analysis and SEM-EDS analyses. Preparation of TEM specimen and microtexture observation were conducted with an ion milling machine (JEOL EM-09100IS) and TEM (JEOL JEM-2000FX, JEM-3200FSK) in the Research Laboratory for High Voltage Electron Microscopy (HVEM), Kyushu University, Japan. Chemical analyses of microtexture were also examined using JEM-3200FSK equipped with EDS.

Peridotites in this area are partially or perfectly serpentinized. Texture of the serpentinite is mesh texture after forsterite and vein texture. Scarcely serpentinized enstatite is also observed. Each mesh texture is composed of mesh rim shows optical anisotropy and mesh core shows optical isotropy. The serpentinization of mesh texture is strong in close to vein textures. Most mesh rims near vein texture consist of some layers; outer rim, outer-inner rim boundary and inner rim. These rims consist of chrysotile, about 50 nm in width and 2 μm in length, and lizardite, about 300 nm in width and 1 μm in length, and outer-inner rim boundary about 2 μm in width are filled with serpentine fine grains, up to 100 nm in diameter.

A number of awaruite fine grains, 200-300 nm diameter, array along cell boundary, outer-inner rim boundary and rim-core boundary. These awaruite coexist with no other metal minerals; pentlandite, magnetite and etc. In contrast, metal minerals in vein texture are magnetite and minor pentlandite. These results indicate that mesh texture in serpentinite is extremely reductive environment compared with vein texture. The chemical composition of awaruite (average of four analysis) is Ni 73.13% and Fe 26.87%. The cross-section of these awaruite grains is square or rhombic, indicating that these grains are cube or octahedral crystals (fig. 1a). These grains seem to be euhedral from grain shapes, and this is characteristic compared with previous studies (e.g., Rubin, 1991). The SAED pattern recorded along the [001] zone axis shows strong 200, 220 reflections and weak 100, 110 reflections (fig. 1b). This indicates space group of the Oshima awaruite is *Pm3m*, which is ordering phase of *Fm3m* awaruite. Lower symmetry of the Oshima awaruite will be formed lower temperature.

キーワード: アワルワ鉱, 網目状組織, 蛇紋岩, 微細組織, 蛇紋石鉱物, 透過電子顕微鏡

Keywords: Awaruite, Mesh texture, Serpentinite, Microtexture, Serpentine minerals, TEM

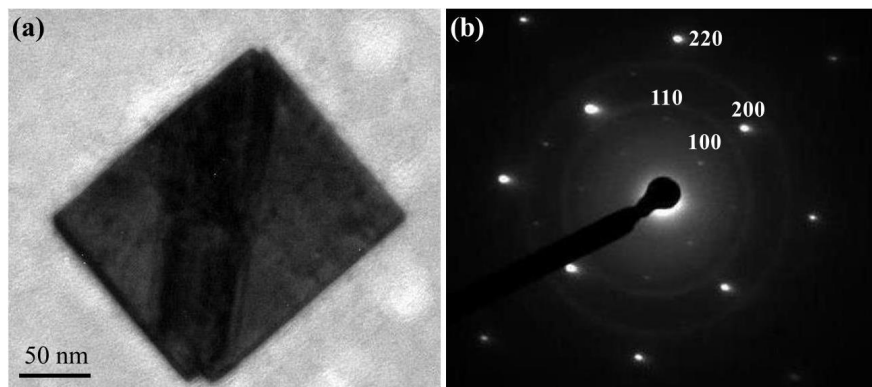


Fig. 1. (a) TEM image of awaruite in mesh texture. (b) The SAED pattern of (a) recorded along the [100] zone axis.



## アンチゴライト CPO の測定 Antigorite CPO measured by U-stage, EBSD and synchrotron X-rays

曾田 祐介<sup>1\*</sup>; 安東 淳一<sup>2</sup>; 浦田 義人<sup>2</sup>; Wenk Hans-Rudolf<sup>3</sup>  
SODA, Yusuke<sup>1\*</sup>; ANDO, Jun-ichi<sup>2</sup>; URATA, Yoshito<sup>2</sup>; WENK, Hans-rudolf<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 広島大学, <sup>3</sup> カリフォルニア州立大学

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>Hiroshima University, <sup>3</sup>University of California, Berkeley

Foliated antigorite serpentinite with crystallographic preferred orientation (CPO) probably causes shear wave splitting observed at subduction zones (e.g., Katayama et al., 2009). Therefore, the study of type and intensity of antigorite CPO is an important to understand the detail of this phenomenon.

Soda and Wenk (2014) measured CPOs of antigorite serpentinite from the Sashu Fault at the Saganoseki Peninsula, Oita Prefecture, by three independent methods, U-stage (with optic microscope), EBSD and synchrotron X-rays. The obtained antigorite CPOs by three methods are almost same without the fabric strength, maxima of pole figures in multiples of random distribution. The fabric strength decreases in the following order, U-stage >EBSD >synchrotron X-rays, which is probably caused by the characteristics of three methods. Through U-stage measurement, we can obtain the fabric pattern of antigorite CPO mainly from coarser antigorite grains (>30  $\mu\text{m}$ ). In the case of EBSD measurement, we measure antigorite CPO within an area of ca. 0.8 mm  $\times$  0.8 mm. Measurement points of only ca. 30% can be used to make fabric patterns. Residual ca. 70% points are neglect, because the quality of Kikuchi lines from them is too low to identify the orientation. In the synchrotron X-rays method, the result represents the bulk fabric from a volume of ca. 0.5 mm  $\times$  0.5 mm  $\times$  1.0mm.

The serpentinite measured antigorite CPO develops mylonitic structures with a penetrative foliation and lineation (Soda and Takagi, 2010). The antigorite grains show undulose extinction. And their grain boundary is unclear under the microscopy. Mg# (Mg/(Mg+Fe)) of antigorite grains is wide range 0.98-0.88. The BSE images indicate Fe-rich antigorite infilling the grain boundaries and fractures of Mg-rich antigorite.

The same serpentinite has already observed by TEM (Urata et al., 2009). The results indicate that the m-values of antigorite grains, the number of octahedral along the [100] modulation wave, make two groups, high m-value (16-18) and low m-value (13-14). This result suggests that the antigorite are crystallized mainly two stages, which is supported by the variation of Fe contents of antigorite (Fe-rich and Mg-rich). The Mg-rich antigorite grains are main minerals composed of the serpentinite, Fe-rich antigorite grains occupy at the periphery of the others and within the vein. The TEM observation indicates that the Mg-rich antigorite grains are subdivided into sub-grain with 50-100 nm in size, which can be recognized as an undulose extinction under optic microscope.

These microstructures of antigorite grains potentially influence the outcome of CPO measurements. The weaker fabric patterns from the synchrotron X-rays are probably attributed to the fine-grained antigorite crystallized at the deferent stages and to sub-grain. And the U-stage and EBSD measurements focus only the selected grains, which may result in overestimation of elastic wave anisotropy of serpentinite.

### References

- Katayama et al, 2009, Nature 461, 1114-1117.
- Soda and Takagi, 2010, Journal of Structural Geology 32, 792-802.
- Soda and Wenk, 2014, Tectonophysics, in press
- Urata et al., 2009, AGU2009 abstract. MR41A-1858.

キーワード: アンチゴライト, CPO, シンクロトロン X 線, 弾性波異方性  
Keywords: antigorite, CPO, synchrotron X-ray, elastic anisotropy

## Olivine CPO in non-deformed peridotite due to topotactic replacement of antigorite Olivine CPO in non-deformed peridotite due to topotactic replacement of antigorite

永治 方敬<sup>1</sup>; ウォリス サイモン<sup>1\*</sup>; 小林 広明<sup>1</sup>; 道林 克禎<sup>2</sup>; 水上 知行<sup>3</sup>; 瀬戸 雄介<sup>4</sup>; 三宅 亮<sup>5</sup>; 松本 恵<sup>6</sup>  
NAGAYA, Takayoshi<sup>1</sup>; WALLIS, Simon<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Hiroaki<sup>1</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>2</sup>; MIZUKAMI, Tomoyuki<sup>3</sup>  
; SETO, Yusuke<sup>4</sup>; MIYAKE, Akira<sup>5</sup>; MATSUMOTO, Megumi<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya Nagoya University, <sup>2</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>3</sup>Department of Earth Science, Kanazawa University, <sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Science, Kobe University, <sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Science, Kyoto University, <sup>6</sup>Center for Supports to Research and Education Activities, Kobe University  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya Nagoya University, <sup>2</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>3</sup>Department of Earth Science, Kanazawa University, <sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Science, Kobe University, <sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Science, Kyoto University, <sup>6</sup>Center for Supports to Research and Education Activities, Kobe University

Olivine crystallographic preferred orientation (CPO) is thought to be the main cause of seismic anisotropy in the mantle, and its formation is generally considered to be the result of plastic deformation of mantle by dislocation creep. Olivine CPO has been reproduced in laboratory deformation experiments and considerable success has been achieved in understanding the deformation conditions (e.g. stress, temperature and water content) under which different olivine CPO patterns develop. This opens the possibility of mapping conditions in the mantle using seismic anisotropy and has been the subject of considerable study. Here we report an alternative mechanism for olivine CPO without the need for deformation. This process may be important in understanding the seismic properties of mantle in convergent margins.

Metamorphic studies show peridotite in the Happo area, central Japan, formed by the dehydration of antigorite-schist related to contact metamorphism around a granite intrusion. Both field and microstructural observations suggest the olivine has not undergone strong plastic deformation. This was confirmed by TEM work that shows the olivine has very low dislocation densities and lacks low angle tilt boundaries. Such tilt boundaries are general stable even after annealing. These features show that peridotite in the Happo area formed in the absence of solid-state deformation.

The olivine of the Happo peridotite formed dominantly by the dehydration breakdown of antigorite schist. We propose that the olivine CPO formed as a result of topotactic replacement of antigorite by the newly formed olivine. EBSD measurements in samples where both antigorite and new olivine are present and in contact show a very close crystallographic relationship between the two minerals: the *a*-axes are parallel, and the *b*- and *c*-axes are perpendicular. We conclude the strong olivine CPO in the Happo area was inherited from the original CPO of the antigorite. Such a process is likely to also occur in subduction zones where serpentinite is dragged down by plate movement. Topotactic growth of olivine may be an important cause of mantle anisotropy in convergent margins.

キーワード: subduction zones, microstructure, B-type olivine CPO, antigorite, topotaxy  
Keywords: subduction zones, microstructure, B-type olivine CPO, antigorite, topotaxy

## Cr-rich olivine in deserpentinized peridotite and its implication Cr-rich olivine in deserpentinized peridotite and its implication

遠藤 俊祐<sup>1\*</sup>

ENDO, Shunsuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研 地質情報

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geoinformation, AIST

Formation of Cr-rich olivine ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 0.1 \text{ wt } \%$ ) in the presence of Cr-spinel  $\pm$  pyroxene has been thought to require extremely reducing and/or high-temperature conditions. Indeed, terrestrial olivine is Cr-free except for some high-T occurrences from Archaean komatiites, inclusions in diamonds, and ultrabasic pseudotachylytes. Deserpentinization is an important fluid release process in subduction zones. One of the best studied examples of this process occurs in Cerro del Almirez (SE Spain), where the antigorite-out reaction front ( $\text{Atg} = \text{Ol} + \text{Opx} + \text{Chl} + \text{H}_2\text{O}$ ) at eclogite facies conditions is well preserved. Large elongate olivine crystals (similar to spinifex textures in komatiites) at the reaction front contain abundant exsolution lamellae of Cr-magnetite, and estimated primary compositions of the elongate olivine show high Cr content (0.1-0.4 wt%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), leading to a proposal of the spinifex-like textured peridotite being pseudotachylyte ( $> 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ , Evans & Cowan, 2012), in contrast to the generally held view that the elongate olivine crystallized under ambient subduction-zone T ( $\sim 680 \text{ }^\circ\text{C}$  at 1.9 GPa) but high supersaturation conditions.

To better understand the dehydration process of serpentinite in subduction zones, this study focuses on a deserpentinized peridotite from the Eclogite unit of the Sanbagawa belt (SW Japan). It consists of porphyroblastic olivine ( $\sim 70 \text{ vol } \%$ ,  $\text{Mg}\# = 0.952 \pm 0.004$ ,  $\text{NiO} = 0.37 \pm 0.04 \text{ wt } \%$ ), antigorite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.3\text{-}0.5 \text{ wt } \%$ ), brucite, zoned Cr-spinel and Ni sulfides. Olivine porphyroblasts contain inclusions of antigorite, brucite, magnetite and Ni sulfides, suggesting that the olivine-forming reaction  $\text{Atg} + \text{Brc} = \text{Ol} + \text{H}_2\text{O}$  took place after serpentinization of a dunitic protolith. Sporadic occurrences of Ni-rich olivine (up to 8.1 wt% NiO) within the olivine porphyroblasts suggest prograde breakdown of Ni-rich sulfides. Zoned Cr-spinel grains are composed of a chromite core, a ferritchromite mantle, and an irregular-shaped overgrowth of Cr-magnetite. The chromite core, being the only primary mineral preserved, shows Cr-rich/Ti-poor compositions [ $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al}) = 0.74\text{-}0.76$ ,  $\text{TiO}_2 < 0.14 \text{ wt } \%$ ] indicative of a forearc wedge mantle origin. The Cr-magnetite rim contains inclusions of Cr-rich olivine ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.12\text{-}0.70 \text{ wt } \%$ ,  $\text{Mg}\# = 0.950 \pm 0.004$ ,  $\text{NiO} = 0.37 \pm 0.04 \text{ wt } \%$ ), in addition to Cr-rich antigorite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.5\text{-}3.1 \text{ wt } \%$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.3\text{-}3.9 \text{ wt } \%$ ), diopside and brucite.

Formation of the Cr-rich olivine inclusions can be explained by dehydration of Cr-rich antigorite that developed around Cr-spinel grains. Slow diffusivity of  $\text{Cr}^{3+}$  compared to the olivine growth rate may have caused disequilibrium Cr incorporation into olivine under low-T conditions just above the  $\text{Atg} + \text{Brc}$  breakdown equilibrium ( $\sim 460\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Alternatively, a distinct Cr substitution mechanism ( $\text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{3+} = \text{Mg} + \text{Si}$ ) than that proposed for high-T olivine ( $\text{Cr}^{2+} = \text{Mg}$  or  $2\text{Cr}^{3+} + \text{vacancy} = 3\text{Mg}$ ) could explain the low-T formation of Cr-rich olivine. In any case, the local uptake of Cr in olivine from the Sanbagawa metaserpentinite does not imply very high-T conditions, and this weakens the main basis of the pseudotachylyte hypothesis for the spinifex-like textured peridotite in Cerro del Almirez. The geological record on the causal link between deserpentinization and deep earthquake nucleation remains elusive.

Keywords: Cr-rich olivine, antigorite, dehydration, subduction zone

振幅—継続時間スケーリングから推測される四国西部における深部低周波微動のスケール長の空間変化  
Spatial variation in scale length of deep low-frequency tremor inferred from duration-amplitude scaling in western Shiko

堀野 一樹<sup>1\*</sup>; 平松 良浩<sup>2</sup>; 水上 知行<sup>2</sup>; 小原 一成<sup>3</sup>; 松澤 孝紀<sup>4</sup>

HORINO, Kazuki<sup>1\*</sup>; HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>2</sup>; MIZUKAMI, Tomoyuki<sup>2</sup>; OBARA, Kazushige<sup>3</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科自然システム学専攻, <sup>2</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Division of Natural System, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, <sup>2</sup>School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>4</sup>National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention

Slip properties on plate interface vary largely along dip direction from seismic to aseismic slip. At the transition zone at depths of 25-35 km, non-volcanic deep low-frequency (DLF) tremor and short-term slow slip event occur in the Nankai subduction zone. Recent detailed studies (e.g. Obara, 2010) reveal along dip and along strike variations in the occurrence and the migration of DLF tremor in the transition zone. We report here an along dip variation in scale length of DLF tremor inferred from duration-amplitude scaling in the western Shikoku.

A physical process of natural phenomena is reflected by scaling law, for example, frequency of occurrence versus size distribution. Watanabe et al. (2007) reported that a duration-amplitude distribution of DLF tremor shows a better fit to the exponential model rather than the power-law model, which is different from regular earthquakes. We investigate the duration-amplitude distribution of DLF tremor using Hi-net data in the western Shikoku. The procedure of analysis is the same as that of Watanabe et al. (2007).

We focus on the slope of the exponential distribution for the duration-amplitude distribution of DLF tremor. The value of the slope is small in the western area and large in the eastern area. Noting along dip direction, we can recognize a weak variation of the value of the slope. Deeper DLF tremor tends to show a larger value of the slope than shallower DLF. A large value of the slope means a small scale length and vice versa.

Beneath the western Shikoku, the configuration and the age distribution of the subducting Philippine Sea plate changes significantly along the strike, generating a large variation in a thermal structure. Such a variation causes various modes of serpentinization in the hanging wall mantle. The resultant structures due to the different modes are the most likely cause of the detected transition of the scale length.

キーワード: 深部低周波微動, スケーリング則, 沈み込み帯, 規模別頻度分布, 蛇紋岩化

Keywords: deep low-frequency tremor, scaling law, subduction zone, size distribution, serpentinization



## Lithospheric Rheology and Stress and the Dynamics of Plate Tectonics Lithospheric Rheology and Stress and the Dynamics of Plate Tectonics

ZHONG, Shijie<sup>1\*</sup>  
ZHONG, Shijie<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Colorado

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Colorado

Plate tectonics is a kinematic theory that describes relative motions of Earth's surface tectonic plates. However, with the subduction of cold lithosphere into mantle interiors, plate tectonics has profound implications on the thermal and dynamic evolution of planets. Earth appears to be the only planetary body in the solar system that has active plate tectonics. The cause of plate tectonics remains one of the most important unresolved questions in Earth and planetary sciences. The recent discovery of a large population of exoplanets further raises the question on how common plate tectonics is to planetary bodies and what causes plate tectonics. In this presentation, I will discuss two issues that are important to understanding the origin of plate tectonics: lithospheric rheology and stress. Lithospheric rheology is important for understanding crustal and lithospheric dynamics, and the conditions for plate tectonics. For example, numerical modeling studies suggest that plate tectonics emerge from the dynamics of mantle convection when a small coefficient of friction  $\mu$  ( $<0.1$ ) or small yield stress for lithosphere is used [Moresi and Solomatov, 1998]. However, both in-situ borehole stress measurement (to  $\sim 10$  km depth) and laboratory studies suggest that  $\mu \sim 0.6$  [Kohlstedt et al., 1995; Zoback and Townend, 2001]. A recent study that models the seismically observed elastic flexure and seismicity at Hawaiian islands in response to volcanic loading indicates  $\mu > 0.25$  [Zhong and Watts, 2013]. The loading study [Zhong and Watts, 2013] also suggests that lithospheric rheology related to low-temperature plasticity is significantly weaker than laboratory studies [Mei et al., 2010] and that lithospheric stress at Hawaiian islands is 100-200 MPa, possibly largest lithospheric stress on the Earth, given that Hawaiian islands represent the largest uncompensated surface loads on the Earth. These studies highlight the importance to understand the evolution of lithospheric stress and rheology from plate interiors to plate boundaries, in order to understand the cause of plate tectonics. I will also discuss the convection-driven stress in the top thermal boundary (lithosphere). Convection-driven stress scales with Rayleigh number and hence mantle viscosity. A larger mantle viscosity or smaller Rayleigh number leads to a larger viscous stress in the lithosphere in mantle convection models. Some recent mantle convection studies for plate tectonics generation reported  $>500$  MPa stress in lithosphere. It is important to develop independent observable measures to examine the relevance of modeled lithospheric stress. I will discuss possible measures that may be developed and used in this context.

キーワード: Mantle Convection, Plate Tectonics, Lithospheric Stress, Lithospheric Rheology, Brittle Deformation  
Keywords: Mantle Convection, Plate Tectonics, Lithospheric Stress, Lithospheric Rheology, Brittle Deformation

## 3D numerical modeling of thermal regime and mantle flow associated with subduction of the two oceanic plates

## 3D numerical modeling of thermal regime and mantle flow associated with subduction of the two oceanic plates

季 穎鋒<sup>1\*</sup>; 吉岡 祥一<sup>1</sup>

Ji, Yingfeng<sup>1\*</sup>; YOSHIOKA, Shoichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学都市安全研究センター, <sup>2</sup> 神戸大学理学研究科

<sup>1</sup>RCUSS, Kobe University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kobe University

Based on a thermal convection model for an arbitrarily curved oceanic plate, we newly constructed a 3D model for subduction of two oceanic plates, and investigated its thermal regime and mantle flow. The 3D parallelepiped modeled domain for numerical simulations is a length of 840 km, a width of 840 km, and a depth of 300 km, with 72\*72\*72 grids, and the total calculation time up to 15 Myr. Geometry of one continental plate and two oceanic plates are prescribed in the simulation. The two oceanic plates subduct with prescribed velocities beneath the continental plate along neighboring two trenches, adjoining with a right angle. The upper oceanic plate and the lower oceanic plate contact each other at their intersection zone. Both of the oceanic plates are assumed to be 30 km in thickness. Giving boundary conditions of adiabatic and permeable walls, half-space cooling and rigid upper surface, and stratified initial temperature condition, we solved equations of mass conservation, momentum, and energy, using the finite difference method (FDM) and Finite Volume Method (FVM). In this study, the dynamical properties of the thermal regime associated with double subduction are investigated in detail. In our numerical simulation for the subducting two oceanic plates, the convergent rate of the upper oceanic plate should be paralleled to the intersection line of the two plates so as to reach a stable and sustainable subduction. Dip angles of the two oceanic plates, obliquity of the lower oceanic plate, and subduction velocity are assumed to be 10 deg, 0 deg ~75 deg, and 5 cm/yr, respectively. As a result of numerical simulation, we found that there are remarkable low temperatures in the inter-slab zone due to subduction of the two cold oceanic plates. We also found that obliquity and relative directions of plate subduction velocities contribute to the obliquity of subduction-induced mantle flow convection adjacent to the two oceanic plates, and spiral mantle convection may be produced by the difference of the obliquity of two oceanic plates.

Keywords: thermal regime, plate tectonics, subduction, numerical simulation

## Mantle flow and overriding plate stress state in 3-D models of thermo-mechanical subduction

### Mantle flow and overriding plate stress state in 3-D models of thermo-mechanical subduction

HOLT, Adam<sup>1</sup> ; BECKER, Thorsten<sup>1\*</sup>  
HOLT, Adam<sup>1</sup> ; BECKER, Thorsten<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>University of Southern California

<sup>1</sup>University of Southern California

The formation of back-arc basins is a fundamental component of plate tectonics, yet the dominant mechanism for their formation, and whether an individual mechanism is dominant over different tectonic settings, is not entirely clear. On top of the classic mechanism of extension being driven by basal tractions due to poloidal return flow, recent numerical and experimental modeling studies have indicated that, for slabs with finite widths, toroidal return flow around slab edges plays an important role. We investigate the relative contribution of poloidal and toroidal flow field components to back-arc extension by examining the overriding plate stress regime in conjunction with the flow field for various model setups. We characterize the velocity field by decomposing it into toroidal and poloidal components at various stages of subduction, and calculating the ratio of the toroidal to poloidal RMS velocities (TPR).

Models are carried out using a thermo-mechanical setup of the finite element code, CitcomCU. We find that the presence of an overriding plate reduces the development of trench curvature, and so 3-D modeling studies that neglect the presence of the overriding plate may be significantly overestimating the rate of development of trench curvature. Within the overriding plate, we observe long wavelength back-arc extensional stresses at a large distance from the trench and more localized forearc compressive stresses. Fixing the position of either the subducting or overriding plate causes the amplitude of back-arc extension to be greater than that for the case when both plates are free. This occurs because, for the fixed overriding plate models, all of the slab rollback is forced to occur at the expense of overriding plate thinning/extension, and for the fixed subducting plate models, increased rollback causes heightened toroidal flow. For all models with significant slab rollback, the poloidal RMS velocity is maximum in the very upper and lower portions of the model whereas toroidal flow is maximum at mid-domain depths due to return flow around slab edges, indicating that slab rollback-induced toroidal flow is focussed at sub-lithospheric depths, where it has the potential to contribute to back-arc extension. Reducing the width of the plate vastly reduces the rate of slab rollback, yet increases the degree of back-arc extension and focuses it closer to the trench. In such models, toroidal flow magnitude is approximately constant throughout the domain resulting in only minor TPR variation with depth, and yet the magnitude of overriding plate extensional stress is large, possibly suggesting an alternate control on back-arc extension.

Finally, we investigate the effect that Byerlee plasticity and a laterally confining side plate has on both overriding plate stress state and the flow field. Including a side plate does not modify the slab dynamics and overriding plate stress state, yet significantly reduces the toroidal RMS velocity component throughout the model, while retaining the systematic variation, which results in uniformly reduced TPR throughout the domain. The inclusion of plasticity, intended to approximate brittle failure, gives rise to elevated forearc compression, due to increased plate convergence, and reduced backarc extension.

キーワード: subduction, mantle flow, slab rollback, overriding plate stress  
Keywords: subduction, mantle flow, slab rollback, overriding plate stress

## 大西洋ポルトガル沖における磁気スペクトル解析 Magnetic spectral analysis over the Atlantic Ocean off Portugal

松島 潤<sup>1</sup>; 大久保 泰邦<sup>2</sup>; アンтониオ コーレイア<sup>3</sup>; 内田 洋平<sup>2\*</sup>  
MATSUSHIMA, Jun<sup>1</sup>; OKUBO, Yasukuni<sup>2</sup>; ANTONIO, Correia<sup>3</sup>; UCHIDA, Youhei<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> エボラ大学  
<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, <sup>3</sup>University of Evora

Magnetic spectral analysis, which has often been applied to estimate Curie point depths, was used to delineate thermal and crustal structure of the Atlantic Ocean off Portugal. The Atlantic oceanic plate covers the study area deepening eastward and volcanic islands rise in the eastern margin. We used EMAG2, the resolution and the altitude of which are 2 arc minute and 4 km above geoid, respectively. Linear magnetic anomalies are dominant over the study area. They are attributed to the seafloor spreading of the oceanic plate. The magnetic lineation forms a strong directional feature not only in the space domain but also in the spectral domain. Taking the directional feature, we developed a pseudo-one dimensional spectral analysis using two dimensional data sets. The gradient of the power spectrum across the lineation depends on the centroid depth of magnetic layer. The bottom depth is easily calculated by the centroid and the seafloor depth, assuming that the top of magnetic layer corresponds to the seafloor. The bottom of magnetic layer over young oceanic plate deepens with time, because the Curie point depth deepens with time. Taking the relationship, we assume that the bottom of magnetic layer over the Atlantic oceanic plate corresponds to the Curie point depth and delineates a thermal structure. The results of spectral analysis show that the bottom depths over the oceanic plate are deepening gradually from the ridge to Europe. The results correlate well with magnetic isochrons and thermal history of the oceanic plate. The bottom depths over the volcanic islands are anomalously shallow indicating a rise of high thermal structure.

キーワード: 磁気データ, スペクトル解析, キュリー点  
Keywords: Magnetic data, spectral analysis, Curie point



## 沈み込み過程と地球の「Top-down 半球ダイナミクス」仮説 Subduction Processes and a New Hypothesis for “Top-down Hemispherical Dynamics” of the Earth

岩森 光<sup>1\*</sup>; 中村 仁美<sup>2</sup>; 羽生 毅<sup>1</sup>; 木村 純一<sup>1</sup>; 中久喜 伴益<sup>3</sup>; 中川 貴司<sup>1</sup>; 吉田 晶樹<sup>1</sup>; 田中 聡<sup>1</sup>; 末次 大輔<sup>1</sup>; 大林 政行<sup>1</sup>

IWAMORI, Hikaru<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Hitomi<sup>2</sup>; HANYU, Takeshi<sup>1</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>1</sup>; NAKAKUKI, Tomoeiki<sup>3</sup>; NAKAGAWA, Takashi<sup>1</sup>; YOSHIDA, Masaki<sup>1</sup>; TANAKA, Satoru<sup>1</sup>; SUETSUGU, Daisuke<sup>1</sup>; OBAYASHI, Masayuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京工業大学, <sup>3</sup> 広島大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>TITEC, <sup>3</sup>Hiroshima University

Water-rock interactions reduce the rock strength, and possibly produce weak plate boundaries, inducing active plate tectonics. Water-rock interactions may also have geochemical impacts, causing the unique differentiation of the Earth (e.g., formation of granitic continental crust and hydrothermal ore deposits). However, how water actually interacts with the rocks and circulates within the solid Earth to contribute to material differentiation and dynamics has been poorly constrained. In this paper, we present numerical models of water and element transport in subduction zones, as well as global geochemical evidences for water and the associated element cycling in the mantle. Then we compare these geochemical evidences with the geophysical observations and modeling to propose “top-down hemispherical dynamics” for the whole Earth’s interior.

Water-rock interaction may significantly reduce the viscosity of rocks [1], and affects the subduction zone dynamics. Hydrated subducting slabs release water as the slabs are heated up, which hydrates the bottom of mantle wedge just above the subducting slab, to form a serpentinite layer. In this case, the slab-wedge mechanical coupling is reduced, and weakens the wedge corner flow, decreasing the slab surface temperature. The serpentinite layer is stabilized to extend deeper, enhancing mechanical decoupling between the slab and the wedge. This positive feedback has a large impact on the overall thermal-flow structure and magmatism in subduction zones [2]. We compare the model results and the observations such as position of arc magmatism, heat flow and seismic structures to constrain the actual structure and dynamics.

Water may enhance elemental transport once a fluid phase is formed and migrates, which potentially causes specific elemental fractionation. We have constructed two-dimensional models of trace element transport in subduction zones, incorporating (i) slab subduction-dehydration, (ii) fluid migration and its reaction with the convecting mantle, (iii) melt generation and (iv) associated elemental partitioning among the solid, aqueous fluid and melt [3]. This model predicts various trace element abundances in solid, fluid and melt, and shows that significant variability in terms of trace element ratios is produced in subduction zones and can be brought down to the deep mantle. The trace element variability must affect long-term radiogenic isotopic evolution of the mantle (e.g., Sr, Nd and Pb isotopic compositions). Recently, a global isotopic structure has been found based on a statistical analysis of a large geochemical data set including MORB, OIB and arc basalts [4]: the eastern mantle hemisphere is enriched in subducted aqueous fluid components compared to the western hemisphere. Magnitude of the radiogenic ingrowth for the hemispherical structure suggests that it has been mostly developed within the last several hundred million years. These observations can be explained by focused subduction towards the supercontinent (Rodinia, Gondwana and Pangea), which has created the large-scale mantle heterogeneity. A strikingly similar pattern is found for the seismic velocity structure of the inner core [5,6]. Such hemispherical structures may be key to understanding the global dynamics of the Earth. We propose that the focused plate subduction governs the flow and thermal structure of the deep interior, in a “top-down” manner.

References: [1] S. Karato, H. Jung, *Philos. Mag.* 83, 410 (2003). [2] S. Horiuchi, Ph.D. thesis, U. Tokyo (2013). [3] A. Ikemoto, H. Iwamori, *Earth Planet. Space*, in revision. [4] H. Iwamori, H. Nakamura, *Geochem. J.* 46, e39 (2012). [5] S. Tanaka, H. Hamaguchi, *JGR* 102, 2925 (1997). [6] L. Waszek et al., *Nature Geo.* 4, 264 (2011).

Keywords: subduction, water, trace element, isotope, hemisphere, mantle

## Effects of plate-like behavior and material recycling on lateral variation of CMB heat flux Effects of plate-like behavior and material recycling on lateral variation of CMB heat flux

中川 貴司<sup>1\*</sup>  
NAKAGAWA, Takashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC

We studied the relationship between heat flux across the core-mantle boundary (CMB) and seismic anomalies in the CMB region in numerical mantle convection simulations in a 3-D spherical shell with a simple temperature- and depth-dependent viscosity [Nakagawa and Tackley, 2008]. That study suggested that the relationship between CMB heat flux and seismic anomalies was not simple linear function because of the post-perovskite phase transition and/or compositional heterogeneous structure in the deep mantle. However, in that study, we did not include the complicated rheology that occurred to the plate tectonics-like behavior and the segregation of oceanic crust in the deep mantle because they would be important for regulating the heat flux across the CMB [e.g. Nakagawa and Tackley, 2010].

Here we revisit to investigate the relationship between heat flux across the CMB and seismic anomalies in the deep mantle including plate tectonics-like behavior and material recycling. Preliminary result suggests that the heat flux tends to be more linear relationship with seismic anomalies in the deep mantle including plate tectonics-like behavior and material recycling but the uncertainty of this relationship between two quantities is very strong. The peak-to-peak of lateral variation of CMB heat flux is much larger than that obtained from our previous study. This is still problematic for magnetic field generation caused by geodynamo.

キーワード: CMB heat flux, lateral variation, plate tectonics, material recycling  
Keywords: CMB heat flux, lateral variation, plate tectonics, material recycling

## Petrology and Geochemical Evolution of Lavas from the Ongoing and Voluminous Puu Oo Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii

### Petrology and Geochemical Evolution of Lavas from the Ongoing and Voluminous Puu Oo Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii

Garcia Michael<sup>1\*</sup> ; PIETRUSZKA Aaron<sup>2</sup> ; GREENE Andrew<sup>3</sup> ; MARSKE Jared<sup>4</sup> ; RHODES Michael<sup>5</sup>  
GARCIA, Michael<sup>1\*</sup> ; PIETRUSZKA, Aaron<sup>2</sup> ; GREENE, Andrew<sup>3</sup> ; MARSKE, Jared<sup>4</sup> ; RHODES, Michael<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dept. Geology-Geophysics, Univ. of Hawaii, <sup>2</sup>USGS, Denver, <sup>3</sup>Depart. Natural Sciences, Hawaii Pacific University, <sup>4</sup>Dept. Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington, <sup>5</sup>Dept. Geoscience, Univ. Massachusetts  
<sup>1</sup>Dept. Geology-Geophysics, Univ. of Hawaii, <sup>2</sup>USGS, Denver, <sup>3</sup>Depart. Natural Sciences, Hawaii Pacific University, <sup>4</sup>Dept. Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington, <sup>5</sup>Dept. Geoscience, Univ. Massachusetts

The Puu Oo eruption of Kilauea Volcano is one of the longest-lived (31 years and continuing) Hawaiian eruptions. Volumetrically, it is the most significant historical eruption. It has produced over 4 km<sup>3</sup> of lava from several vents along its east rift zone. We have continually monitored the compositional and isotopic signatures of its lavas, which have shown remarkable variations. These variations resulted from diverse crustal and mantle processes including crystal fractionation, magma mixing and storage, assimilation of crust and melting of a heterogeneous plume source. Crystal fractionation is an important process in these lavas based on their wide range of MgO contents (5-10 wt.%) and normally zoned minerals (mostly only olivine). During the first two years, the effects of crystal fractionation were superimposed on hybrid magmas created by mixing two evolved, rift zone-stored magmas with a new, mantle-derived magma. Later lava erupted show no signs of mixing except for one-day, uplift events in 1997 and 2011. Small, systematic variations in Pb and Sr isotopes, incompatible trace element ratios and MgO-normalized (10 wt.%) major element abundances of post-mixing lavas document rapid changes in the parental magma composition unrelated to crustal processes. Lavas erupted between 1985-1998 continued the post-1924 composition trend of Kilauea lavas towards more depleted composition. This trend was initiated by the collapse of summit crater during a period of very low magma supply. Puu Oo lavas showed a systematic temporal evolution towards historical Mauna Loa lava composition from 1998-2003. This trend reversed in 2003 and again in 2008 creating a cyclic pattern of geochemical variations. These reversals in composition are contrary to previous models for geochemical trends during sustained basaltic eruptions. The cyclic variations of Pb isotopic and some trace element ratios during the Puu Oo eruption suggest melt extraction from a mantle source with thin strands of vertically-oriented source heterogeneities. These strands may be 1-3 km in diameter in order to explain the scale of isotopic variations for the Puu Oo eruption. This continuing eruption provides a dynamic laboratory for evaluating models of the generation and evolution of basaltic magmas.

キーワード: volcano, Hawaii, eruption, historical, magma, basalt  
Keywords: volcano, Hawaii, eruption, historical, magma, basalt

## When did the plate tectonics start on the Earth? When did the plate tectonics start on the Earth?

丸山 茂徳<sup>1\*</sup>  
MARUYAMA, Shigenori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球生命研究所

<sup>1</sup>ELSI Tokyo Institute of Technology

Initiation of plate tectonics on the Earth is a key to make life-sustaining rocky planet Earth, because primordial ocean was highly toxic and primordial atmosphere had high XCO<sub>2</sub>. Transportation of huge amounts of CO<sub>2</sub> into mantle by plate subduction depends on pH of seawater and composition of oceanic slab.

Plate tectonics has been proposed from the data set of the ocean-floor, firstly by ocean-floor spreading theory followed by rigid lithosphere. Yet, the oldest lithosphere goes back to only 200Ma, hence demonstration of plate tectonics on the Earth is restricted to the Earth after 200Ma.

Hence, we need to make logical framework of pre-200Ma plate tectonics of the Earth. The principle of Accretionary Complex Geology (ACG) is an only key issue which is centered by Ocean Plate Stratigraphy (OPS). ACG is a technology which separates the subducted oceanic slab from trench turbidites, and offers the MORB, OIB, pelagic sediments, and subduction zone magmatic rocks from the mixture of rock units formed at trench.

Application of this technology to 3.8Ga Isua ACs clarified Early Archean plate tectonics which had different aspects of plate tectonics from the modern plate tectonics, e.g., thickness and composition of lithosphere (Komiya et al., 1999). Specifically, thickness of MORB was 20km which seems to be buoyant to prohibit subduction (e.g., Davies, 1992). But if slab-melting is common, the buoyancy turns to be negative to cause more rigorous slab-pull force at subduction zone (Komiya et al., 2002).

For the Hadean Earth, there are no geologic units remained on the modern Earth, except for zircons with back to 4.4 Ga. Mineral inclusions within the Hadean zircons suggest the host melt with granitic magma. Formation of granitic melts could be most probable for the operation of plate tectonics. But this is logically imperfect, because small amounts of granitic melts can be formed and actually present on the Moon. Conversely, the forward modelling of planetary tectonics could be more important than zirconology. Formation of primordial ocean causes the formation of rigid lithosphere, and hydrous minerals on the slab surface would act as liberated lubricants along Benioff plane. This is plate tectonics and plays even in the state of magma pods remains in the asthenospheric mantle (Sleep et al., 2011). If so, initiation of plate tectonics on the Earth could be back to Hadean Earth, presumably back to 4.4Ga.



## 地球と金星のレオロジー構造における違いとテクトニクス Difference of tectonics and rheological structure between Earth and Venus

東 真太郎<sup>1\*</sup>; 片山 郁夫<sup>1</sup>; 中久喜 伴益<sup>1</sup>  
AZUMA, Shintaro<sup>1\*</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>1</sup>; NAKAKUKI, Tomoeki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

これまで金星は密度、質量、体積、太陽の距離などから地球とよく似た地球型惑星だと考えられていた。しかし現在では、Magellan missionによって、金星は温度、水、大気、地形、そして生命において地球とはかなり異なり、さらにプレートテクトニクスが働いていないことが明らかにされ、同じ地球型惑星でも金星は全く違う進化を辿ってきたと考えられている。プレートテクトニクスは地球において最も重要な物質循環の1つである。そのため、このプレートテクトニクスの欠如が地球と金星の違いを生み出した1つの要因であると推察される。プレートテクトニクスを考える上で重要なものとして、惑星内部の強度や変形を考察するレオロジーが挙げられる。なぜなら岩石のレオロジーが惑星内部の強度や変形メカニズムを支配し、テクトニクスに大きな影響を与えるからである。先行研究では、金星のレオロジー層構造は地殻を構成していると考えられるダイアベースの流動則を室内実験から求め、金星内部の温度・圧力に外挿することによって考察されてきた。それらによると金星の下部地殻と上部マントルには大きい強度コントラストが期待され、デカップリングを起こしている可能性が示唆されている。しかし、ケイ酸塩鉱物のような強い化学結合を持つ鉱物において、比較的低温では power-law タイプの流動則は適応できず、パイレスメカニズムが支配的になることが知られている。本研究では、金星のモホにおいて強度コントラストの有無を変形実験によって明らかにし、その強度コントラストの有無がどのように金星のテクトニクスに影響を与えるかを、1次元と2次元の数値シミュレーションから考察する。変形実験を行った目的は、流動則からの外挿ではなく、改良型 Griggs 変形試験機を用い、斜長石とオリビンの2相系で変形実験を行い、強度比を直接決定することである。変形実験の条件は  $T=600-1000^{\circ}\text{C}$ ,  $P=2\text{GPa}$  である。また金星の表面温度  $T=470^{\circ}\text{C}$  であることから、かなりドライな惑星であると考えられ、無水条件で実験を行った。無水条件における変形実験により、全ての温度条件でオリビンが斜長石よりも強度が大きいことが確認された。これは power-law creep の外挿からでは起こりえないことから、オリビン及び、斜長石の変形メカニズムが低温では Peierls メカニズムが支配的になっていることが示唆される。この無水実験より得られた強度比から金星内部のレオロジー構造を推察し、さらに地球の海洋リソスフェアとの違いも考察した。まず地球の場合、海洋リソスフェアのレオロジー層構造は Byerlee's law と power-law creep によってよく制約されている。それによると、海洋リソスフェアのモホ面はまだ脆性領域であり、モホにおいて強度のコントラストは無いと考えられる。そのため、地殻と上部マントルはよくカップリングし、一緒に地球深部へと沈み込むことができる。一方、本研究の実験結果から金星のレオロジー層構造を考えると、モホに大きい強度コントラストが期待できる結果となった。下部地殻と上部マントルの強度コントラストが大きいとデカップリングを起こす可能性が考えられる。この弱い下部地殻によって起こるデカップリングが強い上部マントルの変形から地殻を切り離し、地殻の水平移動を妨げていることが期待される。さらに強度の小さい物質は強度の大きい物質に沈み込むことは困難であることが予想されるため、リソスフェアの地殻の部分はマントル中に沈み込むことが出来ない。また一次元の数値計算からも、モホにおいて大きい強度差があればあるほど、下面の速度に対して、表面速度は遅くなることがわかった。それゆえ、モホに大きい強度差があるとき、地殻の部分はマントルの変形に巻き込まれそうにない。実際2次元のシミュレーションからも、地殻とマントルに強度差がある場合、地殻の部分は沈み込むことができないことがわかった。以上のことから、この地殻とマントルのデカップリングが金星のプレートテクトニクスを阻止した1つの要因ではないかと考察される。

キーワード: 斜長石, かんらん石, 金星, レオロジー, プレートテクトニクス  
Keywords: plagioclase, olivine, Venus, rheology, plate tectonics

## On the origin of plate tectonics: Thinking outside of the convective box On the origin of plate tectonics: Thinking outside of the convective box

SOLOMATOV, Viatcheslav<sup>1\*</sup>  
SOLOMATOV, Viatcheslav<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Washington University in St. Louis

<sup>1</sup>Washington University in St. Louis

From the observational point of view, there is no evidence of plate tectonics on other planets in the Solar System. Remote sensing methods for detecting plate tectonics on exoplanets are yet to be developed and are unlikely to be as robust as the surface observations that were conducted for Venus, Mars, and Mercury. The observational constraints on the tectonics of the early Earth are probably the most important clues to the plate tectonics origin and yet, their interpretations remain ambiguous. Some researchers see a very early start of plate tectonics in the data while others do not exclude a relatively late start. From the theoretical point of view, the absence of plate tectonics is easy to explain and can be considered as a normal state of any rocky or icy body. Two decades ago, both the observational data and theoretical studies led to the reversal of the question “why do other planets not have plate tectonics” to “why does the Earth have plate tectonics”. Since then various theories and numerical models focused on the latter question and investigated how plate tectonics began and what conditions are required for plate tectonics to occur on a planet. In most models the starting state of a planet is a non-plate tectonics regime (e.g. stagnant lid convection) which then transitions to plate tectonics. The forces responsible for the transition can be caused by convective motions below the lithosphere and with thermal (e.g. lithospheric relief) and compositional density variations (e.g. continents) near the surface. The role of the factors involved can be complicated. For example, the crust can both hinder and help plate tectonics. The transition to plate tectonics can also be caused by external factors, such as impacts and tidal forces. Similar to the previous, internal factors, these external factors can also either help or hinder plate tectonics initiation. For example, even though impacts are sometimes considered as a possible cause of plate tectonics, they can create conditions that would hinder plate tectonics initiation later on or stop it in case if plate tectonics was previously initiated by other mechanisms. Plate tectonics could also have emerged from a magma ocean, bypassing the stagnant lid regime. In this scenario plate tectonics is a continuation of convection in the magma ocean. As the magma ocean crystallizes, the surface boundary layer, which has little difficulty to recycle in the liquid magma, eventually transforms into tectonic plates as the crystallizing magma ocean undergoes a transition from turbulent convection controlled by melt viscosity to laminar convection predominantly controlled by solid-state creep. Regardless of the origin of the first episode of plate tectonics, the question of how plate tectonics survived and evolved into a relatively stable regime is a challenge for any of these models and may require a combination of many factors such as asthenosphere, surface oceans and volatile cycling.

キーワード: Plate tectonics, Stagnant lid convection, Giant impacts, Magma oceans, Exoplanets  
Keywords: Plate tectonics, Stagnant lid convection, Giant impacts, Magma oceans, Exoplanets

## マルチモード表面波によるリソスフェア-アセノスフェア境界の推定 Estimation of the lithosphere-asthenosphere transition from multi-mode surface waves

吉澤 和範<sup>1\*</sup>  
YOSHIZAWA, Kazunori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup> Earth and Planetary Dynamics, Faculty of Science, Hokkaido University

The lithosphere-asthenosphere transition (LAT) is a key to the understanding of the present-day plate motion, but its seismological determination is not straightforward unlike material boundaries such as the Moho and core-mantle boundary. Some recent works on the LAT using body-wave receiver functions have revealed evidences for clear converted signals at the bottom of lithosphere, particularly in oceanic region. To the contrary, receiver functions normally do not show clear converted signals from the expected bottom of cratonic lithosphere at about 200 km depth, where surface wave studies indicate fast wave speed anomalies of the thick continental lithosphere.

In this study, we investigate a quantitative way to estimate the depth and thickness of the LAT from S-wave speed models derived from surface waves. Although surface waves are inherently not very sensitive to the sharpness of boundaries due to their long-wavelength features, the depth of LAT can be roughly estimated from the depth of either the negative peak of velocity gradient or the slowest shear velocity beneath the lithosphere. In this study, we consider that the former represents an upper bound of LAT and the latter a lower bound. The thickness (or sharpness) of LAT can be deduced from the differences between the upper and lower bounds.

We have performed synthetic experiments using several types of S-wave models including different smoothness (or sharpness) of LAT. Synthetic experiments using multi-mode surface waves (including up to fourth higher modes) result in a successful recovery of the smooth LAT (with a depth range over 50 km), which is expected at the base of the cratonic lithosphere. However, if we use the fundamental mode only, the recovery is unsatisfactory even for the smooth boundary, and the effects of the sharpness of boundary are almost indistinguishable in the recovered models. Surface waves have less sensitivity to a sharp boundary (with a transition thickness less than 25 km), but our experiments indicate that the estimated depth from the velocity gradient (upper bound of LAT) are found to be coincide well with the depth of sharp boundary, which may indicate the distribution of oceanic LAT can be well represented by the negative peak of vertical gradient in S-wave speed profiles derived from surface waves.

キーワード: lithosphere, asthenosphere, surface wave, higher mode  
Keywords: lithosphere, asthenosphere, surface wave, higher mode

## 室内岩石 AE 実験研究の進展 Advances in laboratory acoustic emission study

雷 興林<sup>1\*</sup>  
LEI, Xinglin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST, Japan

Acoustic emission (AE) is an elastic wave radiated by rapid cracking in solids. As a technology of nondestructive inspection, AE has a long history of development and has been applied in numerous areas including material sciences, medical sciences and engineering fields. In stressed rocks, macroscopic fracturing is preceded by a very complex pervasive evolution of some pre-failure damage. Thus, studies focusing on both fracture dynamics and pre-failure damage are a subject of interest and can be inferred from AE statistics as the number of AE events is proportional to the number of growing cracks, and the AE amplitudes are proportional to the length of crack growth increments in the rock. In Earth science, since the similarity in size distribution of earthquakes and acoustic emissions (AE) was found in the 1960s, many laboratory studies have been motivated by the need to provide tools for the prediction of mining failures and natural earthquakes. This report aims to draw an outline of laboratory AE studies in the last 50 years, which have addressed seismological problems, with special focuses on some key issues associated with fault nucleation and growth in brittle rocks.

The AE technique, which monitors the spatiotemporal distribution of AE events, is applied to the analysis of the micro-cracking activity inside the sample space, and it can be performed under an artificially controlled pressure, which is very important for the simulation of underground conditions. During the last five decades, a great number of studies were done following developments in experimental technology, AE monitoring technology, and data processing methodology. Fifty years ago, only the hitting time of an AE could be recorded with a single sensor or a small number of sensors. The rock fracture test was performed under simple loading conditions. Later, the number of sensors that could be used in a study increased and thus allowed the determination of the hypocentre of an AE. Developments in transient memory technique in the 1970s through to the 1980s lead to the ability to make a digital multichannel recording of the full waveform of an AE. Hypocentre location was improved greatly by the use of more precise arrival times obtained through waveform analysis. In addition, it became possible to determine the mode of fracture, i.e., the focal mechanism solution of an AE source. In the present day, AE are usually monitored by 16-32 sensors with digital waveform recording at up to a 200 MHz sampling rate and up to a 16 bit A/D resolution. The dead time of a recording is sufficiently short and continuous recording is possible by use of very large amounts of memory. The waveform of most events can be captured with multiple channels, even for the period of dynamic failure in which the AE rate may reach several thousand a second. Rock fracture experiments can be performed under triaxial compression conditions with controlled fluid injection and pore pressure. AE hypocentres are determined with a location error of a few mms. A focal mechanism solution can be determined for individual events or a group of events. As demonstrated by very recent studies progress in laboratory AE study, particularly studies focusing faulting nucleation, is shedding more and more light on earthquake seismology.

By summarising recent results, it can be concluded that the fault nucleation behaviour, including critical size, duration time, and AE productivity, depend on the heterogeneity of the area of weakness of the fault compared with that of the host rock. If the fault is as strong as the host rock then the fracture makes no difference and the rock remains intact. Furthermore, a homogeneous fault or rock mass appears to fracture in unpredictable ways without a consistent trend in precursory statistics, while inhomogeneous faults fracture with clear precursors related to the nature of the heterogeneity.

キーワード: AE, 前駆ダメージ, 岩石破壊, 地震素過程, 断層核形成, 断層先端ゾーン

Keywords: Acoustic emission (AE), Pre-failure damage, Rock fracture, Earthquake, Fault nucleation, Process zone



## 採掘空洞前方の岩盤中での大規模亀裂の形成を示唆する微小破壊の震源分布 Microfracture distributions indicating formation of large-scale cracks in the rock mass ahead of the mining front

直井 誠<sup>1\*</sup>; 森谷 祐一<sup>2</sup>; 中谷 正生<sup>1</sup>; 村上 理<sup>3</sup>; Thabang Kgarume<sup>4</sup>; Thabang Masakale<sup>5</sup>; Luiz Ribeiro<sup>6</sup>; 矢部 康男<sup>2</sup>; 川方 裕則<sup>3</sup>; Anthony Ward<sup>6</sup>; Ray Durrheim<sup>4</sup>; 小笠原 宏<sup>3</sup>  
NAOI, Makoto<sup>1\*</sup>; MORIYA, Hirokazu<sup>2</sup>; NAKATANI, Masao<sup>1</sup>; MURAKAMI, Osamu<sup>3</sup>; THABANG, Kgarume<sup>4</sup>; THABANG, Masakale<sup>5</sup>; LUIZ, Ribeiro<sup>6</sup>; YABE, Yasuo<sup>2</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>3</sup>; ANTHONY, Ward<sup>6</sup>; RAY, Durrheim<sup>4</sup>; OGASAWARA, Hiroshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大, <sup>2</sup> 東北大, <sup>3</sup> 立命大, <sup>4</sup> CSIR, <sup>5</sup> OHMS, <sup>6</sup> SeismoGen

<sup>1</sup> Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> Tohoku Univ., <sup>3</sup> Ritsumeikan Univ., <sup>4</sup> CSIR, <sup>5</sup> OHMS, <sup>6</sup> SeismoGen

採掘によって平板状空洞が形成され、それによる応力集中で誘発地震が多発する南アフリカ Cooke 4 鉱山 (旧 Ezulwini mine) の地表下 1km において Mw-4 程度まで検知可能な微小破壊 (Acoustic Emission; 以下 AE) 観測網を展開した。観測網は 24 台の AE センサと 6 台の 3 軸加速度計からなる。Naoi et al. (2013; Pageoph) では、この観測により得られた約 3 ヶ月分のトリガー波形データを用いて約 36 万イベントからなる震源カタログを作成し、その 90 % 以上が採掘前線から 10m 程度の領域内に密集していることを報告した。

本研究では、この観測網で得られた 9 ヶ月分のデータに対して、Naoi et al. (2013) と同様の手法で約 100 万イベントからなる AE カタログを作成し、さらに Double Difference 法による相対震源決定 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を行い、採掘前線付近の AE の空間分布の詳細を調べた。震源決定には、Horiuchi et al (2011) の自動走時検出・震源決定プログラムを用いた。相対震源決定に用いる走時差もこの検測結果を使用している。また、大量のイベントを効率よく再決定するために、解析領域を互いに重複する小領域に分割し、各領域中のイベントに対して再決定を行ってから重複して計算された震源を平均化する手法 (Hauksson and Shearer, 2005) を用いた。この処理により、上記 100 万個の震源の約 96% が再決定された。

得られた震源分布から、採掘前線前方に密集している AE は 3 次元的に広がった分布をしているのではなく、Dip, strike 方向に数十 m の広がりをもつ、複数の 2 次元的な AE 集中域 (以下 tabular cluster) で構成されていることがわかった。各 Tabular Cluster は AE 密度が低い領域で隔たれており、それぞれの cluster を空間的にひとまとまりの group として認識することができる。採掘域前方で起こる AE は空洞の存在による高差応力領域中でまんべんなく起こるのではなく、板状の Zone でのみ発生するようである。Tabular cluster は採掘前線に平行な走向を持ち、60-80 度程度傾斜している。これは採掘前線周辺で視認される、最大剪断応力の方向にできる同程度に大規模な剪断亀裂 (Gay and Ortlepp, 1979; Adams and Jager, 1980; Adams et al. 1981) に類似している。解析期間中、40m 程度採掘が進行した採掘パネル前方では、このような Tabular zone が平均 5m 間隔で 10 個形成された。

この観測では、地質調査によって断層の存在が確認された場所で、厚み数十 cm 程度の領域に強く密集した、非常に薄い面状分布を示す AE 活動も確認されているが (直井・他; 2013 連合大会)、Tabular cluster は、1-2m 程度の厚みのなかに散らばったような分布を示しており、その密集度は既存断層面上の活動とは明らかに異なる。Tabular cluster 内の AE 活動は、採掘が近づくと共に徐々に増加し、採掘前線が通過すると活動がなくなるという時間発展を示しており、既存の弱面を利用して起こった破壊というよりは、採掘にともなって形成される大規模 shear crack の形成過程で生じる AE と解釈できそうである。

キーワード: 微小破壊, 誘発地震, 岩石破壊

Keywords: Acoustic Emission, Induced Earthquake, Rock fracture

## 遅い陥入による粉体のアコースティック・エミッション統計と変形則 Deformation and acoustic emission of a penetrated granular bed

松山 和広<sup>1</sup>; 桂木 洋光<sup>2\*</sup>

MATSUYAMA, Kazuhiro<sup>1</sup>; KATSURAGI, Hiroaki<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院総合理工学府, <sup>2</sup>名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University

粉体の挙動は様々な地球物理現象に関係することが知られているが、その挙動については未解決な問題が多く残されている。本研究では、固体球を粉体層に低速で陥入させた際の粉体層の応答を実験的に調べた。特に、固体球にかかる抵抗力とその陥入時に発生するアコースティック・エミッション信号に注目し、それらの同時計測を行った。用いた実験系は、我々の以前の研究 [1,2] に用いたものと基本的には同様のものとなる。これらの先行研究では、抵抗力と容器壁を伝達する圧力成分の関係について議論したが、本研究では陥入に伴うミクロスコピックな変形に注目するためにアコースティック・エミッション信号の計測を行った。用いた粉体粒子はガラスビーズ（代表粒径：0.4?2 mm）で、陥入する固体球の直径は 10 -40 mm の範囲で変化させた。アコースティック・エミッション・センサー（NF AE-9913）を粉体層に埋め込み、その後、万能試験機（Shimadzu AG-100Nx）を用いて固体球をゆっくりと粉体層に押し込んだ。固体球にかかる抵抗力が陥入速度に依存しない（準静的領域）ように、陥入速度は十分小さい範囲にとられた（1 mm/s のオーダー）。この実験系を用いて粉体層における低速陥入による抵抗力とアコースティック・エミッション統計の詳細を実験的に調べ、特にそれらの従う「べき則」について見つかったいくつかの知見について報告する [3]。

まず、計測された抵抗力が陥入深さに対してべき的に依存することが明らかになった。本実験と先行研究の結果を組み合わせると、このべき則の指数は粉体層のサイズすなわち容器サイズに依存することが明らかになった。得られた実験の傾向より、容器壁が小さい場合はより容器壁の影響が大きく出ることがわかり、このことは粉体の作る応力鎖による効果と考えられる。

また、計測されたアコースティック・エミッション信号は短いバースト型イベントから構成されていることがデータから明らかになった。更に、各バースト・イベントの最大振幅をイベント・サイズとして、アコースティック・エミッション・イベントのサイズ分布を求めると、べき分布となることが分かった。べき分布は地震統計のゲーテンベルグ・リヒター則と似ているが、アコースティック・エミッション・イベントの統計では、べき分布の特性指数が粉体粒子の粒径に依存して系統的に変化することが実験より明らかになった。具体的には、粒径が小さくなるほどべき指数は大きくなった。このことは小さな粒径で構成される粉体層が塑性的に振る舞い、大きな粒子による粉体層が脆性的であることを示唆している。更に本実験の結果は、小粒子による粉体層がより散逸的であることも整合的であった。より詳細に破壊のモードを調べるためにはアコースティック・エミッションと同時に磁気放射の計測も必要となるが、本研究では、とくにアコースティック・エミッションのみに注目した。本実験結果から地球物理現象に関わる現象のレオロジー特性を直接議論することは簡単ではないが、本研究により地球物理現象の多くと関係する（連続体とは異なる）粉体の特殊性の一部が明らかにされた。

[1] H. Katsuragi, Material, preparation, and cycle dependence of pressure behavior in a slowly plunged granular column, Chem. Eng. Sci., 76, 165-172 (2012).

[2] H. Katsuragi, Nonlinear wall pressure of a plunged granular column, Phys. Rev. E, 85, 021301:1-5 (2012).

[3] K. Matsuyama and H. Katsuragi, Power law statistics of force and acoustic emission from a slowly penetrated granular bed, Nonlin. Processes Geophys., 21, 1-8 (2014).

キーワード: アコースティック・エミッション, 準静的抵抗力, 粉体, べき則

Keywords: acoustic emission, quasi-static resistant force, granular matter, power law

## 乾燥亀裂パターンとして可視化される粘土ペーストの流れの記憶の多様性 Variety of memories of clay paste flows which can be visualized as desiccation crack patterns

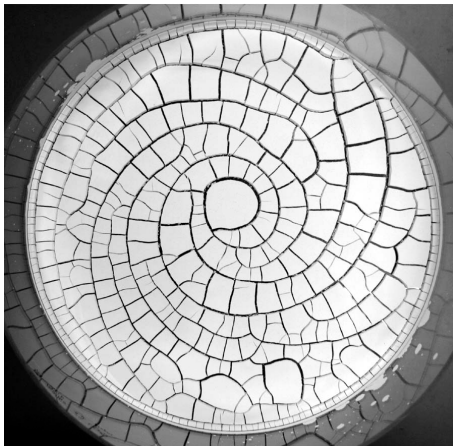
中原 明生<sup>1\*</sup>; 松尾 洋介<sup>1</sup>; 大信田 丈志<sup>2</sup>; 大槻 道夫<sup>3</sup>; 狐崎 創<sup>4</sup>  
NAKAHARA, Akio<sup>1\*</sup>; MATSUO, Yousuke<sup>1</sup>; OOSHIDA, Takeshi<sup>2</sup>; OTSUKI, Michio<sup>3</sup>; KITSUNEZAKI, So<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 日本大学理工学部一般教育教室(物理), <sup>2</sup> 鳥取大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻, <sup>3</sup> 島根大学総合理工学部物質科学科物理分野, <sup>4</sup> 奈良女子大学大学院自然科学系物理学領域

<sup>1</sup> College of Science and Technology, Nihon University, <sup>2</sup> Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tottori University, <sup>3</sup> Department of Materials Science, Shimane University, <sup>4</sup> Graduate School of Human Culture, Nara Women's University

粘土と水を混ぜた粘土ペーストは高濃度の状態では塑性を持つゆえに、揺れや流れの方向を記憶できる。これまで実験してきた粘土ペーストでは、流れを体験した時に記憶として形成される構造は、乾燥破壊させると「乾燥前に体験した流れ」に「平行」に亀裂が走る形で視覚化された。ところが、ある種のペーストでは同じように流れを体験したはずなのに、乾燥破壊で視覚化した時に亀裂が走る方向が「乾燥前に体験した流れ」に「垂直」になっていることがわかった。同じように流れを体験したはずなのに、なぜ記憶として残る構造が流れに平行であったり垂直であったりと異なるのか、その違いを解明していく。

キーワード: 乾燥亀裂パターン, 粘土ペーストのレオロジー, 流れの記憶効果  
Keywords: desiccation crack pattern, rheology of clay paste, memory effect of flow



## フロントスラスト形成に先立つ予兆現象の発見：大規模超高精度砂箱実験の現況 Precursory Signal of Frontal Thrust Formation: Current status of Large Scale High Precision Sand Box Experiments

堀 高峰<sup>1\*</sup>; 阪口 秀<sup>1</sup>; 山田 泰広<sup>2</sup>; 堂垂 達也<sup>2</sup>; 福元 豊<sup>3</sup>

HORI, Takane<sup>1\*</sup>; SAKAGUCHI, Hide<sup>1</sup>; YAMADA, Yasuhiro<sup>2</sup>; DOTARE, Tatsuya<sup>2</sup>; FUKUMOTO, Yutaka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 京都大学工学研究科都市社会工学専攻, <sup>3</sup> 京都大学大学院農学研究科

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Department of Urban Management Engineering, Kyoto University, <sup>3</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University

我々は、2011年から付加体形成のアナログ実験のための大規模超高精度砂箱実験装置の開発を行ってきた。実験系の高精度化に当たり、様々な試行錯誤を繰り返し、今年度7月に、ようやく装置の開発を終え、プロダクティブランの段階に入った。本装置開発の当初目的は、付加体のシーケンシャルスラストと隆起が作る構造に対して、南海トラフに見られるようなトラフ軸方向に「複雑に屈曲・分岐した縮緬模様」と、南米チリ沖に見られるような「直線的な構造」の違いが生じる要因を調べることであった。この目的を達成するためには、できるだけ大きな砂箱を使うことと砂を敷き詰める過程で生じる初期不整を十分にコントロールして再現性の高い実験を行う必要があった。そこで、1m四方の砂箱に対して、砂粒1粒子以下の精度で所定の砂の敷き詰め厚さを確保する超高精度装置を開発した。しかし、皮肉なことに、装置の高精度化の結果、縮緬模様は一切形成されず、ほぼ直線的な構造のみが現れるようになった。ところが、フロントスラストの形成時に、その位置と走行方向にほぼ直線的な構造が確実に再現されるようになった結果、我々は、思わぬ発見をした。それは、フロントスラストの形成前に砂層表面の粒子が不連続な微小変位を繰り返す現象である。講演では、砂箱実験で見られたスラスト形成の予兆現象についての詳細観察の結果と、砂箱実験を模擬した数値シミュレーション結果から、予兆現象の実体とフィールドでの観測可能性についての考察を行う。

キーワード: 予兆現象, 地震, 砂箱実験

Keywords: precursor, earthquake, sandbox experiment



## アナログモデル実験の高精度化に向けた取り組み New modelling devices to enhance the reproducibility of analogue model experiments

堂垂 達也<sup>1\*</sup>; 山田 泰広<sup>1</sup>; 阪口 秀<sup>2</sup>; 堀 高峰<sup>2</sup>  
DOTARE, Tatsuya<sup>1\*</sup>; YAMADA, Yasuhiro<sup>1</sup>; SAKAGUCHI, Hide<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Urban Management, Kyoto University, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

アナログモデル実験は、乾燥砂などの粒状体材料を用いて地質構造の形成過程を実験室スケールで再現する手法として100年以上にわたって用いられてきた。近年、デジタル画像解析手法の導入により、相似率に従って縮小されたモデル内部における変形量が、定量的に評価できるようになったのに加え、以前では不可能であった微小な変形量の検出が可能になってきた。

そこで我々は断層形成過程に着目した実験を行うことにより、断層形成前に微小なせん断帯が形成されることを確認した。しかしながら、以前は手作業によって作成されてきた縮小モデルには、不均質性が存在し、断層形成の位置、タイミング、形状などの再現性が高くないという問題が存在していた。

したがってこの問題を解決するために、初期の縮小モデルを自動的に作成することのできる装置を開発し、実験の再現性を確認する実験を行った。

本実験では、豊浦標準砂を用いて作成した初期モデルを可動壁を押し当てることによって短縮し、逆断層を複数形成させる実験を行った。初期モデルの作成には、手作業でふるいを通して作成する以前の手法と、新しく開発した装置を用いて作成する方法、双方の手法を用いてそれぞれ実験を5回ずつ行った。実験過程をモデル上方および側方からデジタル画像を撮影し、変形過程の再現性の確認を行った。結果として、以前の手法を用いた実験では、形成断層の分岐や、形成位置のばらつきがみられたのに対し、装置を用いて初期モデルを作成した実験では、形成断層の分岐は確認されず、また形成位置のばらつきも抑えられていた。

この結果は、新たな装置を用いて作成した初期モデルでは、手作業で作成したモデルに比べ、実験ごとの初期モデルの再現性が向上していること、初期モデル内部に存在する不均質性が抑えられていることを示唆しており、アナログモデル実験結果の精度向上に成功したといえる。

今後さらに新たな手法を用いたモデルに対して断層形成に着目した実験を行い、微小せん断帯の形成位置、タイミングの分布を明らかにする予定である。

キーワード: アナログモデル実験, 砂箱実験, 付加体, 実験再現性, 不均質性, 地殻変動

Keywords: analogue modelling, sandbox, reproducibility, accretionary prism, heterogeneity

## 高速剪断される粉体層の緩和過程と粉体層厚 Relaxation processes of granular layer at seismic slip rates and layer thickness.

桑野 修<sup>1\*</sup>; 中谷 正生<sup>2</sup>; 波多野 恭弘<sup>2</sup>; 阪口 秀<sup>1</sup>  
KUWANO, Osamu<sup>1\*</sup>; NAKATANI, Masao<sup>2</sup>; HATANO, Takahiro<sup>2</sup>; SAKAGUCHI, Hide<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東大・地震研  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, University of Tokyo

A natural fault has the cataclasite core zone, along which shear deformation concentrates. Rheology of these granular matters thus provides us an important insight in considering the nature of friction on faults from a microscopic point of view. In the past two decades, experiments conducted at sub-seismic to seismic slip rates (mm/s to m/s) revealed two remarkable phenomena of high-velocity rock friction; very long critical slip distance ( $D_c$ ) of the order of 1-10m/s and the considerable weakening due to mechanochemical effects by frictional heating [e.g., Di Toro et al., 2011, Nature]. Recently, Chambon et al.[2006, JGR] conducted friction experiment with very large shear displacement experiment on a thick granular layer, and reported significant slip-weakening behavior active over decimetric slip distances. However, the relation between long  $D_c$  observed in a thick granular layer and long  $D_c$  in the high-velocity friction is still not clear. Here, we report on laboratory experiments designed to explore transient responses of a thick granular layer following a step change in slip velocity at seismic slip rates. We use simple particle and choose relatively low normal stress to exclude the possible mechanochemical effects caused by frictional heat. We find that friction coefficient and layer thickness show similar response that is symmetry with respect to velocity changes, and  $D_c$  is of the order of 10m. It appears that these responses are attributed to dynamics of granular matter. We also report how magnitude of the relaxation and  $D_c$  are affected by the layer thickness.

キーワード: high-velocity friction, granular matter, rheology  
Keywords: high-velocity friction, granular matter, rheology

## 上総層群第四紀シルト岩の間隙率および透水係数の有効圧依存性 Porosity and permeability under effective pressure for the Quaternary Kazusa Group siltstones

丸茂 春菜<sup>1\*</sup>; 上原 真一<sup>1</sup>; 田村 幸枝<sup>2</sup>; 三橋 俊介<sup>2</sup>

MARUMO, Haruna<sup>1\*</sup>; UEHARA, Shin-ichi<sup>1</sup>; TAMURA, Yukie<sup>2</sup>; MITSUHASHI, Shunsuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東邦大学理学部

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Toho University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Toho University

上総層群は、房総半島中・北部に広く分布する海成の鮮新世 - 中期更新生の地層である。上総層群中の泥岩は第1次圧密段階であり、間隙率は37.9~55.5%で地質年代が古くなるにつれて減少している(井波, 1983)。また、上総層群の特徴として高間隙率異常が見られる層準であり、天然ガス鉱床と一致している。この高間隙率異常は、異常高間隙圧によって生成されたと推定されている。その発達過程については、天然ガスの生成と関連させて議論した研究もあるが、定量的に十分な検討がなされていないのが現状である。地下深部で異常高間隙圧が保持されると堆積盆地や付加体の圧密の進行が妨げられ、間隙率や透水係数が減少しない。また、異常高間隙圧は岩石中や堆積層内の流体や石油移動の駆動力となり、さらに断層面の摩擦強度にも影響する。このように、異常高間隙圧は様々な現象において影響を与えるため、その発達メカニズムを解明することは重要である。そこでわれわれは、Tanikawaら(2008)の単純な堆積-圧密過程を基盤とした次元モデルを基に、上総層群での異常高間隙圧発達メカニズムを検証することを目指している。そのためにまず本研究では、上総層群のシルト岩について、間隙率と透水係数の有効圧依存性を室内岩石透水実験を用いて求めた。

間隙率および透水係数の測定には、東邦大学の容器内岩石圧縮変形透水試験機を使用した。岩石試料には、上総層群の梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層、大原層および勝浦層の露頭より採取した岩石ブロックを直径約40mm、高さ約30mmの円柱形に整形したものを使用した。間隙流体は蒸留水、封圧媒体には油を使用した。間隙率測定では、封圧上昇時に試料から排出される水の量を測定することで有効圧下の間隙率を推定した。透水係数は、試料両端の圧力差を一定にし、定常状態における流量を測定することで求めた(定差圧流量法)。それぞれの測定は、有効圧が0 MPa~35 MPaの1サイクルの何点かの応力条件で行った。

各試料の間隙率は約34%~42%の値を示した。ただし、大原層の間隙率は大気圧下で55%と他に比べて高い値を示した。一方、透水係数は約 $10^{-17}$ ~ $10^{-18}$  m<sup>2</sup>の範囲の値を示した。間隙率、透水係数はどちらも有効圧が上昇するにつれて減少する傾向がみられた。また、同じ有効圧でも、有効圧下降時の値は、上昇時の値に比べて小さい値を示す傾向がみられた。実験の結果に基づき、各層序の岩石について間隙率および透水係数を有効圧との関数として表した。また、間隙率と透水係数の関係について検討した。

キーワード: 上総層群, 間隙率, 透水係数, 異常間隙水圧, 室内岩石透水実験

Keywords: Kazusa group, porosity, permeability, laboratory experiment

## 沈み込み帯に存在する塩基性片岩のレオロジー Rheological properties of mafic schists: Implications for subduction dynamics

岡崎 啓史<sup>1\*</sup>; Hirth Greg<sup>1</sup>  
OKAZAKI, Keishi<sup>1\*</sup>; HIRTH, Greg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geological Sciences, Brown University

<sup>1</sup>Department of Geological Sciences, Brown University

To understand the spatial and temporal distribution of deformation (e.g., underplating and exhumation of metamorphic rocks) and earthquakes in subduction zones, it is important to constrain the rheological properties of metamorphic rocks (i.e., altered oceanic crust and sediments), and how they evolve during metamorphic reactions following hydration, carbonation and dehydration of the down-going slab. Metamorphism of oceanic crust has stimulated hypotheses on the relationship between intra-slab earthquakes and slab-wedge coupling along plate boundaries in subduction zones. While it is well known that metamorphism has important effects on material fluxes and arc volcanisms at subduction system, it remains unclear how the formation of metamorphic minerals following fluid release influences rheology. Past experimental studies on mafic metamorphic rocks were mostly concentrated on phase equilibrium, thus there are few reports on the mechanical data for these metamorphic rocks.

We conducted triaxial deformation experiments on two mafic schists sampled from the Sambagawa metamorphic belt (Shikoku Island, Japan), using Griggs-type solid pressure- medium apparatus at Brown University. Both mafic schists are mainly composed of amphibole, albite, epidote, and chlorite with small amounts of titanite and phengitic mica. However, there are differences in the peak metamorphic condition (i.e., the maximum PT condition), amphibole composition and mineral abundance of minerals in the two schists. One, which was metamorphosed at greenschist facies (pressure of ~0.75 GPa and temperature of ~400 °C), has a relatively high chlorite content (~12 %) and actinolite is the dominant amphibole phase. The other, metamorphosed at the epidote-amphibolite facies (pressure of ~1 GPa and temperature of ~520 °C), has a lower chlorite content (<2 %) and hornblende is the dominant amphibole phase. Constant strain rate experiments and strain rate stepping experiments were conducted at confining pressures ( $P_c$ ) from 0.76-2GPa, temperatures ( $T$ ) from 300-600 °C and strain rates from  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  1/s.

At conditions near the peak conditions of the greenschist ( $P_c = 1$  GPa,  $T = 400$  °C), differential stresses were higher than 1 GPa. The greenschist samples are weaker than the epidote-amphibolite samples under all experimental conditions. Both types of samples exhibit strain rate strengthening; frictional behavior that inhibits earthquake nucleation. Differential stress increased with increasing confining pressure, while friction coefficient decreased with increasing confining pressure and temperature. At  $T = 400$  °C, the nominal friction coefficient ( $\mu$ ) for the greenschist samples was  $\mu \sim 0.34$  at  $P_c = 1$  GPa and  $\mu \sim 0.30$  at  $P_c = 1.5$  GPa; for the epidote-amphibolite,  $\mu \sim 0.48$  at  $P_c = 1$  GPa and  $\mu \sim 0.42$  at  $P_c = 1.5$  GPa. Stress exponents ( $n$ ) for the greenschist samples at  $P_c = 1$  GPa were  $n \sim 26$  at  $T = 300$  °C,  $n \sim 36$  at  $T = 400$  °C and  $n \sim 34$  at  $T = 500$  °C; for the epidote-amphibolite,  $n \sim 31$  at  $T = 400$  °C and  $n \sim 21$  at  $T = 500$  °C. Microstructures of recovered samples showed modest buckling and several localized shear zones. These features suggest that the deformation of mafic schist is accommodated by semi-brittle deformation resulting in strain localization on faults.

We also conducted deformation experiments in which temperature was increased above the thermal stability of chlorite (~800 °C) to simulate a prograde metamorphism in subduction zones. With increasing temperature during deformation, differential stress decreased and reached nearly 0 MPa. This suggests that such reaction-enhanced weakening of metamorphic rocks forms weak fault zones in subducting slab, which might promote detachment of oceanic crust from the subducting slab and allow underplating to forearc crust. The strain-rate strengthening behavior of these materials suggests that such faults would be relatively aseismic.

キーワード: 緑色片岩, 塩基性片岩, 変形実験, 沈み込み帯, 海洋地殻, 二重深発地震面

Keywords: mafic schist, subduction zone, deformation experiment, oceanic crust, semi-brittle deformation, intermediate depth earthquake



## 含水かんらん石多結晶体の変形における鉄の効果 Effect of iron content on the creep behavior of olivine under hydrous conditions

田阪 美樹<sup>1\*</sup>; ジー ママン マーク<sup>1</sup>; コールステッド デイビット<sup>1</sup>  
TASAKA, Miki<sup>1\*</sup>; ZIMMERMAN, Mark<sup>1</sup>; KOHLSTEDT, David<sup>1</sup>

<sup>1</sup> アメリカ州立ミネソタ大学  
<sup>1</sup>University of Minnesota

Since iron and hydrogen play important roles in dynamic processes not only in Earth's mantle but also in Mars's mantle, we conducted triaxial compressive creep experiments on polycrystalline samples of olivine,  $(\text{Fe}_{1-x}, \text{Mg}_x)_2\text{SiO}_4$ , with  $x = 0, 0.53, 0.77, 0.90$ , and  $1.0$  under hydrous condition. A Paterson-type gas-medium apparatus was used for these experiments. The water contents, determined from Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analyses of larger  $\text{Fo}_{90}$  crystals embedded in the olivine aggregates, demonstrate that the samples are water-saturated both before and after deformation. The grain sizes of initial and deformed samples were determined using electron backscatter diffraction (EBSD).

Creep tests at 300 MPa confining pressure were conducted at temperatures from 1050 to 1200C at constant stresses in the range 25 to 315 MPa. The values of the pre-exponential term, stress and grain size exponents, and activation energy in the constitutive equation were determined for a wide range of iron concentrations. Samples with high Mg contents are finer grained ( $1-2 \mu\text{m}$ ) than those with low Mg contents ( $10-20 \mu\text{m}$ ). Furthermore, samples with high Mg contents ( $x \geq 0.90$ ) exhibit a stress exponent of  $n = 2$ , whereas samples with low Mg contents ( $x < 0.90$ ) deform with  $n = 3$ . This result is consistent with the dislocation-accommodated grain boundary sliding model of Langdon (1994), which predicts that fine-grained samples that do not contain sub-grains should exhibit  $n = 2$  while coarser-grained samples that do contain sub-grains should exhibit  $n = 3$ . The flow stress decreases with increasing iron content of the olivine samples at constant temperature, strain rate, and grain size. Following the analysis of previous studies (Mackwell *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2009), we fit our creep data to the following flow law: strain rate =  $A \sigma^n d^{-p} (1-x)^m f_{\text{H}_2\text{O}}^r \exp\{-[Q_0 + \alpha(1-x)] / RT\}$ , where  $A$  is a material-dependent parameter,  $\sigma$  is stress,  $d$  is grain size,  $p$  grain size exponent,  $m$  iron content exponent,  $f_{\text{H}_2\text{O}}$  water fugacity,  $r$  water fugacity exponent,  $Q_0$  activation energy at  $(1-x) = 0$ , and  $\alpha$  a constant. The dependence of strain rate on iron concentration is characterized by two parameters - directly, through the iron content exponent  $m$  and, indirectly, through the term  $\alpha(1-x)$  in the activation energy. The values of  $m$  and  $\alpha$  are determined by the rate-controlling mechanism of deformation and the charge neutrality condition for Fe-bearing olivine.

Keywords: olivine, iron content, creep, rheology, experiments, deformation

## オリビン多結晶体のクリープ及び電気伝導の活性化エネルギー高精度測定 High accuracy measurement of activation energy of creep and electrical conductivity of olivine aggregate

仲小路 理史<sup>1\*</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>; 三部 賢治<sup>1</sup>  
NAKAKOJI, Tadashi<sup>1\*</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>; MIBE, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

マントル構成岩石を代表するかんらん岩のクリープ速度は、拡散速度の一番遅い元素である Si<sup>4+</sup> の拡散によって律速されると考えられる。しかし、Sundberg and Cooper(2008) は、かんらん石のみではなく輝石を含む系での拡散クリープにおいて、変形を律速するのは、Si<sup>4+</sup> の拡散ではなく、二番目に遅い拡散速度を持つ元素の拡散であると提案した。このように、マントル岩の変形に関して、その律速過程は必ずしも分かっていない。また、変形機構の特定の指標となる活性化エネルギーに関して、その見積もりには、大きな誤差を含んでいる。そのため、地球内部への外挿の際に、大きな不確定性を生む。以上の二つの問題を解決するべく、連続的に変化する温度下で、変形実験と共にインピーダンス測定実験を行った。

実験試料は、上部マントル物質を模擬したフォルステライト (90Vol%) + エンスタタイト (10Vol%) の合成多結晶焼結体である。実験中の試料の粒成長を抑制するために、予め 1360 °C 24 時間で、試料の焼鈍しを行った。実験中は、一定応力 20MPa の下、1360 °C から 1240 °C まで温度を変化させた。再現性の確認のために、炉内温度が 1240 °C まで到達した後、再び 1360 °C まで温度を上昇させた。変形実験と同時にインピーダンス測定も行った。印加電圧は交流 20V である。これを 1360 °C から 10 °C 毎に試料に印加し、その際の応答電流の値から試料内部のインピーダンスを求めた。

応力-歪速度の関係から粘性を求めた。粘性の逆数のアレニウスプロットをしたところ、実験温度の全領域において、線形分布を示した。これは、実験中に試料の変形メカニズムが変化しなかったことを示唆する。またインピーダンス測定実験によるデータから、試料内部の抵抗を決定し、電気伝導度を求めた。伝導が熱活性化過程であることを仮定し、温度と伝導度の積をアレニウスプロットしたところ、線形分布を示した。これら直線の傾きから活性化エネルギーを求めると、クリープは 627±15kJ/mol と電気伝導度は 297±12kJ/mol という値が得られた。このエネルギーの差は、試料内部で電気伝導を担う拡散種もしくは、拡散パスが異なることを示唆する。

Sundberg and Cooper(2008) によると、かんらん石+輝石系の試料の場合、変形メカニズムは、Si<sup>4+</sup> による拡散ではなくて、Mg<sup>2+</sup> と O<sup>2-</sup> の拡散によると示唆されている。そこで、本研究で得られた活性化エネルギーと先行研究のものを比較する。Si<sup>4+</sup> と O<sup>2-</sup> の格子拡散の活性化エネルギーは、それぞれ約 530kJ/mol と約 340kJ/mol である (Dohmen et al. (2002))。また、Chakraborty et al. (1994) によると、Mg<sup>2+</sup> の格子拡散の活性化エネルギーは約 400±60kJ/mol である。一方、本研究で得られた活性化エネルギーは、627±15kJ/mol であることから、本研究において変形を担っていたのは、Si<sup>4+</sup> の格子拡散であると推察される。また、ten Grotenhuis et al. (2004) は、本研究と同様の試料を用いて、鉄なしかんらん石の電気伝導度を計測して、その活性化エネルギー 315±39kJ/mol、および伝導度が粒径が大きくなると共に低くなる結果を得ている。以上のことから、本研究の電気伝導による活性化エネルギーが 297±12kJ/mol であったこと、ten Grotenhuis et al. (2004) で用いられた試料の粒径が本研究の粒径と同程度であったことを考えると、本研究における電気伝導は Mg<sup>2+</sup> の粒界拡散が寄与していたことが推察される。

キーワード: オリビン, クリープ, 電気伝導, 活性化エネルギー, 拡散, 多結晶体

Keywords: olivine, creep, electrical conduction, activation energy, diffusion, polycrystal

## マントル物質の拡散クリープ下での粒界すべりと粒子回転の定量化 Quantification of grain boundary sliding and grain rotation during diffusion creep of mantle rocks

丸山 玄太<sup>1\*</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>  
MARUYAMA, Genta<sup>1\*</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学、地震研究所、地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震学的観測より、上部マントルにおいて地震波速度の異方性の存在が明らかになっている (Tanimoto and Anderson 1984)。これは、マントル流動による、かんらん石の結晶格子選択配向 (CPO) が原因であるとされている。一般的に、CPO は転位すべりに伴う粒子回転によって発達すると考えられている。しかし最近、我々はこれまで CPO が発達しないと考えられてきた拡散クリープ領域において、結晶選択配向 (CPO) の発達を報告した (Miyazaki et al. 2013)。しかしながら、CPO の発達メカニズムは明らかにされていない。そこで、拡散クリープ領域における CPO 発達メカニズムを微細組織の観察によって解明することを目的とし、大気圧下における高温圧縮変形試験を行った。

本研究では、真空焼結法によって、円柱状の多結晶体であるフォルステライト+ダイオプサイド 2 相系 (Fo80Di20 vol. %) とフォルステライト+エンスタタイト 2 相系 (Fo65En35 vol. %) を合成し、これらを試料とした。変形実験前に試料の側面を鏡面研磨し、その面にマーカーとなる溝を圧縮軸に平行となるように作成した。この試料の加工は収束イオンビームを用いて行った。大気圧下における高温圧縮変形試験は、温度 1300 °C、歪速度  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の条件で行った。変形実験後に、電界放出型走査型電子顕微鏡 (JEOL 6500F、東京大学ナノ工学研究センター) を用いて変形に伴うマーカーの移動を観察した。このマーカーの観察から、変形による粒子の移動を調べる。

試料表面のマーカー観察により、マーカーのオフセットを確認した。これは粒界すべりが生じた証拠となる。また、粒内のマーカーに歪が見られないことから、粒内変形はないと考えられる。さらに我々は、個々の粒子の回転を確認し、回転角度を定量化した。Fo80Di20 の場合、歪 3 %、7 %、14 % のとき粒子の平均回転角度はそれぞれ 1.2°、3.9°、6.5° となった。この結果から、歪量の増加に伴い回転量も増加することがわかる。さらに、Fo80Di20 の方が Fo65En35 よりも回転量が大きいことが明らかになった。これは、Fo 粒子の形状が原因であると考えられる。Fo80Di20 の場合 Fo 粒子は異方的である。一方、Fo65En35 の Fo 粒子は等方的である。異方的な粒子は結晶学的に制御された結果、長く直線的な粒界を持ったと考えられる。我々は、粒界すべりクリープ下における粒子回転のモデル (Beere 1978) を拡張し、すべりが容易であると考えられる長く直線的な粒界の存在によって粒子の回転が生じ CPO が発達すると仮定している。本研究の結果は、我々の CPO 発達モデルを支持するものと思われる。

キーワード: 粒子回転, 粒界すべり, CPO, クリープ

Keywords: grain rotation, grain boundary sliding, CPO, creep

カンラン石の結晶方位定向配列発達の高圧高温下その場観察実験：上部マントルの地震波速度異方性の強度発達  
In-situ observation of crystallographic preferred orientation of olivine deformed in simple shear: Implications for the

大内 智博<sup>1\*</sup>; 西原 遊<sup>1</sup>; 瀬戸 雄介<sup>2</sup>; 川添 貴章<sup>3</sup>; 西 真之<sup>1</sup>; 丸山 玄太<sup>5</sup>; 肥後 祐司<sup>6</sup>; 舟越 賢一<sup>7</sup>; 鈴木 昭夫<sup>8</sup>; 亀卦川 卓美<sup>9</sup>; 入舩 徹男<sup>1</sup>

OHUCHI, Tomohiro<sup>1\*</sup>; NISHIHARA, Yu<sup>1</sup>; SETO, Yusuke<sup>2</sup>; KAWAZOE, Takaaki<sup>3</sup>; NISHI, Masayuki<sup>1</sup>; MARUYAMA, Genta<sup>5</sup>; HIGO, Yuji<sup>6</sup>; FUNAKOSHI, Ken-ichi<sup>7</sup>; SUZUKI, Akio<sup>8</sup>; KIKEGAWA, Takumi<sup>9</sup>; IRIFUNE, Tetsuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> パイロイト大学地球科学研究所, <sup>4</sup> 東京工業大学地球生命科学研究科, <sup>5</sup> 東京大学理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>6</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>7</sup> 総合科学研究機構東海事業センター, <sup>8</sup> 東北大学理学研究科地学専攻, <sup>9</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, <sup>3</sup>Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, <sup>4</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>5</sup>Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>6</sup>Japan Synchrotron Radiation Institute, <sup>7</sup>Research Center for neutron Science and Technology, <sup>8</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University, <sup>9</sup>Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization

The characteristics of the seismic anisotropy vary depending on the types of crystallographic preferred orientation (CPO) of olivine. Therefore, the pattern of the seismic anisotropy has been interpreted by taking into account the water- and pressure-induced fabric transitions of olivine in recent studies (Jung and Karato, 2001; Ohuchi et al., 2011). The fabric strength of olivine aggregates is also important when we evaluate the magnitude of the seismic anisotropy in the upper mantle. In the upper mantle, the steady-state fabric strength of olivine is expected to be achieved due to long time-scales of flows.

The dependency of the fabric strength of olivine aggregates on strain has been evaluated in only limited numbers of experimental studies (e.g., Bystricky et al., 2000). Bystricky et al. (2000) showed that total shear strains higher than 4 are needed to achieve the steady-state fabric strength of olivine (D-type fabric) at 0.3 GPa and 1473 K. However, it has been difficult to evaluate the detailed process of the development of fabrics because fabrics of recovered samples have been evaluated. Recently, we have developed experimental techniques for in-situ simple-shear deformation experiments using a D-DIA apparatus. In this paper, we briefly show that our recent experimental results on in-situ observations of stress, strain, and fabric developments in olivine samples.

Simple-shear deformation experiments on olivine aggregates at pressures  $P = 2-3$  GPa, temperatures  $T = 1290-1490$  K, and shear strain rates of  $3E-4$  s<sup>-1</sup> were performed using a deformation-DIA apparatus installed at SPring-8. Shear strain (up to 5) was measured by the rotation of a platinum strain-marker, which was initially placed perpendicular to the shear direction. Differential stress, generated pressure, and CPO patterns of olivine samples were determined from two-dimensional X-ray diffraction patterns using software (IPAnalyzer, PDIndexer, and ReciPro: Seto et al., 2010; Seto, 2012). The CPO patterns of olivine in the recovered samples were also evaluated by the indexation of the electron backscattered diffraction (EBSD) patterns.

A-type olivine fabric was developed under dry conditions. The fabric strength increased with strain ( $<2$ ), and steady-state fabric strength was achieved at shear strains about 2. The [010] axes strongly concentrated to the shear plane normal and its concentration increased with strain. Preferential alignments of the [100] and [001] axes were developed through increase in strain, though concentrations of the [100] and [001] axes were weaker than those of the [010] axes. Development of B-type olivine fabric was observed under wet conditions (~700 ppm H/Si). The fabric strength of B-type sample continuously increased with strain (up to 3). As same as the case of A-type samples, concentrations of the [010] axes were stronger than those of other axes in the B-type sample. Because the concentration of the [010] axes efficiently increases at strains larger than 1, seismic anisotropy (e.g., VSH/VSV) at shear strains = 1 is quite similar to that under the steady-state conditions.

Using the CPO data of the steady-state A-type fabrics,  $V_{SH}/V_{SV}$  of the asthenospheric upper mantle is estimated to be 1.027 (note that 70 vol.% of preferred-orientated olivine grains and 30 vol.% of random-orientated orthopyroxene grains are assumed in the calculation). This value is consistent with the global one-dimensional model reported by Visser et al. (2008). The  $V_{SH}/V_{SV}$  of the asthenospheric upper mantle is expected to have higher values in the case of B-type fabric (e.g., 1.035), which is harmonious with the global one-dimensional model reported by Panning and Romaniwics (2006). Our results show that seismic anisotropy in the upper mantle is mostly explained by the steady-state olivine fabrics (A- and B-types), and other effects (e.g., shape-preferred orientation of melt, CPO of other minerals) would be limited.



SIT38-13

会場:511

時間:4月30日 12:15-12:30

キーワード: カンラン石, 結晶方位定向配列, その場観察, 地震波速度異方性

Keywords: olivine, crystallographic preferred orientation, in-situ observation, seismic anisotropy

## 放射光単色 X 線と AE6-6 システムを用いた高圧下における antigorite の脱水反応と変形挙動のその場同時観察 Simultaneous observations of dehydration and AE activities during the deformation of antigorite at high pressures

岩里 拓弥<sup>1\*</sup>; 久保 友明<sup>1</sup>; 肥後 祐司<sup>2</sup>; 加藤 工<sup>1</sup>; 金嶋 聰<sup>1</sup>; 上原 誠一郎<sup>1</sup>; 今村 公裕<sup>1</sup>  
IWASATO, Takuya<sup>1\*</sup>; KUBO, Tomoaki<sup>1</sup>; HIGO, Yuji<sup>2</sup>; KATO, Takumi<sup>1</sup>; KANESHIMA, Satoshi<sup>1</sup>; UEHARA, Seiichiro<sup>1</sup>; IMAMURA, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 九大・理, <sup>2</sup>JASRI

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>JASRI

Intermediate-depth earthquakes are seismic activities at depths of 60-300 km, where subducting plates deform plastically rather than brittle failure. Because dehydration embrittlement (Raleigh and Paterson, 1965) may not work for serpentinite at pressures more than ~2 GPa, it is important to understand the mechanisms of shear instability at higher pressure. To conduct simultaneous observation of dehydration reaction, plastic flow and shear instability, we developed an in-situ observation system combined with synchrotron monochromatic X-ray and AE 6-6 system (multiple acoustic emission measurement for multi-anvil 6-6 type system) using Deformation-DIA (D-DIA) apparatus. Using this system, we carried out antigorite deformation experiments up to ~4.5 GPa and ~850 K including the condition of the antigorite dehydration to talc and forsterite.

Deformation experiments were conducted at high pressure and high temperature using a 1500-ton uniaxial press (SPEED Mk. II) with a D-DIA type guide block installed at BL-04B1, SPring-8 (Katsura et al., 2004; Kawazoe et al., 2011). 50 keV monochromatic X-ray were used to measure two-dimensional X-ray diffraction (2D-XRD) patterns and X-ray radiography images, which give reaction kinetics, differential stress, and strain. We developed MA 6-6 type system (Nishiyama et al., 2008) to monitor shear instabilities by AEs from maximum six piezoelectric devices positioned between first and second stage anvils. AE waveforms were recorded in trigger mode using six-channel 8-bit digital oscilloscopes at a sampling rate of 50MHz. Starting material of polycrystalline antigorite cylinder (1.7 mm in diameter and 2.7 mm in length) cored from high-temperature serpentinite (Eigami, Nagasaki, Japan) were first compressed at room temperature, then heated at constant load, and finally deformed with constant strain-rate mode. In some runs, dehydration occurred during heating or deformation. Microstructures of recovered samples were preliminarily observed by optical microscopy.

A total of ten deformation experiments of polycrystalline antigorite were conducted at 1.1~4.5 GPa, 300~850 K, and strain rates of  $3.4\sim 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . AEs were frequently generated from the sample during the cold compression. Relatively large AEs were also detected when heating the sample to 673 K, while AE activities became zero at higher temperatures. During the constant strain-rate deformation, the flow stress reached steady state at the sample strain of more than 5%, and no stress drops were observed until the final strain of ~30-40%. These flow behaviors and the flow strength are almost consistent with the previous study (Hilaret et al., 2007). We also detected AEs during the deformation stage although the frequency was lower compared to the cold compression and heating stages. The AE activities during the deformation became large at lower temperature and larger strain conditions. Optical microscopic observation revealed that some faults are present in the antigorite samples recovered from each stage. On the other hand, we observed dehydration reaction from antigorite to talc-like phase during the deformation at 800 K. The reaction was very slow and only one AE event was detected at the strain of ~25%. Because the faults were only observed in the relict antigorite region, the AE was possibly originated from antigorite. At higher temperature of 850 K, complete dehydration quickly occurred before the deformation. No AEs were detected during the dehydration and the following deformation of dehydrated materials to more than 30% strain. No faults were observed in the recovered sample. Our simultaneous observations of reaction and AE activities showed that the AE is not generated by dehydration of antigorite at more than ~2 GPa. Instead, the unstable fault slipping that generates AEs occurs during heating and deformation of antigorite without dehydration.

Keywords: Acoustic emission, In situ X-ray observation, deformation-DIA, antigorite, dehydration, stress and strain

## 高温高圧下における周期振動実験による地震波減衰測定 Seismic attenuation measurement by cyclic loading under high pressure and temperature

芳野 極<sup>1\*</sup>; 山崎 大輔<sup>1</sup>; 肥後 祐司<sup>2</sup>; 舟越 賢一<sup>3</sup>

YOSHINO, Takashi<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>; HIGO, Yuji<sup>2</sup>; FUNAKOSHI, Ken-ichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>3</sup> 総合科学研究機構東海事業センター

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama Univ., <sup>2</sup>JASRI, <sup>3</sup>CROSS

The estimation of the mantle structure using seismic tomography method has been advanced by understanding of the detailed velocity structure of the Earth interior. On the other hand, Brillouin scattering in the DAC at very high pressure, X-rays inelastic scattering, sound velocity measurement of ultrasonic range in the large press is also improved. These developments can be expected this time as a further declaration of a picture of a more detailed Earth interior. However, as compared to the frequency band of MHz to GHz region, the frequency range of the seismic waves propagating through the earth interior is much lower. We should noted that it is greatly affected by the attenuation of seismic waves. Because the materials are not in a perfectly elastic body, energy loss inside the materials occurs in the wave propagation because of presence of grain boundaries, dislocations, and defects. Thus, seismic attenuation occurs as a function of frequency.

The attenuation of seismic waves (the determination of the  $Q^{-1}$ ) of mantle material under high pressure has not been reported until recently mostly because it is an experimental quantification is very difficult. Temperature effects and particle size effects were reported for the first time systematically for olivine aggregates at high temperature under low pressure. However, for this system the upper limit of the generated pressure is low because it is a torsion test performed in the gas pressure. So the study of pressure -dependent and high-pressure mineral is difficult. The other group using the D-DIA type press having two differential ram measured  $Q^{-1}$  combining an in-situ observation and radiation uniaxial periodic vibration test. This system expands a possibility of experimental determination of  $Q^{-1}$  at much higher pressure. In Japan, the DIA type press was installed at SPring8 (D-DIA). Recently we started the measurement of  $Q^{-1}$  under high pressure using in situ image acquisition of the high time and spacial resolution at short period of oscillation cycle.

In this paper, some experimental developments for measuring seismic attenuation at high pressure and results of cyclic loading tests are introduced. Time resolved images of the sample and reference material obtained by a synchrotron X-ray radiography provide their strain as a function of time during cyclic loading. Attenuation is determined as the tangent of the angle of phase lag between the strain of the sample and the strain of the reference material. A newly installed short period sinusoidal cyclic loading oil pressure system enable us to determine minimal strain of the sample in a wide frequency range from 2 to 0.01 hertz on olivine aggregates at 1 GPa and up to 1673 K. The detectable minimum strain is around  $5 \times 10^{-5}$ . Several test experiments exhibited resolvable  $Q^{-1}$  ( $10^{-2}$ ) above 1273 K. The results are generally consistent with previously reported data.

キーワード: 減衰, 高圧, 振動, Q 値, 剛性率

Keywords: seismic attenuation, high pressure, oscillation, Q value, shear modulus

## アンチゴライトの非弾性的性質 Viscoelastic property of antigorite

山崎 大輔<sup>1\*</sup>  
YAMAZAKI, Daisuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学  
<sup>1</sup> Okayama University

Seismological data reveals the structure and dynamics combined with mineral physics. For example, the velocity structures from observations are interpreted using the elastic properties of constituting minerals obtained from the laboratory measurements. Because the minerals in the earth is not perfect single-crystal but they contain a certain amount of defects (vacancy, dislocation, grain boundary), the viscoelastic relaxation is taken place by the viscous motion of the defects during the propagating the seismic waves with the frequency of  $10^{-4}$ -10 Hz. Serpentine can be considered to be one of the candidate for the source of the fluid in the wedge mantle. In the present study, therefore, we examine the viscoelastic property of serpentine (antigorite) under uppermost mantle conditions by means of high pressure experiments.

Fine-grained polycrystalline antigorite (a few micrometer of grain size) sintered at 3 GPa and 550 degree C for 4 hours was used as a starting material for the attenuation experiment. We conducted the experiments by using D-DIA press with a short-period cyclic loading system, which was recently installed at BL04B1, SPring-8, Japan. D-DIA, which is a single stage of six-anvil compression device, applied pressure by forcing each of the six anvils to advance on the cubic pressure medium with a main ram. After pressure reaching to the target value of 1 GPa by the pumping the main ram, a sinusoidal stress and strain was applied by advancing and withdrawing the upper and lower anvils operated by the short-period cyclic loading system with the frequency between 0.01-2 Hz at 1 GPa and 500-750 degree C. At high temperature ( $>650$  degree C), dehydration is expected. The strain was monitored directly from X-ray radiography of sample located in the pressure medium through the anvil gap during cyclic loading. In the present study, single crystal of forsterite was placed next to the sample along the stress axis of the sample and it can be used as the standard to estimate the stress by recording the X-ray radiography images displaying the lengths of standard and sample simultaneously.

The time lag of strain of sample against that of standard provided us the quality factor,  $Q$ , to be 5.4, 4.8 and 4.4 for the periods of 5, 10 and 20 s, respectively, at 600 degree C. Present preliminary results shows the temperature dependence of  $Q^{-1}$ . At 500 degree C,  $Q^{-1}$ s are  $\sim 0.5$  log unit lower than those at 600 degree C. The present values is  $\sim 2$  order of magnitude lower than that of olivine aggregates. The shear modulus was estimated to be 15-25 GPa in our experimental condition, which is much smaller than the shear modulus without attenuation (38.5 GPa). The large reduction in shear modulus due to attenuation was previously reported in the case of olivine.



## アナログ物質を用いた多結晶体の非弾性実験：融点近傍における振る舞い Experimental study of anelasticity of a polycrystalline material near the melting temperature

山内 初希<sup>1\*</sup>; 武井 康子<sup>1</sup>  
YAMAUCHI, Hatsuki<sup>1\*</sup>; TAKEI, Yasuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

岩石の非弾性は、上部マントルの地震波速度・減衰  $Q^{-1}$  構造を解釈するために必要となる重要な物性である。しかし地震波の周波数、高温高圧下でおこなわれる岩石の非弾性実験は困難でデータが少ない。そこで我々は岩石のアナログ物質として有機多結晶体(ボルネオール,  $C_{10}H_{18}O$ ) を使って実験をおこなっている。ボルネオールは融点が  $204.5^\circ\text{C}$  と岩石に比べて低い。不純物としてジフェニルアミン ( $(C_6H_5)_2NH$ ) を混ぜることで共融点が  $43^\circ\text{C}$  とさらに低くなり、岩石よりも簡単にメルトを含む試料を作成できるというメリットがある。そしてボルネオール+ジフェニルアミン系のメルトの形状はオリビン+バサルト系のものでとてもよく似ている。[Takei, 2000]

McCarthy et al.(2011) ではボルネオール多結晶体試料を用いてさまざまな温度 ( $20-50^\circ\text{C}$ ) ・さまざまな粒径で強制振動実験をおこない、ヤング率と減衰  $Q^{-1}$  を周波数  $f=10^{-4}-2\text{Hz}$  で測定した。また、クリープ実験をおこなって粘性を測定し、マクスウェル周波数  $f_m$  を求めた。得られた  $Q^{-1}$  を  $f_m$  で規格化した周波数に対してプロットすると、さまざまな温度・粒径でおこなった結果がすべてほぼ 1 本の曲線上にのることが示された。さらにオリビン多結晶体を用いた他の実験結果 (Gribb and Cooper, 1998, Tan et al., 2001, Jackson et al., 2002) も同じ曲線上にのることがわかり、多結晶体の非弾性には物質に依らない普遍性があることがわかった。しかしこの実験の規格化周波数の領域 ( $f/f_m < 5 \times 10^4$ ) は地震波の規格化周波数領域 ( $f/f_m = 10^6 - 10^9$ ) には届いていないため、マクスウェル周波数  $f_m$  を用いた非弾性の規格化が地震波の周波数領域でも有効かどうかは明らかではなかった。

その後試料製法や実験装置に改良を加え、Takei et al.(in preparation) では McCarthy et al.(2011) よりも低温 ( $0-20^\circ\text{C}$ ) ・高周波数領域 ( $f=10^{-4}-50\text{Hz}$ ) でより精度の良い実験が可能となった。この実験では試料として純粋なボルネオール多結晶体の他にボルネオール+ジフェニルアミン多結晶体を用いた。そして McCarthy et al.(2011) と同様にマクスウェル周波数  $f_m$  で規格化した周波数に対して  $Q^{-1}$  をプロットした結果、 $f/f_m = 10^4$  以上の領域では温度や粒径、化学組成によって大きさの異なるピークがあらわれ、データが一本の曲線にはのらず大きくばらつくことがわかった。したがって地震波の規格化周波数領域では単純なマクスウェル周波数  $f_m$  による規格化が当てはまらないことがわかった。このピークは温度が高いほど、また不純物を含むほど大きい。ボルネオール多結晶体の融点はジフェニルアミンを不純物として含むことで  $204.5^\circ\text{C}$  から  $43^\circ\text{C}$  に下がるので、同じ温度では純粋な試料よりも不純物を含む試料のほうが融点に近い。そして温度が高いほど、つまり融点に近づくほど  $Q^{-1}$  が大きくなることから、上部マントルのような高い  $Q^{-1}$  をもつ構造を理解するためには融点付近の多結晶体の非弾性のふるまいを理解することが重要と考えられる。

本研究では、ジフェニルアミンを不純物として含むボルネオール多結晶体を用いて融点  $43^\circ\text{C}$  をまたぐ温度範囲 ( $20-46^\circ\text{C}$ ) で、また、周波数  $f=2 \times 10^{-4}-50\text{Hz}$  の範囲で上記の先行研究と同様の実験をおこなった。これまでの実験から、試料の粘性・非弾性などの物性が融点付近で徐々に変化していくという結果が得られた。これは、物性は融点を超えてメルトができた途端に急に変わるという今までの認識とは異なるものである。今後、融点付近の非弾性をさらに深く知るために粒径やメルト分率を系統的に変えて実験をおこなっていく予定である。

キーワード: 非弾性, 地震波減衰

Keywords: anelasticity, seismic attenuation

## 部分溶融系の体積粘性率・剪断粘性率の測定 Experimental study of bulk and shear viscosities of partially molten rock analogue

鈴木 彩子<sup>1\*</sup>; 武井 康子<sup>1</sup>; 渡邊 俊一<sup>2</sup>  
SUZUKI, Ayako<sup>1\*</sup>; TAKEI, Yasuko<sup>1</sup>; WATANABE, Shun-ichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海上保安庁海洋情報部

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Hydrographic & Oceanographic Dept, Japan Coast Guard

Deformation of partially molten rock is controlled by two independent viscosities: shear viscosity for shear deformation and bulk viscosity for compaction/decompaction. Bulk viscosity and its ratio to shear viscosity,  $h_b/h_s$ , play an important role in melt segregation dynamics in the upper mantle (Katz, 2008). However, that value has not been well constrained theoretically nor experimentally especially at small melt fractions. Most numerical studies have used the theoretically predicted value of  $h_b/h_s = \sim f^{-1}$ , where  $f$  is the melt fraction. Takei and Holtzman (2009a) theoretically obtained a constant value of  $h_b/h_s$  by taking into account a diffusion creep mechanism. The discrepancy between two models is significant at small melt fractions. There has not been experimentally determined value of  $h_b/h_s$  because very few experimental studies have been done about bulk viscosity although shear viscosity has been measured extensively. To discuss the validity of these models based on the experimental data, it is highly important to measure both bulk and shear viscosities by using the equivalent samples. In this study, we measured experimentally these two viscosities as functions of melt fraction using a partially molten rock analogue.

Samples were polycrystalline aggregates of borneol-diphenylamine binary with eutectic temperature of 316K, which has a quite similar equilibrium microstructure to olivine + basalt system (Takei, 2000). Initial melt fraction can be controlled precisely by the concentration of diphenylamine because of its simple eutectic reaction. Before deformation experiments, samples were annealed at 320K for ~100 hours in a sealed capsule to make those grain size large enough (~0.030 mm), resulted in negligible grain growth during the successive deformation tests at the same temperature.

To measure bulk and shear viscosities, we carried out two separate experiments. For bulk viscosity, compaction experiments were performed under the diffusion creep regime. A cylindrical sample was compacted uniaxially in a rigid sleeve ( $e_{zz} < 0$ ,  $e_{xx} = e_{yy} = 0$ , where  $e$  is the strain). Melt was squeezed out from the partially molten sample into porous metals which contact with the sample at the top and bottom ends until melt fraction becomes nearly zero. Evolution of melt fraction in the sample was calculated from the sample length measured with digital gauge. Apparent viscosities as a function of melt fraction were proportional to  $\exp(-af)$  with  $a = \sim 30$  at  $f > 4\%$ , which is quite consistent with the olivine + melt systems (Renner et al., 2003). At  $f < 3\%$ , deviation of the viscosity from the exponential curve occurs, suggesting the possible effects of permeability and change of rate limiting process of the volumetric creep (Takei & Holtzman, 2009b). For shear viscosity, uniaxial deformation experiments were performed without a horizontal confining pressure ( $s_{zz} < 0$ ,  $s_{xx} = s_{yy} = 0$ , where  $s$  is the stress). Melt fraction was nearly constant during the test. Deformation tests were conducted with some constant load steps under the diffusion creep regime. Apparent viscosity is evaluated from the stress and the strain rate at steady state.

From the two apparent viscosities obtained independently, we can calculate each bulk and shear viscosities as functions of melt fraction. We will test the predictions of models and discuss the possible viscosity ratio of the partially molten rocks in the upper mantle.

### References:

- Katz RF (2008) J.Petrol., 49, 2099-2121.
- Renner J, Viskupic K, Hirth G, Evans B (2003) G<sup>3</sup>, 4, doi:10.1029/2002GC000369.
- Takei Y (2000) JGR, 105, 16665-16682.
- Takei Y, Holtzman BK (2009a) JGR, 114, doi:10.1029/2008JB005850.
- Takei Y, Holtzman BK (2009b) JGR, 114, doi:10.1029/2008JB005851.

キーワード: 粘性, 体積粘性率, 剪断粘性率, 部分溶融

Keywords: viscosity, bulk viscosity, shear viscosity, partial melt

## 地球マントルのレオロジーと粒成長における Mg-O 粒界拡散の役割 Role of Mg-O grain-boundary diffusion in rheology and grain-growth in the Earth's mantle

西原 遊<sup>1\*</sup>; 西 真之<sup>1</sup>; 丸山 玄太<sup>2</sup>  
NISHIHARA, Yu<sup>1\*</sup>; NISHI, Masayuki<sup>1</sup>; MARUYAMA, Genta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地球マントルの物質輸送、熱輸送の定量的理解には、構成物質のレオロジーやこれと密接に関連する粒成長の理解が欠かせない。これまでにマントル構成鉱物のレオロジーが幅広く研究されており、各鉱物単相のレオロジーの定量的理解は進みつつある。一方で、複数鉱物の集合体である多相系のレオロジーは、構成鉱物単相のレオロジーの単純な平均では記述できない場合が多く不明な点が残されている。マントル鉱物の結晶粒成長についても、粒界移動が直接律速過程となる単相系では比較的よくわかっているものの、多相系では異種鉱物の存在が粒界移動を妨げ異なるプロセスが粒成長を律速していると考えられ単相系のデータは現実の大部分のマントルには適用できない。最近、Sundberg and Cooper (2008) はハルツバーガイトの変形実験に基づき、カンラン石-斜方輝石界面での反応を伴った Mg-O の粒界拡散が歪を生み出す新しい変形機構のマントルでの重要性を指摘した。また、Tasaka and Hiraga (2013) はフォルステライト-エンスタタイト系の粒成長実験に基づき、この系の粒成長が Mg-O 粒界拡散に律速されている可能性が高いことを示した。これらの結果はいずれも、多相系のマントルのレオロジー、粒成長において Mg-O 粒界拡散が重要な素過程であることを示している。最近われわれのグループでは、高温高压下での反応帯成長実験によってフォルステライト (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) と MgSiO<sub>3</sub> ペロフスカイトの Mg-O 粒界拡散係数を報告している (丸山ほか, 2013; Nishi et al., 2013)。本研究では、これらの結果を用いた理論モデルと変形実験、粒成長実験の比較により、Mg-O 粒界拡散が律速過程となる変形機構、粒成長機構の上部マントルと下部マントルにおける重要性を調べた。

上部マントルにおいてはカンラン石-斜方輝石界面での反応を伴った Mg-O の粒界拡散により (Sundberg and Cooper, 2008)、下部マントルではペリクレスの粒成長を伴った Mg-O の粒界拡散により変形する機構を考え、丸山ほか (2013) と Nishi et al. (2013) の結果を用いて Coble (1963) の提案した関係式によりその流動則を求めた。上部マントルについて得られた流動則は Tasaka et al. (2013) のフォルステライト-エンスタタイト二相系の変形実験結果より約 3 桁も大きな歪速度を示し現実的ではないことがわかった。下部マントルについては比較できる変形実験がないが、この変形機構は Xu et al. (2011) の仮定した Si 格子拡散クリープよりも大きな歪速度を示した。そのため下部マントルの大部分がこの機構により変形している可能性がある。

上部マントルの粒成長については、Tasaka and Hiraga (2013) がすでに、フォルステライト-エンスタタイト二相系の系統的な粒成長実験に基づいて、この系の粒成長が第一相粒界を通じた Mg-O 粒界拡散が律速する第二相粒成長に支配されていることを示している。これと同様に、Ardell (1972) の理論に基づき、下部マントルに相当する MgSiO<sub>3</sub> ペロフスカイト-ペリクレス系の粒成長速度係数を Nishi et al. (2013) の Mg-O 粒界拡散係数を用いて計算した。その結果、Yamazaki et al. (1996) の報告した MgSiO<sub>3</sub>+MgO 系の実験と矛盾のない結果が得られた。彼らの実験では実験初期の非平衡組織からの急速な成長に続いて、平衡組織達成後に Mg-O 粒界拡散の律速する粒成長が起こっていると解釈できる。この解釈に基づけば、従来の考えと異なり下部マントルの粒径は百万年で数百 μm に成長し得る。

キーワード: 上部マントル, 下部マントル, レオロジー, 粒成長, カンラン石, Mg ペロフスカイト  
Keywords: Upper mantle, Lower mantle, Rheology, Grain-growth, Olivine, Mg-perovskite



## 第四紀上総層群シルト岩のスケンプトン係数と続成作用の関係 Relationship between Skempton's coefficient and diagenesis of the Quaternary Kazusa Group siltstones

三橋 俊介<sup>1\*</sup>; 上原 真一<sup>1</sup>; 丸茂 春菜<sup>2</sup>; 田村 幸枝<sup>1</sup>

MITSUHASHI, Shunsuke<sup>1\*</sup>; UEHARA, Shin-ichi<sup>1</sup>; MARUMO, Haruna<sup>2</sup>; TAMURA, Yukie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学理学部, <sup>2</sup> 東邦大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Science, Toho University, <sup>2</sup> Graduate School of Science, Toho University

スケンプトン係数(以下 B 値)は岩石や堆積物の基本的な物理特性である。B 値は、非排水条件における、岩石に働く封圧の変化量に対する間隙水圧の変化量の割合を示す。例えば堆積盆中の異常高間隙水圧の発達メカニズムを検討する上では、続成作用の過程においての堆積物や堆積岩の B 値の変化について考慮する必要がある(Tanikawa et al., 2008)。しかしながら、この性質はまだよくわかっていないのが現状である。本研究では続成作用と B 値の関係を明らかにすることを目的として、第四紀上総層群の各層準のシルト岩の有効圧下での間隙率の測定結果から B 値を算出し、その結果を比較した。また B 値を直接測定する実験も行い、上述の手法で算出した値と比較することで、これらの測定手法について検討した。

室内実験では上総層群の梅ヶ瀬層、大田代層、黄和田層、大原層及び勝浦層から採取したシルト岩を直径 40mm、高さ 30mm の試料に整形したものを使用した。室内実験は東邦大学の容器内圧縮変形透水試験機を用いて、温度は室温、封圧は 2MPa~35MPa の範囲で行った。間隙流体には蒸留水を用いた。上総層群各岩石試料について有効圧下での間隙率を測定し、有効圧の変化による岩石の体積の変化量は間隙体積の変化量に等しいという仮定のもとで岩石の圧縮率を求め、その結果を用いて B 値を推定した。また、B 値直接測定実験では非排水条件で封圧を載荷したときの間隙水圧の増加量を測定し、その結果から B 値を求めた。

間隙率より推定した上総層群全体の B 値の結果から、層準が下位になるほど B 値は低いという傾向が得られた。ただし、大原層は比較的下位に位置するにも関わらず、高い B 値を示した。これは異常間隙圧の発達など何らかの要因により他の層に比べて堆積物の圧密が十分に進行しなかったことを反映していると考えられる。B 値の有効圧依存性に注目すると、B 値は有効圧の増加にともなって単調に下がるのではなく、ある有効圧の範囲では増加することがわかった。この増加は過圧密過程から正規圧密過程への変遷にともなって圧縮率が増加することを主に反映している。B 値は岩石の圧縮率と間隙率に依存するが、上総層群シルト岩の場合は圧縮率の性質をより強く反映することがわかった。すなわち続成作用が進むと圧縮率は減少するため、B 値は減少する傾向がある。また、上総層群の岩石では、B 値直接測定実験の結果は間隙率より求めた B 値より高い値を示す傾向が見られた。これは、B 値直接測定実験においては有効圧を載荷した時間が短く定常状態に達していなかったためであると考えられる。

キーワード: スケンプトン係数, 続成作用, 上総層群, 間隙率, 圧縮率, 室内岩石実験

Keywords: Skempton's coefficient, diagenesis, Kazusa Group, porosity, compressibility, laboratory rock experiment



## タルクの摩擦挙動における間隙圧変化の影響 Effects of pore pressure changes on frictional behaviors of talc

上原 真一<sup>1\*</sup>; 岡崎 啓史<sup>2</sup>; 清水 以知子<sup>3</sup>  
UEHARA, Shin-ichi<sup>1\*</sup>; OKAZAKI, Keishi<sup>2</sup>; SHIMIZU, Ichiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学理学部, <sup>2</sup>Department of Geological Science, Brown University, <sup>3</sup> 東京大学理学部

<sup>1</sup>Faculty of Science, Toho University, <sup>2</sup>Department of Geological Science, Brown University, <sup>3</sup>Faculty of Science, The University of Tokyo

いくつかの沈み込み帯で発見されている低周波地震の発生メカニズムについて、これまで様々なモデルが提案されてきた。そのいくつかは、プレート境界における高間隙圧の存在の重要性について指摘している。それに加えて、プレート境界に分布する含水鉱物も重要な要素として注目されている。特に蛇紋岩については、岩石学的にも地震波の観測からも、沈み込み帯のプレート境界上盤のマントルウェッジ内に存在すると考えられている。しかしながら、タルクもプレート境界断層のレオロジーを考える上で重要な物質である可能性が高い。タルクは、沈み込むスラブ起源の流体と蛇紋岩の反応によって生成されることが知られている。また、タルクは天然の断層帯で存在が確認されている物質のうち最も強度の弱いもののひとつであり、少量でも断層のレオロジーに大きな影響を与える可能性が考えられる。しかしながら、タルクの摩擦特性が間隙圧にどのように影響を受けるかについて、定量的な検討はあまりなされていないのが現状である。本研究では、封圧 $P_c$ 、間隙圧 $P_p$ を制御して、タルクのプレカット試料による摩擦実験を実施した。実験には中国産のタルクについて、直径 20 mm の円柱形の試料を軸に対して 30° に切断したプレカット試料を用いた。プレカット面（摩擦滑り面）は#400のカーボナダムで研磨した。試料には、間隙水が摩擦面に行きわたるように直径 3 mm の穴を設けた。この試料を封圧下で、一定の軸変位速度（1  $\mu\text{m/s}$ ）で軸載荷することでせん断試験を行った。実験はいくつかの封圧 $P_c$ （最大 110 MPa）・間隙圧 $P_p$ （最大 100 MPa）条件で行った。せん断試験の途中で、 $P_c$  または  $P_p$  をステップ状に変化させてそのときのせん断応力の変化の様子を調べた。

有効法線応力  $\sigma$  ( $=\sigma_t - P_p$ , ここで  $\sigma_t$  は全法線応力) をステップ状に変化させたところ、摩擦係数は遷移的な変化を経て定常状態に達する様子が観察された。 $\sigma$  が減少する場合、摩擦係数は一時的に増加したのち減少して定常状態に戻るが、 $\sigma$  の 1 桁分の変化に対するその摩擦係数の遷移的な変化量は 0.2 から 0.28 の範囲の値をとった。これは先行研究による石英やウエスター花崗岩の場合の結果に近い結果である (Linker and Dieterich, *J. Geophys. Res.*, 1992; Hong and Marone, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005)。一方  $\sigma$  が増加する場合は (このとき摩擦係数は一時的に減少)、この値は小さくなった (0.12 以下、場合によっては負の値を示すこともあった)。これは、この場合のせん断応力の遷移的な変化量が石英や花崗岩によるものに比べて小さいことを意味する。この現象は、摩擦面の起伏の変形がより延性的に変形することに関係しているのかもしれない。

ここで示された摩擦特性は、スロースリップのメカニズムに関係する可能性がある。例えば間隙圧の増加による有効法線応力の減少によって断層滑りが引き起こされた場合、滑り面上で部分的に非排水状態となり膨張硬化 (ダイラタンシーハードニング) が起きることによって有効法線応力が増加する可能性がある。このとき、断層面がタルクに覆われている場合、通常物質で覆われている場合に比べて、有効法線応力の増加に対する摩擦係数の一時的な減少量が小さくなる (摩擦係数があまり減少しない) ことが予想される。したがって、滑りに対する摩擦抵抗がより有効に働き、通常の地震性滑りよりも滑り速度が小さくなることが期待される。

本研究は、科研費補助金 (新学術領域) の援助を受けて実施した。ここにその感謝の意を表する。

キーワード: タルク, 摩擦実験, 間隙圧, 低周波地震

Keywords: talc, friction experiment, pore pressure, low frequency earthquake

## 微粒正長石多結晶体の焼結実験 Sintering experiments on fine-grained polycrystalline orthoclase

大平 茜<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>1</sup>  
OHIRA, Akane<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院・学府

<sup>1</sup> Graduate school of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

カリ長石は花崗岩や変成岩の主要構成鉱物であり、その変形挙動を明らかにすることは大陸地殻のレオロジーを理解するうえで重要である。変形機構の1つである拡散クリープは鉱物種、結晶粒径、空隙等の因子が影響しており、室内実験においてはこれらの因子が制御された鉱物多結晶体が欠かせない。そこで正長石を原料に緻密な微粒正長石多結晶体を作製することを目的とした焼結実験を行った。

本研究では、正長石 ( $\text{K}_{0.83}\text{Na}_{0.17}\text{Al}_{1.04}\text{Si}_{2.96}\text{O}_8$ ) をサブミクロンスケールに粉砕した。蛍光 X 線 (XRF) 分析により、微粒粉末からは粉碎機からの混染であると考えられるジルコニウムが最大 5.65wt.% 検出された。この微粒粉末を乾式にて一軸加圧成形 (室温, 20MPa) を行い、円柱状の成形体を超高温管状炉で温度 970 °C, 圧力  $\sim 4.1 \times 10\text{Pa}$  の条件下で 4 時間焼成した。またマッフル炉を用い同温で常圧焼結した試料との比較を行った。焼結体は XRF 分析, X 線回折 (XRD) 分析を行い、組織観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

真空焼結と常圧焼結の結果、それぞれ収縮率 52.2%, 44.5%, 空隙率 0.15, 0.17 の焼結体を得られた。SEM 観察から、いずれの焼結体も空隙が減少し緻密化している構造が確認された。XRD 分析の結果、結晶構造 (Al/Si 秩序無秩序) は成形体から変化せずに焼結していることが確認された。

本研究の結果、微粒粉末を用いることで真空下または常圧下の焼成で低空隙率の鉱物多結晶体を作製することが可能であることが分かり、無秩序型の長石であるサニディンが安定する温度で焼成しても、4 時間の焼成では正長石が Al/Si 秩序無秩序相転移を起こさずに焼結することが確認できた。

キーワード: サブミクロン, 正長石, 焼結  
Keywords: submicron, orthoclase, sintering

## アノーサイト多結晶体の高温クリープへの微量添加物の効果 Doping effect on high-temperature creep of polycrystalline anorthite

谷部 功将<sup>1\*</sup>; 小泉 早苗<sup>1</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>  
YABE, Kosuke<sup>1\*</sup>; KOIZUMI, Sanae<sup>1</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

内陸地震の発生準備過程には下部地殻の粘性変形が大きく関与していると考えられている。これまでのアノーサイトの流動則に関する研究と岩石微構造観察から、下部地殻（温度 400~700 °C、及びマイロナイトで見られる粒径数十  $\mu$  m 程度）では拡散クリープで変形すると考えられている。したがって、拡散クリープ下でのアノーサイトの正確な固さを決めることは非常に重要なことである。

これまでの先行研究ではアノーサイトの粒径、温度、応力、含水率の効果が詳細に調べられてきた。しかし、先行研究の試料に含まれる微量 (<1 wt%) の不純物の効果は考慮されてこなかった。セラミックスでは微量の不純物によって多結晶体の固さが大きく変化することが知られている。実際、我々が開発した不純物のほとんど含まれていないアノーサイト多結晶体は先行研究のアノーサイトよりも粘性率にして 2 ケタ固いことがわかっている。そこで、本研究ではこの不純物のほとんど含まれていないアノーサイトに微量の MgO を添加し高温クリープに対する影響を調べた。

MgO 入りアノーサイト多結晶体は粒径 50 nm 以下の CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub> の微粒粉を真空焼結法を用いて作製した。MgO の量が 1 wt% となるようにした。この多結晶体に対し、応力一定実験を行った。実験条件は応力 10~100 MPa、温度 1150 °C~1380 °C、封圧 0.1 MPa とした。変形実験前後で走査型電子顕微鏡観察によって粒径を求めた。

実験前後の平均粒径は 1~2  $\mu$  m であった。応力-歪速度を対数プロットしたところ、両者に線形関係が見られた。その傾きから応力指数  $n = 1$  が得られ、拡散クリープ下で変形したと推測された。MgO 入りアノーサイトは純粋なアノーサイトよりも粘性率にして 1 ケタ以上柔らかいことがわかった。また、活性化エネルギー  $Q = 702$  kJ/mol も純粋なアノーサイトよりも大きかった。固さの違いは粒界に偏析した Mg の影響と考えられる。

キーワード: アノーサイト多結晶体, 拡散クリープ, 微量添加物の効果  
Keywords: polycrystalline anorthite, diffusion creep, effect of doping

## 強磁場プロセスを用いた配向性フォルステライト多結晶体の創製 Synthesis of textural polycrystalline forsterite using colloidal processing in a strong magnetic field.

小泉 早苗<sup>1\*</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>; 鈴木 達<sup>2</sup>; 目 義雄<sup>2</sup>  
KOIZUMI, Sanae<sup>1\*</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>; SUZUKI S., Tohru<sup>2</sup>; SAKKA, Yoshio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 物質・材料研究機構

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>National Institute for Material Science

It is well known that the crystallographic preferred orientation (CPO) of minerals is commonly produced in the Earth's interior. Thus, it is important to understand the physical properties of the mineral aggregates that exhibit CPO. However, silicate minerals are often feeble magnetic and have small anisotropic susceptibilities so that it is difficult to apply a magnetic field effectively to rotate the mineral particles. Tendency of finer particles to spontaneously agglomerate due to strong attractive interactions (van der Waals forces) add further difficulty. We used a technique of slip casting in a high magnetic field (12T) to align certain crystallographic axis of mineral particles. For the particles to rotate easily in the solvent under a strong magnetic field, we improve the method of deflocculating. To control the surface potential of the particles, we applied various types of polymer modification. Vacuum sintering of the powders that were composed of the aligned particles was expected to produce a polycrystalline material aggregate that exhibits CPO. The resultant materials were characterized by X-ray powder diffraction (XRD), secondary electron microscope (SEM) and Electron Backscatter Diffraction (EBSD).

The specimen exposed to a strong magnetic field exhibits preferential A-axis alignment to the magnetic direction. Those synthetic specimens allow us to examine the effect of CPO on the physical properties of the earth's materials in future room experiments.

キーワード: フォルステライト, 多結晶体, 磁場, 配向, CPO

Keywords: forsterite, polycrystalline, magnetic field, orientation, CPO



## 下部マントル条件におけるパイロライトの多相粒成長実験 Grain growth experiment on pyrolite material under lower mantle conditions

今村 公裕<sup>1\*</sup>; 久保 友明<sup>1</sup>; 加藤 工<sup>1</sup>  
IMAMURA, Masahiro<sup>1\*</sup>; KUBO, Tomoaki<sup>1</sup>; KATO, Takumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 九大・理  
<sup>1</sup> Kyushu Univ.

Grain size is a key parameter for understanding viscosity of Earth's mantle. Grain growth rate is one of important factors controlling the grain size. Especially, it is indispensable to examine grain growth kinetics in multiple phases because the grain growth rate of major phase drastically changes with the proportion of secondary phases (e.g., Hiraga et al., 2010). In the lower mantle, Mg-perovskite is major phase, and ferro-periclase, Ca-perovskite, and majoritic garnet are present as secondary phases (e.g., Irifune, 1994; Nishiyama and Yagi, 2003). The previous grain growth experiment (Yamazaki et al., 1996) in the two-phase system of MgSiO<sub>3</sub> perovskite and MgO periclase using Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> forsterite as a starting material suggests that the grain growth rate is too slow to explain the lower mantle viscosity constrained by geophysical observations. This inconsistency may arise from effects of the eutectoid transformation prior to the grain growth process (e.g., Solomatov et al., 2002). It is also necessary to examine effects of the chemical composition that affects the proportion of secondary phases and diffusivity. Here, we report preliminary results of the grain growth experiment on pyrolite material under lower mantle conditions.

High-pressure and temperature experiments were conducted using a Kawai-type multi-anvil apparatus (QDES) installed at Kyushu University. Starting material is a powder with pyrolite composition that was used in the previous phase equilibrium study (e.g., Irifune, 1994). We conducted annealing experiments at 25-28 GPa and 1600-1800 °C for 6-600 min. Chemical compositions, microstructures and grain sizes of recovered samples were examined using a FE-SEM with an energy-dispersive analytical system.

Four phases of Mg-perovskite, Ca-perovskite, ferro-periclase and majoritic garnet were present in recovered samples annealed at 25 GPa and 1600-1800 °C. The normalized grain size distribution in the recovered samples showed Gaussian-like shape and the largest grain size is smaller than three times of the mean grain size, suggesting that normal grain growth occurred. The grain growth rate is faster than that of the previous study (Yamazaki et al., 1996). Preliminary analysis of the kinetic data of Mg-perovskite obtained showed the smaller grain growth exponent of 4.3 than that reported in the previous study. On the other hand, three phases of Mg-perovskite, Ca-perovskite and ferro-periclase were present at higher pressure of 28 GPa and 1800 °C, in which the volume fraction of Mg-perovskite increased compared to the four-phases experiment. While the microstructure and the grain size distribution in the three-phase assemblage was similar to those of the four-phase assemblage, the grain size was larger probably due to the smaller proportion of the secondary phases. Our preliminary results provide some insights into the grain-size evolution in the lower mantle and suggest that further quantitative grain growth data with possible lower mantle conditions are needed.

Keywords: lower mantle, multi-anvil, pyrolite, grain growth

## マントル鉱物多結晶体中の貴金属元素の拡散 Grain boundary diffusion of noble metal elements in mantle composites

松尾 直弥<sup>1\*</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>  
MATSUO, Naoya<sup>1\*</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Eartquake Research Institute, The University of Tokyo

コアとマントルが地質時間を通して化学的に分離しているかは、現在も大きな議論がある。特に、マントル鉱物（シリケート）の結晶に入りにくい元素は、コアからマントルへの寄与は無く、コアとマントルの元素存在度は両者が分離した際の元素量で決定されたと予想されている。しかし最近の研究で、鉱物同士の隙間、つまり鉱物の粒界には、結晶に入りにくい元素が濃集し、高速で動き回ること（高速拡散）が予想されるようになってきた（Hiraga et al., 2004）。強親鉄性元素（HSE）は難揮発性であるが、マントル中には微量しか存在しないため、その大部分はコア中に存在していると考えられる（Wood, 2006）。したがって、もし HSE がコアからマントルへ移動することがあれば、マントル中の HSE 濃度は大きく変化する。すなわち、HSE はコアとマントルの化学的相互作用を見るためのトレーサーの役割を果たす。

本研究では、1 気圧・1360 °C の条件下でマントル鉱物中の金粒子の粒成長実験を行った。まずフォルステライトの粉に 10vol% の金粒子を分散させ、1 時間焼結して試料とした。これを複製し、各試料ごとに時間を変えて焼きなました後、走査型電子顕微鏡で観察した。その結果、混ぜる前は球状の形をしていた金粒子が多角形に変化していることが確認された。これは、金粒子とフォルステライト結晶間の界面張力のつりあいによると考えられる。また、各試料中の金粒子の粒径が、焼きなました時間とともに増大していることが分かった。これは、試料内全体の界面エネルギーを最小化するため、小さな粒子から大きな粒子へ原子が移動することで起こる Ostwald ripening によると考えられるため、フォルステライト結晶間の粒界を金原子が拡散していたことが示唆される。時間  $t$  だけ焼きなました後の金原子の平均粒径を  $d$ 、初期の粒径を  $d_0$  とすると、 $d^4 - d_0^4 = kt$  という関係があるので、測定した平均粒径から成長係数  $k$  を求めた。さらに粒子の形状から金粒子とフォルステライト粒子の間の界面エネルギーなどを推定し、フォルステライト多結晶体中の粒界における金原子の濃度  $c$  と金原子の拡散係数  $D$  の積を求めた。

キーワード: 粒界拡散, 粒成長, コア-マントル相互作用

Keywords: grain boundary diffusion, grain growth, core-mantle interaction

## 部分融解がマンツルの粘性および電気伝導度に与える影響 The effect of partial melting on the mantle viscosity and electrical

末善 健太<sup>1\*</sup>; 平賀 岳彦<sup>1</sup>  
SUEYOSHI, Kenta<sup>1\*</sup>; HIRAGA, Takehiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

本研究では、中央海嶺下マンツル岩体の上昇時の圧力低下によって生じる部分融解に伴う粘性率と電気伝導度の変化を調べるために、マンツル模擬試料を作製し、大気圧下、高温における粘性率と電気伝導度を測定した。オリビン (50%) - 斜方輝石 (40%) - 単斜輝石 (10%) に 0.5vol% のスピネルを加えたレーゾライト試料を合成し、試料を一定荷重で変形させながら、ソリダスをまたぐ温度領域において緩やかに温度上昇させることで、各温度での粘性と、同時におこなうインピーダンス測定によって電気伝導度を算出した。特にメルト無しからメルト有りの系に転移する際、粘性と電気伝導度に連続的な変化がみられるかに注目した。温度領域は 1100~1390° C、メルト分率 ( $\phi$ ) は最大 0.09 まで上昇させ、メルト分率が大きくなるに従って、単斜輝石に富む組成になる。

測定の結果、粘性率は温度上昇に伴って連続的に低くなった。これにはメルト分率が増えることに伴う効果が重なっている。測定した粘性率を  $\log(1/\eta)$  vs  $1/T$  でプロットしたところ、直線的な関係がみられ、これまで知られている経験則の形で粘性率がよく表されていることが示された。

本実験の粘性率を解析すると、1220° C から 1340° C にかけての見かけの活性化エネルギーは 970 kJ/mol で、メルト分率の増加による見かけの活性化エネルギーは約 35 kJ/mol であった。これを差し引き、メルト無しの系の活性化エネルギーは 935 kJ/mol であることが分かった。この値は輝石の転位クリープの活性化エネルギーの値に近く、本実験では輝石が変形に大きく寄与していることが推定された。

一方電気伝導度は、ソリダスをまたいでもメルトによる電気伝導度の上昇が確認できなかった。そして粒径依存性がみられたことから、本実験試料は粒径が小さいために粒界による電気伝導の寄与が強く、単斜輝石質メルトの電気伝導度を上回ったことがわかった。同じ温度において、これまでの研究で明らかにされている玄武岩質メルトと輝石を含まない系での粒界の電気伝導度と比べても、本実験における粒界の電気伝導度は 3~4 倍大きかった。これは本実験に含まれる輝石の粒界の存在が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

本研究により、これまで検証されてこなかったメルトなし ( $\phi=0$ ) から連続的に上記の流動則を適用できることを実証した。また、メルト増加率や連結性は岩石に含まれる輝石やスピネルの量に大きく依存し、鉱物モードがマンツル岩の融解時のレオロジーと電気伝導度に大きく影響することが分かった。

キーワード: レオロジー, レゾライト, メルト, 粘性, 電気伝導度

Keywords: rheology, rhelzolite, melt, viscosity, electrical conductivity

## Griggs 型固体圧式変形試験機の差応力測定値の較正 Stress calibration of Griggs-type deformation apparatus with solid salt assemblies

木戸 正紀<sup>1\*</sup>; 武藤 潤<sup>1</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>  
KIDO, Masanori<sup>1\*</sup>; MUTO, Jun<sup>1</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻  
<sup>1</sup> Department of Earth Sciences, Tohoku University

岩石や鉱物の力学的性質は地球内部の温度と圧力を再現した変形実験を行うことによって定量的に調べることができ  
る。岩石変形試験機には、使用する圧媒体の違いから固体圧式変形試験機、油圧式変形試験機、ガス圧式変形試験機など  
がある（例えば、Tullis and Tullis, 1986）。油圧試験機は高温での油の変質を防ぐため、500 °C以下に実験が制限される。  
固体圧試験機は柔らかい固体の圧媒体を用いているため、長期間安全かつ安定的に高封圧を得られるが、圧媒体と試料  
や載荷ピストンの間に生じる摩擦のため応力の測定精度は低い（例えば、Tullis and Tullis, 1986）。ガス圧試験機はロー  
ドセルが圧力容器の中にあるため、力学データの精度が最も高いが、国内では高压ガスの規制法規のため封圧 200 MPa  
以下に制限されている。従って、地殻深部や最上部マントルを構成する岩石鉱物の塑性流動変形に必要な高温・高压条  
件を得るためには固体圧試験機が必要となる。

近年、固体圧試験機とガス圧試験機を用いて封圧、温度、歪速度条件を等しくした金属試料の軸圧縮実験を行い、差  
応力測定値を比較することで固体圧試験機の較正則が示された（Holyoke and Kronenberg, 2010）。この較正則によって、  
固体圧試験機を用いて定常領域の差応力を± 30 MPaの誤差で求めることができるようになった。しかし、ガス圧試験機  
と固体圧試験機の定常領域に当たる歪 5%の応力値のみを比較することでこの較正則を求めているため、弾性領域や降伏  
領域、降伏後の歪硬化や歪軟化といった挙動を再現することはできない。岩石や鉱物の詳細な粘弾性挙動を明らかにす  
るためには、あらゆる変形挙動に適用できる固体圧試験機の差応力測定値の較正則が必要である。

本研究では、東北大学所有の Griggs 型固体圧式変形試験機（固体塩アセンブリ）を用いてニッケルの軸圧縮実験を行  
い、差応力の測定を行った。試料として用いたニッケルは Holyoke, Kronenberg 両博士に提供して頂いた。実験は、封圧  
300 MPa 及び 1200 MPa、温度 600 °C、700 °C、800 °C、歪速度  $2 \times 10^{-4}$  /s、 $2 \times 10^{-5}$  /s、 $2 \times 10^{-6}$  /s の条件で行った。その  
結果、先行実験（Holyoke and Kronenberg, 2010）と封圧の等しい差応力測定結果は先行実験の結果と± 30 MPa 程度の誤  
差でよく一致していた。しかし、封圧を増加させると差応力測定値が大きくなる傾向があった。得られたニッケルの力  
学データを嶋本（1987）の粘弾性構成則に基づいて解析し、様々な温度・歪における挙動を規格化したマスターカーブ  
を作成した。Holyoke and Kronenberg (2010) のガス圧試験機によるニッケルの力学データについても同様に解析し、マ  
スターカーブを作成した。固体圧試験機とガス圧試験機で同じニッケルを試料として用いており、温度、歪条件を規格化し  
ているため固体圧試験機とガス圧試験機のマスターカーブの差は試験機の本質的な違いによるものと考えられる。固体  
圧試験機とガス圧試験機のマスターカーブの差から固体圧試験機の差応力測定値の較正則を導出した。較正則を固体圧  
試験機によって得られたニッケルの差応力測定値に適用したところ、ガス圧試験機の差応力測定値を定常領域だけで  
なく、弾性領域や降伏領域も± 30 MPa 程度の誤差で再現することができた。炭酸塩岩の力学データにも較正則を適用し  
たところ、誤差は± 70 MPa と大きかった。また、ガス圧試験機と異なり固体圧試験機は封圧を上昇するほど差応力測定値  
が大きくなる傾向がある。封圧が固体圧試験機の差応力測定値に与える効果を調べて、較正則に組み入れる必要がある。

キーワード: レオロジー, 変形実験, 固体圧試験機の較正

Keywords: rheology, deformation experiment, calibration of Griggs-type apparatus



## 23GPaまでのCa-Pv及びMg-Pvのその場応力歪測定に関する予備的実験 Preliminary experiments on in-situ stress-strain measurements of Ca-Pv and Mg-Pv up to 23 GPa

辻野 典秀<sup>1\*</sup>; 山崎 大輔<sup>1</sup>; 芳野 極<sup>1</sup>; 櫻井 萌<sup>2</sup>; 西原 遊<sup>3</sup>; 肥後 祐司<sup>4</sup>

TSUJINO, Noriyoshi<sup>1\*</sup>; YAMAZAKI, Daisuke<sup>1</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>1</sup>; SAKURAI, Moe<sup>2</sup>; NISHIHARA, Yu<sup>3</sup>; HIGO, Yuji<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学・地球物質科学研究センター, <sup>2</sup> 東京工業大学・地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>4</sup> (財) 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>ISEI, Okayama Univ., <sup>2</sup>Tokyo tech., <sup>3</sup>GRC, Ehime Univ., <sup>4</sup>JASRI

In order to discuss mantle dynamics in the Earth's interior, knowledge of viscosity of the Earth's lower mantle, which is the highest of the whole mantle, is important. Viscosity models of the Earth's lower mantle were reported by geophysical observations. However, observation values of viscosity have large variety (2~3 order magnitude). Although determination of viscosity of lower mantle minerals by high pressure experiments is needed to understand mantle dynamics, stress-strain relationship for MgSiO<sub>3</sub>-perovskite (Mg-Pv) and CaSiO<sub>3</sub>-perovskite (Ca-Pv), which are principal minerals of the Earth's lower mantle, are not reported due to difficulty of high pressure deformation experiments. In this study, we tried in-situ stress-strain measurements of Ca-Pv and Mg-Pv up to 23.0 GPa.

In-situ uniaxial deformation experiments were conducted using a deformation DIA apparatus (SPEED-Mk.II) as Kawai-type apparatus at SPring-8 BL04B1. Experimental conditions of Ca-Pv and Mg-Pv are 13.8 GPa, 1473 K and 23.0 GPa, 1273 K, respectively. cBN anvils, which was transparent material against X-ray, was used along X-ray path. Two-dimensional X-ray diffraction patterns were taken for 120-180 s using CCD detector. To calculate the stress magnitude from the X-ray diffraction data, we used a model of stress-lattice strain relationship (Singh et al. 1998),

$$d_{hkl}(\psi) = d_{0hkl} [1 + (1 - 3\cos^2\psi) \sigma / 6 G_{hkl}] \quad (1)$$

where  $d_{hkl}$  is the d-spacing measured as a function of azimuth angle  $\psi$ ,  $d_{0hkl}$  is the d-spacing under the hydrostatic pressure,  $G_{hkl}$  is the appropriate shear modulus for a given hkl, and  $\sigma$  is the uniaxial stress. Pressure and stress were estimated using Ca-Pv (110) (200) and Au (111) diffraction in Pressure marker (Au : Fo = 1 : 2 volume ratio) at deformation experiments of Ca-Pv and Mg-Pv, respectively. An X-ray radiograph of the strain markers was taken using an imaging system composed of a YAG crystal and a CCD camera with an exposure time of 60 s.

Uniaxial stress of Ca-Pv at 13.8 GPa, 1473 K and  $\sim 1.2 \times 10^{-5}$  /s and Mg-Pv at 23.0 GPa, 1273 K and  $\sim 1.5 \times 10^{-5}$  /s were estimated as  $\sim 2$  GPa and  $\sim 0.25$  GPa, respectively. Stress of Mg-Pv was significantly smaller than that of Ca-Pv though temperature condition of Mg-Pv was lower than that of Ca-Pv. This fact is doubtful. This reason is thought that stress estimated by Au was much smaller than that of Mg-Pv because of framework made by Ringeoodite, which was polymorphic phase of Fo in pressure marker.

キーワード: その場観察実験, 変形実験, 応力, 歪, ペロブスカイト, 下部マントル

Keywords: In-situ measurements, deformation experiments, Stress, Strain, Perovskite, The Earth's lower mantle

## マックスウェル粘弾性体の力学方程式の新しい定式化 A new form of the dynamics equation of Maxwellian visco-elastic media

松野 太郎<sup>1\*</sup>  
MATSUNO, Taroh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

岩石からなる地殻・マントルやグリーンランド・南極に存在する氷床は普通の意味で固体であるにもかかわらず、長い時間スケールでは流動することが知られている。そして、マントル対流などに対しては粘性流体とみなして Navier-Stokes 方程式を基に数値シミュレーションが行われている。氷床流動に関しても氷は粘性流体として扱われ、ただ粘性力と流れの関係が非ニュートンのとされている。

一方、両方の性質を考慮しなくてはならない問題として、氷期終了後の地殻上昇の問題では、応力とひずみの関係を表す構成方程式として、Maxwell によって提唱された短い時間では弾性体、長い時間では粘性流体となるような形の式を用いて議論されてきた。しかし、この方程式を用いた議論は、伝統的に時間に関してラプラス変換して半ば解析的に扱われてきた。これを、ちょうど大気や海洋の大循環の数値シミュレーションのように、時間空間差分化して解こうとするとうまくいかない。

そのような背景のもと、マントル対流のシミュレーションで、地表近くの弾性体としてのプレートの効果を取り込むことは大変困難であり、うまくできていない。氷床流動でも、西南極大陸で岩盤を離れて海水の上に張り出した氷棚を粘性流体として扱うのには疑問がある。「正しい」粘弾性体力学を基に両方の性質を持ち、時間空間差分化した数値シミュレーションを可能とする方程式の形をさぐる。

マックスウェルの構成方程式は、ばねとダッシュポットが直列につながれた系の示す力と変位（のび）の関係をモデルとして導かれた。この系で、ダッシュポットの部分は粘性を表すと考えられ模式図にもそのように描かれる。しかし、系の力は一つだから、ばねの伸びだけでできまり、ダッシュポットの部分はばねの伸び縮みの原点の位置の時間的変化を表す式と考えるてもかまわない。その結果、力が等しいという関係式はばねの原点（自然長は不変）がばねの伸び縮みによって引きずられて変化することを表す式と読み替えられる。これを連続体における力と歪の関係に置き換えると、弾性歪を定義する原点の位置（のびずみ）即ち塑性歪の時間変化が弾性歪によって生じることを示す式となる。即ち弾性歪が時とともに塑性歪に転化するという事を意味する。この時定数がマックスウェル緩和時間になる。

こう考えると、日常経験的にも知られている「弾性ひずみが時とともに塑性ひずみに転化する」という事を物理の法則とし、これと弾性体に対する運動方程式とを組み合わせる基礎方程式系とする事が適切と思われる。このことは従来の「正しい」マックスウェル構成方程式と矛盾せず、差分法による数値積分を可能にする。即ち、弾性波の伝搬より十分ゆっくりの現象に対しては（静的）準弾性平衡を保ちつつ、「弾性ひずみ緩和」によって生じるゆっくりした変化を扱うのである。

マントル対流を粘性流体として扱いつつ、地球表面近くのプレートの弾性を取り入れようとする試みが、過去 20 年ほど現れてきたが、著者が調べた範囲では工学のレオロジーで使われた方程式系をそのまま持ってきたもので正しいものではない。

キーワード: マックスウェル粘弾性体, 粘弾性体力学, マントル対流, プレート・マントル結合シミュレーション

Keywords: Maxwellian visco-elastic media, visco-elastic medium dynamics, mantle convection, plate-mantle coupling simulation

斜方輝石-カンラン石間の水の分配に与える Al の効果：リソスフェア-アセノスフェア境界に関する考察  
Effects of Al content on water partitioning between Opx and Ol: Implications for lithosphere-asthenosphere boundary

櫻井 萌<sup>1\*</sup>; 辻野 典秀<sup>2</sup>; 佐久間 博<sup>3</sup>; 河村 雄行<sup>4</sup>; 高橋 栄一<sup>1</sup>  
SAKURAI, Moe<sup>1\*</sup>; TSUJINO, Noriyoshi<sup>2</sup>; SAKUMA, Hiroshi<sup>3</sup>; KAWAMURA, Katsuyuki<sup>4</sup>; TAKAHASHI, Eiichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東工大 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 岡山大学 地球物質科学研究センター, <sup>3</sup> 物質・材料研究機構, <sup>4</sup> 岡山大院 環境科学専攻  
<sup>1</sup>Earth and Planet. Sci., Tokyo Inst. Tech., <sup>2</sup>ISEI, Okayama, <sup>3</sup>NIMS, <sup>4</sup>Environmental Sci., Okayama Univ.

Most minerals in the Earth's upper mantle contain small amounts of hydrogen (i.e. "water"), structurally bound as hydroxyl. Water has an important influence on the behavior of rock system. This small amount of water has an important influence on the behaviours of rock systems. A large viscosity contrast of more than two orders of magnitude was detected at depths of 70 km to 100 km beneath ocean and was defined as the lithosphere-asthenosphere boundary [1]. The origin of the lithosphere-asthenosphere boundary remains an enigma. The water distribution in the Earth is critical to the nature of the boundary. For example, Mierdel et al. (2007)[2] indicated that a high water solubility in aluminous orthopyroxene among mantle geotherm in the Earth's upper mantle would effectively contribute to a stiffening of the lithosphere. Therefore, precise knowledge on the distribution of water among mantle minerals is very important for understanding the Earth's dynamics. The Earth's uppermost mantle is composed mainly of olivine (Ol), orthopyroxene (Opx), clinopyroxene (Cpx), spinel, and garnet. In particular, Ol accounts for a large proportion (60 vol.%) of the Earth's uppermost mantle. In addition, Opx, which contains significantly more water than does Ol in the mantle xenolith, is the second phase of the Earth's uppermost mantle. The FeO content in mantle Ol shows very limited variation in range, whereas the Al content of Opx in the Earth's upper mantle decreases significantly with increasing pressure [3] Therefore, the variation of Al content in mantle minerals can be important for the solubility of water in mantle minerals.

To investigate the partitioning coefficient of water between Opx and Ol ( $D_{(Opx/Ol)}$ ) under low-water concentrations (3 ~ 387 wt. ppm) similar to the Earth's mantle conditions, high-pressure experiments have been conducted at pressures of 1.5-6 GPa and a temperature of 1573 K. The experiments were performed with Kawai-type multi-anvil and piston-cylinder apparatus by using starting materials of natural Ol and synthetic Opx with various Al contents. The water contents were obtained with a vacuum type Fourier transform infrared spectrometer (Jasco: FT-IR6100, IRT5000). Water content of minerals was calculated based on Paterson's calibration [4]. IR-spectra of Ol and Al-bearing Opx in this study are similar to those obtained by high-pressure experiments [5] and natural rocks [6], respectively. It is believed that broad bands in IR spectra of natural Opx are due to effect of crystal distortion by large Al substitution. On the contrary, IR-spectra of Al-free Opx are not consistent with those reported by Rauch and Keppeler (2002) [7] likely because of the large difference of water fugacity.  $D_{(Al-freeOpx/Ol)}$  is ~ 1 at all pressure conditions. However, the water contents of Al-bearing Opx are significantly larger than those of Ol at the same conditions. In addition, the effect of Al concentration in Opx on  $D_{(Opx/Ol)}$  becomes larger with increasing pressure. The high Al content in Opx significantly increases  $D_{(Opx/Ol)}$  and the trend increases with increasing pressure.  $D_{(Opx/Ol)}$  drops sharply at the pressure at which the Al concentration of Opx becomes nearly 0 in the Earth's mantle conditions.

These results imply that viscosity of the upper mantle decreases sharply at depths deeper than those in which orthopyroxene contains no Al. The dramatic change of  $D_{(Opx/Ol)}$  may explain the lithosphere-asthenosphere boundary beneath oceans and continents.

[1] D.L. Anderson, (1989) Blackwell Scientific, Boston [2] K. Mierdel et al. (2007) Science, 315, 364-368 [3] M. Obata, (1976) Am. Mineral., 61, 804-816 [4] M. S. Paterson, (1982) Bull. Mineral., 105, 20-19 [5] Q. Bai and D.L. Kohlsted, (1993) Phys. Chem. Minerals, 19, 460-471 [6] K. Grant et al., (2007) Contrib Mineral Petrol, 154, 15-34 [7] M. Rauch, H. Keppeler, (2002) Contrib. Mineral. Petrol., 143, 525-536

キーワード: 水の分配係数, カンラン石, 斜方輝石, 粘性, FT-IR, リソスフェア-アセノスフェア境界  
Keywords: water partitioning coefficient, olivine, orthopyroxene, viscosity, FT-IR, lithosphereasthenosphere

## Brillouin 散乱分光法に基づく高圧力条件下での非晶質 MgGeO<sub>3</sub> の構造変化の研究 Acoustic velocities of MgGeO<sub>3</sub> gel at high pressure by Brillouin scattering

川代 智史<sup>1\*</sup>; 村上 元彦<sup>1</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>  
KAWADAI, Tomofumi<sup>1\*</sup>; MURAKAMI, Motohiko<sup>1</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Tohoku University

Properties of silicate melts are essential for understanding evolution and dynamic behavior of the Earth and terrestrial planets. In the shallow mantle melting processes the density contrast between melts and crystals is well studied, but studies on the deep melting near the core-mantle boundary are still limited due to technical difficulties. The studies of amorphous material, analogs of melt, at high pressure can provide valuable insights about melts in the deep mantle. The Brillouin scattering method is suitable for velocity measurements of amorphous materials. It has been suggested that the change in coordination in the melt or glass structure reflects to the change in acoustic velocity. Thus we conducted sound velocity measurement using the Brillouin scattering method in diamond anvil cell at high pressure. We report in situ high-pressure acoustic velocity measurements of MgGeO<sub>3</sub> gel, an analogue of the MgSiO<sub>3</sub> melt, revealing the gradual coordination change of Ge from four- to six at least up to 80 GPa. We will conduct experiments at higher pressure in order to confirm the possible Ge coordination change in the gel expected to exist in the terrestrial and extraterrestrial planets.

Keywords: sound velocity measurement, high-pressure experiment, mantle dynamics, silicate melts, super-Earth



## 海洋多重反射波補正した広帯域海底地震計間P波相対走時測定 Measurement of differential P-wave travel time between two BBOBSs with Correction for crustal reverberation

大林 政行<sup>1\*</sup>; 吉光 淳子<sup>1</sup>; 石原 靖<sup>1</sup>; 末次 大輔<sup>1</sup>  
OBAYASHI, Masayuki<sup>1\*</sup>; YOSHIMITSU, Junko<sup>1</sup>; ISHIHARA, Yasushi<sup>1</sup>; SUETSUGU, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> JAMSTEC

マントル3次元地震波速度構造の推定において海洋での観測が全球的に解像するのに欠かせない。しかしながら、海底での地震観測は一般的に周期5秒以下でノイズレベルが高いため、相の立ち上がりを読むことは困難である。そこで、約10秒またはそれ以上の周期帯で波形相関をとり、2観測点間の相対的な走時を測定することが行われている(例えば、Toomey et al. 1998, Tanaka et al., 2009)。

一方、P波マントルトモグラフィーにおいて、P波走時の分散を有限波長理論を用いてインバージョンに取り入れることは、分解能の向上に有効であり(例えば Obayashi et al. 2013 JpGU meeting)、観測点の少ない海洋下では特に大きな効果が期待される。Obayashi et al. (2004)はPP波が反射点下の(海洋を含む)地殻多重反射波の影響で分散が生じることを示した。直達P波でも観測点下の地殻多重反射の影響はあり、特に海洋の多重反射の影響は無視できない。大林ら(2012)は地球深部構造由来の分散を広帯域海底地震計で測定すべく、堆積層を含む海洋多重反射の影響を補正する方法を提案した。それはまず堆積層を含む地殻構造および水深からHaskellのマトリックス法を用いて、観測点下の多重反射の応答を計算し、多重反射応答を互いの観測波形に畳み込み積分し、波形相関により相対走時を測定するというものであった。その際に堆積層の構造が多重反射波の波形に大きな影響を与えるため、堆積層構造の推定が重要であることを報告した。しかしながら、その後の検討の結果、堆積層が1km未満と比較的薄い場合には、走時の測定においては構造の多少の違いはほとんど影響がないことが判明した。

そこで、我々はフレンチポリネシアに展開した広帯域海底地震計に上記測定法を適用した。BBOBSと島の観測点間の波形は補正を施すことでたがいに似るようになり、補正法が有効であることを示している。観測された分散の特徴と分散データを取り入れたトモグラフィーの初期結果を報告する。

キーワード: 地殻多重反射, 広帯域海底地震計, トモグラフィー

Keywords: crustal reverberation, broadband ocean bottom seismometer, tomography

## 立方晶カルシウムペロブスカイトの小さな剛性率 Small shear modulus of cubic CaSiO<sub>3</sub> perovskite

河合 研志<sup>1\*</sup>; 土屋 卓久<sup>2</sup>

KAWAI, Kenji<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大学 GRC

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

Ca-perovskite (CaPv) is considered to be one of the most abundant minerals in the Earth's lower mantle (LM) and was suggested to have distinctly larger shear modulus than MgPv from static calculations and mean-field theory (Karki and Stixrude 1999; Stixrude et al. 2007). In this study the elasticity of cubic CaPv is reinvestigated using density functional constant-temperature first principles molecular dynamics simulations with strict calculation conditions. First, we computed the stable structure of CaPv and found that the cubic phase is more stable than the tetragonal and orthorhombic in the LM P,T condition. The thermal equation of state of CaPv was analyzed using the MD data set, which indicates its thermal properties including Gruneisen parameter quite similar to those of MgPv. Along the adiabatic temperature, CaPv was found to have higher density than the PREM and 12.5% iron-bearing MgPv. Next, we calculated elastic constants of cubic CaPv. Our new results clearly demonstrate that cubic CaPv does not have anomalously large shear modulus suggested by previous calculations with a small computation cell. This is because the cell applied in the previous studies is too small to allow the rotational phonon motion of SiO<sub>6</sub> octahedra related to the zone boundary optic phonon instability. Acoustic wave velocities were finally determined from the elastic moduli, indicating no significant differences in velocities between CaPv and iron-bearing MgPv.

キーワード: Ca ペロブスカイト, 弾性率, 下部マントル, 第一原理計算

Keywords: Ca-perovskite, elasticity, lower mantle, first principles

## Seismic Constraints on an Enstatite Chondrite Earth Seismic Constraints on an Enstatite Chondrite Earth

Houser Christine<sup>1\*</sup>; Greaux Steeve<sup>2</sup>; DU WEI<sup>2</sup>  
HOUSER, Christine<sup>1\*</sup>; GREAUX, Steeve<sup>2</sup>; DU, Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Tech, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

<sup>1</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Tech, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

Recently, Javoy et al., EPSL, 2010 suggested the possibility that Earth had an initial enstatite chondrite composition due to their similar oxygen isotopes. Currently, the calculations of the bulk silicate Earth (BSE) are based on the assumption that the initial Earth began with a composition very close to that of a carbonaceous chondrite. Thus, it is necessary to evaluate whether the 1D seismic properties of the Earth are more consistent with an initial enstatite or chondritic composition. The BSE of an enstatite chondrite Earth (ECE) is different from that of a carbonaceous chondrite since the magnesium/silicon ratio is much lower for the former, resulting in a lower mantle that is almost devoid of Mg. Hence, the primitive lower mantle of an ECE consists mostly of iron-rich perovskite and pure silica. The seismic velocities of these phases are much slower than Mg-perovskite which, by itself, is faster than PREM (the slower MgO phase is necessary to match PREM velocities). However, the present-day lower mantle would be a mix of the primitive upper mantle (ie. pyrolite) and the Mg-depleted lower mantle. The latest mineral physics results are used to calculate possible 1-D seismic profiles of the Earth associated with these two scenarios and to compare with those observed for the Earth today.

## 核マントル境界の熱特性モデリング Thermal property modeling of the core-mantle boundary

土屋 卓久<sup>1\*</sup>; 出倉 春彦<sup>1</sup>  
TSUCHIYA, Taku<sup>1\*</sup>; DEKURA, Haruhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学  
<sup>1</sup> Ehime Univ

Lattice thermal conductivity of minerals under pressure and temperature is a key property to understanding dynamics and evolution of the Earth's interior. We recently established an efficient ab initio technique for calculating the thermal conductivity of silicate minerals with complex structure and chemistry (Dekura, Tsuchiya, Tsuchiya, PRL, 2013). Calculated lattice thermal conductivity of MgSiO<sub>3</sub> perovskite agreed satisfactorily with experimental values at room temperature, and post-perovskite was found to have thermal conductivity quite different from perovskite's, indicating that the D'' discontinuity is not only the phase transition boundary but also the conductivity boundary. Using the obtained results, we determine the effective conductivity of the lower mantle and estimate the energy flow across the core-mantle boundary (CMB). Our results demonstrate that the CMB heat flux could change significantly from place to place by reflecting temperature heterogeneity located atop the core. A large CMB heat flow recently suggested from the outer core side can be reconciled only by considering polycrystalline assemblages yielding high-thermal conductivity.

キーワード: 第一原理計算, 格子熱伝導率, CMB 熱流量  
Keywords: First principles computation, Thermal conductivity, CMB heat flow



## 西太平洋下のD''領域内部の3次元S波速度構造 Waveform inversion for localized 3-D seismic velocity structure in the lowermost mantle beneath the Western Pacific

小西 健介<sup>1</sup>; 河合 研志<sup>2</sup>; ゲラー ロバート<sup>3\*</sup>; 富士 延章<sup>4</sup>  
KONISHI, Kensuke<sup>1</sup>; KAWAI, Kenji<sup>2</sup>; GELLER, Robert J.<sup>3\*</sup>; FUJI, Nobuaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ソウル大学校, <sup>2</sup>東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻,  
<sup>4</sup>パリ地球物理研究所

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>4</sup>Institut de Physique du Globe de Paris

We infer 3-D localized shear velocity structure in the lowermost 400 km of the mantle at the western edge of the Pacific large low shear velocity province (LLSVP) by applying waveform inversion to transverse component body-wave waveforms from the F-net seismic array in Japan. Our dataset consists of relatively long period (12.5-200 s) broad-band seismic waveforms of Tonga-Fiji deep focus and intermediate deep earthquakes. We conduct several tests to confirm the robustness of the inversion results. We find two low velocity zones at the bottom of the target region, with a high velocity zone in the middle, and a low velocity zone above the high velocity zone and contiguous with the two deeper low velocity zones at a depth of 200-300 km above the CMB. This supports the idea that the Pacific LLSVP may be an aggregation of small upwelling plumes rather than a single large thermochemical pile.

キーワード: 波形インバージョン, 西太平洋, マントル対流, 最下部マントル, プルームクラスター  
Keywords: Waveform inversion, Western Pacific, Mantle convection, Lowermost mantle, Plume cluster

## 核条件下での hcp-Fe の音速・密度測定

### Compressional sound velocity and density measurements of hcp-Fe under core conditions

坂巻 竜也<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 福井 宏之<sup>2</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 高橋 豪<sup>1</sup>; 坂入 崇紀<sup>1</sup>; 高畑 明拓<sup>1</sup>; 境 毅<sup>4</sup>; 筒井 智嗣<sup>5</sup>; BARON Alfred<sup>3</sup>

SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; FUKUI, Hiroshi<sup>2</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Suguru<sup>1</sup>; SAKAIRI, Takanori<sup>1</sup>; TAKAHATA, Akihiro<sup>1</sup>; SAKAI, Takeshi<sup>4</sup>; TSUTSUI, Satoshi<sup>5</sup>; BARON, Alfred<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大, <sup>2</sup> 兵庫県立大, <sup>3</sup> 理研, <sup>4</sup> 愛媛大, <sup>5</sup> SPring-8/JASRI

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>University of Hyogo, <sup>3</sup>RIKEN, <sup>4</sup>Ehime University, <sup>5</sup>SPring-8/JASRI

Sound velocity measurements of Fe and Fe-alloy at high temperature and high pressure are necessary to understand the Earth's inner core. Despite seismological observations providing density-sound velocity data of Earth's core, there are few experimental reports about sound velocity of hcp-Fe at ultrahigh pressure and temperature conditions. In order to push forward with research, we have developed a portable laser-heating system for diamond anvil cell, which is called COMPAT (Fukui et al., 2013). We have succeeded in measuring the sound velocity of hcp-iron up to 160 GPa and 3000 K by inelastic X-ray scattering measurements combining with a laser-heated diamond anvil cell. The obtained pressure and temperature dependence of the sound velocity suggest that compressional sound velocity of hcp-Fe at inner core boundary (330 GPa and 5500 K) is higher than that of Earth's inner core. Thus, we can conclude that the light elements or combination of the light elements and nickel in the inner core decreases both density and compressional sound velocity of hcp-Fe simultaneously under the inner core conditions.

#### Reference

Fukui et al., 2013. A compact system for generating extreme pressures and temperatures: An application of laser-heated diamond anvil cell to inelastic X-ray scattering. *Review of Scientific Instruments* 84, 113902; doi: 10.1063/1.4826497.

キーワード: 地球核, 音速, 密度, 高温高圧, X線非弾性散乱, レーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル

Keywords: Earth's core, sound velocity, density, high pressure and high temperature, inelastic X-ray scattering, laser-heated diamond anvil cell

第一原理分子動力学法による鉄・軽元素系液体合金の状態方程式の決定  
The P-V-T equation of state of liquid pure Fe and Fe-light elements alloys by ab initio  
molecular dynamics simulations

市川 浩樹<sup>1\*</sup>; 土屋 卓久<sup>1</sup>; 大角 正直<sup>2</sup>  
ICHIKAWA, Hiroki<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>; OSUMI, Masanao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 及び 東京工業大学地球生命研究所, <sup>2</sup> 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

The equation of state (EoS) of pure Fe and Fe-light elements alloy liquids were calculated by means of ab initio molecular dynamics simulations at the outer core  $P$ - $T$  conditions. In the outer core, many light elements, such as carbon, nitrogen, oxygen, hydrogen, sulfur, and silicon, have been proposed as possible constituents. The concentrations of these elements have been strongly debated for years. In this study, internally consistent thermodynamic and elastic properties of pure Fe and Fe-light elements alloys, in particular density, adiabatic bulk modulus, and P-wave velocity were analyzed in order to clarify the effect of light elements incorporation on seismically observable data. Then the results were compared with the seismological data of the Earth's outer core to confine the plausible compositions of the outer core. The new EoS model of liquid iron alloys as a function of pressure, temperature and fraction of light elements may serve as fundamental data for the composition model of the Earth's core.

## X線吸収法と超音波法を併用した高圧下における Fe-C 融体の密度-弾性波同時測定 Simultaneous measurement of liquid Fe-C density and sound velocity at high pressure

下山 裕太<sup>1\*</sup>; 寺崎 英紀<sup>1</sup>; 田窪 勇作<sup>1</sup>; 浦川 啓<sup>2</sup>; 桑原 莊馬<sup>1</sup>; 片山 芳則<sup>3</sup>  
SHIMOYAMA, Yuta<sup>1\*</sup>; TERASAKI, Hidenori<sup>1</sup>; TAKUBO, Yusaku<sup>1</sup>; URAKAWA, Satoru<sup>2</sup>; KUWABARA, Souma<sup>1</sup>; KATAYAMA, Yoshinori<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学研究科, <sup>2</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科, <sup>3</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Okayama University, <sup>3</sup>Japan Atomic Energy Agency

水星や火星、月といった地球型惑星および衛星の液体核は軽元素を含有した鉄合金融体で構成されていると考えられており、これら天体核の組成を解明する為には高温高圧下における鉄融体の密度や体積弾性率に対する軽元素の影響を定量的に評価することが必要となる。このような密度の情報に加え核中の軽元素を特定するためには、地震波速度データと直接比較できる弾性波速度の情報が不可欠である。本研究では弾性波速度測定の手法を SPring-8 BL22XU の装置に新たに導入し、高圧下における鉄合金融体の弾性波速度-密度の同時測定を行った。

高温高圧実験は BL22XU 設置の 180ton キュービックマルチアンビルプレスを用いた。弾性波測定は超音波法 (Higo et al., 2009)、密度測定は X 線密度吸収法 (Katayama et al., 1993) を用いた。圧力と温度の測定は試料部に封入した MgO と h-BN 混合粉末の X 線回折パターンから格子体積を求め、2つの圧力マーカーより圧力-温度条件を算出した。

今回の測定では Fe-3.5wt% C 組成での測定を行った。圧力・温度条件は 2.9 GPa, 1850 K までの測定を行った。その結果、X 線吸収法により求めた密度の値は 1.2 GPa, 1675 K では 7.01 g/cm<sup>3</sup>, 2.9 GPa, 1700 K では 7.15 g/cm<sup>3</sup> となり圧力とともに密度の上昇が観察された。この結果はこれまで我々が得ている X 線吸収密度法の結果 (Shimoyama et al., 2013) と調和的な結果であった。また超音波法による測定では試料の前面、背面からの反射波をはっきり観察することができ、得られた Fe-C 融体の縦波速度  $V_p$  は、圧力と共に増加する傾向が見られた

キーワード: 密度, 弾性波速度, Fe-C 融体

Keywords: Density, Sound velocity, liquid Fe-C



## レーザー衝撃圧縮による液体状態でのFeSiの音速密度測定 Sound velocity and density measurement of liquid FeSi alloy by laser-shock compression

細木 亮太<sup>1\*</sup>; 横山 直也<sup>1</sup>; 境家 達弘<sup>1</sup>; 近藤 忠<sup>1</sup>; 寺崎 英紀<sup>1</sup>; 重森 啓介<sup>2</sup>; 弘中 陽一郎<sup>2</sup>  
HOSOGI, Ryota<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Naoya<sup>1</sup>; SAKAIYA, Tatsuhiro<sup>1</sup>; KONDO, Tadashi<sup>1</sup>; TERASAKI, Hidenori<sup>1</sup>; SHIGEMORI, Keisuke<sup>2</sup>; HIRONAKA, Yoichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Institute of Laser Engineering, Osaka University

The internal structure of the earth is estimated by observing seismic wave. Comparing seismic wave observations and experimental data of sound velocity of iron(Fe), the composition of the Earth's core is not pure Fe. Several light elements (hydrogen, carbon, oxygen, silicon, sulphur, etc.) have been considered as the candidate of the composition of the Earth's core, but its composition is still unclear. In order to constrain the core composition, it is important to measure the sound velocity of iron alloys because it can be directly compared with the seismic wave. Silicon (Si) has been proposed as a major light element in the inner core [Mao et al., 2012]. So we measured the sound velocity of laser-shocked FeSi alloy in order to investigate the effect of Si for sound velocity of liquid Fe in the outer core condition.

The starting sample was prepared by synthesizing from mixture of Fe (99.98% purity) and Si (99.9% purity) slugs at arc furnace. The compositions of Fe and Si are 66.5 wt.% and 33.5 wt.%, respectively. We measured sound velocities and densities of FeSi at high pressure and high temperature conditions at the large laser facility in Institute of Laser Engineering, Osaka University. The sound velocities were measured by the x-ray radiography [Shigemori et al., 2012].

We obtained the sound velocity and density of FeSi at pressures around 700 GPa. It is seen that Si has the effect of increasing the sound velocity of liquid Fe. Comparing our experimental results and PREM model [Dziewonski and Anderson, 1981], Si may be contained up to 13.1 wt.% at 135 GPa, and up to 5.5 wt.% at 330 GPa in the outer core.

## 水が沈み込むスラブの挙動に与える効果 Effects of hydrous rocks on behaviors of subducting slabs

中尾 篤史<sup>1\*</sup>; 岩森 光<sup>2</sup>; 中久喜 伴益<sup>3</sup>  
NAKAO, Atsushi<sup>1\*</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>2</sup>; NAKAKUKI, Tomoeki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution, JAMSTEC, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

**はじめに** 深部マントルに数十から数百 ppm 含まれるとされる水は、プレートテクトニクスの発生と活性化・沈み込み帯火山・内陸および深発地震・親水元素の大規模輸送などの地球固有のダイナミクスを引き起こすと考えられている。その重要性から、マントル内部の水輸送の数値シミュレーションが行われてきたが、それらのモデルではプレートの速度や形状が人為的に与えられてきた。本研究では、一切の外力を与えないマントル全域に亘る数値モデルにより、地球深部への水輸送、およびそれに伴って水がどのようにスラブの自発的な挙動を変化させるかを同時に調べる。

**手 法** 2次元流体力学シミュレーション (Tagawa *et al.*, 2007, *EPS*) に基づき、固相の運動を解く。含水した岩石の移流は粒子法により解き、脱水・再含水反応は、実験に基づく含水玄武岩および含水かんらん岩の相平衡図 (Iwamori, 2007, *Chem. Geol.*) により評価した。含水した岩石の構成方程式 (*e.g.* Karato and Wu, 1993, *Science*) と状態方程式を導入することで、水輸送と固相のダイナミクスとが相互に作用するようになっている。構成方程式中の  $r$  ( $= 0, 0.7, 1.0, 1.93$ ; 含水化による粘性低下の大きさ) と状態方程式中の  $\beta$  ( $= 0.1, 1.0, 2.0$ ; 含水化による密度低下の大きさ) の2者のみを変化させ、その他の設定は統一して計算を行った。

**結果と議論** 計算結果で、スラブ上面の岩石の反応経路 ( $p$ - $T$ 経路) はいずれも西南日本のものと同一のものとなり (Iwamori, 2007), 200 km 以深で含水かんらん岩の層がスラブ上に形成された (NAMs 中に 2000 ppmH<sub>2</sub>O 程度)。背弧拡大には含水域が軟らかくなる必要があるようである。スラブ沈み込みにより上盤プレート内部に引張応力が生ずるのに伴い、含水した低粘性域に変形が集中するからである。計算結果同士を比較すると、 $r$ が大きくなるにつれ、海洋プレート速度が速くなる。これは、スラブ上面の含水層が粘性抵抗を減らす効果で説明できる。一方、 $\beta$ が大きくなるにつれ、海洋プレート速度は遅くなる。これは、含水岩石がスラブの負の浮力を部分的に相殺する効果で説明できる。沈み込み速度は、マントルウェッジ内のコーナー流れの速さを決める最も重要なパラメータである。コーナー流れが速い場合、スラブ表面にかかる吸い上げの力が大きくなり、沈み込み角度は浅くなる。速いコーナー流れはまた、マントル深部から表面への移流による熱輸送を活性化させ、急速で継続的な背弧の拡大に寄与する。このような解析的な議論によって、 $r$ と $\beta$ を変化させた場合の計算結果の違いを説明できる。東アジアでは、スタグナントスラブと背弧とが広域に分布するが、その両者を実現するためには、大きな $r$ と小さな $\beta$ が必要である。両者の生成には強いコーナー流れが必要だが、 $\beta$ はそれを妨げる力を生むからである。このように、スラブの形状や背弧拡大の寿命などから、マントルウェッジ内に働く含水化に伴う浮力の大きさと粘性低下の大きさを制約できる可能性がある。

キーワード: 水輸送, 自由対流, 沈み込みのダイナミクス, プレート速度, 大マントルウェッジ

Keywords: water transportation, free convection, subduction dynamics, plate velocity, big mantle wedge

## Hi-net で計測される日本列島における splitting intensity の空間的变化について II Regional scale variation of splitting intensity observed in Japanese islands by Hi-net II

小川直人<sup>1\*</sup>; 川勝均<sup>1</sup>; 竹内希<sup>1</sup>; 汐見勝彦<sup>2</sup>

OGAWA, Naoto<sup>1\*</sup>; KAWAKATSU, Hitoshi<sup>1</sup>; TAKEUCHI, Nozomu<sup>1</sup>; SHIOMI, Katsuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

To systematically investigate the spatial variation of seismic anisotropy around the Japanese islands, we measured the splitting intensity (SI) of teleseismic SKS and SKKS phases by Hi-net (Ogawa et al., 2013, SSJ). SI is first introduced by Chevrot (2000) as a method of measuring seismic anisotropy; it is based on cross-correlation of polarized waveforms, and can be modeled like the delay time of seismic tomography considering the effect of finite frequency (e.g., Favier and Chevrot, 2003). In this study, we extend our previous work by measuring SI for a large number of dataset recorded by the dense seismic station network, Hi-net. We use data from tilt-meters of Hi-net from October in 2000 to September in 2013. We have selected the recordings of SKS phases for epicentral distances between 90 and 135 degrees and SKKS beyond 105 degrees, and Mw larger than 6.0, resulting in a total number of events to be 189 that is much larger than the previous case. For the actual analysis, we apply a band-pass filter between 0.05 and 0.125 Hz, and the measurement error of each SI will be carefully estimated using a new formulation, as there appears an error in the Chevrot (2000)'s original treatment. The preliminary analysis indicates regional scale variations of SI patterns that apparently depend on the back azimuth of seismic event, which may be influenced by the subducting slabs.

キーワード: 地震波異方性

Keywords: seismic anisotropy, splitting intensity

660km 不連続面付近におけるパイロライト、MORB、ハルツバージャイトの相関係  
の比較：マルチセル法を用いた精密実験  
Comparison of phase relations in pyrolite, MORB and harzburgite across 660-km discon-  
tinuity

石井 貴之<sup>1\*</sup>; 糞谷 浩<sup>1</sup>; 赤荻 正樹<sup>1</sup>  
ISHII, Takayuki<sup>1\*</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1</sup>; AKAOGI, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大学理学部

<sup>1</sup>Department of chemistry, Gakushuin University

Pyrolite is the model rock which composes the average upper mantle. It is accepted that 660-km seismic discontinuity is formed by post-spinel transition of pyrolite. MORB (mid-ocean ridge basalt) and harzburgite in slabs subduct to 660-km seismic discontinuity due to their higher densities than pyrolitic average mantle. It has been considered that the density cross-over between pyrolite and slab materials occurs due to post-spinel transition in pyrolite at the 660-km discontinuity, and MORB and harzburgite are trapped around the depth (e.g. Ringwood and Irifune, 1988). Therefore, the phase transition pressures of these mantle rocks are the important parameters to elucidate the dynamics around 660-km seismic discontinuity. We investigated detailed phase relations of pyrolite, MORB and harzburgite with multi-sample cell technique.

The starting materials were prepared from the oxide mixtures of pyrolite, MORB and harzburgite composition after McDonough and Sun (1995) (excluding MnO, K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Melson et al. (1976) (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and Michael and Bonatti (1975), respectively. High-pressure and high-temperature experiments by quench method were performed at about 20-28 GPa and 1600-2200C for 2-10 hours using a Kawai-type 6-8 multianvil high-pressure apparatus at Gakushuin University. These samples were packed with pressure calibrants (MgSiO<sub>3</sub> or pyrope) in a Re multi-sample capsule with four holes. Temperature was controlled with a LaCrO<sub>3</sub> heater and measured with a W5%Re-W26%Re thermocouple inserted in a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped MgO pressure medium. Phases of recovered samples were identified with microfocus-Xray diffractometer and SEM-EDS.

In pyrolite at 1600-2200C, the mineral assemblage of MgSiO<sub>3</sub>-rich perovskite (Mpv) + magnesiowustite (Mw) + garnet (Gt) + CaSiO<sub>3</sub>-perovskite (Cpv) is stable at pressure range of 22-24 GPa, and changes to that of Mpv + Mw + Cpv above 24 GPa. The mineral assemblage of ringwoodite (Rw) + Gt + Cpv at 1600C transforms to that of Rw + Mw + Gt + Cpv due to transition of Rw to Gt + Mw at 1800-2000C, and Rw disappears perfectly above 2200C. In MORB, the mineral assemblage of Gt + stishovite (St) + Cpv changes to that of Mpv + St + Al-rich phase + Cpv with continuous post-garnet transition. In harzburgite at 1600C, the mineral assemblage of akimotoite (Ak) + Rw + Gt changes to that of Mpv + Mw by post-spinel transition after the Ak to Mpv transition. Above 1800C, no Ak was observed.

At 1600C, post-spinel transition in pyrolite occurred by about 0.5 GPa and 2 GPa lower pressure than that of harzburgite and post-garnet transition in MORB, respectively. The Clapeyron slope of post-spinel transition in harzburgite is larger than that of pyrolite, and both boundaries intersect at 2000C. From the comparisons of density profiles at 1600C, MORB and harzburgite have lower densities than pyrolite by post-spinel transition in pyrolite.

キーワード: ポストスピネル転移, ポストガーネット転移, 660-km 地震波不連続面, パイロライト, MORB, ハルツバージャイト

Keywords: post-spinel transition, post-garnet transition, 660-km discontinuity, pyrolite, MORB, harzburgite



## ミッシングキセノン問題に対する鉄キセノン系の融解実験 Melting experiments in the system Fe-Xe and Earth's missing xenon

森 祐子<sup>1\*</sup>; 廣瀬 敬<sup>2</sup>; 館野 繁彦<sup>1</sup>; 小澤 春香<sup>3</sup>; 大石 泰生<sup>4</sup>  
MORI, Yuko<sup>1\*</sup>; HIROSE, Kei<sup>2</sup>; TATENNO, Shigehiko<sup>1</sup>; OZAWA, Haruka<sup>3</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学 地球生命研究所, <sup>3</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Dept. of Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>4</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute,

The abundances of noble gases in the Earth's atmosphere should be consistent with those in CI chondrite. However, xenon in the atmosphere is depleted relative to chondritic abundance, while lighter rare gases, Ne, Ar, and Kr, are less depleted. This is the so-called "missing xenon" problem and its reservoir has been discussed for a long time. Since xenon is too heavy to escape toward outer space, the missing xenon (Xe) might be hidden in the deep Earth.

The potential reservoirs are the mantle and core because xenon has a good reactivity under high pressure. Although extensive studies on the reactions of Xe and various mantle materials have been performed, none of those found a Xe reservoir (e.g., Sanloup et al., 2005; 2011; Brock et al., 2011). On the other hand, the alloying of iron with xenon has been expected based on the fact that Xe becomes metallic above 130 GPa (e.g., Eremets et al., 2000). While first-principle calculations suggested that the solubility of xenon in hcp iron is 0.8 mol% at Earth's core conditions (Lee et al., 2006), experimental study showed that the solid Fe-Xe reaction did not occur at least up to 155 GPa and 3000 K (Nishio-Hamane et al., 2010). Here we performed melting experiments in the Fe-Xe system to 86 GPa and 6450 K.

High pressure and temperature (P-T) conditions were generated in a laser-heated diamond-anvil cell. We used pure iron foil as a starting material. Xe was loaded cryogenically. Angle-dispersive X-ray diffraction (XRD) measurements in-situ at high P-T were conducted at BL10XU, SPring-8. The textural and chemical characterizations of recovered samples were made by using a field-emission-type scanning electron-microprobe (FE-SEM) equipped with energy dispersive x-ray spectrometry (EDS). Both cross section and surface of a sample were carefully examined by combining a focused Ga ion beam (FIB) with FE-SEM.

Any evidence for the reaction was not observed at least up to 83 GPa and 3810 K based on both XRD measurements and chemical analyses. On the other hand, chemical analysis on the sample recovered from 86 GPa and 6450 K, the highest P-T condition achieved in this study, showed Fe alloyed with up to ~1.6 wt.% Xe as tiny grains. This sample had a difference in the texture between heated and unheated regions. We calculated the concentration of Xe in the entire molten area by assuming the heated region and the small grains of Fe-Xe alloy as a cylinder and spheres, respectively. The xenon content was estimated to be 0.02 wt. % for the heated area which is high enough to account for the missing xenon problem ( $10^{-10}$  wt.% Xe in the core). The present results could be a clue to solve the "missing xenon" paradox. Since the temperature of the present Earth's core is most likely lower than 6000 K, xenon might be incorporated into the core during Earth's early history at higher temperature.

キーワード: ミッシングキセノン, 高温高圧, 融解実験, コア

Keywords: Missing Xe, melting experiments, High pressure and temperature, core

## 全マントル P 波鉛直異方性トモグラフィー Whole-mantle P-wave radial anisotropy tomography

北川 弘樹<sup>1\*</sup>; 趙 大鵬<sup>1</sup>; 豊国 源知<sup>1</sup>  
KITAGAWA, Hiroki<sup>1\*</sup>; ZHAO, Dapeng<sup>1</sup>; TOYOKUNI, Genti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・予知セ  
<sup>1</sup> RCPEVE, Tohoku Univ.

### 1. はじめに

地震波の異方性を研究する際には、ほとんどの場合において六方対称の異方性（即ち、transverse isotropy）が仮定される。その対称軸は、水平面内（即ち、方位異方性）又は鉛直方向（即ち、radial anisotropy）にとることが多い。

マントル内の地震波の異方性は、かんらん石などの造岩鉱物のもつ結晶方位異方性、及び応力のかかることによるそれらの選択配向（lattice preferred orientation, LPO）によるものと考えられる（e.g., Zhang & Karato, 1995; Tommasi et al., 2000; Kaminski & Ribe, 2001）。地震波の異方性と地球内部物質の状態との関係が分かれば、異方性を観測することで地球内部の構造とダイナミクスを解き明かすことができる（Silver, 1996）。地震波の方位異方性に関する研究は数多く行われている。一方、異方性は鉛直方向のみに存在すると仮定した鉛直異方性に関する研究は、P 波走時データを用いて Wang & Zhao (2013) により東北地方と九州地方で行われた。

本研究では全マントルの鉛直異方性を考慮に入れたグローバルトモグラフィーを実施し、マントルダイナミクスの研究を試みた。

### 2. データ・手法

国際地震センター (ISC) の EHB カタログから山本・趙 (2010) によって選択された 6765 点の観測点で観測された 12,657 個の地震を解析に用いた。約 140 万個の P, pP, PP, PcP と Pdiff 波の走時データをインバージョンに使用した。

解析に用いた手法は、Wang & Zhao (2013) の鉛直異方性トモグラフィーの手法を Zhao et al. (2013) によるグローバルトモグラフィーの手法に組み込んだものである。三次元等方速度構造を表す格子点の間隔は 2 度（約 220 km）であり、三次元異方性構造を表す格子点の間隔は 10 度（約 1100 km）である。

### 3. 結果

鉛直異方性を考慮に入れたトモグラフィーを実施した結果、等方成分のみを考慮したモデルに比べて最終的な root-mean-square (RMS) 走時残差は減少した。上部マントルには環太平洋に低速度異常が、安定大陸の下には著しい高速度異常が見られた。また、南太平洋とアフリカの下には核-マントル境界 (CMB) から地表まで連続した低速度異常が見られるなど等方成分については先行研究で行われた等方トモグラフィーの結果と非常に調和的であった。異方性成分は、太平洋スーパーブルームなどでは鉛直方向の速度が水平方向より卓越している領域が見られ、マントル中の鉛直方向の運動を表していると考えられる。

### 参考文献

Kaminski & Ribe (2001) A kinematic model for recrystallization and texture development in olivine polycrystals. *Earth Planet. Sci. Lett.* 189, 253-267.

Silver (1996) Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 24, 385-432.

Tommasi, Mainprice, Canova & Chastel (2000) Viscoplastic self-consistent and equilibrium-based modeling of olivine lattice preferred orientations: Implications for the upper mantle seismic anisotropy. *J. Geophys. Res.* 105, 7893-7908.

Wang & Zhao (2013) P-wave tomography for 3-D radial and azimuthal anisotropy of Tohoku and Kyushu subduction zones. *Geophys. J. Int.* 193, 1161-1181.

山本芳裕, 趙大鵬 (2010), 全マントル P 波トモグラフィー -Tohoku モデル-, 月刊地球, 32, 312-324.

Zhang & Karato (1995) Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature* 375, 774-777.

Zhao, D., Y. Yamamoto, T. Yanada (2013) Global mantle heterogeneity and its influence on teleseismic regional tomography. *Gondwana Res.* 23, 595-616.

キーワード: トモグラフィー, マントル, 異方性トモグラフィー

Keywords: tomography, mantle, anisotropy tomography

## CO<sub>2</sub>レーザー両側加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いたMgO-MgSiO<sub>3</sub>系の溶融実験 Melting experiments on the MgO-MgSiO<sub>3</sub> system using double CO<sub>2</sub> lasers heated diamond anvil cell

大西 里佳<sup>1\*</sup>; 木村 友亮<sup>1</sup>; 桑山 靖弘<sup>1</sup>  
OHNISHI, Satoka<sup>1\*</sup>; KIMURA, Tomoaki<sup>1</sup>; KUWAYAMA, Yasuhiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター  
<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

Seismological studies suggest the presence of ultralow-velocity zones (ULVZ) near the core mantle boundary (CMB). Partial melting of the lower mantle materials has been proposed to explain these zones, but experimental validation at the appropriate temperature and pressure regimes remains challenging. The melting curve of the lower mantle material is a key to constrain the existence of melt at the base of the mantle. A laser heated diamond anvil cell (LHDAC) provides an enabling tool for determination of melting temperatures of materials under high  $P$ - $T$  conditions. Although YAG, YLF lasers (the wavelengths are about 1  $\mu$ m) have been generally used for LHDAC experiments, the use of metal absorber is required to heat silicate materials. However, the thermal absorber may cause a chemical reaction and a temperature gradient in the sample. The accuracy of temperature determination is suffered from the chemical reaction and the temperature gradient. In contrast, the CO<sub>2</sub> laser with the wavelength of about 10  $\mu$ m can directly heat silicate materials. For the minimization of temperature gradients, double-sided heating system for LHDAC was suggested by Shen *et al.* (1996). This technique using the YAG laser has been widely used to study the behavior of materials under high  $P$ - $T$  conditions. However, the double CO<sub>2</sub> laser heating system has not been used due to the wavelength of this laser is different from that of visible light.

The requirements for the pressure medium in laser heating experiments are low thermal conductivity and chemical inertness. Ar, which is a noble gas, is one of the suitable pressure mediums. However, loading Ar into the DAC is difficult under room temperature and ambient pressure. Therefore, a simplified method to load Ar into the DAC is required. In this study, I established new experimental technique for the minimization of temperature gradients and chemical reactions and performed melting experiments of the lower mantle materials using LHDAC.

First, a double-sided heating system using CO<sub>2</sub> laser was developed by separating optical elements. This system consists of the heating system using two CO<sub>2</sub> lasers which have the high power (100 W), the observation systems and the temperature measurement system. By using lenses designed for the CO<sub>2</sub> laser wavelength, the laser system is separated from observation and temperature measurement system. Two dimensional images and radiation spectrums are observed by Charge Coupled Device (CCD) camera and spectrometer, respectively.

Second, a simplified method to load Ar into the DAC was developed by the cryogenic technique. In this technique, Ar is cooled using liquefied N<sub>2</sub> until it forms a liquid, and the liquefied Ar is loaded into the sample chamber of the DAC. Cu was used to enhance cooling efficiency.

Finally, I performed melting experiments of the lower mantle materials using the double CO<sub>2</sub> lasers heated diamond anvil cell and Ar as the pressure medium. I used forsterite (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) and mixtures of MgO and MgSiO<sub>3</sub> as the starting material. After the complete pressure release, the sample was recovered from the DAC and examined by FE-SEM. From the surface texture of recovered samples, I discussed melting temperatures of the lower mantle materials under high  $P$ - $T$  conditions.

The double CO<sub>2</sub> laser heating and loading Ar methods developed in this study could powerful tool for determination of melting temperatures of the lower mantle materials.

## 2 段式加圧方式 DAC による超高压発生への試み Ultra high pressure generation using the double-stage diamond anvil cell

境 毅<sup>1\*</sup>; 八木 健彦<sup>1</sup>; 大藤 弘明<sup>1</sup>; 入船 徹男<sup>1</sup>; 大石 泰生<sup>3</sup>; 平尾 直久<sup>3</sup>; 鈴木 裕也<sup>4</sup>; 黒田 靖<sup>4</sup>; 浅川 孝之<sup>4</sup>; 金村 崇<sup>4</sup>  
SAKAI, Takeshi<sup>1\*</sup>; YAGI, Takehiko<sup>1</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>1</sup>; IRIFUNE, Tetsuo<sup>1</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>3</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>3</sup>; SUZUKI,  
Yuya<sup>4</sup>; KURODA, Yasushi<sup>4</sup>; ASAKAWA, Takayuki<sup>4</sup>; KANEMURA, Takashi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 地球深部ダイナミクス研究センター、愛媛大学, <sup>2</sup> 地球生命研究所、東京工業大学, <sup>3</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>4</sup> 日立ハイテクノロジーズ

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute, <sup>4</sup>HITACHI High-Technologies

高压物性科学にとって 1 TPa 領域は今も未開拓地である。ダイヤモンドアンビルセル (以下 DAC) による静的圧縮実験としての最高圧力は 400 GPa 程度 (Akahama and Kawamura, 2010) であった。これに対し、Dubrovinsky et al. (2012) が DAC を用いた 2 段式加圧方式により 640 GPa を発生したと報告し、静的圧縮による 1 TPa の発生は目指しうる目標として見えてきた。しかしこの報告では、1 段目に通常のダイヤモンドアンビル、2 段目に炭素から直接変換した半球状のナノ多結晶ダイヤモンドを対向させたものが使用されており、マイクロアンビルの形状制御が困難、アンビルの位置がずれやすい、試料設置が困難等により再現性ある実験を行うことが難しいといった問題点がある。

本研究では、集束イオンビーム (FIB) 加工機によるマイクロアンビルの作成を行った。この利点は、アンビルの形状制御ができる、サブミクロン精度での組み立て可能、試料も同時に作成可能、素材によらず加工が可能といった点で、種々のパラメータを制御しながら再現性良く実験を繰り返すことができる。我々はこの手法により現在最高で 340 GPa までの発生に成功しており、その詳細について報告する。

キーワード: ナノ多結晶ダイヤモンド, マイクロアンビル

Keywords: nano-polycrystalline diamond (NPD), microanvil



## 第一原理分子動力学法による Fe-O 液体の相分離に関する研究 Ab initio molecular dynamics study on a phase separation in liquid Fe-O

大角 正直<sup>1\*</sup>; 土屋 卓久<sup>1</sup>; 市川 浩樹<sup>1</sup>  
OHSUMI, Masanao<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>; ICHIKAWA, Hiroki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター  
<sup>1</sup> Geodynamic Research Center, Ehime University

The Earth's outer core is mainly composed of liquid Fe-Ni alloy. The density of the outer core is, however, ~10% smaller than this alloy. The density deficit indicates that substantial amount of light elements are present in the outer core [Birch, 1964]. Recent seismological observations proposed that seismic wave velocity is ~3% slower than PREM below a few hundred kilometers of the CMB [Helffrich and Kaneshima, 2010]. The low-velocity anomaly is considered to be caused by stratification. However, mechanisms of the stratification have not been clarified yet. One possible cause is phase separation into Fe-rich and light element-rich liquid. Oxygen is one of the most important light elements, because an iron-oxygen phase separation was observed experimentally at low-pressure condition [Tsuno et al., 2007]. This immiscible behavior is, however, still unclear at the outer core pressure.

In this study, we calculated liquid Fe-O alloy at the outer core condition by means of *ab initio* molecular dynamics simulations. First, we analyzed local structures of liquid Fe-O alloy to detect signs of phase separation. Second, we evaluated its excess enthalpy. Both indicate that the liquid was well-mixed. Finally, we computed P-wave velocity in liquid Fe-O alloy. P-wave velocity was found to increase with increasing the oxygen concentration. All these results suggest that the simple enrichment process is less suitable to explain the low-velocity anomaly.

Keywords: ab initio molecular dynamics simulation, phase separation, liquid Fe-O alloy

放射光 X 線その場観察と川井式マルチアンビル装置を用いた 30 GPa までのクロム  
苦土鉱の相関係の解明  
In situ X-ray observations of phase transitions in MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> to 30 GPa using Kawai-type  
multianvil apparatus

國本 健広<sup>1\*</sup>; 入船 徹男<sup>1</sup>; 藤野 清志<sup>1</sup>  
KUNIMOTO, Takehiro<sup>1\*</sup>; IRIFUNE, Tetsuo<sup>1</sup>; FUJINO, Kiyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学

<sup>1</sup>Ehime University

Phase relations in MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (magnesiochromite) have been studied up to 30 GPa and 1600 °C, using a large volume Kawai-type multianvil apparatus and in situ X-ray diffraction measurements system installed at SPring-8/BL04B1. MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel dissociates into Mg<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (orthorhombic type) + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (eskolate) at 9 GPa and 1200 °C, and then reunion to higher pressure phase (CaTi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> type) at 22 GPa and 1200 °C. Moreover, another high-pressure phase was observed above CaTi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> type structure phase, and this phase was unquenchable to ambient condition. In addition, pressure-induced phase transition in MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> was confirmed without decomposition under cold compression process. In this cause, Magnesiochromite is directly transformed to high-pressure phase through the mixture of spinel and high-pressure phase. In this study, CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> type and ε-phase, which reported in earlier studies in MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> were not observed. The Birch-Murnaghan equation of state was used for least-squares fitting of the volume data (assuming K<sub>0</sub>' = 4). Thus, determined zero-pressure bulk modulus (K<sub>0</sub>) of the CaTi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> type MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> was 195 GPa.

In this presentation, we will discuss further details of high-pressure phase relation and physical properties of high-pressure phases in MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> series.

Keywords: Magnesiochromite, in situ X-ray diffraction measurement, Kawai-type multianvil apparatus, phase transition

## 地球核条件下にレーザー衝撃圧縮された Fe-Ni 合金の音速 Sound velocities of laser-shocked Fe-Ni alloys under Earth core conditions

境家 達弘<sup>1\*</sup>; 横山 直也<sup>1</sup>; 細木 亮太<sup>1</sup>; 近藤 忠<sup>1</sup>; 寺崎 英紀<sup>1</sup>; 重森 啓介<sup>2</sup>; 弘中 陽一郎<sup>2</sup>  
SAKAIYA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Naoya<sup>1</sup>; HOSOGI, Ryota<sup>1</sup>; KONDO, Tadashi<sup>1</sup>; TERASAKI, Hidenori<sup>1</sup>; SHIGEMORI, Keisuke<sup>2</sup>; HIRONAKA, Yoichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka University, <sup>2</sup>Institute of Laser Engineering, Osaka University

When we consider the structure of Earth's interior, the sound velocity is one of the important physical properties of the interior materials because it can be directly compared with the seismological data (1) which can yield the physical properties of the Earth's interior. Cosmochemical data and the composition of iron meteorites suggest that Earth's core contains mainly Fe-Ni alloy with 5-25 wt.% Ni. Although Lin et al. (2) and Kantor et al. (3) measured compressional sound velocities of Fe-Ni alloys at room temperature by inelastic x-ray scattering (IXS) at diamond anvil cell (DAC), the sound velocity data of liquid Fe-Ni alloys is very few (4).

We performed laser-shock experiments of liquid Fe-Ni alloys at HIPER system of Gekko-XII laser in Institute of Laser Engineering, Osaka University (5). Sound velocities were measured by side-on radiography (6, 7). We obtained sound velocities of Fe-Ni alloys at pressures up to 770 GPa. The sound velocity of Fe-Ni alloy was about 10% lower than that of liquid Fe at inner core boundary (ICB) pressure.

Part of this work was performed under the joint research project of the Institute of Laser Engineering, Osaka University.

### References

1. A.M. Dziewonski, D.L. Anderson, *Phys. Earth Planet. Inter.* 25, 297 (1981).
2. J.F. Lin et al., *Geophys. Res. Lett.* 30, 2112 (2003).
3. A.P. Kantor et al., *Phys. Earth Planet. Inter.* 164, 83 (2007).
4. P.M. Nasch, M.H. Manghnani, *Geophys. Monograph Ser.* 101, 307 (1998).
5. C. Yamanaka et al., *Nucl. Fusion* 27, 19 (1987).
6. K. Shigemori et al., *Rev. Sci. Instrum.* 83, 10E529 (2012).
7. T. Sakaiya et al., *Earth Planet. Sci. Lett.* in press (2014).

キーワード: 音速, レーザー, 衝撃波, 鉄合金, 地球核, 実験

Keywords: sound velocity, laser, shock wave, iron alloy, Earth's core, experiment

## 広帯域MT法による地殻内流体の3次元分布解明 3D imaging of geofluid by wideband magnetotellurics

小川 康雄<sup>1\*</sup>; 市來 雅啓<sup>2</sup>; 神田 径<sup>1</sup>  
OGAWA, Yasuo<sup>1\*</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>2</sup>; KANDA, Wataru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup> Graduate School of Science, Tohoku University

Magnetotelluric measurements have been conducted over the five years in the central part of NE Japan arc surrounding the Naruko Volcano with approximately 3km grid. Over 200 sites were used for modeling the crustal resistivity structure in detail. Full impedance tensors for 8 periods were used for inversion. To alluviate the computational load, first four short periods were used to image upper crustal features and the resultant model was used for a prior model for another set of inversions with longer 4 periods.

The obtained model show the crustal conductor underneath the Mukaimachi caldera and Sanzugawa caldera. Seismic tomography shows low S-wave velocity for both, however, the resistivity image show clear low resistivity for Mukaimachi Caldera, but not for Sanzugawa Caldera. This difference may be due to the salinity of the fluids underlying the volcanic regions.

キーワード: 地殻流体, マグネトテルリクス, 比抵抗, 3次元構造  
Keywords: geofluid, magnetotellurics, resistivity, 3d



## 東北地方上部マントル沈み込み帯の3次元電気伝導度構造 Three dimensional electrical conductivity model in the subduction zone beneath north-eastern Japan

市來 雅啓<sup>1\*</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 海田 俊輝<sup>1</sup>; 出町 知嗣<sup>1</sup>; 平原 聡<sup>1</sup>; 本蔵 義守<sup>2</sup>; 市原 寛<sup>3</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 小山 崇夫<sup>4</sup>; 松島 政貴<sup>5</sup>; 中山 貴史<sup>1</sup>; 鈴木 秀市<sup>1</sup>; 藤 浩明<sup>6</sup>; 上嶋 誠<sup>4</sup>  
ICHIKI, Masahiro<sup>1\*</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; KAIDA, Toshiki<sup>1</sup>; DEMACHI, Tomotsugu<sup>1</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>1</sup>; HONKURA, Yoshimori<sup>2</sup>; ICHIHARA, Hiroshi<sup>3</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; KOYAMA, Takao<sup>4</sup>; MATSUSHIMA, Masaki<sup>5</sup>; NAKAYAMA, Takashi<sup>1</sup>; SUZUKI, Shu'ichi<sup>1</sup>; TOH, Hiroaki<sup>6</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所, <sup>5</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科, <sup>6</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Grad. School of Sci., Tohoku University, <sup>2</sup>VFRC, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>IFREE, JAMSTEC, <sup>4</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>5</sup>Grad. School of Sci. & Eng., Tokyo Tech, <sup>6</sup>Grad. School of Sci., Kyoto University

Our final goal is to infer a geofluid map (GFM) from both of the seismological (seismic velocity,  $V_p/V_s$ ,  $Q$  etc.) and electrical conductivity structures in the wedge mantle of subduction zone beneath northeastern Japan. While plenty of high-resolution three dimensional (3-D) seismic tomographic images has been revealed there, none of 3-D electrical conductivity distribution model, of which the resolution is comparative to those of seismic tomography, has been proposed in terms of wedge mantle in subduction zones. Here, we show a high-resolution 3-D electrical conductivity distribution model in the wedge mantle beneath northeastern Japan used as input of GFM.

We carried out long-period MT observation using the state-of-the-art equipments, LEMI-417 and NIMS. The total 72 site observation has been completed. To remove tilt changes, baseline steps and drifts of fluxgate magnetometers, we first subtracted magnetic field variations to which a median filter was applied, from raw data. The horizontal coordinate of magnetic field data in each site was rotated before the response calculation such that the declination of the averaged horizontal component should be consistent with the 2010 absolute geomagnetic observation map provided by Geospatial Information Authority of Japan. We used the BIRRP processing code (Chave and Thomson, 2004) to estimate MT responses and have successfully retrieved them up to 61440 seconds in period.

The MT impedance responses were inverted into 3-D electrical conductivity model using WSINV3D (Siripunvaraporn et al, 2005), the data-space Occam inversion method. The all input data error floor was assigned to be 10 percent. We investigated the optimal reference model with trial and errors. The test model was (1) uniform models, (2) layered models and (3) layered models with subducting slab models. The best RMS in each reference model was (1) 2.81, (2) 2.71 and (3) 2.48, respectively. Hence, we adopted the reference model of the layered model with subducting slab.

The conductivity profiles normal to the trench axis in higher latitude than N 39 degrees delineate conductive region on the subducting slab, and the conductive region is raised just beneath the central range of northeastern Japan (Ou-backbone range). This electrical image is well consistent with that obtained by the seismic tomographic model. On the other hand, a profile in lower latitude than N 39 degrees reveals that the conductive region is overturned towards backarc. The top of the overturned conductive body coincides with Gassan Volcano location, one of the outstanding backarc volcanism. However, Chokai Volcano, another distinctive backarc volcanism has no subsurface conductive root originated from deep upper mantle. The overturned mantle convection image is not found in the seismic tomographic image.

## S-wave attenuation on the western side of Nankai subduction zone: implications for geofluid distribution and dynamics

### S-wave attenuation on the western side of Nankai subduction zone: implications for geofluid distribution and dynamics

高橋 努<sup>1\*</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 山本 揚二郎<sup>1</sup>; 仲西 理子<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1\*</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Yojiro<sup>1</sup>; NAKANISHI, Ayako<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

One major cause of seismic wave attenuation is the presence of fluid in rocks. In this study, we estimated the attenuation structure in southwestern Japan and western Nankai trough by applying the attenuation tomography that takes account of apparent amplitude attenuation due to multiple forward scattering [Takahashi, 2012]. Because the estimated attenuation  $1/Q$  in our tomographic study was much larger than  $1/Q$  due to wide-angle scattering, our estimated  $1/Q$  is composed mainly the intrinsic  $1/Q$ .

High  $1/Q$  ( $>1/500$  at 4-8 Hz) was imaged beneath the Quaternary volcanoes. The highest attenuation ( $1/Q \sim 1/250$  at 4-8 Hz) distributes beneath the Beppu-Shimabara rift zone at 40-60km depth. Beneath this rift zone,  $1/Q$  becomes larger as depth increases. Random inhomogeneities in this zone are relatively strong at 0-40 km depth; whereas at 40-60 km depth random inhomogeneities are almost comparable to those in non-volcanic area. Meanwhile, in northeastern Japan, uppermost mantle beneath the volcanoes shows strong inhomogeneities and high attenuation. Apparent attenuation at the uppermost mantle beneath the Quaternary volcanoes is high in both study areas, but relative contributions of scattering and intrinsic attenuation differ between northeastern Japan and the Beppu-Shimabara rift zone. If we consider random inhomogeneities and  $1/Q$  in other areas, the weak random inhomogeneities and high  $1/Q$  beneath this rift zone suggest that random inhomogeneities due to the presence of igneous rocks are not significant, and that any magma inclusions are too small to excite S-wave scattering at 4-32 Hz.

At off Shikoku region, moderate  $1/Q$  ( $1/800 \sim 1/1000$  at 4-8 Hz) is imaged at 0-20 km depth. This moderate  $1/Q$  is estimated as  $1/Q(f) \sim 10^{-2.5} f^{-0.5}$ . Similar moderate attenuation can be found beneath the south of Shikoku at 20-40km, beneath the northern edge of Shikoku at 40-60km depth, and beneath Chugoku area at 40-60km depth. From geometry models of subducting Philippine Sea plate, most of the moderate  $1/Q$  zone is located in and around the oceanic crust of subducting Philippine Sea plate except beneath Chugoku region. In this area, Shelly et al. [2006] pointed out fluid existence in the oceanic crust by estimating  $V_p/V_s$  structure. This correspondence implies this moderate  $1/Q$  reflects fluid in the subducting slab. If we suppose that  $1/Q$  of P- and S-wave have the same frequency dependences and that random inhomogeneities of P- and S-wave has the same scale dependences, we can show possible cases of fluid flow induced by the passage of low frequency seismic waves ( $<1$  Hz) by applying a theoretical model of wave attenuation in saturated porous random media [Muller and Gurevich, 2005]. As a phenomenon suggesting such fluid flow by lower frequency seismic wave, triggering of non-volcanic tremors by surface waves passing has been observed [e.g., Miyazawa and Brodsky, 2008]. Even though we further need P-wave studies for detailed examination of this topic, it is likely that random inhomogeneity, intrinsic at 4-32 Hz and triggered tremors can be used to investigate medium properties and fluid dynamics.

## 秋田県森吉山周辺の地震活動：流体の移動との関連 Seismic activity near the Mori-yoshi-zan volcano in northeastern Japan: Implications for geofluid migration

小菅 正裕<sup>1\*</sup>  
KOSUGA, Masahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学理工学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science and Technology

2011年東北地方太平洋沖地震によって、各地で誘発地震が発生した。その中で、秋田県森吉山周辺での地震活動は、地殻流体との関係において興味深いと考えて研究を行って来た。我々は、震源位置の精度を高めるために、2012年9月から臨時地震観測を行っている。観測点は、最も活発な地震クラスターの直上付近に1点、その7 km程度北西の地点に9点から成るアレイ観測点を設置した。震源決定には、クラスター直上の1点と、アレイのうちの1点を用いた。これら臨時観測点のデータを加え、Double-difference法を用いて震源の再決定を行った。震源は顕著なマイグレーションを示し、そのパターンは複雑である。震源のマイグレーションを間隙流体圧の拡散によると解釈し、圧力源の位置と圧力増加が生じた時間、及び流体の拡散係数を、複数のマイグレーションに対して求めた。その結果、拡散係数として $0.01\sim 1.0$  m<sup>2</sup>/sの値が推定された。この値は、先行研究において水の圧入による誘発地震や自然地震から推定した値と調和的である。観測された地震波では、S波の後に顕著な後続波が見られる。これをS-S散乱波と仮定して、back-projection法で散乱源の位置を推定をした。その結果、散乱源は森吉山の北西約5 km、深さ13 km付近に存在することがわかった。この深さは、森吉山付近の深部低周波地震の震源深さの上限にほぼ対応する。森吉山周辺での地震活動は、東北地方太平洋沖地震から約2か月経過してから開始した。地震波の散乱源を流体の貯留する場所と考え、ここからの流体圧の拡散が東北地方太平洋沖地震直後に始まり、2か月経過して地震発生層の下限に達して地震活動を開始したと考え、拡散係数の値として0.2 m<sup>2</sup>/s程度が推定される。これは上記の推定の範囲内に収まる。このことも、森吉山周辺での地震活動が地殻流体にトリガーされていることを示唆する。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 誘発地震, 震源マイグレーション, 散乱, 地殻流体

Keywords: The 2011 Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, triggered seismicity, hypocenter migration, scattering, geofluid

## 地殻の電気伝導度は H<sub>2</sub>O-NaCl 流体で説明できるか？ Is H<sub>2</sub>O-NaCl fluid enough to explain high electrical conductivity in the earth's crust?

佐久間 博<sup>1\*</sup>; 市來 雅啓<sup>2</sup>  
SAKUMA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 物質・材料研究機構, <sup>2</sup> 東北大学  
<sup>1</sup>National Institute for Materials Science, <sup>2</sup>Tohoku University

古い大陸地殻では深さ 20 から 30 km に高電気伝導層が観測されている [1]。水流体 (aqueous fluid) の存在が、この高電気伝導層を説明するのではという仮説があり [2]、その仮説を検証するためには、高温高压条件における水流体の電気伝導度を知らなければいけない。地殻内の水流体は液体から超臨界状態に相当し、これらの状態での電気伝導度を知る必要がある。

実験的には電気伝導度の測定結果は、NaCl 水溶液の場合、圧力 ( $P$ ) < 400 MPa, 温度 ( $T$ ) < 1073 K, 塩濃度 ( $c$ ) < 0.6 wt% の低温低圧低塩濃度に限られている [3]。我々は古典分子動力学 (MD) 法を用いて、超臨界状態にある H<sub>2</sub>O-NaCl 流体の電気伝導度を計算した。

超臨界状態の水を取り扱うため、我々が開発した H<sub>2</sub>O 分子モデル (FIPC) [4] を使用した。計算の詳細は文献 [4] と同様である。本計算では塩濃度が 10 wt% 以下の H<sub>2</sub>O-NaCl 流体について計算した。

電気伝導度の等温線を見ると、圧力の増加とともに電気伝導度も増加し、高压で飽和することが分かった。また温度の増加とともに電導度が減少することも分かった。これらの挙動は、温度圧力変化に伴う密度、イオンの動きやすさ、水の誘電率の変化で説明できる。

地殻のある圧力温度分布のモデルに沿って、電気伝導度の変化を計算すると、電磁気観測で見られる電気伝導度の変化のうち、H<sub>2</sub>O-NaCl 流体で電気伝導度の一桁の変化を説明できることがわかった。しかし観測で見られる 2 桁程度の電気伝導度の変化を説明するためには、流体の連結度や CO<sub>2</sub> の影響等を考量する必要があるようである。

### References

- [1] T. J. Shankland and M. E. Ander (1983) *J. Geophys. Res.* **88** 9475-9484.
- [2] B. E. Nesbitt (1993) *J. Geophys. Res.* **98** 4301-4310.
- [3] A. S. Quist, and W. L. Marshall, (1968) *J. Phys. Chem.* **72** 684-703.
- [4] H. Sakuma, M. Ichiki, K. Kawamura and K. Fuji-ta (2013) *J. Chem. Phys.* **138** 134506.

キーワード: 塩水, 電気比抵抗, 超臨界流体, 分子動力学計算, 誘電率

Keywords: salt water, electrical resistivity, supercritical fluid, molecular dynamics, static dielectric constant



## 花崗岩中の空隙の連結度 Connectivity of cracks and pores in a granitic rock

渡辺 了<sup>1\*</sup>; 樋口 明良<sup>1</sup>; 米田 明<sup>2</sup>

WATANABE, Tohru<sup>1\*</sup>; HIGUCHI, Akiyoshi<sup>1</sup>; YONEDA, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部, <sup>2</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター

<sup>1</sup>Graduate school of science and engineering, University of Toyama, <sup>2</sup>Institute for Study of Earth's Interior, Okayama University

Seismic velocity and electrical conductivity are used to map the fluid distribution in the crust. Seismic velocity reflects the contiguity of solid phases, while electrical conductivity the connectivity of fluid phases. The combination of velocity and conductivity could provide us a strong constraint on the fluid distribution. However, mapping of the fluid distribution has not been successful. The connectivity of fluid phases in rocks is poorly understood. In order to understand the connectivity of fluid phases in rocks, we have made conductivity measurements on a fluid-bearing granitic rock under various confining pressures.

Fine grained (100-500 $\mu$ m) biotite granite (Aji, Kagawa pref., Japan) was used as a rock sample. The sample is composed of 52.8% plagioclase, 36.0% Quartz, 3.0% K-feldspar, 8.2% biotite. The density is 2.66(1) g/cm<sup>3</sup>, and the porosity 0.8(1) %. The porosity was estimated from the mass of the dry and wet samples. Cylindrical samples have dimensions of 25 mm in diameter and 30 mm in length, and saturated with 0.01 mol/l KCl aqueous solution. Simultaneous measurements of elastic wave velocity and electrical conductivity were made using a 200 MPa hydrostatic pressure vessel. The pore-fluid is electrically insulated from the metal work by using plastic devices (Watanabe and Higuchi, 2013). The confining pressure was progressively increased up to 125 MPa, while the pore-fluid pressure was kept at 0.1 MPa. It took five days or longer for the electrical conductivity to become stationary after increasing the confining pressure.

Elastic wave velocities and electrical conductivity showed reproducibly contrasting changes for a small increase in the confining pressure. Elastic wave velocities increased only by 5% as the confining pressure increased from 0.1 MPa to 25 MPa, while electrical conductivity decreased by an order of magnitude. The increase in velocities is caused by the closure of cracks. Most (~80%) of the decrease in electrical conductivity occurred below the confining pressure of 5 MPa. The decrease in electrical conductivity must also be caused by the closure of cracks. The decrease in porosity was only 0.07(1) %. Such a small change in porosity caused a large change in electrical conductivity. The connectivity of fluid was maintained at least up to the confining pressure of 125 MPa. A calculation with the effective medium theory (Kirkpatrick, 1973) suggests that the fluid forms a network with small coordination number (average coordination number=2.3), and that the connectivity at higher pressures is maintained by stiff pores. More cracks are open at lower pressures to link pores, drastically increasing electrical conductivity.

キーワード: 空隙, クラック, 連結度, 花崗岩, 電気伝導度

Keywords: pore, crack, connectivity, granitic rock, electrical conductivity

## マントル捕獲岩中の粒間流体形状：岩石物性に対する効果 Geometry of intergranular fluids in the mantle xenoliths: Implications for the physical properties of upper mantle

中村 美千彦<sup>1\*</sup>; 奥村 聡<sup>1</sup>; 吉田 武義<sup>1</sup>; 佐々木 理<sup>2</sup>; 高橋 栄一<sup>3</sup>

NAKAMURA, Michihiko<sup>1\*</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>1</sup>; YOSHIDA, Takeyoshi<sup>1</sup>; SASAKI, Osamu<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Eiichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学総合学術博物館, <sup>3</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Tohoku University Museum, <sup>3</sup>Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Recent magnetotelluric (MT) studies have revealed that crust and uppermost mantle are less resistive than dry rocks in various localities in the world. This suggests that interconnected fluid phases present more ubiquitously than previously realized. Intergranular fluids also decrease seismic wave velocities and changes  $V_p/V_s$  ratio, thus interpretation of the seismic tomographic images largely depends on the volume fraction and geometry of the fluid phase. The conventional view on grain-scale fluid distribution is based on dihedral angle between minerals and fluids in isotropic monomineralic rocks (i.e. ideal equilibrium geometry). Natural rocks are, however, composed of anisotropic multiple phases and undergo textural adjustment to minimize interfacial and strain energy such as grain growth and dynamic recrystallization, which results in microstructural complexity. In order to understand real fluid distribution in deep-seated rocks, we conducted an X-ray CT study of xenoliths from the uppermost mantle from various localities.

The mantle xenoliths samples investigated were from Ichinomegata (NE Japan), Eifel (W Germany), San Carlos (AZ, USA), Bullen Merri and Shadwell (Victoria, AU), Kilbourne Hole (New Mexico, USA), Longang-hu (NE China), Gi-rona (Spain), Lanzarote (Canary islands), and Moses Rocks (Utah, USA). The micro-focus X-ray CT imaging was performed using Comscantecno ScanXmate-D160TSS105 in Tohoku University Museum with a tube voltage of 100 – 130 kV and current of 90 – 120 mA. The voxel size was typically 43 – 73  $\mu\text{m}^3$ . The 3-D image analysis was carried out with a software package Slice[1].

All the observed spinel lherzolite and Harzburgite xenoliths contained up to a few vol% of intergranular pores, indicating that the rocks were saturated with a free-fluid phase. The imaged pore fluids are typically polyhedral and tens – hundreds of micrometers in scale; this suggests that they were formed via coalescence of smaller pore fluids. The fluids are localized in interphase boundaries (between different mineral phases), while most of the monomineralic triple junctions lack pore fluids. All these characteristics are consistent with the results of grain-growth experiments in a fluid-bearing bimineralic system[2]; in other words, the role of interfacial energy anisotropy and grain growth are crucial in determining fluid distribution in nature. In the ellipsoid approximation, the 3-D shape of the intergranular fluids show deformed rugby-ball shape with aspect ratios larger than those of the equilibrium fluid geometry determined by the dihedral angle[3]. The geometry, distribution and thus connectivity of fluids cannot be assessed simply from dihedral angles.

The results of CT imaging suggest that no pervasive grain-scale fluid interconnection is established in the uppermost mantle. To explain the observed low electrical resistivity in the mantle which does not undergo partial melting, concentration (localization) and interconnection of CHO fluids in a larger spacing, such as in meter-scale shear zones should be necessary. Given the observed geometry of the inter-granular fluids, their effects on  $V_p/V_s$  ratio is limited.

References: [1] Nakano et al. <http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/> (2006). [2] T. Ohuchi and M. Nakamura J. Geophys. Res. 111, B01201, doi: 10.1029/2004JB003340 (2005). [3] Y. Takei JGR 107 (B2) doi:10.1029/2001JB000522 (2002).

キーワード: マントル捕獲岩, 岩石微細構造, 弾性波速度, 電気比抵抗, 粒成長

Keywords: mantle xenoliths, rock microstructure, elastic wave velocity, electrical resistivity, grain growth

## マントル起源かんらん岩捕獲岩中の鉍物境界に発達する微細組織観察 Ultra-fine textures along grain boundaries in nominally fresh mantle xenoliths

村田 雅美<sup>1\*</sup>; 植松 勝之<sup>2</sup>; 山本 貴史<sup>3</sup>; 谷 健一郎<sup>4</sup>; 宿野 浩司<sup>5</sup>; 水上 知行<sup>1</sup>; 森下 知晃<sup>1</sup>  
MURATA, Masami<sup>1\*</sup>; UEMATSU, Katsuyuki<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Takafumi<sup>3</sup>; TANI, Kenichiro<sup>4</sup>; SHUKUNO, Hiroshi<sup>5</sup>;  
MIZUKAMI, Tomoyuki<sup>1</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院, <sup>2</sup> マリン・ワーク・ジャパン, <sup>3</sup> 広島大学大学院, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 無所属  
<sup>1</sup> Kanazawa Univ., <sup>2</sup> Marine Works Japan LTD., <sup>3</sup> Hiroshima Univ., <sup>4</sup> JAMSTEC, <sup>5</sup> non party

マントル物質中の結晶と結晶の境界(相境界)に、メルトや水に富む流体がどのように、どれだけ存在しているかは、メルトの発生や移動、マントルの物性・化学組成変動に直接的な影響を与えるため重要な情報である。実際に実験岩石学的、理論的アプローチは多い(例えば Drury, *geophysical research letters*, 1996, Hiraga et al., *nature article*, 2004)が、天然物質の観察例はほとんどない。

我々の研究グループでは、これまで知られていなかったマントル起源かんらん岩の結晶表面(相境界)のナノスケール微細組織に着目し、この組織が、固相-流体反応で相境界に形成された物質であると仮説をたて検証している。天然マントル物質を観察するためには、マントル起源の新鮮なかんらん岩と鉍物相境界を壊さないで観察する方法が必要である。かんらん岩捕獲岩は新鮮であるが、上昇時の体積増加のため鉍物相境界がはがれ、地表付近での低温低圧条件下で変質し、鉍物相境界の観察としては不十分である。そこで、新たな結晶表面観察・分析方法を確立し、天然かんらん岩試料に適用することが必要となっている。

本発表では、世界的に最も著名なかんらん岩捕獲岩の産地である米国アリゾナ州サンカルロスのかんらん岩捕獲岩での観察結果について予察的結果を報告する。先行研究では、このサンカルロスのかんらん岩捕獲岩結晶相境界にアモルファス相が報告されている(Wirth, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1996)。

鉍物境界を観察するには、一般的に TEM を用いた観察が主流であるが、できるだけ容易に多く観察したい。近年、電気を利用した鉍物分離装置(selFlag)が開発され、鉍物相境界を壊すことなく岩石を鉍物単位にばらばらにすることができるようになった。そこで、海洋開発研究機構の selFlag を用いて鉍物境界にそってばらばらにし、高空間分解能電子顕微鏡(FE-SEM)で観察した。

このかんらん岩捕獲岩の結晶表面の微細組織には多様性があり、以下のように分類した。(1)  $\mu\text{m}$  スケールで確認される組織(虫食い状組織や網目状の組織、自形のような物質、エッチピット)、(2)  $<\mu\text{m}$  スケールの高空間分解能で観察される組織。(1)の  $\mu\text{m}$  スケールで確認される組織の上には、シート状の物質があり、その上に別の結晶が形成している場合もある。また、(1)の  $>\mu\text{m}$  スケールで観察される組織であっても、(2)の  $<\mu\text{m}$  スケール組織の集合体であるものも存在する。

現在、かんらん石結晶表面の EDS 分析による化学組成の定性分析によって、表面を構成している物質の同定を行っている。かんらん石の(2)  $<\mu\text{m}$  スケール組織は、 $<\mu\text{m}$  スケール組織が確認されない部分と比較すると Mg よりも Si が多く、Al が含まれている。このことは、エッチピットの内部と外部でも同様で、内部と比較し外部は Mg よりも Si が多く、Al が含まれている。また、シート状の物質や、自形のような形状の物質には Ca と S が含まれ、さらに Na と Cl からなる結晶もあった。また、今後透過型電子顕微鏡により結晶表面形態を観察する予定である。これらの結果から、相の同定や、形成条件、形成プロセスを報告する。

キーワード: かんらん岩捕獲岩, 微細組織, 透過型電子顕微鏡, 結晶相境界, 流体  
Keywords: peridotite xenolith, Microstructures, TEM, grain boundary, fluids

## 下部一中部地殻条件下における元素輸送：三波川帯，塩基性片岩の吸水反応の例 Elemental transport under lower-middle crustal condition: example from hydration of basic schist, Sanbagawa belt, Japan

宇野 正起<sup>1\*</sup> ; 中村 仁美<sup>2</sup> ; 岩森 光<sup>3</sup>

UNO, Masaaki<sup>1\*</sup> ; NAKAMURA, Hitomi<sup>2</sup> ; IWAMORI, Hikaru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Geochemical Evolution Research Program, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

To constrain the behavior of geofluids under the lower to middle crustal conditions, hydration reactions and trace element and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of basic schists in the Cretaceous Sanbagawa metamorphic belt, a typical regional metamorphic belt in the circum-Pacific orogeny, have been investigated based on the observations of thin-sections and outcrops. The basic schists have undergone significant hydration from 0.8 GPa, 550 °C to 0.3 GPa, 400 °C during decompression towards the surface at the final stage of metamorphism. High-field-strength and rare-earth element compositions of the basic schists, as well as the Sr-Nd-Pb isotopic ratios, are different among three mineral zones with different peak P-T metamorphic conditions; the basic schists in the low-grade chlorite zone shows N-MORB-like compositions whereas those in the higher-grades, garnet and oligoclase-biotite zones, show more enriched compositions (E-MORB-like). On the other hand, there is a common feature to all the metamorphic zones; the enrichment degree of some group of elements (e.g., large-ion lithophile elements) relative to high-field-strength and heavy-rare-earth elements is proportional to loss on ignition that approximately measures the bulk rock H<sub>2</sub>O content. This correlation suggests that Li, B, K, Cr, Ni, Rb, Sr, Cs and Ba have been added to the basic schists during hydration. The addition of these elements amounts to as much as 60-80% of the bulk abundance, indicating that significant amounts of elements were transported via pervasive fluid flow, which overprinted the variation in the bulk rock compositions of the protolith. The estimated compositions of hydration fluid show high concentrations in large-ion lithophile elements, lead and light-rare-earth elements (10-100 times denser than primitive mantle, Fig. 1) and are similar to those of the slab-derived fluids<sup>[1]</sup> that induce arc volcanism. These elements (Cs, Rb, Ba, K, La, Ce and Pb) are thought to have been preferentially partitioned into the fluid when it was generated at depth. Such high concentrations indicate a high temperature origin of the hydration fluid, and are consistent with a model of hot slab subduction during exhumation of the Sanbagawa belt.

### References:

[1] Nakamura, H., Iwamori, H., and Kimura, J.-I., 2008 *Nat. Geosci.*, **1**, 380-384

キーワード: 地殻流体, 変成作用, 微量元素, Sr-Nd-Pb 同位体, 吸水反応, 三波川変成帯

Keywords: geofluid, metamorphism, trace elements, Sr-Nd-Pb isotopes, hydration reaction, Sanbagawa metamorphic belt

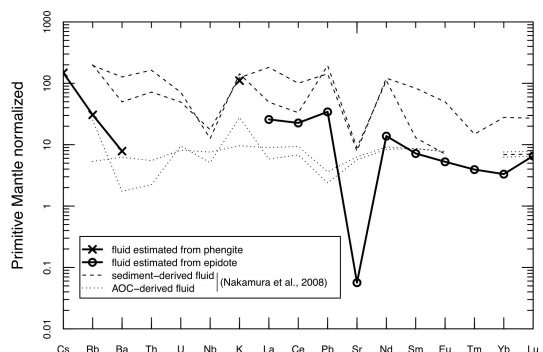


Fig. 1 Estimated compositions of the hydration fluid (solid lines). Compositions of slab-derived fluids estimated for arc volcanism (dotted lines; Nakamura *et al.*, 2008 *Nat. Geosci.*, **1**, 380-384) are shown for comparison. Note that the concentrations of LILE, Pb and LREE in the hydration fluid are in the range of slab-derived fluids.



## マントルウェッジにおける蛇紋岩化作用の進行：酸化還元状態への影響 Progress of serpentinization in the mantle wedge and its effect on the redox state

小木曾 哲<sup>1\*</sup>; 三好 茜<sup>2</sup>

KOGISO, Tetsu<sup>1\*</sup>; MIYOSHI, Akane<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学人間・環境学研究科, <sup>2</sup>JX 日鉱日石エネルギー

<sup>1</sup>Human Environ. Stds., Kyoto Univ., <sup>2</sup>JX Nippon Oil & Energy Corporation

Serpentinization of peridotite in the mantle is a key process that significantly changes the physical properties of the mantle. Serpentinization also produces hydrogen, which is essential not only for the activity of microbial systems in hydrothermal fields on the seafloor, but also for controlling the oxidation state of the mantle in subduction zones. Hydrogen is generated along with the formation of magnetite during serpentinization. However, there still remains controversy about what factors promote the mineralogical reactions responsible for magnetite formation during serpentinization in natural ultramafic rocks. Recent petrologic studies have proposed that serpentinization reactions proceed via a two-stage process involving the early formation of serpentine and brucite and subsequent magnetite formation. Many studies proposed that magnetite forms by the break down of ferrous brucite promoted by the addition of aqueous silica, but others proposed that magnetite forms by the breakdown of ferrous serpentine which releases silica component. To solve this controversy, we examined a number of variably serpentinized harzburgite and dunite samples taken from the Iwanaidake ultramafic body in Kamuikotan belt, Japan (Miyoshi et al. 2014). Petrographic observations of these samples revealed that successive changes in textures, mineral chemistry, whole-rock H<sub>2</sub>O contents, and magnetic susceptibility with the progress of serpentinization of harzburgite involved two stages: replacement of olivine by serpentine and brucite, and subsequent formation of magnetite along with more-magnesian serpentine and brucite. The later reactions occurred concurrently with serpentinization of orthopyroxene, which supplied the silica component. In serpentinized dunite, which doesn't contain orthopyroxene, serpentinization involved replacement of olivine by serpentine and brucite, and the fraction of magnetite did not increase with the progress of serpentinization. These observations, and the fact that the Iwanaidake ultramafic body originated from the forearc mantle of the Northeast Japan arc, suggest that the silica supply from serpentinization of orthopyroxene is an essential factor for the formation of magnetite during serpentinization in mantle wedge.

Our observations imply that serpentinization in the mantle wedge of subduction zone produces H<sub>2</sub> along with magnetite if sufficient amounts of silica component are supplied from subducting slab, which will probably occur because dehydration in subducted sediments can supply silica-rich fluids. Since H<sub>2</sub> is expected to exist as immiscible hydrogen-rich gas phases that coexist with H<sub>2</sub>O fluids in normal subduction zone conditions, it will be rapidly migrate upwards owing to its very low density. Then the remaining serpentinites will become oxidized. Such oxidation associated with serpentinization would occur in the shallow part of the wedge corner where temperatures are lower than ~600 °C, but the oxidized (magnetite-bearing) serpentinite will be dragged downwards in the mantle wedge. Thus serpentinization reactions can be one of the main processes to increase the oxygen fugacity of the mantle wedge. On the other hand, the H<sub>2</sub> gas removed from the wedge corner will produce highly reduced fluid phases, which may result in reducing the shallowest part of the forearc mantle and the lower part of the forearc crust. This could be the cause of rare presence of metal phases in subarc peridotite.

Reference:

A. Miyoshi, T. Kogiso, N. Ishikawa, K. Mibe (2014) *American Mineralogist*, in press.

キーワード: 蛇紋岩化作用, 水素, 磁鉄鉱, 沈み込み帯, 酸化還元状態

Keywords: serpentinization, hydrogen, magnetite, subduction zone, redox state

## 石英脈形成に伴うき裂間隙構造の発達 Evolution of porosity structures in a fracture during quartz vein formation

山田 稜<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 最首 花恵<sup>1</sup>; 中村 美千彦<sup>2</sup>; 奥村 聡<sup>2</sup>; 佐々木 理<sup>3</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
YAMADA, Ryo<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; SAISHU, Hanae<sup>1</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>2</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>2</sup>; SASAKI, Osamu<sup>3</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院 環境科学研究科, <sup>2</sup> 東北大学大学院 理学研究科, <sup>3</sup> 東北大学博物館  
<sup>1</sup>Tohoku university, <sup>2</sup>Tohoku university, <sup>3</sup>The Tohoku university museum

Ubiquitous occurrences of quartz veins suggest that dissolution/precipitation of silica provides significant effects on the hydrological and mechanical properties within the crust. For example, a model has been proposed that fracture sealing processes control the change of pore fluid pressure and thus earthquake cycle. Previous studies on natural quartz veins have focused on estimates of P-T conditions, stress and strain fields and fluid compositions; however, details of dynamics of fluid flow and how fractures are sealed during vein formation are still unclear. In this study, we synthesized quartz veins by the hydrothermal experiments, and observed the aperture structures by using X-ray CT to clarify how aperture structures evolve during vein formation.

We conducted the hydrothermal flow-through experiments for quartz precipitation from Si-supersaturated solutions under controlled high temperature and high pressure condition. The experimental apparatus consists of two vessels for preparation of the Si-supersaturated solution and for precipitation, respectively. The precipitation vessel has double-structure: the main flow path was the inner alumina tube (diameter=4mm), and the outer SUS tube was filled with static solutions. The advantage of this system is that we can take out the non-destructive sample for the X-ray CT analyses. We conducted two types experiments: first one is precipitation in porous media with alumina balls, the second one is rock slice as analog of a fracture.

In the alumina-ball experiments, we carried out the precipitation experiment at supercritical (430C, 30MPa) and vapor condition (370C, 20MPa). In both experiments, the significant silica precipitation within few days, but showed contrasting porosity structures. Under supercritical condition, amorphous silica was predominantly formed with covering the surfaces of the alumina balls and alumina tube, and discrete quartz crystal (50  $\mu\text{m}$ ) within the amorphous silica layers. The porosity ( $\phi$ ) gradually decreases with minimal porosity ( $\phi = 0.4$ ) at  $\sim 38\text{mm}$  from the inlet. In contrast, under vapor condition, fine-grained quartz grains (0.1-1  $\mu\text{m}$ ) were directly nucleated in solutions using surface of vapor, and immediately settled on the bottom. The porosity rapidly decreases from 18 mm ( $\phi = 0.8$ ) to 25 mm ( $\phi < 0.1$ ) from the inlet. These results suggest that a depressurization of crustal fluids related to fault dilation by earthquakes would cause a formation of fine-grained silica particles, and their mineralogy and transport/deposition properties strongly depend on properties water.

In the experiment with rock slits, we evaluated the effect of rock substrate (amount and distribution quartz in the fracture wall). The P-T conditions and solution chemistry are similar to the previous experiments, but we used granite core with a slit ( $\sim 300 \mu\text{m}$ ). The mineralogy and aperture structures changes systematically along the fluid flow path. From the inlet to 35 mm of fracture, nucleation of quartz and other silica polymorphs predominantly occurred, regardless of vein wall minerals. From  $>35\text{mm}$  low Si concentration, silica precipitates occurred as epitaxial overgrowth from quartz crystal. The wavelength of aperture structures is controlled by distribution and grain size of quartz of the host granite. Accordingly, fractures are not sealed homogeneously, but complex flow pathways are evolved during vein formation. Such a variation in the precipitation mechanism and porosity structures during quartz vein formation may affect the evolutions of permeability and strength of rock fractures in the Earth's crust.

Keywords: Hydrothermal experiments, Quartz, Vein, Fracture, Porosity

## LAL-ICPMS法を用いた局所高精度Pb同位体分析による熱水性方鉛鉱の起源推定 High precision in situ Pb isotope analysis of galena by LAL-ICPMS technique

若木 重行<sup>1\*</sup>; 谷水 雅治<sup>1</sup>  
WAKAKI, Shigeyuki<sup>1\*</sup>; TANIMIZU, Masaharu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 高知コア研究所

<sup>1</sup> Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC

Radiogenic Nd and Pb isotopic compositions of the fluids originated from subducting Pacific and Philippine Sea plates have been characterized from isotopic trends observed among arctic volcanic rocks (Nakamura et al., 2008). Origin and evolution of the fluids that produced hydrothermal ore deposits may now be investigated by radiogenic isotopic compositions of ore deposits. In this study, we analyzed the micro scale isotopic variation of Pb in a hydrothermal galena to shed light on the macro scale dynamics of the fluids. To investigate the possibly small degree of isotopic changes within a galena sample, both high spatial resolution and high precision are required for the isotopic analysis. We employed the combination of laser ablation in liquid (LAL) micro sampling technique (Okabayashi and Hirata, 2011) and solution-based Pb isotopic analysis by MC-ICPMS technique to meet the analytical requirements. In the LAL micro sampling, laser-ablated sample particles are trapped in the liquid that placed above the sampling area. The trapped samples are then dissolved and introduced to the ICPMS as a solution. The advantage of the combined LAL-ICPMS technique over laser ablation (LA) ICPMS technique is the stable ion signals due to solution form, which allows high-precision isotope ratio measurement.

Sample analyzed in this study was a hydrothermal galena from Hosokura mine (Miyagi, Japan). A microscopic texture of the sample was observed in detail with FE-SEM-EDS system (JEOL JSM-6500F) prior to the isotopic analysis. A fs laser (IFRIT, Cyber Laser, Japan) with a wavelength of 780 nm (~200 fs pulse width) was used for the LAL micro sampling. Care was taken to avoid sampling of grain boundaries and inclusions. Typical spatial resolution was 150 micron in diameter and 30 micron in depth. The laser-sampled PbS (300-400ng Pb) trapped in Milli-Q water was dissolved in conc. HNO<sub>3</sub>, and adjusted to 200 ng/mL Pb solution in 0.15 M HNO<sub>3</sub> for Pb isotopic analysis. Pb isotope ratios were determined with a MC-ICPMS, Neptune (Thermo Instruments, Bremen, Germany). An isotopic reference material of Tl (NIST-SRM 997) was added to the final sample solutions for the correction of mass discrimination of Pb in the instrument to have a concentration of 20 ppb Tl.

Galena occurs as discrete layers of ca. 1cm width in between layered CaF<sub>2</sub> as well as sub mm-sized inclusion within thick CaF<sub>2</sub> layer. Galena inclusion and layers were numbered from 1 to 3 according to its precipitation order. Grain size of the galena in each of the layer is several hundred microns to several millimeters. Euhedral quartz with a size of 10-100 micron occurs along the grain boundary of galena and as an inclusion within galena grains.

Small but significant Pb isotopic variation of sub-permil order was observed among and within the 3 galena layers. The analyzed samples clearly form a linear trend in the <sup>208</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb vs. <sup>206</sup>Pb/<sup>207</sup>Pb diagram. The observed Pb isotopic trend indicates that the Pb isotopic composition of the fluid that produced the galena has slightly changed during galena precipitation. The Pb isotopic composition of the galena is consistent with mixing of a sediment component of the Pacific plate (Nakamura et al., 2008) with a deep fluid derived from Pacific Ocean plate (Nakamura et al., 2008) and/or the DMM. With the high-precision isotopic analysis as demonstrated in this study, LAL-ICPMS may have an important contribution to high-spatial-resolution geochemical studies in the future.

キーワード: 地殻流体, LAL法, Pb同位体比, 方鉛鉱, 局所同位体分析

Keywords: Geofluids, laser ablation in liquid, Pb isotope ratio, galena, in situ isotope analysis

中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源 —プレート脱水流体起源の可能性についての水文化学的検討—  
Origin of saline waters distributed along the Median Tectonic Line in southwest Japan

網田 和宏<sup>1\*</sup>; 大沢 信二<sup>2</sup>; 西村 光史<sup>3</sup>; 山田 誠<sup>4</sup>; 三島 壮智<sup>2</sup>; 風早 康平<sup>5</sup>; 森川 徳敏<sup>5</sup>; 平島 崇男<sup>6</sup>  
AMITA, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; OHSAWA, Shinji<sup>2</sup>; NISHIMURA, Koshi<sup>3</sup>; YAMADA, Makoto<sup>4</sup>; MISHIMA, Taketoshi<sup>2</sup>; KAZAHAYA, Kohei<sup>5</sup>; MORIKAWA, Noritoshi<sup>5</sup>; HIRAJIMA, Takao<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学大学院工学資源学研究科地球資源学専攻, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 (別府), <sup>3</sup> 東洋大学 経済学部, <sup>4</sup> 総合地球環境学研究所, <sup>5</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門, <sup>6</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Science & Technology Faculty of Engineering and Resource Science Akita University, <sup>2</sup>Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Faculty of Economics, Toyo University, <sup>4</sup>Research Institute for Humanity and Nature, <sup>5</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>6</sup>Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University

温泉起源流体としての変成流体を探索するために、西南日本の前弧域の中央構造線沿いに湧出する高塩分温泉において、温泉水や付随ガスを採取し化学・同位体分析を行った。その結果、和歌山と四国地域で採取した温泉水試料から、現海水や浅層地下水に比べて水素・酸素安定同位体組成の大きく異なる温泉を見出した。四国地域の温泉起源流体は、Li-B-Cl 相対組成や He 同位体システムティクスから、続成流体の一つであることが確認された。一方、和歌山地域の温泉起源流体は、続成脱水流体とは異なる Li-B-Cl 相対組成を示し、また高い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を有していることから、大分平野で得られたものと同様、その起源が変成脱水流体にあると判断された。和歌山、大分の温泉起源流体と四国、宮崎のそれでは、付随ガスの化学組成において前者が CO<sub>2</sub> に富むのに対して後者は CH<sub>4</sub> に富むという明瞭な違いが認められ、また、和歌山と大分の付随ガスに含まれる CO<sub>2</sub> の大半が、沈み込み帯の火山ガスと同様に、海成炭酸塩に由来するものであることが示された。さらにこれら起源流体の Li-B-Cl 相対組成は、続成脱水流体と火山性熱水流体のその中間的な値を示した。これらの結果は全て、和歌山と大分の温泉起源流体が、沈み込むフィリピン海プレートより脱水してきた変成脱水流体であることを示唆しているものと考えられた。

キーワード: 温泉水, プレート脱水流体, 中央構造線

Keywords: hot spring water, dehydrated fluid from subducting plate, Median Tectonic Line



## 東北日本のヘリウム同位体比分布；地質構造との比較 Distribution of the helium isotope ratios in northeast Japan in terms of geological setting

堀口桂香<sup>1\*</sup>；風早康平<sup>1</sup>；塚本齊<sup>1</sup>；森川徳敏<sup>1</sup>；佐藤努<sup>1</sup>；大和田道子<sup>1</sup>；仲間純子<sup>1</sup>  
HORIGUCHI, Keika<sup>1\*</sup>；KAZAHAYA, Kohei<sup>1</sup>；TSUKAMOTO, Hitoshi<sup>1</sup>；MORIKAWA, Noritoshi<sup>1</sup>；SATO, Tsutomu<sup>1</sup>；  
OHWADA, Michiko<sup>1</sup>；NAKAMA, Atsuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

The distribution of slab fluid defined by high Li/Cl ratios conforms the area of "hot fingers" (Tamura et al., 2002) in Northeast Japan (Kazahaya et al., submitted). Conversely, the high  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios distribute wider and do not match with slab-derived fluids indicating that some of the mantle-derived helium would not be transported with magmas or slab fluids but directly upwells as mantle-derived fluid. The  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios vary along the volcanic front showing an areal contrast; such as a low-ratio-area close to volcanoes are observed in the central part of Tohoku. We propose here an extended helium upwell model which can explain the spatial variation of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios with the following concept; 1) The most important constraint for mantle helium upwelling is the crustal structure divided by tectonic lines; Hatagawa Tectonic Line (HTL) divides the Kitakami and Abukuma belts. Ryoke belt and north part of Abukuma belt is torn apart by number of faulting events. The rest of parts, Abukuma granitic province and Kitakami province form very large stable blocks which might prohibit helium to upwell from mantle. 2) A view from U-Th content in the crust is important to understand the flat distribution of mantle helium in back-arc region; Low U-Th crust in the back-arc with less crustal  $^4\text{He}$  production is favorable to explain the flat and high  $^3\text{He}/^4\text{He}$  signature, such as oceanic crust might have. Tanakura Tectonic Line (TTL) divides the thick crust of continental margin (sedimentary prism and granite) with Ryoke belt.

キーワード: ヘリウム同位体比, 東北日本, 空間分布, 地質構造

Keywords: helium isotope ratio, northeast Japan, areal distribution, geological structure

## 地下水中に含まれるスラブ流体の新指標：塩水のLi-Cl-Br関係 The Li-Cl-Br systematics of saline groundwater: A new indicator for slab fluid

風早 康平<sup>1\*</sup>; 高橋 正明<sup>1</sup>; 岩森 光<sup>2</sup>  
KAZAHAYA, Kohei<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Masaaki<sup>1</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Geochemical Evolution Research Program, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this study, we propose Br/Cl ratio as a new indicator for slab-derived fluids, which is useful to distinguish their sources between pore water and hydrous minerals in subducting slab. The areal distribution of slab-derived fluids and their sources using Li/Cl and Br/Cl as geochemical evidences will provide a view for water circulation in subduction zones.

Subducting slab contains waters (originally seawater) as pore water and many kinds of hydrous minerals. Hydrous minerals such as opal, clay or mica will decompose to release water during subsiding, and pore water will be released by compaction. Even though such complex process occurs, behavior of halogen ions in the subducting slab may be simple because they are always enriched in aqueous phase (pore water) and the rest are in minerals as a replacement of OH. Some metamorphic fluids in wedge mantle peridotite with Br-enriched signature have been observed and were indicated to be from pore water in the slab. The mineral dehydration process is supposed to be responsible for Br-depletion in slab-derived aqueous fluid. Therefore, halogens are potentially good indicators concerning with the water behavior in subduction processes.

The higher Br/Cl ratios (>0.0035 in wt.) have been observed in fossil seawater and oil field brines due to the addition of Br from organic matters. The very low Br/Cl waters (<0.0025 in wt.) have feature of <sup>18</sup>O-shift to the slab (magmatic) fluid end member, which is quite lower than that in seawater (Br/Cl = 0.0034 in wt.), indicating that these waters originate from dehydration of the slab.

キーワード: Li-Cl-Br, スラブ起源流体, 地下水, 沈み込み帯

Keywords: Li-Cl-Br, slab-derived fluid, groundwater, subduction process

## 沈み込み帯の火山岩における U-Th 放射非平衡の起源 Origin of U-Th disequilibrium in subduction zone volcanic rocks

横山 哲也<sup>1\*</sup>; 池本 昭彦<sup>1</sup>; 岩森 光<sup>2</sup>; 上木 賢太<sup>1</sup>  
YOKOYAMA, Tetsuya<sup>1\*</sup>; IKEMOTO, Akihiko<sup>1</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>2</sup>; UEKI, Kenta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>JAMSTEC

Subduction zone magmatism is induced by the addition of slab derived fluids to the mantle wedge [1]. Chemical compositions of subduction zone volcanic rocks are largely controlled by the chemical and physical properties of the slab fluid. The nature of slab fluids have been extensively studied by geochemical approach utilizing trace element abundances and isotope compositions in arc basalts [2]. U-series disequilibrium in arc volcanic rocks is a useful tracer to understand the origin of arc magmas as well as the timescales of fluid/melt migration in subduction zones. However, detail of the process that producing <sup>238</sup>U-<sup>230</sup>Th disequilibrium in primary melts in the mantle wedge is still poorly constrained.

In this study, we determined <sup>238</sup>U-<sup>230</sup>Th disequilibrium in volcanic rocks from the Northeast Japan Arc (Iwate, Akitakoma, Yakeyama, Hachimantai, and Kampu). In addition, we performed a numerical simulation that reproduced (<sup>238</sup>U/<sup>232</sup>Th) and (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) ratios in primary melts in a subduction zone, by simultaneously calculating mantle dynamics, hydro phase reactions and trace elements transport. To discuss the origin of U-Th disequilibrium in arc volcanic rocks, the new data and previously published U-Th data around Japan were evaluated based on the result of the numerical simulation. The numerical simulation performed in this study

Most of arc volcanic rocks possess <sup>238</sup>U-<sup>230</sup>Th disequilibrium with <sup>238</sup>U excesses, suggesting the addition to the mantle wedge of slab fluid enriched in U relative to Th. The feature of <sup>238</sup>U enrichment is well reproduced by the numerical simulation. Interestingly, the simulation produced two positive trends in the U-Th diagram; the shallow trend matches data from the Izu-Mariana arc, while the steep slope is consistent with data from the Kamchatka arc. This strongly suggests that the positive trend in the U-Th diagram for a single arc samples simply reflects the variation of (<sup>238</sup>U/<sup>232</sup>Th) and (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) ratios in primary melts produced in the mantle wedge, and the slope does not have any age significance. Thus, as discussed in [3], the decoupling of U-Th and Th-Ra ages for arc samples would be explained by assuming that the slab derived fluid have (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) ratios higher than the mantle wedge composition.

Although the NEJ frontal-arc lavas (Iwate) possess <sup>238</sup>U-<sup>230</sup>Th disequilibrium with <sup>238</sup>U excesses, the extent of <sup>238</sup>U enrichment is moderate (<10%) compared to the other frontal-arc samples. In addition, Iwate lavas have relatively low (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) ratios that cannot be explained by the numerical simulation. This implies that the (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) in mantle wedge beneath Iwate volcano is lower than that in the depleted MORB mantle (DMM), due presumably to ancient mantle metasomatism by Th-enriched fluids derived from sediments.

In contrast to the frontal arc samples, the extent of <sup>238</sup>U enrichment in the NEJ samples decreases as the slab depth increases, and the rear-arc lavas (Kampu) show <sup>230</sup>Th enrichments relative to <sup>238</sup>U (<10%). This generally reflects gradual decrease of the amount of slab derived fluid mixed into the wedge mantle. The <sup>230</sup>Th excesses in rear-arc lavas would be produced by the melting of garnet-bearing upwelling mantle, as reproduced by the simulation. However, our data for Kampu show <sup>230</sup>Th excesses with an extremely low (<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th) ratio (~0.8) that plots outside the simulation data. This is explained by assuming the existence of metasomatized mantle beneath the NE Japan as discussed above, although the possibility of direct addition of Th-enriched fluid to the DMM-like mantle cannot be ruled out for the generation of rear-arc magmas.

References: [1] Iwamori (1998) *EPSL* 160, 65. [2] Nakamura et al. (2008) *Nature Geosci.* 1 380. [3] Yokoyama et al. (2003) *JGR* doi: 10.1029/2002JB002103.

キーワード: U-Th 放射非平衡, 沈み込み帯, 火山岩, スラブ由来流体

Keywords: U-Th disequilibrium, Subduction zone, volcanic rocks, slab derived fluid

## 沈み込み帯深部の水循環とマントル対流との相互作用 Water transport coupled dynamically with a plate-mantle convection system involving a shallow to deep subduction zone

中久喜 伴益<sup>1\*</sup>; 金子 岳郎<sup>1</sup>; 中尾 篤史<sup>2</sup>; 岩森 光<sup>3</sup>  
NAKAKUKI, Tomoeki<sup>1\*</sup>; KANEKO, Takeo<sup>1</sup>; NAKAO, Atsushi<sup>2</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Inst. Technology, <sup>3</sup>Geochemical Evolution Research Program, JAMSTEC

水がマントル岩石の融点を下げ、部分融解を作り出すことは、島弧の火成活動に不可欠であると考えられている。島弧下のマントルの流動と水輸送を結合した数値モデリングにより、スラブが脱水してから部分融解の生成に至るまでの過程を詳しく理解できるようになった (Iwamori, 1998; 2007)。一方、背弧や大陸プレート内部においても、火山活動が見られることや、リソスフェアが大きく変形し、表層に厚い地震波高速度域が見られないことから、沈み込んだスラブからの水が影響を与えている可能性があると考えられる。それでは、沈み込み帯深部に沈み込んだスラブから水がどのように発生し、また、水は沈み込み帯のダイナミクスにどのような影響を与えるのであろうか。これらの動力学的過程を理解するため、沈み込み帯深部までの水輸送とプレートの沈み込みを動的結合したマントル対流の数値モデルを構築し、シミュレーションを行った。

基礎となるモデルとして、これまで著者らが開発してきた自発的沈み込みのモデル (Tagawa et al. 2007; Nakakuki, et al. 2010) を使用した。このモデルに、含水鉱物の相図 (Iwamori, 1998; 2007) と水輸送を組み込む。岩石の最大含水量は相図から決まる水和鉱物・結晶内の水だけでなく、結晶粒界の水も考慮した。水がマントル対流に与える影響として、含水によって岩石の密度や粘性が低下する効果 (Karato and Jung 2003) を考える。最大含水率を超えると岩石は脱水し、その水は浸透流により上方に運ばれると考えられる。その速度は、マントル対流よりも大幅に高速であると考えられるので、脱水した水は瞬間的に上方へ動くとして、その移動をモデルに取り入れた。水の拡散はマントル対流の時空間スケールよりも無視できるほど小さいので、水の輸送は拡散項のない移流方程式で表されることになる。拡散のない式をEuler的な方法で解くのは難しいため、マントル対流に伴って移動する水の移流方程式の解法に Marker-And-Cell (MAC) 法を適用した。脱水を計算する際、メッシュと粒子の間で水含有率を交換する必要がある。このとき、脱水した水をメッシュ内の粒子に分配する扱いを工夫し、水が玄武岩と橄欖岩との間で拡散するのを極力抑えた。

岩森らの研究や地震学的な研究 (Kawakatsu and Watada, 2007) によると、海洋地殻から脱水した水は、スラブ上面の橄欖岩に取り込まれ serpentine あるいは chlorite として、150km 程度の深さまで輸送される。我々のモデルでは、この含水層が安定に形成されるためには、沈み込む海洋地殻の含水量は 2% 程度以上でなければならなかった。また、強度については、プレート境界の逆断層と同程度かそれよりも小さくしなければならなかった。これらは Horiuchi (2013) の結果と調和的である。この相が choke point で分解した後、水は高温のマントルへ脱水し、高温の nominally anhydrous minerals (NAMs) により深部へ輸送される。このとき、NAMs が持つことの出来る水は最大で 0.2 wt. % 程度と推定される。これより大きい場合 (0.4 wt. %) には、深部へ輸送される水が多くなりすぎて島弧下のマントルを水で満たすことは出来なくなってしまう。岩石の相図から予想されるように、NAMs は脱水することなく、マントル遷移層に沈み込む。Richards and Iwamori (2010) は水平なスタグナントスラブが形成された際、含水層がレイリー・テイラー不安定を起こし、プルームとして上昇する可能性を示した。これに対し本研究では、そのような不安定の発生は見られなかった。一方、下部マントルに沈み込むスラブは、下部マントルの含水量に依存して脱水する。下部マントルの含水量が 410km 以浅の NAMs マントルより小さい場合には脱水を起こす。この場合、スラブ上面の含水層は 660km 相境界面を境に大きく水平方向へ広がることが分かった。これは、上方への脱水とマントル対流に伴う斜め下降を繰り返すためである。脱水した水によって、水に飽和した薄い層が 660km 相境界直上に形成された。この層は軽いので、不安定となり、含水プルームとして上昇し始める。410km の相境界より上部では、含水量が遷移層よりも小さい。このため、含水プルームは 410km 境界に達すると水を放出する。放出された水は、島弧下の水輸送と同様、浸透流として上昇する。その浸透流は、含水プルームの大きさによっては上盤プレートにまで達することも見られた。このような機構により、背弧側リソスフェア下のウェッジマントルには大量の水が運ばれ、島弧から 500 から 1000km 程度の範囲が 1 億年程度の時間で水に満たされた。含水プルームと背弧側プレートの相互作用は、リソスフェア下部を浸食するため、時間が経過しても背弧リソスフェアを薄いまま保つことが出来る。この作用により、含水プルームは背弧に部分融解を引き起こすだけでなく、島弧下のアセノスフェアを高温に保つ機構としても働くことが分かった。



SIT40-17

会場:416

時間:5月1日 15:45-16:00

キーワード: 沈み込み帯, 水輸送, 遷移層, スラブ, 含水プルーム, マントル対流

Keywords: subduction zone, water transport, transition zone, slab, hydrous plume, mantle convection

## 浅部ゆっくり地震活動と地殻流体に基づく地殻変動とプレート間固着の特徴とまとめ

### An overview of seismic coupling and crustal deformation on the basis of geofluid and shallow slow earthquakes

有吉 慶介<sup>1\*</sup>; 松澤 暢<sup>2</sup>; 日野 亮太<sup>3</sup>; 長谷川 昭<sup>2</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>; 中田 令子<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
ARIYOSHI, Keisuke<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Toru<sup>2</sup>; HINO, Ryota<sup>3</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>; NAKATA, Ryoko<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター, <sup>3</sup> 東北大学災害科学国際研究所

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), <sup>2</sup> Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, <sup>3</sup> International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

本発表では、地殻流体の役割として、高間隙圧による浅部ゆっくり地震への寄与に関する研究のまとめを行う。

浅部超低周波地震は、これまで西南日本や十勝沖でしか捉えられてこなかったが、東北地方太平洋沖地震後の詳細な解析により、東北沖でも発生していることが確かめられた。そこで本研究では、数値シミュレーションに基づいて、浅部超低周波地震の活動とプレート間固着との関係を調べ、その結果を東北地方太平洋沖地震へ適用することを試みた。

南海トラフ沿いで発生する”ゆっくり地震”の一種である超低周波地震は、30kmの等深線上にほぼ分布しているだけでなく、海溝付近でも発生していることが、最近の海底観測から明らかとなった。

そこで本発表では、海溝まで地震性すべりが突き抜けるほど強く固着する場合と地震性すべりが海溝まで突き抜けにくい弱い固着の場合について、大規模な数値シミュレーションの計算結果を比較し、浅部超低周波地震の活動変化の特徴およびそれに伴う地殻変動についての抽出を試みると共に、地殻流体の役割について西南日本と東北沖とで比較しながら議論する予定である。

キーワード: 海溝型巨大地震, 沈み込み帯, 地震の静穏化, 高間隙圧, 海底観測, 速度状態依存摩擦構成則

Keywords: megathrust earthquake, subduction zone, seismic quiescence, high pore pressure, seafloor observation, rate- and state-dependent friction law

## 九州地方の三次元 P 波減衰構造 Three-dimensional seismic attenuation structure beneath Kyusyu

才田 悠人<sup>1\*</sup>; 中島 淳一<sup>1</sup>  
SAITA, Hiroto<sup>1\*</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学  
<sup>1</sup>Tohoku University

### 1. はじめに

九州地方では、フィリピン海プレートの沈み込みによる活発な島弧火山活動がみられる。さらに、阿蘇と霧島との間におよそ 110 km の火山空白域があるなど火山分布に興味深い特徴もある。島弧マグマの生成・上昇過程に関しては、多くの沈み込み帯において、地震波速度構造などに基づいたモデルが提唱されている（たとえば、Hasegawa and Nakajima, 2004）。一方、地震波減衰は、温度異常や流体分布に対して、地震波速度とは異なる影響をうけることが知られている。そのため、地震波減衰構造を詳細に推定することは、プレート沈み込みに起因するマントルウェッジの物理プロセスを理解するうえで重要である。本研究は、九州地方の詳細な 3 次元減衰構造を推定し、九州地方のマグマ生成・上昇のメカニズムの理解を深めることを目的とする。

### 2. データ・解析手法

本研究では、Nakajima et al. (2013) の手法を、2003 年 4 月から 2013 年 12 月までに九州地方とその周辺で発生した 5195 個の地震の速度変位スペクトルに適用した。まず、S コーダ波のスペクトル比法によって震源パラメータを求め、その震源パラメータを用いて観測された P 波速度振幅スペクトルを補正した。次いで、補正したスペクトルをデータとして、観測点毎に観測方程式を立て、インバージョンにより波線に沿った減衰 ( $t^*$ )、サイト増幅特性とスペクトルレベルとを同時に推定した。結果として 75207 本の  $t^*$  が得られた。最後に、得られた  $t^*$  をインバージョンすることで 3 次元 P 波減衰構造を推定した。

### 3. 結果と議論

得られた結果の特徴を以下に示す。

- 1) 深さ 10km では活火山直下が高減衰異常を示す。
- 2) 下部地殻では九州全域が比較的高減衰を示す。この結果は、火山直下のみで高減衰を示す東北地方の結果とはやや異なっている。
- 3) 沈み込むフィリピン海プレートは非常に減衰が小さい。
- 4) 背弧側のマントル上昇流に対応すると考えられる領域が高減衰を示す。しかし、阿蘇、霧島の間が存在する火山空白域にはマントル上昇流に対応する高減衰域は見られな。

今後は、解の分解能の評価を行うとともに、得られた 3 次元減衰構造と速度構造など他の結果と比較し、九州地方のマグマ上昇モデルを提案する予定である。

キーワード: 地震波減衰構造, フィリピン海プレート, 九州  
Keywords: seismic attenuation structure, Philippine Sea Plate, Kyusyu

## 磁場変換関数データによる九州地方の3次元比抵抗構造 3D Electrical Resistivity Imaging beneath Kyushu by Geomagnetic transfer function data

畑 真紀<sup>1\*</sup>; 上嶋 誠<sup>1</sup>; 半田 駿<sup>2</sup>; 下泉 政志<sup>3</sup>; 田中 良和<sup>4</sup>; 橋本 武志<sup>5</sup>; 鍵山 恒臣<sup>4</sup>; 歌田 久司<sup>1</sup>; 宗包 浩志<sup>6</sup>; 市來 雅啓<sup>7</sup>; 藤田 清士<sup>8</sup>

HATA, Maki<sup>1\*</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>1</sup>; HANDA, Shun<sup>2</sup>; SHIMOIZUMI, Masashi<sup>3</sup>; TANAKA, Yoshikazu<sup>4</sup>; HASHIMOTO, Takeshi<sup>5</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>4</sup>; UTADA, Hisashi<sup>1</sup>; MUNEKANE, Hiroshi<sup>6</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>7</sup>; FUJI-TA, Kiyoshi<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 佐賀大学農学部, <sup>3</sup> 九州職業能力開発大学校, <sup>4</sup> 京都大学理学研究科, <sup>5</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター, <sup>6</sup> 国土地理院, <sup>7</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>8</sup> 大阪大学院工学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Faculty of Agricultural Science, Saga University, <sup>3</sup>Kyushu Polytechnic College, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>5</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>6</sup>Geographical Survey Institute, <sup>7</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>8</sup>GSE, Osaka University

The Kyushu island in the Southwest Japan Arc has many Quaternary active volcanoes in relation to the subduction of the Philippine Sea Plate (PSP). The volcanoes exist along the volcanic front of N30°E-S30°W, whereas the volcanoes are densely located in the northern and southern regions of the island. The Kyushu island has a non-volcanic region in the central region of the island between the two volcanic regions. We performed three-dimensional (3D) inversion analyses to obtain a lithospheric-scale electrical resistivity model beneath the entire Kyushu island using the Network-Magnetotelluric (MT) data. The electrical resistivity model, however, has a limited resolution in a horizontal direction because of the sparse Network-MT data in several areas of Kyushu. Thus data of geomagnetic variations are used anew to improve the uncertainty of the electrical resistivity structure in a horizontal direction. Data of geomagnetic variations were obtained at the entire Kyushu island and several islands off the western coast of Kyushu from 1980's to 1990's [e.g., Handa et al., 1992; Shimoizumi et al., 1997; Munekane et al., 1997]. In this study, accessible data of geomagnetic variations around Kyushu are compiled. Geomagnetic transfer functions for the data of geomagnetic variations in the northern Kyushu are re-estimated using the BIRRP code [Chave and Thomson, 2004] in order to enhance the quality of the transfer functions and their error estimation. The transfer functions at about 150 sites, which are 12 periods between 20 and 960 s, are obtained with improving quality at the entire Kyushu island. The induction vector representation [Parkinson, 1962] is generally used to delineate the lateral variation of electrical resistivity structure because the vectors point to current concentration in conductive anomalies. Induction vectors determined using the improved transfer functions have the following specific features. First, the vectors on the northern and central Kyushu do not point to the Pacific ocean off the eastern coast of Kyushu but point to the East China Sea of the shallow sea off the western coast of Kyushu. Second, the induction vectors on the southern Kyushu point to the Pacific ocean in the eastern part and point to the East China Sea in the western part at short period, whereas the vectors are arranged along a direction parallel to a direction of the coast line at longer period (>300 s). These results are consistent with the previous work [Handa et al., 1992; Shimoizumi et al., 1997; Munekane, 2000]. It is considered that the complex behavior of the induction vectors are influenced by conditions of the Earth's mantle relating to the igneous activities. Then we applied three-dimensional (3D) inversion analyses for geomagnetic transfer functions using the WSINV3DMT inversion code [Siripunvaraporn and Egbert, 2009]. The electrical resistivity of a starting model is based on values of the 3D electrical resistivity model estimated by using the Network-MT data. In this presentation, we will mainly describe features of the 3D electrical resistivity structure using the geomagnetic transfer functions and them of the 3D electrical resistivity structure using only the Network-MT data [Hata et al., 2013].



## 含水岩石の弾性波速度・電気伝導度に対する封圧・間隙流体圧の影響 Influence of confining and pore-fluid pressures on velocity and conductivity of a fluid-saturated rock

瀬間 文絵<sup>1\*</sup>; 牧村 美穂<sup>1</sup>; 樋口 明良<sup>1</sup>; 渡辺 了<sup>1</sup>  
SEMA, Fumie<sup>1\*</sup>; MAKIMURA, Miho<sup>1</sup>; HIGUCHI, Akiyoshi<sup>1</sup>; WATANABE, Tohru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山大学地球科学科

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, University of Toyama

Pore-fluid pressure in seismogenic zones can play a key role in the occurrence of an earthquake (e.g., Sibson, 2009). Its evaluation via geophysical observation can lead to a good understanding of seismic activities. It is critical to understand how pore-fluid pressure affects seismic velocity and electrical conductivity. We have studied the influence of pore-fluid pressure on elastic wave velocity and electrical conductivity of water-saturated rocks.

Measurements have been made using a 200 MPa hydrostatic pressure vessel, in which confining and pore-fluid pressures can be separately controlled. An aqueous pore-fluid is electrically insulated from the metal work by using a specially designed device (Watanabe and Higuchi, 2013). Elastic wave velocity was measured with the pulse transmission technique (PZT transducers,  $f=2$  MHz), and electrical conductivity the four-electrode method (Ag-AgCl electrodes,  $f=100$  mHz-100 kHz) to minimize the influence of polarization on electrodes.

Berea sandstone (OH, USA) was used for its high porosity (19.1%) and permeability ( $\sim 10^{-13}$  m<sup>2</sup>). It is mainly composed of subangular quartz grains. Microstructural examinations show clay minerals (e.g., kaolinite) and carbonates (e.g., calcite) fill many gaps between quartz grains. A small amount of feldspar grains are also present. The grain size is 100-200 micrometers. Cylindrical samples have dimensions of 25 mm in diameter and 30 mm in length. Their axes are perpendicular to sedimentation bed. Elastic wave velocity is slightly higher in the direction perpendicular to the axis than in that parallel to the axis.

Confining and pore-fluid pressures work in opposite ways. Increasing confining pressure closes pores, while increasing pore-fluid pressure opens them. For a given pore-fluid pressure, both compressional and shear velocities increase with increasing confining pressure, while electrical conductivity decreases. When confining pressure is fixed, velocity decreases with increasing pore-fluid pressure while conductivity increases. The closure and opening of pores can explain observed changes of velocity and conductivity.

Effective confining pressure is defined by the difference between confining and pore-fluid pressures. Velocity increases with increasing effective confining pressure, while conductivity decreases. However, neither velocity nor conductivity is unique function of the effective confining pressure. For a given effective confining pressure, conductivity significantly increases with increasing confining pressure. Velocity also increases with increasing confining pressure, though it is not so significant. Increasing pore-fluid pressure can compress clay minerals to increase pore space. This might explain observed conductivity change.

キーワード: 間隙流体圧, 地震波速度, 電気伝導度, 地殻流体

Keywords: pore-fluid pressure, seismic velocity, electrical conductivity, geofluid

## 電気伝導度測定による岩塩中の粒界水の研究 A study on grain boundary brine in halite rocks using electrical conductivity measurements

渡辺 了<sup>1\*</sup>; 北野 元基<sup>1</sup>  
WATANABE, Tohru<sup>1\*</sup>; KITANO, Motoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部

<sup>1</sup> Graduate school of science and engineering, University of Toyama

Intercrystalline fluid can significantly affect rheological and transport properties of rocks. Its influences are strongly dependent on the style of distribution. When a fluid fills grain boundaries in a rock, it will significantly reduce the strength of the rock. The fluid distribution is mainly controlled by the dihedral angle between solid and fluid phases. The grain boundary wetting is expected only when the dihedral angle is 0°. The dihedral angle of the halite-water system was studied through microstructural analyses of quenched materials (Lewis and Holness, 1996). The dihedral angle is 50~70° at  $P < 200$  MPa and  $T < 300$  °C. However, deformation experiments (e.g., Watanabe and Peach, 2002) and cryo-SEM observations (e.g., Schenk et al., 2006) on halite rocks have indicated the coexistence of grain boundary brine with a positive dihedral angle. In order to understand the nature of grain boundary brine, we have conducted electrical impedance measurements on synthetic wet halite rocks over a wide range of pressure and temperature.

Wet halite rock samples (9 mm diameter and 6 mm long) are prepared by cold-pressing ( $P=140$  MPa, 40 min.) of wet NaCl powder and annealing ( $T=180$ °C,  $P=180$  MPa, 160 hours). Grains are polygonal and equidimensional with a mean diameter of 50-100  $\mu$ m. The porosity is less than 1%. The volume fraction of brine is estimated to be 11.1% by the thermo gravimetric analysis. Microstructural observation shows that most of brine is enclosed inside halite grains. Electrical impedance is measured in the axial direction of a sample by a lock-in-amplifier (SRS, SR830) with a current amplifier (SRS, SR570). The cylindrical surface of a sample is weakly dried and coated with RTV rubber to suppress the contribution of surface conduction. A conventional externally heated, cold-seal vessel (pressure medium: silicone oil) is used to control pressure and temperature.

Electrical conductivity of wet halite rocks is higher than that of NaCl by orders of magnitude even at the conditions of the dihedral angle larger than 60 degrees. The conduction through brine dominates the bulk conduction. This is also supported by the quick conductivity change in response to the change in pressure. Brine is interconnected over a whole range of pressure and temperature.

No remarkable change in conductivity is observed around the condition of the dihedral angle of 60 degrees. Although the interconnection of triple-junction tubes might drastically change at the dihedral angle of 60 degrees, its influence on the bulk conductivity is masked by more conductive paths. A triple-junction tube is so stiff that it cannot give observed conductivity changes in response to changes in pressure. The dominant conduction paths are not triple-junction tubes. Grain boundary brine must be the dominant conduction paths.

Electrical conductivity decreases with increasing pressure. Larger change is observed for lower temperatures. A simple model of fluid tube with elliptical cross-section shows that the thickness of a fluid tube decreases by less than 10%. The observed large change in conductivity suggests that the conductivity of brine is strongly dependent on the fluid thickness. When the thickness is comparable to the molecular size, the mobility of ions must be sensitive to the thickness. The observed large change in conductivity might be caused by the decrease in ionic mobility.

キーワード: 岩塩, 粒界, 水, 電気伝導度

Keywords: salt, grain boundary, water, electrical conductivity

## 室内実験による上総層群シルト岩の最大埋没深度の推定 Estimation of the maximum burial depth of siltstones from the Kazusa Group by laboratory experiments

田村 幸枝<sup>1</sup>; 丸茂 春菜<sup>2</sup>; 三橋 俊介<sup>1</sup>; 上原 真一<sup>1\*</sup>

TAMURA, Yukie<sup>1</sup>; MARUMO, Haruna<sup>2</sup>; MITSUHASHI, Shunsuke<sup>1</sup>; UEHARA, Shin-ichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東邦大学理学部, <sup>2</sup> 東邦大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Science, Toho University, <sup>2</sup> Graduate School of Science, Toho University

堆積岩の最大埋没深度を推定することは、例えば堆積盆の隆起量や侵食量の推定等に関係して重要である。堆積岩の最大埋没深度を推定する手法の一つとして、土質実験で一般的に実施される室内圧密実験による手法が提案されている。しかしながら、岩石の場合、続成作用において化学的な粒子間の固着等により、この方法では単純に評価できない可能性がある。従って、実際の堆積盆を用いて、本手法の適用性を評価することは重要である。

本研究では、関東平野の基盤である上総層群のシルト岩について、室内実験により、間隙率の有効圧依存性を測定し、その結果に基づいて岩石の最大埋没深度を推定した。その結果と、各層の層序及び層厚から推定された各岩石試料採取地点間の層厚差と比較し、本地域において、最大埋没深度の求め方として本研究の手法が適しているのかを検証した。

実験に使用するシルト岩は、上総層群の梅ヶ瀬層 (UMG) 及び大田代層 (OTD)、黄和田層 (KWD)、大原層 (OHR)、勝浦層 (KTR) (以上、層準的に上位から下位の順番) 露頭より採取した。その岩石ブロックから直径約 40 mm、高さ約 30 mm の円柱形に加工したものを試料として実験に用いた。間隙率実験は容器内圧縮変形透水試験機を用い、有効圧を 0 MPa から 35 MPa (間隙水圧は 1 MPa) の条件で測定を行った。有効圧を加えた時の試料から出た間隙水の体積を測定し、これを試料の体積で割ることで、間隙率の変化量を求めた。この結果を用いて、まず有効圧と間隙率の関係をグラフにし、グラフの折れ曲がっている点の前後の箇所についてそれぞれ近似曲線を引き、その交点から最大経験有効圧 ( $P_{e,B}$ ) を求めた。そして  $P_{e,B}$  の値を、湿潤岩石密度から間隙水密度を引いた値に重力加速度をかけた値で割ることで、最大埋没深度 ( $D_{max}$ ) を推定した。

UMG、OTD、KTR は、上位の層ほど間隙率が高い関係が見られた。一方、OHR と KWD は他の岩石に比べて間隙率が高く、層序順に並ばなかった。OHR 以外は、各採取地点間の層厚差と  $P_{e,B}$  には正の相関が見られた。ただし、層厚差と  $D_{max}$  推定値の関係の傾きが 1 とは異なった (約 0.27)。また、UMG と OTD の値は互いに層序的に逆転した。以上のように、本研究の手法による最大埋没深度の推定値は、層厚差と正の相関は見られたものの、いくつか矛盾した点が見られたことから、その適用性については今後更に検討する必要がある。また、OHR は層序が比較的下位に位置するのにも関わらず、 $P_{e,B}$  は他の岩石に比べ低い値となった。これは大原層中の間隙圧が静水圧分布に対し 5~12 MPa 程度高く、そのため有効圧が低かったことを反映している可能性がある。

キーワード: 間隙率, 最大埋没深度, 最大経験有効圧, 上総層群, 異常間隙水圧, 室内岩石実験

Keywords: porosity, maximum burial depth, maximum effective stress experienced, Kazusa Group, overpressure, laboratory rock experiment

## アンチゴライトが安定な温度圧力条件下における蛇紋岩化速度に関する実験的研究 Experimental constraints on the serpentinization rate under the antigorite-stable P-T condition

中谷 貴之<sup>1\*</sup>; 中村 美千彦<sup>1</sup>  
NAKATANI, Takayuki<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科地球惑星物質科学科

<sup>1</sup> Earth and Planet Materials Sci., Tohoku Univ.

Water transport into the Earth's interior can be limited by the rate of serpentinization reaction proceeding at slow spreading ridges and along bending related faults (Iyer et al., 2012). Moreover, the distribution of H<sub>2</sub>O in the mantle wedge may be controlled by the extent of progression of the reaction between the slab-derived fluid and the hanging wall mantle, as suggested by theoretical models (Iwamori, 1998). Previous hydration experiments for kinetic studies have been vigorously conducted at relatively low P-T condition (up to ca. 400 °C and 0.3 GPa) where the low T serpentine variety lizardite or chrysotile is stable. In contrast, antigorite is expected to be the dominant serpentine variety under the higher P-T condition corresponding to the deep oceanic lithosphere and the mantle wedge.

In order to constrain the serpentinization rates of peridotite under the antigorite-stable conditions, we conducted piston-cylinder experiments at 580 °C and 1.3 GPa. Four types of starting materials were prepared from the crushed powder of a San Carlos lherzolite xenolith: 1) olivine (Ol), 2) orthopyroxene (Opx) + clinopyroxene (Cpx), 3) Ol + Opx, and 4) Ol + Opx + Cpx + spinel. These systems were abbreviated as OL, OPX+CPX, OL+OPX, and LHZ, respectively. The starting materials were reacted with 15 wt% distilled water for 4-15 days. The formation of serpentine + talc + magnetite was observed in all the systems except for OL. Based on Raman spectroscopy results and crystal shapes, the synthesized serpentine mineral was identified as lizardite with 6.9 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, rather than antigorite. The high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in the system possibly stabilized the aluminous lizardite at the experimental temperatures. Low silica activity precluded olivine reaction in the OL system, whereas olivine reacted with the SiO<sub>2</sub> component in orthopyroxene to form lizardite and talc in the other systems. The reaction progress followed an interface-controlled rate law. The growth rate, *G*, was estimated to be 2.31 ± 0.37, 1.23 ± 0.20, and 2.78 ± 0.64 μm/day in the OPX+CPX, OL+OPX, and LHZ systems, respectively. As an example, we applied the hydration rates of peridotites, which were obtained experimentally, to a reactive-transport model for the convecting mantle wedge hydration. In the case of grain-scale pervasive flow, the mass flux ratio of water fixable in the hanging wall peridotites to that supplied from the dehydrating oceanic lithosphere was calculated to be 2.7 × 10<sup>5</sup> - 1.5 × 10<sup>8</sup>. This indicates that the water is completely fixable in the convecting mantle wedge and carried down to the stability limit of serpentine as soon as it is supplied from the slab. Aqueous fluid may penetrate all the way through the serpentine stable layer and reach the hot center of the mantle wedge only when the fluid migrates via crack-like pathways with a spacing >270-15000 m, which is not consistent with observations of natural serpentinites.

キーワード: 加水反応, 蛇紋石, 流体, 沈み込み帯, マントルウェッジ

Keywords: hydration, serpentine, fluid, subduction zone, mantle wedge



## シリケートガラス中の水の拡散における速度論的同位体効果 Diffusive kinetic isotope fractionation of water in silicate glasses

黒田 みなみ<sup>1\*</sup>; 山本 大貴<sup>1</sup>; 橘 省吾<sup>1</sup>; 中村 美千彦<sup>2</sup>; 奥村 聡<sup>2</sup>; 朝木 美帆<sup>2</sup>; 石橋 充子<sup>1</sup>; 坂本 直哉<sup>1</sup>; 坂本 尚義<sup>1</sup>  
KURODA, Minami<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Daiki<sup>1</sup>; TACHIBANA, Shogo<sup>1</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>2</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>2</sup>;  
ASAKI, Miho<sup>2</sup>; ISHIBASHI, Atsuko<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Naoya<sup>1</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 東北大学理学系大学院地学専攻

<sup>1</sup>Department of Natural History Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Department of Earth Science, Tohoku University

火道内を上昇するマグマ中で過飽和状態となった揮発性成分は、核形成を経て拡散によって、より大きな気泡へと成長する。これらの過程は揮発性成分の溶解度および拡散係数により支配されているため、メルト中の揮発性成分の挙動を理解することは、噴火メカニズムおよびダイナミクスを知る上で重要となる。

火道内での脱ガス過程は、気泡とメルト中に溶解した水との間で行われる同位体交換反応を通じ、水素同位体比に記録されていると考えられている。天然の岩石に含まれる水素同位体比は含水量と相関があり、含水量が低い程同位体比は小さくなり、その減少率は含水量の減少に伴い大きくなる。この傾向は閉鎖系脱ガスから開放系脱ガスへの推移を反映していると考えられるが、現在考えられている脱ガスモデルには、マグマ中の拡散の効果が考慮されていない。拡散による脱ガスは、マグマの上昇に伴う減圧脱ガスと同程度の影響を、脱ガスプロセス全体に与えている可能性があるため、より詳細な脱ガスモデルを組み立てる際には拡散の影響を考える必要がある。さらに、シリケートメルト中の水の拡散では、 $H_2O$  が HDO に比べ拡散しやすいことが考えられるため、速度論的同位体効果が起きていることが予想される。この影響は天然試料の D/H にも記録されている可能性がある。しかし、シリケートメルト中の水の拡散における水素同位体変化は未だ明らかになっていない。本研究では、水素の拡散による同位体分別係数を決定するために、シリカガラスと合成ライオライトガラスに対し、重水素の濃集させた水試料 ( $H/D = 10, 5, 1$ ) を用いた拡散実験を行った。

実験はシリカガラスおよび合成ライオライトガラスを用い、石英管封入による実験 (850 °C, 50 bar) と、東北大学の水熱装置を用いた実験 (650 °C, 50・1000 bar) の二種類を行った。ガラスサンプルは、イオンマイクロプローブ (北海道大学の Cameca ism-6f) で H, D の濃度プロファイルを測定し、拡散係数の決定を行った。実験によって得られた  $H_2O$ , HDO を含む水の拡散係数 (水の濃度で割った値) は、650 °C, 850 °C 共に先行研究 (Davis and Tomozawa, 1995; Berger and Tomozawa, 2003) と矛盾しないことが確かめられている。また、本研究ではシリカガラスについて、拡散に伴う D/H 変化の測定を行った。その結果、D/H が拡散に伴い一度減少し、その後プロファイルに沿って増加することが確認された。D/H が下がる現象は拡散に伴う速度論的同位体効果が影響していることが考えられるが、その後の増加は拡散の同位体効果だけでは説明することができない。この現象は含水量変化に伴う IMF (Instrumental Mass fractionation) の変化によるものだと考えることができるため (Hauri et al., 2006), 今後、水素同位体変化を正確に補正するため、IMF の値を決定することが必要である。

キーワード: 噴火ダイナミクス, ケイ酸塩ガラス, 水, 拡散, 水素同位体, 同位体効果

Keywords: eruption dynamics, silicate glass, water, diffusion, hydrogen isotope, isotopic fractionation

## 超高精度地質圧力計の開発 Development of high-precision geobarometer

高畑 幸平<sup>1\*</sup>; 鳥本 淳司<sup>2</sup>; 山本 順司<sup>2</sup>  
TAKAHATA, Kohei<sup>1\*</sup>; TORIMOTO, Junji<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Junji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻地球惑星システム科学講座, <sup>2</sup> 北海道大学総合博物館  
<sup>1</sup>Earth and Planetary System Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Hokkaido University Museum

マントル捕獲岩は、我々が手にする事が出来るマントル物質の一つである。マントル捕獲岩は由来深度が分からないため、この岩石を用いて地球深部の定量的な議論をするためには、地質圧力計を適用して由来深度を復元することが重要である。

マントル捕獲岩にはスピネル-レルゾライトと呼ばれる、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石、スピネルからなる種類の岩石がある。このスピネルを含む捕獲岩の由来深度は定性的におよそ 25 — 90 km といわれており、最上部マントルから来た岩石である事が推定される。よって、この岩石の由来深度が精密に計りとる事が出来れば、マントル最上部で起きている事象を定量的に議論する事が出来る。

このマントル捕獲岩に従来から適用されてきた地質圧力計として、ざくろ石-斜方輝石圧力計とかんらん石-単斜輝石圧力計がある。しかし、前者はざくろ石の入っていない岩石には適用出来ず、後者は分析誤差や圧力計が持つ温度依存性の影響で圧力誤差が大きすぎる為、定量的な議論が出来ない。つまり、スピネル-レルゾライトを使って最上部マントルの議論をする為には、新たに高精度な地質圧力計を開発する必要がある。

そこで、本研究では CO<sub>2</sub> 流体包有物の残存圧力を圧力指標とした地質圧力計に必要である、ラマン分光法を用いた高精度な密度測定を実現する為のラマン分光分析装置の開発と、その精度の決定を行った。開発に際して、分光器の焦点距離を伸ばし、波数分解能を向上させた新たなラマン分光分析装置を導入した。

サンプルは、ラマンスペクトルの強度が出やすい石英中の CO<sub>2</sub> 流体包有物を使用した。また、このサンプルの包有物中に CO<sub>2</sub> 以外の不純物が含まれるか加熱ラマン分光法で確認した。

測定の結果、新しい装置による密度測定誤差は、 $\pm 0.0025 \text{ g/cm}^3$  (1  $\sigma$ ) となった。この密度誤差は、圧力誤差にする際の輝石温度計の誤差に比べて非常に小さい為、この地質圧力計の誤差は、すなわち、輝石温度計に起因する誤差のみとなる。よって、この圧力計の深さ誤差は、大陸地殻のモホ面深度付近 (30 km) で地質温度が  $1000 \pm 30^\circ \text{ C}$  と見積もられた場合で、 $\pm 900 \text{ m}$  となる。

この精度があれば、最上部マントルで起きている様々な事象を地球物理的な手法よりも高解像度に議論する事が出来る。

キーワード: 流体包有物, 二酸化炭素, ラマン分光法, マントル捕獲岩, 地質圧力計

Keywords: fluid inclusion, carbon dioxide, Raman spectroscopy, mantle xenolith, geobarometer

## 高精度ホウ素同位体比迅速分析法の地下水・火山岩への応用 Applications of rapid and precise $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ isotopic analysis to water and rock samples

谷水 雅治<sup>1\*</sup>; 永石 一弥<sup>2</sup>; 石川 剛志<sup>1</sup>  
TANIMIZU, Masaharu<sup>1\*</sup>; NAGAISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>2</sup> マリンワークジャパン  
<sup>1</sup>Kochi Institute, JAMSTEC, <sup>2</sup>Marine Works Japan Ltd.

Boron isotope ratio is a powerful tracer in the fields of geochemistry, biochemistry, and environmental chemistry. Boron isotope ratios are determined by TIMS or MC-ICP-MS with precisions of better than 0.1 % RSD, but a large inter-lab discrepancy of 0.6 % is still observed for actual carbonate samples (Foster, 2008). Here, we are trying to determine B isotope ratio by MC-ICP-MS with a simple and common analytical techniques using a quartz sample introduction system with a PFA nebulizer, and compared to recently developed precise B isotope ratio analysis techniques by TIMS in positive ion detection mode determined as  $\text{Cs}_2\text{BO}_2^+$  ions with sample amount of <100 ng (Ishikawa and Nagaishi, 2011) and by MC-ICP-MS (Foster, 2008, Louvat et al., 2011).

In this year, our developed B analytical method above for carbonate and water samples are applied to rock samples. Resultant analytical reproducibility (twice standard deviation) was  $\pm 0.04$  % with a consumption of 50 ng B for several geochemical reference rocks issued from GSJ. Their relative differences from the standard were consistent with those determined by the positive TIMS within analytical uncertainty. Current potential B isotopic analysis by MC-ICP-MS will be discussed.

## スラブとともに沈み込む水の移動と全マントル対流への動的効果 Water migration with a subducting slab and the dynamic effects on whole mantle convection

金子 岳郎<sup>1\*</sup>; 中久喜 伴益<sup>1</sup>; 岩森 光<sup>2</sup>  
KANEKO, Takeo<sup>1\*</sup>; NAKAKUKI, Tomoeiki<sup>1</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 海洋研究 開発機構・地球内部物質循環研究分野  
<sup>1</sup>Dept. Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima Univ, <sup>2</sup>Geochemical Evolution Research Program, JAMSTEC

Existence of liquid water is a characteristic of the earth. The water of interior of the Earths involved with the subducting plate reduces density and viscosity of the crustal and mantle rocks. These effects are essential to emerge the solid Earth activity such as, plate tectonics and island arc volcanism. Although the most of subducted water circulates through upper mantle, there is a possibility that portion of the water penetrates into lower mantle. Where does the water migrate? How much does the water affect mantle dynamics through the rock rheology and property? We performed numerical mantle convection simulation to investigate the water cycle and dynamic effects on the whole mantle convection.

In this study, we use the numerical model based on the model (Tagawa et al., 2007; Nakakuki et al., 2010) including the subducting oceanic plate driven dynamically. This model includes migration of water with the plate motion. We consider influences of reducing density and viscosity due to the water on the mantle flow (Karato and Jung, 2003). The maximum water content in the upper mantle is determined using phase relations of the basalt and the peridotite (Iwamori, 2004; 2007). We use various values of the maximum water content of rocks in the lower mantle, because it has been not clearly defined. We also treated the following physical properties as varying parameters: friction coefficient at the plate boundary, amount of the water injection at the trench, density-water dependence coefficient, and maximum water content in the lower mantle. Addition to we calculated dislocation creep by non-newtonian fluid or newtonian fluid.

A part of subducted water associate with the subducting oceanic plate is absorbed into peridotitic rocks and transported to about 150 km deep mantle. After that, dehydration with the serpentine decomposition occurs, and transported to deeper mantle by hot nominally anhydrous minerals (NAMs). The amount of dehydration at the 660 km phase boundary depends on the maximum water content of lower mantle, when the slab penetrates into lower mantle. The ejected water forms thin and high-water-content layer over the 660 km phase transition. As a result, the buoyancy of this layer induces instability, so that hydrated plumes are generated. We propose that this mechanism is important for the water cycle in the upper mantle. On the other hand, considerable portion of the water is transported into lower mantle with subducting slab, although notable water capacity of the lower mantle much smaller than that of the upper mantle, and reach core-mantle boundary. We have not yet observed notable water influence on mantle convection at lowermost mantle because of the small water concentration. Also, the hydrated materials do not rise to surface with hot plumes generated at the core-mantle boundary.

Keywords: mantle convection, plume, transition zone, water transport



## 南アメリカタイタオオフィオライト最上部マントルかんらん岩の構造岩石学的特徴 Microstructural and fabric characteristics of the uppermost mantle peridotites in the Taitao ophiolite, South America

吉田 佳明<sup>1\*</sup>; 道林 克禎<sup>1</sup>; 安間 了<sup>2</sup>

YOSHIDA, Yoshiaki<sup>1\*</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1</sup>; ANMA, Ryo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科地球科学専攻, <sup>2</sup> 筑波大学生命環境系

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Faculty of Life and Environmental Science, University of Tsukuba

The <6Ma young Taitao ophiolite, exposed at the westernmost promontory of the Taitao Peninsula, is located approximately 40 km southeast of the Chile triple junction and consists of a complete sequence of oceanic lithosphere, including ultramafic rocks, gabbros, a dyke complex and volcanoclastic rocks. The ophiolite is surrounded by several contemporaneous granite plutons intruded in between the ophiolite and the Pre-Jurassic metamorphic basement. Several studies have been carried out on the Taitao ophiolite and surrounding granites. Whereas they have focused mostly on petrology and geochemistry, we investigated microstructures and crystal-fabrics of the ultramafic rocks, aiming to understand the origin of the ophiolite. 6 out of 16 ultramafic rocks preserved peridotite textures despite of intense serpentinization and show mostly porphyroclastic textures consisting of pyroxene porphyroclasts with a fine-grained olivine-pyroxene matrix. Their olivine crystal-fabrics shows [100]{0kl} and [100](001) patterns. These indicate that the uppermost mantle section have remarkably been deformed before and/or during the obduction process after their formation beneath the mid-ocean ridge.

Keywords: Taitao ophiolite, mantle section, peridotite, microstructure, olivine fabrics

## ゴジラメガムリオンと中央海嶺メガムリオンから探る海洋リソスフェアの斑れい岩類の岩石学 Gabbroic petrology of oceanic lithosphere: comparison between Godzilla Megamullion and megamullions in mid-ocean ridges

山下 浩之<sup>1\*</sup>; 小原 泰彦<sup>2</sup>; 有馬 眞<sup>3</sup>  
YAMASHITA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; OHARA, Yasuhiko<sup>2</sup>; ARIMA, Makoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県立生命の星・地球博物館, <sup>2</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>3</sup> 横浜国立大学環境情報研究院

<sup>1</sup>Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, <sup>2</sup>Hydrog. & Oceanog. Dept. of Japan, <sup>3</sup>Yokohama National University

フィリピン海南部パレスベラ海盆には、地球上で最大の露出面積を誇るゴジラメガムリオンが長軸 125km、短軸 55km にわたって分布する (Ohara *et al.*, 2001)。ゴジラメガムリオンではマントル物質のかんらん岩をはじめ、下部地殻を構成する斑れい岩が大量に採集されている。著者らの研究により、ゴジラメガムリオンに産出する斑れい岩類の記載岩石学的、鉱物学的特徴が系統的に明らかになった。本発表では、ゴジラメガムリオンの斑れい岩類の特徴を報告すると共に、大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガムリオンに産する斑れい岩類との比較を行う。

ゴジラメガムリオンに産出する斑れい岩類は、Streckeisen (1976) による、斑れい岩類の分類に基づき、トロクトライト、カンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩に区分され、さらに斑れい岩類と漸移的にあるいは独立して産出するトロニウム岩をあわせた7つに区分された。最も採集の点数が多かった斑れい岩類は、輝石ホルンブレンド斑れい岩であった。ゴジラメガムリオンの斑れい岩類は、カンラン石の含有量が低い一方、角閃石の割合が高いことで特徴づけられる。斑れい岩類に含まれる斜長石の An 値は、トロクトライトからカンラン石斑れい岩、斑れい岩、ホルンブレンド輝石斑れい岩、輝石ホルンブレンド斑れい岩、ホルンブレンド斑れい岩、トロニウム岩にかけて連続的に低くなる傾向が見られた。同様に単斜輝石やカンラン石の XMg 値も連続的に低くなる傾向が見られたことから、ゴジラメガムリオンの斑れい岩類はこの順番に初生的であると考えられる。

ゴジラメガムリオン内における斑れい岩類の分布状況には偏りが見られる。すなわち最も初生的なトロクトライトは活動初期 (13Ma; Tani *et al.*, 2011) でのみ見られ、より分化したホルンブレンド斑れい岩やトロニウム岩は活動後期 (8.7Ma; Tani *et al.*, 2011) で最も多く見られた。ただし、活動最末期 (8.4Ma; Tani *et al.*, 2011) では再びホルンブレンド輝石斑れい岩などのやや初生的な斑れい岩類を産した。この特徴は斜長石の An 値でも見られ、同岩石種間の An 値は活動初期が最も高く、活動中期から活動後期へと徐々に低くなり、活動最末期で再び高くなる傾向が見られた。これらの結果から、活動初期ではメルト量が多く、ゴジラメガムリオンの形成が進むにつれメルト量が減少し、最末期に再びメルト量が増えるというモデルが考えられる。この結果は、かんらん岩の岩石学的研究結果 (Snow *et al.*, in preparation) と整合的である。

大西洋中央海嶺および南西インド洋中央海嶺のメガムリオンに産する斑れい岩類と比較すると、ゴジラメガムリオンに産する斑れい岩類は、カンラン石を含む斑れい岩類に乏しく、角閃石を含む斑れい岩類の割合が高いことで特徴づけられる。そのため、トロクトライトやカンラン石斑れい岩割合が極めて低いのが特徴的である。

キーワード: パレスベラ海盆, ゴジラメガムリオン, 斑れい岩, 海洋コアコンプレックス

Keywords: Parece Vela Basin, Godzilla Megamullion, gabbro, Oceanic core complex

## フィリピン海を伝播する Po/So 波 The Po/So waves propagating in the Philippine Sea

志藤 あずさ<sup>1\*</sup>; 末次 大輔<sup>2</sup>; 古村 孝志<sup>3</sup>  
SHITO, Azusa<sup>1\*</sup>; SUETSUGU, Daisuke<sup>2</sup>; FURUMURA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Institute for Geothermal Science, Kyoto University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The Po/So waves which have high-frequency content, large amplitude, and long-duration propagate for large distance (up to 3000 km) across the oceanic lithosphere. In our previous study, we analyzed Po/So waves from deep-focus earthquakes occurring in the subducting slab beneath Japan, recorded by broadband ocean bottom seismometers (BBOBSs) at northwestern Pacific [Shito et al., 2013]. We demonstrated that the Po/So waves are developed by multiple forward scattering of P and S waves due to laterally elongated heterogeneities in both the subducting and laterally extending oceanic lithosphere. Following this study, the question when and where do the small-scale heterogeneities form in the oceanic lithosphere comes about. In order to answer this question, the Po/So waves in younger oceanic lithosphere need to be analyzed. Therefore in this study, we investigate the Po/So waves in the Philippine Sea plate (15-60 Ma), which is much younger than the Pacific Plate (130 Ma).

The Philippine Sea is one of the marginal seas of the Pacific Ocean. It is fundamentally divided into two regions bounded by the Kyushu-Palau Ridge. It is thought that these two regions were formed in different episodes of back-arc spreading and that western part (45-60 Ma) is older than eastern part (15-30 Ma) [e.g., Seno and Maruyama, 1984]. The comparison of Po/So waves propagation in the different ages of the oceanic lithosphere is expected to reveal the origin of the small-scale heterogeneities.

Seismological observations using BBOBSs was conducted in the Philippine Sea from 2005 to 2008, and high-quality Po/So waves from earthquakes in subducting Philippine Sea plate were recorded very clearly. The findings from the observed Po/So waves in the Philippine Sea plate are summarized as follows. (1) The Po/So waves propagate much effectively in western part than eastern part of the Philippine Sea. (2) The Po/So waves propagate even in youngest oceanic lithosphere (15 Ma) near the past spreading center of the Shikoku Basin.

In order to reveal the structure of the oceanic lithosphere and propagation efficiency in the Po/So waves, we performed numerical FDM simulations of 2-D seismic wave propagation in a realistic oceanic lithosphere model. The model is developed in the same procedure as the case of the Pacific plate [Shito et al., 2013]. In the oceanic lithosphere, we introduce laterally elongated small-scale heterogeneities, which are described by von Karman type stochastic random distribution function. Because the thickness of the oceanic lithosphere is considered to correlate with the age [e.g., Kawakatsu, et al. 2009], we vary the thickness of the oceanic lithosphere from 80 km to 20 km. To evaluate the fit of the computed waveforms to the data, we use the spatial attenuation of the seismic wave energy along the record section (up to 1500 km). The seismic wave energy is defined as integrated squares of amplitudes in a certain time window (25 s from the Po/So wave onset). The model with the thickness of the oceanic lithosphere of 60 km and 30 km successfully explain the spatial attenuation of the Po/So waves record section observed at western and eastern parts of the Philippine Sea, respectively. The thicknesses are consistent with those obtained by previous studies [Kawakatsu et al., 2009]

This result suggests that the oceanic lithosphere including small-scale heterogeneities grow as it ages and develop large-amplitude and long-duration of high-frequency Po/So waves. The small-scale heterogeneities may form at the bottom of the lithosphere as it cools. They suggest that small-scale melts in the asthenosphere are frozen and attached at the bottom of the lithosphere, which remain even after the lithosphere is subducted into the mantle.

Keywords: Po/So waves, Philippine Sea plate, oceanic lithosphere

## 中央海嶺のかんらん岩試料の不均質性 Multi-scale heterogeneity of abyssal peridotite

田村 明弘<sup>1\*</sup>; 森下 知晃<sup>1</sup>; 荒井 章司<sup>1</sup>  
TAMURA, Akihiro<sup>1\*</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>1</sup>; ARAI, Shoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学 地球学教室

<sup>1</sup>Earth Sciences, Kanazawa University

Petrological studies of peridotite have increasingly revealed the origin of magma as well as materials and processes of Earth interior. Although we now only access to the interior indirectly, we can obtain the mantle-derived material brought by magma transporter or by large tectonic reconstruction of the earth surface. At the ocean floor near the mid-ocean ridge spreading center, where the deep seated rock is exposed along spreading axis or fracture zone, abyssal peridotite is collected. The abyssal peridotite studies significantly contribute not only to understanding of the formation of oceanic lithosphere but also to development of analytical way for the mantle material. In mineralogical and geochemical approaches, chromian spinel is a good indicator for the origin; for example, the spinel Cr# reflects a partial melting degree of the upper mantle material (e.g., Dick and Bullen, 1984; Arai, 1987). Trace-element compositions of clinopyroxene allow us to discuss the melting process quantitatively (e.g., Johnson et al., 1990). Recently, further discussions can be available by using ultra-trace elements and PGE isotopes (e.g., Harvey et al., 2006; Ishikawa, 2012).

Several petrological studies of abyssal peridotite samples have demonstrated "regional-scale" heterogeneity of the upper mantle along Mid-Atlantic Ridge based on their spinel Cr# (e.g., Dick et al, 1984; Michael and Bonatti, 1985). In "Global-scope" differences between Atlantic, Indian and Pacific oceans, Niu and Hekinian (1997) proposed that the spinel Cr# of abyssal peridotite is dependent on spreading rate. Contrasting to such a heterogeneity, Ghose et al. (1996) and Dick et al. (2010) showed that the compositional variation of the abyssal peridotite is controlled by local structures at the mid-ocean ridge: for example, spreading axis, fracture zone, abyssal plane and oceanic core complex. Geochemical heterogeneity of each abyssal peridotite sample is recently discussed in aspects of magmatic event during or after partial melting stage (Tamura et al., 2008; Warren and Shimizu, 2010).

In our presentation, to review petrological characteristics of abyssal peridotite, we will demonstrate our compiling data set focused on relationship between their spinel Cr# and sample localities, such as ocean floor structures at the mid-ocean ridge. The example of abyssal peridotite sample heterogeneity are also discussed. Then, we would like to discuss the factor and significance of compositional variation of abyssal peridotite.

キーワード: 海洋底かんらん岩, スピネル組成, 海嶺構造  
Keywords: abyssal peridotite, spinel, ocean floor



## 南西インド海嶺中央におけるマントルから地殻の不均質(1) -上部マントル- Heterogeneity from mantle to crust at the central Southwest Indian Ridge (1) -Upper mantle-

松野 哲男<sup>1\*</sup>; 島 伸和<sup>2</sup>; 佐藤 暢<sup>3</sup>; 佐藤 太一<sup>4</sup>; 仙田 量子<sup>5</sup>; 町田 嗣樹<sup>6</sup>; 中村 謙太郎<sup>5</sup>; 森下 知晃<sup>7</sup>; 水間 恵子<sup>2</sup>; 野木 義史<sup>1</sup>; 沖野 郷子<sup>8</sup>

MATSUNO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; SEAMA, Nobukazu<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>3</sup>; SATO, Taichi<sup>4</sup>; SENDA, Ryoko<sup>5</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>6</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>5</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>7</sup>; MIZUMA, Keiko<sup>2</sup>; NOGI, Yoshifumi<sup>1</sup>; OKINO, Kyoko<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 神戸大学, <sup>3</sup> 専修大学, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所, <sup>5</sup> 海洋研究開発機構, <sup>6</sup> 早稲田大学, <sup>7</sup> 金沢大学, <sup>8</sup> 東京大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Kobe University, <sup>3</sup>Senshu University, <sup>4</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>5</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>6</sup>Waseda University, <sup>7</sup>Kanazawa University, <sup>8</sup>University of Tokyo

Mantle is heterogeneous in terms of geophysical (e.g., bathymetry, geomagnetics, and gravity) and geological (e.g., petrology and geochemistry) aspects. Because heterogeneity is enhanced at slow spreading ridge, the ultra-slow spreading Southwest Indian Ridge (SWIR) is suitable for understanding the heterogeneity. We conducted geophysical and geological investigations since 2007 at the segment along the central SWIR between 35°E and 40°E, where the ridge segment is close to the Marion hotspot.

Serpentinised mantle peridotites occurring as clasts in the conglomerate were dredged from a topographic high within the Prince Edward fracture zone at 35°E. A marine electromagnetic experiment was conducted along a 110 km transect across a subsegment at 37°E to reveal an electrical resistivity structure of the upper mantle.

The peridotites are considered to have originally been lherzolite based on petrographic and mineral chemical composition analyses. Chemical compositions of spinel (Cr# and Mg#) in the peridotites suggest that the peridotites have undergone moderate partial melting without enhancement of melting by the hotspot regardless of proximity of the dredge site to the Marion hotspot. Light rare earth elements of clinopyroxene are more depleted than were previously reported for SWIR peridotites, suggesting that the peridotites have undergone little to no metasomatism of a melt-mantle interaction. Osmium isotope ratios are highly depleted, resulting in that a model age of rhenium depletion ( $T_{RD}$ ) is 1 billion years. These results suggest that the dredged peridotites have not been enriched after the last melt extraction event 1 billion years ago, preserve their initial depleted compositions without hotspot effects, and show the presence of a refractory mantle domain under the central SWIR.

A preliminary 2-D electrical resistivity structure of the upper mantle down to 200 km depth does not show a remarkable conductive melting region beneath the ridge axis and a more conductive asthenospheric mantle than those observed at other mid-ocean ridges. The resistivity model suggests that the presence of the Marion hotspot does not result in enhancement of melt production beneath the ridge and enrichment of conductors like water in the upper mantle at present.

The result of this study suggests that the source mantle contain ancient, refractory, and depleted portion. This mantle may be a part of the depleted mantle prevailed under the Marion Rise, which was proposed by Zhou and Dick (2013) and may be supported by the absence of slow velocity anomalies around the Marion hotspot in upper mantle seismic tomography images (e.g., Zhao, 2007).

## 南西インド海嶺中央におけるマントルから地殻の不均質(2) -地殻- Heterogeneity from mantle to crust at the central Southwest Indian Ridge (2) -Crust-

佐藤 暢<sup>1\*</sup>; 佐藤 太一<sup>2</sup>; 町田 嗣樹<sup>3</sup>; 仙田 量子<sup>4</sup>; 松野 哲男<sup>8</sup>; 島 伸和<sup>5</sup>; 中村 謙太郎<sup>6</sup>; 森下 知晃<sup>7</sup>; 野木 義史<sup>8</sup>; 沖野 郷子<sup>9</sup>

SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; SATO, Taichi<sup>2</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>3</sup>; SENDA, Ryoko<sup>4</sup>; MATSUNO, Tetsuo<sup>8</sup>; SEAMA, Nobukazu<sup>5</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>6</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>7</sup>; NOGI, Yoshifumi<sup>8</sup>; OKINO, Kyoko<sup>9</sup>

<sup>1</sup> 専修大学, <sup>2</sup> 産総研, <sup>3</sup> 早稲田大学, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 神戸大学, <sup>6</sup> 東京大学工学部, <sup>7</sup> 金沢大学, <sup>8</sup> 国立極地研究所, <sup>9</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Senshu Univ., <sup>2</sup>AIST, <sup>3</sup>Waseda Univ., <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>Kobe Univ., <sup>6</sup>Dept. System Innovation, Univ. of Tokyo, <sup>7</sup>Kanazawa Univ., <sup>8</sup>NIPR, <sup>9</sup>AORI, Univ. of Tokyo

Mantle is heterogeneous in terms of geophysical (e.g., bathymetry, geomagnetics, and gravity) and geological (e.g., petrology and geochemistry) aspects. Because heterogeneity is enhanced at slow spreading ridge, the ultra-slow spreading Southwest Indian ridge is suitable for understanding the heterogeneity. We conducted geophysical and geological investigations since 2007 at the segment along the central Southwest Indian Ridge (SWIR) between 35E and 40E, where the ridge segment is close to the Marion hotspot.

Recent investigations of topography and geophysics along the central Southwest Indian ridge between 35E and 40E (Sato, T. et al., 2013) classify the segment between the Prince Edward and Eric Simpson fracture zones as four subsegments: PE-1, PE-2, PE-3, and PE-4 from west to east. A long oblique axial valley (NTD-1) is recognized between PE-1 and PE-2. Geochemical and isotopic compositions of MORB samples from these subsegments consist with previously reported MORB and/or SWIR basalts. However, small scale geochemical and isotopic heterogeneity are recognized in these samples. Sato, T. et al. (2013) considered that strong melt-focusing could be principle process to produce volcanic and low volcanic subsegment rather than the effect of proximity to the Marion hotspot. Continuous seafloor morphology and isochrons over off-axis areas of segment PE-1 and NTD-1 suggest that PE-1 shortened after the C2An chron, indicating the magmatic process has changed for several million years.

Among MORB from the subsegments, PE-1 and NTD-1, geochemically enriched sample (e.g. those with  $La/Sm > 1$ ) are enriched in isotope (higher Sr and lower Nd), suggesting that enrichment is due to source enrichment rather than smaller degree of melting of the homogeneous source mantle. Although geochemical and isotopic compositions could be explained by the mixture of depleted MORB source and the Marion components, contribution of the Marion component is limited only in the eastern part of PE-1 and NTD-1 subsegments. Therefore, it is reasonable to consider that source mantle beneath eastern part of PE-1 segment contains the enriched Marion components rather than direct contribution from Marion hotspot. Degree of enrichment (i.e. amount of enriched component) is higher beneath the present eastern part of PE-1 subsegment.

Sato, T. et al. (2013) pointed out that the melt supply center (tip of V-shaped bathymetric structure) between segment PE-1 and NTD-1 has migrated westward. It means that the enriched portion in the source mantle beneath PE-1 and NTD-1 subsegments has migrated westward. Melting of enriched, probably preferentially melting, components induced the strong melt-focusing process to form the V-shape bathymetric structure between PE-1 and NTD-1. This constraints the spatial scale and type of enriched component in depleted mantle.

### References

Sato, T., K. Okino, H. Sato, M. Mizuno, T. Hanyu, and N. Seama (2013), Magmatic activities on the Southwest Indian Ridge between 35E and 40E, the closest segment to the Marion hotspot, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 5286?5307, doi:10.1002/2013GC004814.

Keywords: heterogeneity, mantle, crust, MORB, Southwest Indian Ridge

## 中央インド洋海嶺ヨコニワ熱水域における高磁化帯の起源 Origin of Magnetization High at the Yokoniwa Hydrothermal Vent Fields, the Central Indian Ridge

藤井 昌和<sup>1\*</sup>; 沖野 郷子<sup>1</sup>; 佐藤 太一<sup>2</sup>; 佐藤 暢<sup>3</sup>; 中村 謙太郎<sup>4</sup>

FUJII, Masakazu<sup>1\*</sup>; OKINO, Kyoko<sup>1</sup>; SATO, Taichi<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>3</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 専修大学, <sup>4</sup> 東京大学

<sup>1</sup>AORI, University of Tokyo, <sup>2</sup>Geological survey of Japan, AIST, <sup>3</sup>Senshu University, <sup>4</sup>University of Tokyo

Measurement of near bottom magnetic anomalies is an effective method to reveal the spatial extent of hydrothermal alteration zone and to find buried hydrothermal vent fields because hydrothermal alteration processes can change crustal magnetization by destruction and creation of magnetic minerals. In the Yokoniwa vent field (YVF), which is located at the top of the non-transform offset massif, called the Yokoniwa Rise, in the southernmost part of the Central Indian Ridge, a high magnetization zone was discovered by AUV r2D4 in 2009. Basalts and ultramafic rocks were found around the YVF, however the origin of positive magnetization and the relationships between high magnetization and hydrothermal activity are remains to be investigated.

In order to constrain the origin of magnetic source near the YVF, we conducted deep-sea geological observation and magnetic measurements using submersible Shinkai 6500 during the R/V Yokosuka cruises, YK09-13 and YK13-03. Vector geomagnetic field were successfully obtained along the all dive tracks at an altitude of ~10 m. The distribution of crustal magnetization is estimated by vertical and horizontal components of magnetic anomalies using the 2-dimensional forward modeling technique and frequency analysis.

In the southern slope of the Yokoniwa Rise, serpentized-peridotites were discovered and absolute magnetization shows entirely low (~6 A/m). On the other hand, just around the YVF, hydrothermal sulfide deposits, tiny dead chimneys, shimmering and talc were observed and absolute magnetization shows relatively high (9 A/m). This magnetization contrast between the YVF and the surrounding area may be attributed to the difference in amount of magnetite, controlled by the degree and the temperature of serpentization. One of the serpentized-peridotite recovered during the cruises showed large amount of magnetite and high natural remanent magnetization. However, the highest absolute magnetization (20 A/m) was discovered at pillow basalt area with thin sediment just ~700 m away from the YVF, implying recent off-axis volcanic activity. Therefore basaltic intrusion beneath the YVF is also possible for the origin of high magnetization. In addition, magnetic iron sulfide (pyrrhotite) grown during hydrothermal circulation, which is proposed at the Rainbow hydrothermal vent field, is also possible.

**Consequently, we proposed three possibilities for the origin of high magnetization at the YVF; serpentized peridotites with high temperature hydrothermal alteration, basaltic intrusion bodies, and pyrrhotites concentration. All of these hypotheses are related to hydrothermal activity. For the further inspection, recovering subseafloor rocks and inspection of rock magnetic properties are absolutely necessary.**

キーワード: 海底熱水系, 中央海嶺, 超塩基性岩, 深海磁気異常, オフアクシス火成活動, 海洋性地殻

Keywords: Seafloor hydrothermal activity, Mid-ocean ridge, Ultramafic rock, Deepsea magnetic anomaly, Off-axis volcanism, Oceani lithosphere

## 大西洋中央海嶺北緯36度レインボー地域における3次元地震波速度構造 Three-dimensional seismic structure of the Rainbow area, Mid-Atlantic Ridge 36 degree N

新井 隆太<sup>1\*</sup>; ダン ロバート<sup>1</sup>; キャナレス パブロ<sup>2</sup>; ソン ロバート<sup>2</sup>  
ARAI, Ryuta<sup>1\*</sup>; DUNN, Robert<sup>1</sup>; CANALES, Pablo<sup>2</sup>; SOHN, Robert<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ハワイ大学, <sup>2</sup> ウッズホール海洋研究所

<sup>1</sup>University of Hawaii, <sup>2</sup>Woods Hole Oceanographic Institution

Oceanic lithosphere formed along slow-spreading mid-ocean ridges is structurally and compositionally heterogeneous due to spatial and temporal variations in tectonic extension, magmatic accretion, and mantle temperature and composition. While mid-ocean ridges with greater magma supply host a greater abundance of hydrothermal systems, the relative roles of magmatic input, heat advection and faulting in controlling ridge structures are still poorly understood. These are particularly important to understanding formation and evolution of oceanic core complexes where ultramafic-hosted lithologies are exhumed at the seafloor by long-lived detachment faulting. The MARINER (Mid-Atlantic Ridge INtegrated Experiments at Rainbow) seismic and geophysical mapping experiment was designed to examine the relationship between tectonic rifting, heat/melt supply, and oceanic core complex formation at a non-transform offset of the Mid-Atlantic Ridge, 36° 14' N, the site of the ultramafic-hosted Rainbow hydrothermal system. Using the seismic refraction data from this experiment, we constructed three-dimensional tomographic images of the crust and upper mantle around the Rainbow area. The seismic velocity images reveal undulations in crustal thickness across the ultramafic Rainbow massif, indicating temporal variations in melt supply, magmatic processes, and crustal construction. Previous studies suggest that a current heat source for the vents, which probably arises from a magmatic body, is required just beneath the hydrothermal vent, but the tomography does not detect a low-velocity anomaly indicating a significant magmatic system or high-temperature region beneath the Rainbow vent site. The only candidate region for high-temperatures and perhaps melt at shallow levels is much further to the south, and located roughly beneath the central valley of the spreading center. At the Rainbow massif, where mantle rocks have been recovered by direct sampling, mantle velocities near the seafloor are significantly reduced to ~ 5 km/s. This velocity reduction implies that an active hydrothermal circulation system altered the mantle via recharge and discharge of seawater.

Keywords: Slow-spreading ridge, Oceanic core complex, Rainbow hydrothermal field, Mantle alteration, Hydrothermal circulation, Seismic tomography



## 古い海洋上部マントルの温度構造：北西太平洋における電気伝導度構造イメージングからの制約 Thermal structure of old oceanic upper mantle: Constraints from electrical conductivity imaging in the NW Pacific

馬場 聖至<sup>1\*</sup>; 多田 訓子<sup>2</sup>; liang pengfei<sup>1</sup>; Zhang Luolei<sup>1</sup>; 清水 久芳<sup>1</sup>; 歌田 久司<sup>1</sup>  
BABA, Kiyoshi<sup>1\*</sup>; TADA, Noriko<sup>2</sup>; LIANG, Pengfei<sup>1</sup>; ZHANG, Luolei<sup>1</sup>; SHIMIZU, Hisayoshi<sup>1</sup>; UTADA, Hisashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

太平洋プレートの北西部は、海洋底年代が100Ma以上と非常に古い。このような古い海洋底の水深や熱流量などは、ある一定の厚さのプレートが年代とともに冷却されるモデルで説明される（例えば、Parsons & Sclater, 1977; Stein & Stein, 1992）。上部マントルの電気伝導度構造も第一義的には温度構造を反映するので、浅部の低電気伝導度層とその下の高電気伝導度領域という典型的な特徴を持つ。しかしながら、我々が推定した北西太平洋域の上部マントル電気伝導度構造は、必ずしも単純・均一なプレート冷却モデルだけでは説明できないことを示唆している。

我々は、2010年より北西太平洋シャツキー海台の北西（A 海域）および南東（B 海域）において、海底電磁気観測を行っている。観測は現在も一部継続中であるが、昨年までに取得されたデータを用いてマグネトテルリック法に基づく電磁場応答関数の推定と1次元電気伝導度構造インバージョン解析を行った結果、両海域の上部マントル1次元電気伝導度構造を推定することができた。ここでは、これらに先行プロジェクトで得られた小笠原沖太平洋域（C 海域）の電気伝導度構造（Baba et al., 2010）と併せた、3つの海域の電気伝導度構造モデルを比較する。A、B、C 海域の平均的な海洋底年代は、それぞれ約130、140、147Maである。プレート冷却モデルに基づく、これらの年代差による温度構造の違いは非常に小さい。ところが電気伝導度構造モデルは、高電気伝導度領域が現われる深さ（あるいは低電気伝導度層の厚さ）が海域によって有意に異なる。0.01S/mよりも高電気伝導度になる深さに注目すると、A 海域では約80km、B 海域では約110km、C 海域では約200kmである。これらの差は、単一のプレート冷却モデルの年代差では説明することが難しい。

3 海域での電気伝導度構造モデルは、少なくとも個々の観測範囲よりも大きなスケールで横方向の不均質構造があることを示す。その差は、単一のプレート冷却モデルに基づく海底年代の差では説明できないので、年代以外で横方向不均質をつくる要因を考える必要がある。

キーワード: 海洋上部マントル, 北西太平洋, マグネトテルリック法, 電気伝導度構造, 温度構造

Keywords: oceanic upper mantle, northwestern Pacific, magnetotellurics, electrical conductivity structure, thermal structure

## 太平洋地域の海洋地殻より採取されたトロクトライトの白金族元素とOs同位体比 PGE abundances and Os isotope ratios of troctolites from pacific oceanic lithosphere

仙田 量子<sup>1\*</sup>; 石川 晃<sup>2</sup>; 森下 知晃<sup>3</sup>; 鈴木 勝彦<sup>1</sup>; 石井 輝秋<sup>4</sup>  
SENDA, Ryoko<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Akira<sup>2</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>3</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>1</sup>; ISHII, Teruaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学大学院総合文化研究科, <sup>3</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>4</sup> 公益財団法人 深田地質研究所

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo, <sup>3</sup>School of Natural System, College of Science and Technology, Kanazawa University, <sup>4</sup>Fukuda Geological Institute

The structure of oceanic lithosphere becomes much clear in these days. Troctolite is a kind of gabbro, mainly consisting of olivine and calcic plagioclase with minor pyroxene, found in oceanic lithosphere. Melt-rock interactions at mantle-crust transition zone are believed to play a main role for troctolite formation. Troctolites are locally found at Atlantis Massif oceanic core complex, Mid Atlantic Ridge 30° N (Blackman et al., 2006), at Kane Megamullion, Mid Atlantic Ridge 23° N (Dick et al., 2008; 2010), at Uraniwa Hills, Central Indidan Ridge (Nakamura et al., 2009), and at Godzilla Megamullion, Parece Vela Basin of the Philippine Sea (Sanfilippo et al., 2013). They also occurred as sections of the oceanic lithosphere in ophiolites and show similarity to lower crust sections from slow and ultra-slow spreading ridges (e.g., Herbert et al., 1989; Sanfilippo and Tribuzio, 2013). The formation process of the troctolites is in debate. From the ophiolite studies, troctolites were formed as cumulates from primitive basalts in a closed system (Bezzi and Piccardo, 1970; 1971; Borghini and Rampone, 2007). Alternatively, troctolites were the results of a substantial amount of mantle olivine incorporated into the lower oceanic crust (Suhr et al., 2008; Drouin et al., 2009; 2010) based on the studies of oceanic core complex.

Troctolites were also found in the drilled core at site 895 of ODP Leg 147 in Hess Deep, located at a triple junction between EPR and Cocos-Nazca plate boundary. Hess Deep is a small rift with intra-rift ridges, where deep-seated rocks probably formed at EPR are exposed (Francheteau et al., 1990; 1992). Ultramafic and related rocks were expected to be found at the site in fast-spreading ridge system and sequences of dunite, harzburgite, troctolite, and gabbro were actually drilled (Allan and Dick, 1996; Dick and Natland, 1996; Arai and Matsukage, 1996). Troctolite appears to be transitional from dunite to olivine gabbro (Arai and Matsukage, 1998).

Major, trace and platinum group element (PGE) abundances and Os isotope ratios of troctolites from Holes 895C, 895D and 895E were newly measured using XRF, ICP-MS, and TIMS. The samples are clearly divided in two groups by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO and NiO. Prichard et al. (1996) reported the PGE and trace element abundances of the ultramafic rocks from Holes 895. Their PGE concentrations of the troctolites were in a similar range to harzburgites and dunites from the same sites and Pt and Pd are enriched in some troctolites. They also found platinum-group alloys and base metals in troctolites. New data set with Os isotope ratios possibly make constraints on the forming process of troctolites under the oceanic ridge.

キーワード: トロクトライト, オスミウム同位体組成, 白金族元素存在度, 海洋プレート  
Keywords: troctolite, Os isotope ratio, PGE abundance, oceanic lithosphere

**海洋底トロクトライトの成因：メルトーマンタル反応によるモホ面の形成**  
**The origin for the olivine-rich troctolites from the oceanic lithosphere: remnants of a reactive MOHO**

太陽降穂 荒潮<sup>1\*</sup>; 森下知晃<sup>2</sup>; 原香織<sup>2</sup>; 田村明弘<sup>2</sup>; 荒井章司<sup>2</sup>  
SANFILIPPO, Alessio<sup>1\*</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>2</sup>; HARA, Kaori<sup>2</sup>; TAMURA, Akihiro<sup>2</sup>; ARAI, Shoji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>パビア大学, 金沢大学, <sup>2</sup>金沢大学

<sup>1</sup>University of Pavia, Kanazawa University, <sup>2</sup>Kanazawa University

近年、海洋底からトロクトライトが多く採取されている。本研究は、これらのトロクトライトの記載岩石学的特徴を明らかにし、相互を比較することでトロクトライトの成因について検討する。また、このトロクトライトの成因と海洋プレートのモホ面形成との関連性について言及したい。

キーワード: 海洋底, かんらん岩, トロクトライト, メルトとマンタル反応, モホ  
Keywords: Ocean floor, Peridotite, Troctolite, Melt-Mantle reaction, Moho

多結晶体の非弾性特性の実験的研究：上部マントル地震波構造の定量的解釈を目指して  
Experimental study of anelasticity of a polycrystalline material for seismological application

武井 康子<sup>1\*</sup>; 山内 初希<sup>1</sup>; 柄澤 史也<sup>2</sup>  
TAKEI, Yasuko<sup>1\*</sup>; YAMAUCHI, Hatsuki<sup>1</sup>; KARASAWA, Fumiya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup>Yahoo, Japan

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Yahoo, Japan

海洋プレートの地震波速度構造や減衰構造から、その温度構造、化学構造、メルト分布、粒径分布などの情報を取り出す際に必要となるのが、岩石の非弾性特性である。この非弾性特性には未知の部分が多いため、アセノスフェアの低速度の原因が温度か水かメルトかといった基本的な問いにも答えることができない。岩石試料の非弾性特性を調べるためには、1000℃以上の高温で、しかも地震波に相当するような低周波数(1-0.001 Hz)と歪み振幅( $<10^{-6}$ )で弾性定数と減衰を測定する必要がある。このような実験は難しいため、温度や粒径依存性を系統的に調べたデータは、I. Jackson 達のグループが発表した一連のデータがあるのみで、実験データの不足からスケール則やメカニズムの解明がなかなか進まない。私達は、データの不足を補うために、岩石のアナログ物質として有機物(ボルネオール)の多結晶体を用いた実験を行っている。岩石よりも融点の低いアナログ物質を使うことで、常温近傍で実験を行うことができ、弾性定数と減衰を約6桁に及ぶ広周波数帯域で精度良く測定できるため、個々の物質に依存しない多結晶体に普遍的な物理メカニズムの解明に有効である。

これまでの研究で、多結晶体の非弾性特性と粘性に密接な関係があることを明らかにし、マックスウエル周波数  $f_m$  を用いた非弾性のスケール則、 $Q = Q(f/f_m)$  を提案した (McCarthy, Takei, and Hiraga, 2011, JGR)。Priestley and McKenzie (2013, EPSL) は、この非弾性モデルを用いて、グローバルな横波速度構造から、海洋プレートおよび陸のプレートの温度構造、粘性構造、減衰構造を求めた。しかし、McCarthy et al (2011) のデータの規格化周波数は、マントルにおける地震波の規格化周波数 ( $10^6 < f/f_m < 10^9$ ) に比べて有意に低いため、より高い規格化周波数帯域での実験データを取得して、このスケール則の地震波への適用可能性を調べることが重要な課題となった。

私達は、岩石アナログ物質の非弾性をより低温・高周波で測定し、規格化周波数の高い帯域でのデータを取得している。これまでの結果から、規格化周波数が  $10^4$  以上の帯域(地震波帯域を含む)での非弾性の振る舞いは、マックスウエル周波数  $f_m$  による単純なスケール則のみではとらえきれないことが分かった。特に、不純物による多結晶体の非弾性緩和の促進が、マックスウエルスケール則からの予想よりも(つまり、粘性への影響から予想されるよりも)はるかに大きいことが分かった。不純物には、多結晶体の融点を大きく低下させる働きがあるため、この実験結果は、多結晶体とその融点に近づいたことで非弾性緩和が促進されたとも解釈できる。上部マントルでは岩石が融点に近い温度にあり、このような場所での地震波速度構造の解釈には、融点近傍での多結晶体の非弾性特性を理解することが重要になると考えている。

キーワード: 非弾性, 多結晶体

Keywords: anelasticity, polycrystalline material



## Seismic structural changes in the incoming oceanic plate beneath the well-developed horst and grabens Seismic structural changes in the incoming oceanic plate beneath the well-developed horst and grabens

藤江 剛<sup>1\*</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>; 山田 知朗<sup>2</sup>  
FUJIE, Gou<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo

近年の海溝周辺の各種構造研究の進展から、海洋プレートが海溝から沈み込む直前にプレート折れ曲り断層が発生する海域では、海洋プレート構造の変質が進んでいることが明らかになってきた。その変質は、折れ曲り断層の発達に伴う亀裂の増加と、水の浸透によるものと解釈されている。しかし、変質がどの深度まで到達しているのか、水の供給源や浸透メカニズムはどのようになっているかなど未解明な課題が数多く残っている。たとえば、水の供給源としては第一には海が考えられているが、折れ曲り断層が海底面には到達していない場所でも海洋地殻内の水量が増加しており、堆積層の底から堆積層基盤に生じた微小な亀裂を通して水が海洋地殻内に浸透している可能性も指摘されている。

日本海溝域や千島海溝域は、プレート折れ曲り断層に伴いホルスト・グラベン構造が世界でもっとも発達している海域の一つであり、沈み込む直前の海洋プレート構造の変質過程を研究するのに適した海域である。しかし、水深が大きくホルスト・グラベンが観測される場所には従来型の海底地震計を設置できないため、これまではもっとも構造変質が進んでいると考えられる海溝軸周辺の調査が実施できていなかった。

そこで、2013年夏、我々は大深度でも調査可能な海底地震計を用いて三陸沖で日本海溝を横切る構造調査を実施した。その結果、海溝軸周辺では海洋マントルまで構造変質が進んでいることを確認できた。さらに、これまでの調査では堆積層内を鉛直方向に伝播した波しか観測できていなかったが、グラベンの中にも海底地震計を設置したことで、堆積層内を横方向に伝播したと解釈されるフェーズを観測することに成功し、堆積層内の滞水構造について新たな知見を得ることができた。その結果は、堆積層の下部が海洋地殻への水の供給源となり得ることを示唆するものである。

キーワード: 海洋プレート, 海溝, アウターライズ, 折れ曲り断層, 含水, 海底地震計

Keywords: oceanic plate, trench-outer rise region, bending-related faults, seismic structure, water contents, ocean bottom seismometer

## ABISMOがマリアナ海溝チャレンジャー海淵で採取した堆積物コアのマフィック鉱物

### Mafic minerals within a sediment core sampled by ABISMO in Mariana Trench

道林 克禎<sup>1\*</sup>; 照峰 直伸<sup>2</sup>; 針金 由美子<sup>3</sup>; 布浦 拓郎<sup>4</sup>; 上原 茂樹<sup>1</sup>; 小原 泰彦<sup>5</sup>; 宮崎 淳一<sup>4</sup>; 高井 研<sup>4</sup>  
MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1\*</sup>; TERUMINE, Naonobu<sup>2</sup>; HARIGANE, Yumiko<sup>3</sup>; NUNOURA, Takuro<sup>4</sup>; UEHARA, Shigeki<sup>1</sup>  
; OHARA, Yasuhiko<sup>5</sup>; MIYAZAKI, Junichi<sup>4</sup>; TAKAI, Ken<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科地球科学専攻, <sup>2</sup> 静岡大学理学部地球科学科, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 海上保安庁海洋情報部

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>3</sup>AIST/GSJ, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>Hydrographic and Oceanographic Department of Japan

Mariana Trench is one of the deepest oceans in the world more than 10,000 m depth. Although the mantle section outcrops along the land-side slope of the southern Mariana Trench, the studied depth so far is approximately shallower than 7,000 m and therefore few geological information is available for the mantle section deeper than 7,000 m. In 2008, a sediment core has been sampled at 10,350 m in Challenger Deep of Mariana Trench by ABISMO (Automatic Bottom Inspection and Sediment Mobile) during KR08-05 cruise. The sediment core is 161.5 cm in length and contains mafic sandy grains such as olivine and spinel. In this study, we sampled the mafic minerals from the sediment core and analyzed their major element compositions. As a result, the chemical compositions of the mafic sandy grains were compatible with those of mafic minerals within the peridotites along the land-side slope of Mariana Trench shallower than 7,000 m. We will discuss the origin of these sandy grains.

Keywords: ABISMO, Mariana Trench, Challenger Deep, sediment core, spinel, olivine

## クロミタイト温度圧力履歴の指示者としての高Ni・Mgかんらん石 High Ni and Mg olivine as a time recorder of chromitite P-T history

三浦 真<sup>1\*</sup>; 荒井 章司<sup>1</sup>; 山本 伸次<sup>2</sup>; シュメレフ ブラディミール<sup>3</sup>  
MIURA, Makoto<sup>1\*</sup>; ARAI, Shoji<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Shinji<sup>2</sup>; SHMELEV, Vladimir<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院 総合文化研究科, <sup>3</sup> ウラル ロシア科学アカデミー 地質・地球化学研究科

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University, <sup>2</sup>Department of Earth Science and Astronomy, University of Tokyo,

<sup>3</sup>Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch Russian Academy of Sciences

High Ni and Mg olivines were found in dunites enveloping podiform chromitites from Oman, Ray-Iz and Luobusa ophiolites. These high Ni and Mg olivines occur only in dunite adjacent to chromitite. This characteristic suggests subsolidus Ni and Mg diffusion from the chromites of the chromitite. In the case of dunite enveloping concordant chromitite from Oman ophiolite, olivines show high NiO (up to 0.5 wt %) and Fo (around 92 mol %) contents. This is not the case, however, for the dunite envelope around the discordant chromitite in the Oman ophiolite. On the other hand, olivines in dunite enveloping UHP chromitites from Ray-Iz and Luobusa ophiolites are extraordinarily high in Fo value (94 - 96) and NiO (around 0.5 wt %). Silicate exsolution lamellae in spinel from UHP chromitites and concordant chromitite suggest that these chromitites have experienced substantial cooling, and probably decompression, for a longer period than the discordant chromitite from Oman. According to the well-known Ni and Mg diffusion coefficients in olivine, the high-Ni and -Mg olivine in the dunite envelope may constrain the cooling duration of the chromitite and the history of ophiolite. Podiform chromitites are enigmatic in origin, and their origins should be systematically classified to understand concerning mantle processes. Their temporal relationship is a clue to solve this problem.

キーワード: かんらん石, Ni・Mg 拡散, ポディフォーム・クロミタイト, 低圧クロミタイト, 超高压クロミタイト, 温度圧力履歴

Keywords: Olivine, Ni and Mg diffusion, Podiform chromitite, Low pressure chromitite, Ultra-high pressure chromitite, P-T history

小笠原諸島とオマーンオフィオライトに産する初生無人岩の地球科学的な特徴と生成条件—メルト包有物研究からの見識  
Geochemistry and genetic conditions of primary boninites from the Ogasawara Island Group and Oman ophiolite

北村 啓太郎<sup>1\*</sup>; 金山 恭子<sup>1</sup>; 海野 進<sup>1</sup>; 石塚 治<sup>2</sup>; 草野 有紀<sup>1</sup>  
KITAMURA, Keitaro<sup>1\*</sup>; KANAYAMA, Kyoko<sup>1</sup>; UMINO, Susumu<sup>1</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>2</sup>; KUSANO, Yuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学地球学教室, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan/AIST

Subduction initiation and arc crust evolution along oceanic plate boundaries are fundamental processes that modify oceanic lithosphere and promotes the material evolution of the Earth. How subduction of oceanic plates initiates and develops largely depend on the thermochemical structure and mechanical strength of the colliding two plates. The resulting conditions of the wedge mantle can be best represented by the varying geochemistry of primary magmas produced through the subduction initiation. For example, the subduction zone in the Izu-Bonin (Ogasawara)-Mariana (IBM) arc started with an intense high-Si to low-Si boninite magmatism during 48-45 Ma (Ishizuka et al., 2006; Kanayama et al., 2012). By contrast, the subduction stage of the Oman Ophiolite lacked typical boninite and is characterized by the low-Si boninite magmatism (Ishikawa et al., 2002; Kusano et al., 2014). Because of its high Mg#s and andesitic chemistry, boninite is generally considered to be a candidate of a primary magma derived from the hydrous upper mantle, and therefore, its compositional variations reflect various thermochemical conditions of the source mantle. The geochemical and petrological studies on boninite magma genesis can provide crucial information on the evolution of arc and the formation of continental crust. Boninites are distinct from ordinary arc magmas in highly depleted U-shaped and depleted spoon-shaped chondrite-normalized rare earth elements (REE) patterns.

We have investigated melt (glass) inclusions enclosed by boninite-derived chrome spinel grains in beach sand, called “uguisu-zuna” from Ogasawara islands, and in wadi sand from the Oman Ophiolite. We analyzed major- and trace-element compositions of the boninitic melt inclusions by EPMA and LA-ICP-MS (Kanazawa Univ.) and H<sub>2</sub>O by SIMS (Hokkaido Univ. Creative Research Institution). Glass inclusions in spinel have more Mg-rich compositions than aphyric whole rocks, indicating their primitive nature since derivation from the source mantle, which experienced least modification by the processes such as crystal fractionation, and assimilation and contamination by the crust. Volatile measurements of melt inclusions confirmed that they were only slightly degassed and retain primitive contents. Five geochemical types (BIC-1~5) are identified among boninites from the Ogasawara Islands and a single geochemical type from the Oman Ophiolite. Both Ogasawara and Oman low-Si boninites show lower H<sub>2</sub>O contents than high-Si boninites. Assuming that the most magnesium-rich melts of each geochemical type in Ogasawara and Oman boninites coexisted with olivine and orthopyroxene, the P-T conditions of these primary boninite magmas were estimated by using the geothermobarometers of Putirka et al. (2007) and Putirka (2008). High-Si boninites erupted on the Ogasawara Islands during 48-46 Ma were generated at 1400-1440 °C and 0.7-0.9 GPa, whereas the subsequent low-Si boninite at 45 Ma formed at 1380-1400 °C and 0.8-0.95 GPa. This suggest that the geothermal gradient descended from 48 Ma to 45 Ma. On the other hand, low-Si boninite from the Oman Ophiolite was generated at 1320 °C and 0.5 GPa. Hence, it is apparent that the wedge mantle beneath the proto-IBM arc was significantly hotter than that in the Oman paleoarc.

キーワード: 沈み込み開始, IBM 前弧域, オマーンオフィオライト, 高 Si 無人岩, 低 Si 無人岩, メルト包有物  
Keywords: subduction initiation, IBM forearc, Oman Ophiolite, high-Si boninite, low-Si boninite, melt inclusion



## 伊豆—小笠原—マリアナ弧創成期マントルウェッジの温度組成構造および島弧発達過程 Thermo-chemical evolution of mantle wedge during the incipient stage of the Izu-Ogasawara-Mariana subduction zone

金山 恭子<sup>1\*</sup>; 北村 啓太郎<sup>2</sup>; 海野 進<sup>1</sup>; 石塚 治<sup>3</sup>  
KANAYAMA, Kyoko<sup>1\*</sup>; KITAMURA, Keitaro<sup>2</sup>; UMINO, Susumu<sup>1</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学理工学域, <sup>2</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門

<sup>1</sup>College of Science and Engineering, Kanazawa University, <sup>2</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan/AIST

プレート沈み込み帯の形成と島弧の発達過程を解明することは、大陸の形成をはじめとした地球の物質的進化を理解する上で重要である。本研究では、小笠原群島を含めた小笠原海嶺で生じたマグマの生成条件とその時空間変化を推定し、長期にわたって活動を継続する海洋性島弧の代表例である IBM 弧の沈み込み帯形成初期のマントルウェッジの温度組成構造を考察した。小笠原海嶺では、52Ma に太平洋プレートが沈み込みを開始した直後、中央海嶺的なマグマ (forearc basalt: FAB) を発生し、遷移型島弧ソレイトを経て、48Ma には希土類元素に高度に枯渇し、SiO<sub>2</sub> に富んだ無人岩 (高 Si 無人岩) を発生、45Ma に低枯渇で SiO<sub>2</sub> に比較的乏しい低 Si 無人岩に変化し、やがて通常の島弧ソレイト・カルクアルカリ岩の活動へ収束した [1,2]。

高 Si および低 Si 無人岩はそれぞれ、ハルツバージャイト [3] およびレルゾライト [e.g. 4] の融解実験で生成されたメルトと近い主要元素組成を示す。著しく低い希土類元素濃度 (Yb>0.3 ppm) も、高 Si 無人岩が高度に枯渇したハルツバージャイトを起源物質とすることを示唆する。また、小笠原の無人岩に特徴的な高い Zr/Ti 比 (<0.04) は高いスラブメルト寄与率を反映している [2]。一方、高 Si 無人岩マグマに先行する FAB は MORB 起源マントルの 10% 以下の分別融解で生成され、溶け残りかんらん岩は枯渇したレルゾライトである。このことは、高 Si 無人岩の高枯渇起源物質が FAB の溶け残りかんらん岩ではないことを示す。

未分化な無人岩マグマがハルツバージャイトと共存可能な温度圧力条件を推定したところ、高 Si 無人岩 (MgO=23、H<sub>2</sub>O=3.2 wt%) で 1430 °C、0.83-0.96GPa、低 Si 無人岩 (MgO=19、H<sub>2</sub>O=2.6 wt%) で 1380 °C、0.86GPa であった [5]。算出した未分化 FAB および島弧ソレイト・カルクアルカリ岩の生成条件をレルゾライト融解実験 [e.g.4] と比較することによって推定した結果、前者は無水で 1350 °C 程度、1.3-1.7GPa、後者は 0-0.5 % の水の存在下で 1300-1350 °C、1-1.2GPa と推定された。

初生マグマの MgO 量からマントルポテンシャル温度 (T<sub>p</sub>) を計算した。FAB や島弧ソレイト・カルクアルカリ岩の T<sub>p</sub> は約 1400 °C で、中央海嶺下マントルと同程度であるのに対し、高 Si 無人岩は 1500 °C、低 Si 無人岩は 1450 °C で中央海嶺下よりも高温であり、特に高 Si 無人岩はプルーム起源マントルと同程度である [6]。これは、西フィリピン海盆で高 Si 無人岩と同時代 (51-45Ma) にプルーム起源の火成活動が起こったことと整合的である [7]。高枯渇の高 Si 無人岩起源物質は、プルーム起源火成活動の溶け残りである可能性がある。

以上のことから、小笠原地域における IBM 弧形成初期のマントルウェッジは次のような温度組成変化を経験したと考えられる。52Ma に古くて高密度の太平洋プレートが若くて軽いフィリピン海プレートに対して沈み始めると、マントル上昇流が発生してフィリピン海プレート東縁部で海洋底拡大が起こり、枯渇度の低いマントルの部分融解で FAB が生成された。48Ma になると、深部に存在したプルームの溶け残りマントルが約 1GPa まで上昇し、スラブメルトを伴った含水融解を起こして高 Si 無人岩マグマを生成した。45Ma 頃には、沈み込みの進行に伴いマントル浅部が冷却され、さらにマントルウェッジの対流が始まった。その結果、マントルウェッジの物質が低枯渇マントルに入れ替わることによって、遷移的な低 Si 無人岩を経て島弧ソレイト・カルクアルカリマグマの活動に移り変わり、定常的な島弧—海溝系へと進化した。

[1] Ishizuka et al. (2011) EPSL, 306, 229-240. [2] Kanayama et al. (2012) Island Arc, 21, 288-316. [3] Falloon and Danyushevsky (2000) J. Petrol., 41, 257-283. [4] Hirose and Kawamoto (1995) EPSL, 133, 463-473. [5] Kitamura et al. (2014) JPGU. [6] Herzberg and Gazel (2009) Nature, 458, 619-623. [7] Ishizuka et al. (2013) Geology, 41, 1011-1014.

キーワード: 小笠原群島, 無人岩, マントルウェッジ, IBM 弧, マントルポテンシャル温度, 沈み込み帯

Keywords: Ogasawara (Bonin) Islands, boninite, mantle wedge, IBM arc, mantle potential temperature, subduction zone

## 「高温沈み込み帯」のマグマ進化過程 Hot and ephemeral subduction zone magmatisms in the Oman Ophiolite

草野 有紀<sup>1\*</sup>; 北村 啓太郎<sup>1</sup>; 足立 佳子<sup>2</sup>; 新城 竜一<sup>3</sup>; 海野 進<sup>1</sup>; 宮下 純夫<sup>2</sup>  
KUSANO, Yuki<sup>1\*</sup>; KITAMURA, Keitaro<sup>1</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>2</sup>; SHINJO, Ryuichi<sup>3</sup>; UMINO, Susumu<sup>1</sup>; MIYASHITA, Sumio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 新潟大学, <sup>3</sup> 琉球大学

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>Niigata University, <sup>3</sup>University of Ryukyus

東ヨーロッパから中央アジアにかけて断続的に分布するテーティスオフィオライト帯は、いずれも基底部に沈み込んだスラブ起源と考えられている変成岩を伴い、マントル—斑レイ岩—岩脈群から溶岩層というオフィオライト層序を保存していることが知られている。溶岩類には共通して無人岩が含まれることや、層序が伊豆小笠原マリアナ弧と類似することからオフィオライトの起源として前弧域が提案されている [e.g. Dilek and Furnes, 2009]。

しかし、中東のオマーンオフィオライトでは、100 Ma 頃に高速拡大海嶺から沈み込み帯への転換によって、無人岩を含む島弧火成活動 (V2 sequence) が起こった [Ishikawa et al., 2002, *Geology*]。放散虫化石年代から、この島弧火成活動は 2-300 万年で終息 [Kurihara and Hara, 2012, *JpGU*]、その後 1000 万年以上かかってアラビア半島に衝上した。本講演では、オマーンの無人岩の産状、岩石学的・地球化学的特徴から、短命に終わったオマーンの沈み込み帯モデルを考察する。

V2 sequence が連続的に観察できる Wadi Bidi 地域では、厚さ 1110 m の溶岩層が南北延長約 2 km に露出する遠洋性堆積物層によって下位 (LV2) と上位 (UV2) に区分される [Kusano et al., 2013, *Special Publication 392, Geological Society of London*]。層厚 970 m の LV2 は普遍的に斜長石、斜方輝石、単斜輝石とかんらん石を含み、斑晶鉱物量は 3 vol% 以下の島弧ソレイトである。層厚 140 m の UV2 の大部分は厚さ 1 m 以下のシート状溶岩からなるが、最上部には水中噴火によって形成した降下火砕物が産する。UV2 溶岩はかんらん石、斜方輝石と単斜輝石斑晶を 5-10 vol% 含む無人岩である。

これらの溶岩は海嶺期から島弧火成活動期を通じて次第に枯渇していく特徴を示す。一方、LIL 元素には富む傾向を示す。LV2 溶岩は  $176\text{Hf}/177\text{Hf}$  と  $143\text{Nd}/144\text{Nd}$  が海嶺期の溶岩と類似した組成範囲を示す。両者はおおむね Hf-Nd Mantle array 上にプロットされることから、スラブ由来メルトが LV2 溶岩に関与した影響はわずかであると考えられる。一方、UV2 溶岩は LV2 よりも低い Nd 同位体値を示す。UV2 の Hf-Nd 同位体組成変化は、海嶺期の溶岩 0.995 に対して遠洋性堆積物 0.005 の混合比で説明可能である。

本地域で観察される初期島弧火成活動は、島弧ソレイト質なもの (LV2) から無人岩 (UV2) へとマグマ組成が変化する。次第に溶岩組成が枯渇する原因として、沈み込んだプレートが若く浮揚性であったために、上盤のマントルウェッジが薄く、背弧側からのアセノスフェア対流が発達しなかったことが考えられる。オフィオライトに底づけされた沈み込んだスラブの一部であるメタモフィックソールに記録された最高変成条件は  $\sim 800^\circ\text{C}$ 、1 GPa である [Searle and Cox, 2002] ことから、無人岩マグマ形成に寄与した遠洋性堆積物メルトは初期のスラブ融解によってもたらされたと考えられる。

キーワード: 高温沈み込み帯, 初期島弧火成活動, 無人岩, オマーンオフィオライト

Keywords: High-T subduction zone, Initial arc magmatism, Boninite, Oman Ophiolite

## 海洋プレートの末路：オマーンオフィオライトにおける高温沈み込み帯の終焉 Fate of high-T subduction zone and the obduction of the Oman Ophiolite

海野 進<sup>1\*</sup>; 草野 有紀<sup>1</sup>; 北村 啓太郎<sup>1</sup>; 永石 一弥<sup>2</sup>; 石川 剛志<sup>3</sup>; 金山 恭子<sup>1</sup>

UMINO, Susumu<sup>1\*</sup>; KUSANO, Yuki<sup>1</sup>; KITAMURA, Keitaro<sup>1</sup>; NAGAISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ISHIKAWA, Tsuyoshi<sup>3</sup>; KANAYAMA, Kyoko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学地球学教室, <sup>2</sup> マリン・ワーク・ジャパン, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University, <sup>2</sup>Marine Works Japan, <sup>3</sup>JAMSTEC

地球の物質的進化に大きな影響を及ぼしてきた海洋リソスフェアの改変プロセスに、海洋プレート境界における沈み込み帯発生と島弧地殻の形成がある。このプロセスの解明はプレートテクトニクスの起源や大陸地殻の形成過程を理解する上で重要な鍵となる。沈み込み帯創成期には特徴的に Mg に富む特殊な安山岩である無人岩マグマが発生する。伊豆-小笠原-マリアナ弧のように持続的な沈み込み帯の発生では Si に富む典型的な無人岩が卓越し、大陸衝突帯に出現するテーチス海オフィオライトなどでは Si に乏しいタイプしか産出しない。2つの無人岩タイプは、マンツルの温度・組成の違いによって生じる [1,2]。著者らは、これらの初生マグマを用いてマンツルウェッジの温度組成構造の違いを明らかにすることで、沈み込み帯形成の必要条件やテクトニクスについて包括的な理解を深めようと試みている。

オフィオライトが大陸地殻上へ定置する先行過程では必然的にプレート拡大から収束への転換が起きる。その結果、拡大軸近傍の高温リソスフェア同士の沈み込み帯が発生し、しばしば無人岩マグマを伴う [3]。変成されたスラブ上部は上盤のマンツルと共に衝上してメタモルフィックソールとなる。多くのソールのピーク変成度 600~840°C, ~1 GPa に対し、その上に重なるオフィオライトは厚さ 10-20 km しかなく、ソールの変成圧力に比して上盤荷重が小さいという矛盾がある [4]。これは別々の場所にあったソールとオフィオライトが衝上する過程で上下に重なったためとされている [3]。しかし、著者らはオマーンオフィオライトにおいて微量元素組成の解析から、ソールと平衡な流体が枯渇したマンツルカンラン岩の融解を引き起こし、まず島弧ソレライトマグマ、次いで無人岩マグマを生成したことを明らかにした [5, 6]。従って、ソールとオフィオライトは隔離した場所にあったのではなく、元々の上下の配置を損なうことなく衝上した可能性が高い。さらに Cr スピネル中のメルト包有物から見出された初生無人岩メルトは、ポテンシャル温度 1400°C のマンツルカンラン岩から 0.5 GPa, 1320°C で分離したことがわかった [1]。即ち、この無人岩マグマは 17 km 以深のマンツルから上昇したことになるが、現存するオフィオライトの厚さは高々 15 km しかない。

これらの観察事実を整合的に説明するために、以下のモデルを提案する：テーチス海の拡大から閉塞への転換に伴い、拡大軸下の高温アセノスフェア下に沈み込んだスラブは深さ 30 数 km, 800°C で単斜輝石角閃岩となった。Nd 位体比によると、このスラブから堆積物メルトを含む流体が放出され [6, 7]、上盤の高温アセノスフェア中で部分融解コラムを形成し、深度 17 km, 1320°C のコラム頂部から無人岩質マグマが溶け残りハルツバーサイトと分離し [1]、より浅部でマンツルと反応してダナイトチャンネルを形成しつつ上昇 [8]、噴火した。800°C 以上の高温では蛇紋石や緑泥石は分解し、沈み込んだスラブ上部の海洋地殻は角閃岩に、上盤マンツルは角閃石レーゾライトとなる。ループリカントとなる鉱物相がないため、変成スラブ上部と上盤マンツルの摩擦が大きく、両者は固着した。一方、スラブ下部のマンツルは地殻と分離して沈み込み続けたが、ほぼ無水であったため、無人岩の発生を最後にわずか 300 万年で島弧活動は終息した。上盤マンツルとカップリングした変成スラブ上部は、衝上してメタモルフィックソールとなった。高温で最も低粘性のマンツルウェッジ下部は、衝上過程でウェッジ上部のリソスフェアの荷重により絞り出され、高圧を記録したソールの上位に薄いオフィオライトが重なる構造を生じた。

[1] Kitamura, K. et al., 2014. JGU 2014, Yokohama [2] Kanayama et al., 2012. Island Arc, 21, 288-316 [3] Wakabayashi & Dilek, 2000. GSA Spec. Paper 349, 53-64 [4] Cox, 2000. PhD thesis, Univ. of Oxford [5] Ishikawa et al., 2002. Geology, 30, 889-902 [6] Ishikawa et al., 2005. EPSL, doi:10.1016/j.epsl.2005.09.049 [7] Kusano et al., 2013. Geol. Soc. Spec. Paper, 392, 177-193 [8] Takazawa, 2012. J.M.P.S., 41, 257-266.

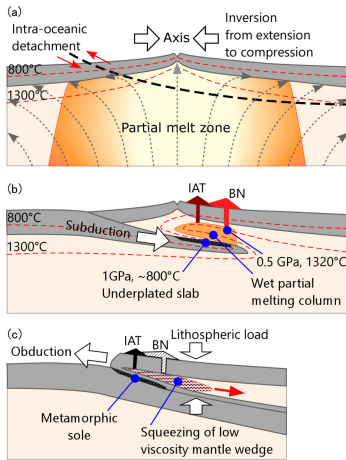
キーワード: オマーンオフィオライト, 無人岩, 高温沈み込み帯, メタモルフィックソール, 沈み込み帯発生, オブダクション

Keywords: Oman Ophiolite, boninite, high-T subduction zone, metamorphic sole, subduction initiation, obduction

SIT41-19

会場:314

時間:4月28日 17:00-17:15





## オマーンオフィオライト地殻セクション中に分布する超苦鉄質岩体の多様性 Magmatic diversity of the ultramafic rock in the oceanic crustal sequence, Oman ophiolite

金子 龍<sup>1\*</sup>; 足立 佳子<sup>2</sup>; 宮下 純夫<sup>2</sup>  
KANEKO, Ryu<sup>1\*</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>2</sup>; MIYASHITA, Sumio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 新潟大学

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Niigata University, <sup>2</sup>Niigata University

Although all the wehrlitic intrusions in the Oman Ophiolite are regarded as a single group (e.g. Koepke et al. 2009), there are two different types of wehrlitic intrusions. The first are ordinary wehrlitic intrusions that have similar features to the crustal sequence of V1 (MOR basalt). The second are a depleted type characterized by the appearance of true wehrlite and depleted mineral compositions (Adachi & Miyashita 2003; Yamasaki et al. 2006; Goodenough et al. 2010). The former and latter groups are linked to V1 and V2 magmatism, respectively.

We report the discovery of a new occurrence of the ultramafic rock in the oceanic crustal sequence from the Oman ophiolite, which does not intrude into the crustal sequence. This ultramafic rock is referred to as the Lasail-South complex, and the oldest rock in the study area because of being intruded by sheeted dyke complex. TiO<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>O contents of clinopyroxene from the complex range 0.06-0.59 and 0.09-0.42 wt%, respectively, and are similar to the fractional crystallization trend of oceanic gabbro. Co-variation of Mg values of clinopyroxene and An contents of plagioclase show that most of samples plot in the Oman layered gabbro field. Although mineral compositions of the Lasail-South complex show characteristic of mid-ocean ridge magmatism, the complex mainly comprises plagioclase-hornblende-lherzolite, olivine-clinopyroxenite and clinopyroxenite. Such rock assemblage is different from the assemblage of the oceanic crust of the Oman ophiolite. The Lasail-South complex shows intermediate characteristic of mid-ocean ridge and island arc magmatism, and we attempt to discuss the origin of the complex.

### References

- Adachi and Miyashita, 2003. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **4**(9), doi.org/10.1029/2001GC000272.  
Goodenough et al., 2010. *Arabian Journal of Geosciences*, **3**, 439-458, doi.org/10.1007/s12517-010-0177-3.  
Koepke et al., 2009. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **10**, 10002, doi.org/10.1029/2009GC002488.  
Yamasaki et al., 2006. *Earth and Planetary Science Letters*, **251**, 52-65, doi.org/10.1016/j.epsl.2006.08.027.

キーワード: オマーンオフィオライト, 超苦鉄質岩体, 海嶺火成活動, 島弧火成活動

Keywords: Oman ophiolite, ultramafic rock, mid-ocean ridge magmatism, island arc magmatism

## Compositionally and genetically distinct domains found in the southernmost Salahi mantle section in the Oman ophiolite Compositionally and genetically distinct domains found in the southernmost Salahi mantle section in the Oman ophiolite

藤井 悟<sup>1\*</sup>; 高澤 栄一<sup>2</sup>  
FUJII, Satoru<sup>1\*</sup>; TAKAZAWA, Eiichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 新潟大学理学部

<sup>1</sup>Graduate school Science and Technology, Niigata University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Niigata University

We investigate spatial variability in mineral compositions in the southernmost part of the Salahi mantle section and discuss genetic relationship between highly refractory peridotites and less refractory plagioclase-bearing peridotites in this region. The study separates the study area into two domains based on spinel Cr# such as high Cr# domain in the eastern part that is closer to Moho and low Cr# domain in the central part. Concordant dunites commonly occur in the low Cr# domain whereas discordant dunites are common in the high Cr# domain. Plagioclase-bearing peridotites and wehrlite also occur in the low Cr# region.

Highly refractory dunite with spinel Cr# >0.7 frequently occurs in the high Cr# domain. In the low Cr# domain, spinel Cr# is low and ranges from 0.47 to 0.57. We analyzed clinopyroxene (cpx) in dunites and harzburgite from both domains for REE abundances by LA-ICP-MS. The results show that harzburgite cpxs in the high Cr# domain and low Cr# domain are highly depleted in LREE ([Ce]CH = 0.01~0.02) with [Yb]CH = 2~3. Dunite cpxs in the low Cr# domain have REE abundances similar to the harzburgites in the same outcrop whereas those in the high Cr# domain are enriched in LREE relative to the harzburgite cpxs in the same outcrop. This implies that dunite cpxs in the high Cr# domain were reacted with LREE-enriched fluid infiltrated from the base of the ophiolite.

In the low Cr# domain, plagioclase-bearing dunite, plagioclase-bearing lherzolite vein occur and phlogopite-bearing wehrlite discordantly cuts them. The spinel Cr# of these dunites are in a range from 0.46 to 0.56. Abundances of REE in a melt in equilibrium with cpx in plagioclase-bearing peridotites and associated dunites are similar to those of N-MORB. On other hand, a melt in equilibrium with wehrlite cpx resembles to those of boninitic dikes from the Fizh block in the northern Oman ophiolite (Yamazaki, 2013). From the field occurrence, plagioclase-bearing dunite and plagioclase-bearing lherzolite formed by a reaction with MORB melt beneath spreading ridge whereas cumulative wehrlite was crystallized from a boninitic melt.

キーワード: オマーンオフィオライト, かんらん岩, 斜長石ダナイト, 斜長石レルゾライト, MORB, Boninite

## 中央インド洋海嶺南部 Kairei 熱水場周辺のマフィック岩と超マフィック岩 Mafic and ultramafic rocks along the southern Central Indian Ridge close to the Kairei Hydrothermal Field

西村 拓真<sup>1</sup>; 針金 由美子<sup>2</sup>; 道林 克禎<sup>3\*</sup>; 森下 知晃<sup>4</sup>; 佐藤 暢<sup>5</sup>

NISHIMURA, Takuma<sup>1</sup>; HARIGANE, Yumiko<sup>2</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>3\*</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>4</sup>; SATO, Hiroshi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学部地球科学科, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門, <sup>3</sup> 静岡大学理学研究科地球科学専攻, <sup>4</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>5</sup> 専修大学経営学部

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>AIST/GSJ, <sup>3</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>4</sup>School of Natural System, College of Science and Technology, Kanazawa University, <sup>5</sup>School of Business Administration, Senshu University

The central Indian Ridge (CIR) is situated at the north of the Rodrigues Triple Junction (RTJ) and is a slow- to intermediate-spreading mid-ocean ridge with a spreading rate increasing from 30 mm/year in full rate near the Equator to 49 mm/year in full rate at the RTJ. In the southern CIR near RTJ, the Kairei Hydrothermal Field (KHF) was discovered in August 2000 as the first directly observed hydrothermal vent site in the Indian Ocean. Recently, KH-10-06 cruise aboard R/V Hakuho-maru was organized for understanding the hydrothermal system and geological feature around KHF. In this study, we present the petrography of mafic and ultramafic rocks dredged from the vicinity of the KHF during KH-10-06 cruise. A total of 76 samples have been studied from 9 sites, including 24 ultramafic rocks and 38 mafic rocks and 14 other rocks. Most of them are remarkably altered and hydrated. We classified them into sub-groups based on their textures and mineral assemblages. The ultramafic rocks were classified into 5 sub-groups: 1 peridotite, 2 pyroxenites, 3 serpentinized peridotites, 9 olivine-bearing serpentinites and 9 serpentinites. The mafic rocks were classified into 8 sub-groups: 21 Fe-Ti oxide gabbros, 4 gabbros including 2 mylonites, 3 olivine gabbros, 7 gabbroic rocks with various textures and 8 amphibole-rich gabbros. The other rocks consist of 5 aragonites and 9 hydrothermally altered rocks.

Keywords: mafic rock, ultramafic rock, Central Indian Ridge, Kairei Hydrothermal Field

## 東南極大陸縁辺部の上部マントル比抵抗構造 Upper mantle electrical resistivity structure at the continental margin of East Antarctica

松野 哲男<sup>1\*</sup>; 野木 義史<sup>1</sup>; 島 伸和<sup>2</sup>  
MATSUNO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; NOGI, Yoshifumi<sup>1</sup>; SEAMA, Nobukazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 神戸大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Kobe University

The breakup of the Gondwana supercontinent is one of targets of the study on the plate tectonics and related mantle dynamics. The crust and the upper mantle structure under the western Cosmonauts Sea at the continental margin of East Antarctica, where a rifting of Gondwana and a subsequent seafloor spreading occurred, are anticipated to reflect the breakup process of Gondwana. We carried out a marine electromagnetic experiment to reveal an electrical resistivity structure at depth of the crust and the upper mantle under the western Cosmonauts Sea. Time variations of the electromagnetic field were acquired at two seafloor sites in the experiment. The time variations data were processed on the basis of the magnetotelluric (MT) method. The MT response function was obtained after considering influence of non-plane magnetic field sources at high geomagnetic co-latitude. The obtained MT response functions and polar diagrams imply that the MT responses involve topographic distortion and/or reflect a higher dimensional resistivity structure under the observational sites. Three dimensional forward modeling was conducted to examine influence on the observed MT responses from the topographic variation around the observational sites and a conductive layer just under the sites, which is mostly regarded as sediment. The results of the forward modeling clearly show that the topographic variation and the surface conductive layer have severe influence on the observed MT responses. A series of 3-D forward modeling with the topographic variation and the surface conductive layer was implemented to examine a resistivity structure at depth of the crust and the upper mantle. The results indicate that the resistivity structure is explained by a two-layer resistivity structure, in which the upper layer is resistive and the lower layer is conductive. The upper resistive and the lower conductive layers likely represent dry and water/melt rich oceanic upper mantle, respectively. The thickness of the upper resistive layer is thinner than that expected for a typical oceanic upper mantle of the seafloor age of the study area. The thin upper resistive layer may require high temperature and high water/melt anomalies that were generated through mantle convection, which was related to the breakup process of Gondwana at the continental margin of East Antarctica.



## 南部マリアナ前弧かんらん岩の地球化学的特徴 Geochemical characteristics of the peridotites from the southern Mariana forearc

柵山 徹也<sup>1\*</sup>; 石井 輝秋<sup>4</sup>; 道林 克禎<sup>2</sup>; 小原 泰彦<sup>3</sup>; 常 青<sup>1</sup>; 原口 悟<sup>5</sup>; 木村 純一<sup>1</sup>

SAKUYAMA, Tetsuya<sup>1\*</sup>; ISHII, Teruaki<sup>4</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>2</sup>; OHARA, Yasuhiko<sup>3</sup>; CHANG, Qing<sup>1</sup>; HARAGUCHI, Satoru<sup>5</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 静岡大学理学部, <sup>3</sup> 海上保安庁, <sup>4</sup> 深田地質研究所, <sup>5</sup> 東京大学工学部

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Shizuoka Univ., <sup>3</sup>Japan Coast Guard, <sup>4</sup>Fukada Geological Institute, <sup>5</sup>Faculty of Engineering, Univ. Tokyo

Dehydration of a subducting oceanic plate and infiltration of the fluid/melt released from the oceanic plate are thought to be the key processes to invoke melting of the wedge mantle. Although a number of studies on volcanic rocks in arcs have been conducted to reveal a material recycling process at subduction zone, understanding of geochemical development process within the wedge mantle is still not as far advanced. The southern Mariana forearc is one of the best locations on the Earth to investigate issues above, since serpentinized peridotites are widely exposed on the inner slope of the Mariana Trench. We have collected peridotite samples obtained by dredging and Shinkai diving from 3000 – 7000 mbsl at the southern Mariana Trench. The dredge and dive points are geographically grouped into three sites: site 1 (KH98-1-D1, KH98-1-D2, and 6K-973), 2 (KH03-3, KH98-1-D3, and 6K-1094), and 3 (6K-1095, 6K-1232, 6K-1233, and 6K-1234) from the east to the west. We conducted EPMA and LA-ICP-MS analyses on minerals in the recovered samples to reveal geochemical development process of the wedge mantle.

Peridotites from the easternmost site 1 consist of olivine (Fo# = 90 – 91), orthopyroxene (Mg# = 90 – 91), spinel (Cr# = 40 – 50), clinopyroxene (Mg# = 89 – 93), tremolite (TiO<sub>2</sub> = 0 – 0.4 wt%), pargasite (TiO<sub>2</sub> = 2.0 – 2.5 wt%), plagioclase, and serpentine. Clinopyroxene and pargasite exhibit LREE-depleted (type C1 and A1, respectively) and orthopyroxene LREE- and MREE-depleted patterns (type O1) in a chondrite-normalized diagram.

Peridotites from the westernmost site 3 consist of olivine (Fo# = 91 – 92.5), orthopyroxene (Mg# = 91 – 93.5), spinel (Cr# = 45 – 75), clinopyroxene (Mg# = 94 – 96), tremolite (TiO<sub>2</sub> = 0 – 0.2 wt%) and serpentine. Some clinopyroxene exhibits LREE-enriched convex upward pattern (type C2), others strong LREE- and MREE-enriched REE pattern (type C3). Tremolite and orthopyroxene exhibit LREE-enriched convex upward (type A3) and weakly LREE-enriched convex upward REE patterns (type O2), respectively. HREE, Ti, and Y abundances of type C3 clinopyroxene are higher and their LREE and Sr abundances lower than those of type C1 clinopyroxene.

Peridotites from the middle site 2 show intermediate characteristics between site 1 and 3. They consist of olivine (Fo# = 90 – 92), orthopyroxene (Mg# = 91 – 92.5), spinel (Cr# = 45 – 52), clinopyroxene (Mg# = ~95), pargasite (TiO<sub>2</sub> = 0.8 – 1.7 wt%), tremolite (TiO<sub>2</sub> = 0 – 0.2 wt%), plagioclase and serpentine. Some clinopyroxene exhibits C1-type REE pattern and coexists with A1-type pargasite, while other clinopyroxene exhibits LREE- and MREE-depleted patterns (type C2) coexisting with LREE- and MREE-depleted tremolite with weak enrichment in LREE (type A2).

Compared to results of high-pressure melting experiments on peridotite, monotonous increase of Mg# of olivine, clinopyroxene, and orthopyroxene as well as Cr# of spinel from site 1 to 3 suggests increase of melting degree of the mantle peridotite from site 1 to 3. Monotonous decrease of HREEs, Ti, Y, Zr, and Hf abundance from C1- to C3-type clinopyroxene, from A1- to A3-type amphibole, and from O1- to O2-type orthopyroxene, is consistent with major element variations above. However, in contrast to the observation above, LREE and LILE abundance increase from C1- to C3-type clinopyroxene, from A1- to A3-type amphibole, and from O1- to O2-type orthopyroxene, suggesting involvement of melt/fluid enriched in such elements.

LREE-enriched clinopyroxene and amphibole have been found from mantle xenoliths and subaerial peridotite complex. Those clinopyroxene and amphibole have been interpreted as a product of melting and melt separation involving infiltration of LREE-enriched melt/fluid into the melting system. Similarity of geochemical characteristics of type C3 clinopyroxene and A3 amphibole to those in xenoliths or peridotite complexes may suggest involvement of LREE-enriched melt/fluid to the mantle beneath the southern Mariana forearc.

キーワード: マリアナ海溝, かんらん岩, 輝石, 角閃石, 微量元素

Keywords: Mariana Trench, peridotite, pyroxene, amphibole, trace element

## ピナツボ火山かんらん岩捕獲岩の岩石学的特徴と沈み込む海洋地殻による交代作用 Petrological features of the peridotite xenoliths in the 1991 Pinatubo dacite and mantle metasomatism by subducted ocean

芳川 雅子<sup>1\*</sup>; 田村 明弘<sup>2</sup>; 荒井 章司<sup>2</sup>; 小林 哲夫<sup>3</sup>; 川本 竜彦<sup>1</sup>; 奥野 充<sup>4</sup>; Payot Betchaida<sup>2</sup>; Rivera J. Danikko<sup>5</sup>; Bariso B. Ericson<sup>5</sup>; Mirabueno Ma. Hannah T.<sup>6</sup>  
YOSHIKAWA, Masako<sup>1\*</sup>; TAMURA, Akihiro<sup>2</sup>; ARAI, Shoji<sup>2</sup>; KOBAYASHI, Tetsuo<sup>3</sup>; KAWAMOTO, Tatsuhiko<sup>1</sup>; OKUNO, Mitsuru<sup>4</sup>; PAYOT, Betchaida<sup>2</sup>; RIVERA, Danikko<sup>5</sup>; BARISO, Ericson<sup>5</sup>; MIRABUENO MA., Hannah T.<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設, <sup>2</sup> 金沢大学理工学域自然システム学類, <sup>3</sup> 鹿児島大学理学部地球環境科学科, <sup>4</sup> 福岡大学理学部地球圏科学科, <sup>5</sup> フィリピン国立火山地震研究所, <sup>6</sup> Institute of Volcanology and Seismology, University of the Philippines

<sup>1</sup>Institute for Geothermal Sciences, Kyoto Univ., <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa Univ., <sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Kagoshima Univ., <sup>4</sup>Department of Earth System Science, Fukuoka Univ., <sup>5</sup>PHIVOLCS, <sup>6</sup>Institute of Volcanology and Seismology, University of the Philippines

フィリピンのルソン島のピナツボ火山は、ルソン（バターン）弧火山フロントに位置する。1991年に噴出したデイサイト質火砕流堆積物中から、かんらん岩捕獲岩を採取した。火砕流堆積物には他にも角閃岩、花崗岩質岩などの捕獲岩やかんらん石捕獲結晶を含む。試料採取した約200個の捕獲岩中の最大径は14cmであった。デイサイトとかんらん岩の間には最大厚さ5mmの角閃岩のselvageが観察される。粗粒な鉱物からなるマントル捕獲岩と、肉眼では同定不可能な細粒な鉱物で構成される捕獲岩があり、後者のようなかんらん岩はルソン弧バタン島イラヤ火山 (Arai et al., 1996)、カムチャッカ弧アバチャ火山 (Ishimaru et al., 2007) で報告されている。

Arai et al. (1996) はイラヤ火山に産するかんらん岩捕獲岩を岩石組織に基づいて粗粒タイプ (C-type) と細粒タイプ (F-type) に分類し、FタイプはCタイプに沈み込むスラブ由来のSiO<sub>2</sub>に富む流体もしくはメルトが付加して、細粒化したものであると解釈している。Fタイプは細粒かんらん石 (≤0.1mm) を含む細粒鉱物を10 vol %以上含む (Arai and Kida, 2000)。彼らの定義に従うと、ピナツボかんらん岩捕獲岩は約50%がFタイプであった。イラヤ捕獲岩およびアバチャ捕獲岩では、Fタイプがそれぞれ約90% (Arai et al., 1996) と15% (Ishimaru & Arai, 2008) である。また、タイプごとの量比は不明だが、Arai et al. (1996) でFタイプに相当すると思われる捕獲岩は、パプアニューギニア Tabar-Lihir-Tang-Feni 弧 Tubaf 火山・Edison 火山でも報告されている (e.g. McInnes et al., 2001)。

ピナツボかんらん岩捕獲岩のすべての試料で流体包有物が認められ、これらの流体包有物は塩水を含む (Kawamoto et al., 2013)。Cタイプかんらん岩捕獲岩のほとんどがハルツバージャイト (かんらん石+斜方輝石+角閃石+スピネル±単斜輝石±金雲母) で、ダナイトとウェールライトがそれぞれ一試料認められた。Cタイプの中で細粒部分が最も少なく、最も初生的と思われる試料の角閃石のSr-Nd同位体組成を求めた。この結果は、ピナツボ火山で噴出しているデイサイトと安山岩の組成領域 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.70419-0.70425, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512924-0.512863; Bernard et al., 1991; Castillo et al., 1991) の最も枯渇した値とほぼ一致する。またルソン弧に沈み込んでいると考えられる南シナ海海洋玄武岩のSr-Nd同位体組成領域内 (Tu et al., 1992) に位置する。角閃石の多元素コンドライト規格化パターンは、基本的には左下がりのパターンだが、Ba, Rb, U, Pbの正のスパイクが認められる。これらの元素は沈み込む海洋地殻由来の流体で付加されると考えられている元素である (e.g., McColloch & Gamble, 1991)。以上の事から、Cタイプのピナツボマントル捕獲岩は沈み込む海洋地殻由来流体による交代作用を受けていると提案する。

キーワード: amphibole-bearing peridotite xenolith, Pinatubo, mantle metasomatism, mantle wedge

Keywords: amphibole-bearing peridotite xenolith, Pinatubo, mantle metasomatism, mantle wedge

## 台湾 Lichi メランジに含まれるマフィック岩・超マフィック岩の岩石学 Petrology of mafic-ultramafic rocks in the East Taiwan Ophiolite, in the Lichi melange, Taiwan

小丸 千尋<sup>1\*</sup>; 森下 知晃<sup>1</sup>; 田村 明弘<sup>1</sup>; 荒井 章司<sup>1</sup>  
KOMARU, Chihiro<sup>1\*</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>1</sup>; TAMURA, Akihiro<sup>1</sup>; ARAI, Shoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Natural Science, Kanazawa University

台湾は世界でも有数の変動帯であり、フィリピン海プレートとユーラシアプレートが衝突する境界の上に位置している。台湾南東部では、オフィオライト状岩石群（火山岩、深成岩類）が泥質のメランジ（Lichi メランジ）の中にブロックとして含まれていることが知られている（Liou et al., 1977）。これらのオフィオライト状岩石は、East Taiwan Ophiolite と定義される（Liou, 1977）。East Taiwan Ophiolite の起源については、火山岩の地球化学的特徴、変成作用解析、テクトニクスモデルから、フィリピン海プレート起源とする見解（Liou, 1974）、火山弧であるルソン弧の北方延長起源（丸山ほか, 2011）、南シナ海起源（Suppe et al., 1981）などが提案されており、現在も議論がなされている。オフィオライトは、「陸上に露出する過去の海洋性リソスフェア（海洋地殻・マントル）の断面」（ペンローズ会議, 1972）であり、通常では手に入らない地下深部の物質を研究する材料を我々に与えてくれる。しかしながら、台湾南東部のはんれい岩やかんらん岩などについて、詳細な研究はなされていない。台湾周辺のテクトニクス、およびオフィオライトの形成やメランジの形成プロセスを考える上でも、これらの岩石の起源を明らかにすることは重要である。そこで、本研究では、台湾南東部の Lichi メランジ中に含まれているマフィック岩および超マフィック岩片について記載を行い、化学分析によって特徴を明らかにしたので報告する。

本研究では、マフィック岩・超マフィック岩を選択的に採取した。その際、露頭において肉眼観察で鉱物の量比を判定し、採取する試料がなるべく多様になるように採取した。採取した試料のうち、超マフィック岩類の大半は蛇紋岩化していた。採取したはんれい岩類は、トロクトライト、かんらん石はんれい岩、ホルンブレンドはんれい岩、はんれい岩ノーライトに分類された。はんれい岩類では、黒色の不透明鉱物が多く見られた。採取したかんらん岩起源の蛇紋岩は、強い蛇紋岩化および変形を受けているものを除くと、ハルツバージャイトおよびダナイトに分類された。

超マフィック岩類の大半は蛇紋岩化していたことから、初生的な組成を示す鉱物がスピネルのみである試料が多かったため、主にスピネルの化学分析を行った。かんらん岩起源の蛇紋岩中のスピネルにおいて、Cr#=0.3-0.6、Mg#=0.3-0.5 という多様な値を示した。ルソン島において採取された島弧かんらん岩類中のスピネルは、Cr#=0.6-0.7 のものが普遍的に見られるという報告がある（Arai et al., 2004）。一方、本研究の試料は多様な試料を選択的に採取しているにもかかわらず、Cr#>0.6 のものが見られないことから、East Taiwan Ophiolite は中央海嶺かんらん岩が由来であると考えられる。

## 中央海嶺下に存在する島弧マントル物質の物質学的証拠 Petrological evidence for arc-metasomatized peridotites beneath mid-ocean ridges

森下 知晃<sup>1\*</sup>; 仙田 量子<sup>3</sup>; 鈴木 勝彦<sup>3</sup>; 中村 謙太郎<sup>3</sup>; 佐藤 暢<sup>2</sup>; 沖野 郷子<sup>4</sup>  
MORISHITA, Tomoaki<sup>1\*</sup>; SENDA, Ryoko<sup>3</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>3</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>3</sup>; SATO, Hiroshi<sup>2</sup>; OKINO, Kyoko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 日本海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 専修大学, <sup>4</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Senshu University, <sup>4</sup>University of Tokyo

中央インド洋最南端の不死鳥海丘から採取されたかんらん岩試料を解析した結果、島弧的な環境で交代作用を受けたかんらん岩が中央海嶺下にリサイクリングしたものであるという結論に至った。特に、本発表では、Os 同位体比の特徴に着目して説明する。

キーワード: 中央海嶺, マントル, かんらん岩, 島弧, リサイクリング

Keywords: Mid-Ocean Ridge, Mantle, Peridotite, arc, recycling



## IntCal13は何が画期的なのか Why is the IntCal13 special?

中川 毅<sup>1\*</sup>; SG06 プロジェクト メンバー一同<sup>1</sup>  
NAKAGAWA, Takeshi<sup>1\*</sup>; SUIGETSU 2006, Project members<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ニューカッスル大学地理学教室

<sup>1</sup>Department of Geography, Newcastle University (UK)

放射性炭素年代が較正を必要とすることは広く認識されている。世界のいくつかの研究グループが較正モデルを提案しているが、その中でもっとも広範に用いられているのは IntCal と呼ばれるモデルである。IntCal は 1998 年に最初のバージョンが公表され (IntCal98)、その後 2004 年 (IntCal04)、2009 年 (IntCal09) と改訂を重ねてきた。だが 2013 年に公表された最新版の IntCal13 は、それまでの IntCal とは大きく一線を画す画期的なモデルであると評価されている。いったい IntCal13 の何が特別であるのか、また IntCal13 とそれ以前のデータセットとの比較から何が明らかになったのか、主として放射性炭素年代測定の専門家以外を対象として概説する。

キーワード: IntCal13, 放射性炭素年代測定, 放射性炭素年代較正, 年縞堆積物, 水月湖, 海洋リザーバー効果

Keywords: IntCal13, Radiocarbon dating, Radiocarbon calibration, Varved sediment, Lake Suigetsu, Marine reservoir effect

## 14C年代値に対する酸-アルカリ-酸洗浄法のアルカリ洗浄段階の影響評価 An evaluation of the effect on 14C dating (AMS) by alkaline treatment of the ABA method on charcoal sample

渥美 晋<sup>1\*</sup>  
ATSUMI, Shin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京理科大学  
<sup>1</sup>Tokyo University of Sciences

地球科学や考古学の分野では、<sup>14</sup>C年代測定に用いる炭化物の前処理に、酸-塩基-酸処理法 (Acid-Base-Acid: ABA method or Acid-Alkali-Acid; AAA method) が広く用いられている。しかし、酸-塩基-酸 (Acid-Base-Acid: ABA) 処理法は<sup>14</sup>C年代測定法における木炭試料の前処理の基本であるにもかかわらず、同法の処理条件についての化学的指標に基づく研究例は少ない。そこで本研究は、<sup>14</sup>C年代測定法の問題点として、従来、詳細は未解明であった前処理法による誤差の発生を明らかにすることを目的とする。発表者はこの目的の為に3種類の実験を行った。第一に年代値の再現性確認実験。第二に最適なアルカリ洗浄時間の確認実験。第三に洗浄に最適なアルカリ溶液の濃度の確認実験である。

第一の結果: NaOH 洗浄済みの試料の年代値群は、 $T=0.45$  (自由度 3; 5% 危険率:  $T > 12.59$ ) と高い収束性を示すのに対して、NaOH 未洗浄試料の年代値は  $T=10.74$  (自由度 4; 5% 危険率:  $T > 9.49$ ) と発散が大きく、NaOH 未洗浄試料 5 試料の中で有意の差が現れた。

第二の結果: 目視によってアルカリ抽出終了と判断された後にも、三次元蛍光測定が NaOH 溶液中にフミン酸を検出し、かつ、<sup>14</sup>C年代測定結果 (渥美ほか, 2009) はフミン酸による影響を示している。さらに、これらの結果はアルカリ抽出終了判定に目視は不適切であり、かつ、三次元蛍光測定が溶存有機汚染物質の存在を監視する上で効果的であることを示唆している。

第三の結果: ある考古遺跡中の同層準の 3 木炭試料を 8 つの別々の濃度の NaOH 溶液で洗浄した試料の年代測定結果を  $\chi^2$  検定で評価した。その結果、1.2 mol/l で処理した試料間で最小値を示した。三次元蛍光測定の結果では 2.1 mol/l の NaOH 洗浄溶液中の腐植物質の抽出特性と 0.5~0.001 mol/l の溶液の抽出特性との間に明確な傾向の差が出た。すなわち、0.5~0.001 mol/l NaOH 溶液は低励起光波長領域の汚染の抽出効率が相対的に弱い。この現象が年代値の収束性の差を生んでいると考えられる。結論として、<sup>14</sup>C年代測定の前処理には 1.0~1.5 mol/l NaOH 溶液の使用を推奨する。

これらの結果は、いずれも前処理の化学的条件の差異が引き起こすフミン酸の残留度の差が<sup>14</sup>C年代値に影響を及ぼすことを示している。

キーワード: 放射性炭素年代測定法, 酸-アルカリ-酸前処理法, 三次元蛍光分析, フミン酸, 木炭試料  
Keywords: 14C dating, ABA pretreatment, 3-D fluorescent spectroscopy, Humic acid, Charcoal sample

## 沖縄トラフ海底熱水域の熱水性鉱石中の重晶石のESR及び放射非平衡による年代測定 Dating of sea-floor hydrothermal barite collected at the Okinawa Trough by ESR and radioactive disequilibrium

藤原 泰誠<sup>2\*</sup>; 豊田 新<sup>1</sup>; 内田 乃<sup>2</sup>; 石橋 純一郎<sup>3</sup>; 中井 俊一<sup>4</sup>; 賞雅 朝子<sup>5</sup>  
FUJIWARA, Taisei<sup>2\*</sup>; TOYODA, Shin<sup>1</sup>; UCHIDA, Ai<sup>2</sup>; ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>3</sup>; NAKAI, Shun'ichi<sup>4</sup>; TAKAMASA, Asako<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学理学部, <sup>2</sup> 岡山理科大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 九州大学大学院理学研究院, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所, <sup>5</sup> 放射線医学総合研究所

<sup>1</sup>Faculty of Science, Okayama University of Science, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Okayama University of Science, <sup>3</sup>Faculty of Science, Kyushu University, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>5</sup>National Institute of Radiological Sciences

The temporal change of submarine hydrothermal activities has been an important issue in the aspect of the evolution of hydrothermal systems which is related with ore formation (Urabe, 1995) and biological systems sustained by the chemical species arising from hydrothermal activities (Macdonald et al., 1980). Dating methods using disequilibrium between radioisotopes such as U-Th method (e.g. You and Bickle, 1998), <sup>226</sup>Ra-<sup>210</sup>Pb and <sup>228</sup>Ra-<sup>228</sup>Th method (e.g. Noguchi et al., 2011) have been employed for such studies.

Okumura et al., (2010) made the first practical application of ESR (electron spin resonance) dating technique to a sample of submarine hydrothermal barite to obtain preliminary ages, while Kasuya et al. (1991) first pointed out that barite can be used for ESR dating. Toyoda et al. (2011) determined the optimum ESR condition while Sato et al. (2011) confirmed that the signal is thermally stable enough for an age range of several thousand years. Takamasa et al. (2013) obtained U-Th and ESR ages which are roughly consistent with each other.

The samples were taken by research cruises operated by JAMSTEC. Barite (BaSO<sub>4</sub>) was extracted from hydrothermal sulfide chimney samples taken from two sites at the Okinawa Trough. Blocks of sulfide deposits were cut into pieces, and about 2.0g was crushed. The samples were soaked in 12M hydrochloric acid, left for approximately 24 hours. Then, 13M nitric acid was added. Finally, after rinsing in distilled water, the sample was filtered and dried. Impurities were removed by handpicking. An X-ray diffraction study was made to confirm that the grains are pure barite. After gamma-ray irradiation at Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, they were measured at room temperature with an ESR spectrometer (JES-PX2300) with a microwave power of 1mW, and the magnetic field modulation amplitude of 0.1mT. The bulk Ra concentration was measured by the low background pure Ge gamma ray spectrometer. Assuming that Ra is populated only in barite, the dose rate was calculated with the alpha effectiveness of 0.043 (Toyoda et al., 2012), where the decay of Ra (a half life of 1600 years) was also taken into account.

The obtained ages range from 4.1 to 16000 years, being consistent with detection of <sup>228</sup>Ra in younger samples and radioactive equilibrium/disequilibrium between radium and daughter nuclei. The variation of the ages within each sample is mostly within the statistical error range. The relative order of the ages is consistent with the result of <sup>226</sup>Ra-<sup>210</sup>Pb method, where the difference in absolute ages would be explained by several hydrothermal events that form the chimney. It was found that Yoron Hole field is the youngest, then, Daiyon-Yonaguni Knoll field, Hatoma Knoll field, being nearly equal to Iheya North Knoll field, then Izena Hole field, which is consistent with the direct observation from the submersible.

キーワード: 重晶石, 海底熱水活動, 電子スピン共鳴, 年代測定

Keywords: barite, hydrothermal activities, electron spin resonance, dating

## 方解石の熱ルミネセンス特性 Thermoluminescence property of calcite

小形 学<sup>1\*</sup>; 長谷部 徳子<sup>1</sup>; 福士 圭介<sup>1</sup>; 藤井 直樹<sup>2</sup>; 佐藤 努<sup>3</sup>; 伊藤 一充<sup>4</sup>  
OGATA, Manabu<sup>1\*</sup>; HASEBE, Noriko<sup>1</sup>; FUKUSHI, Keisuke<sup>1</sup>; FUJII, Naoki<sup>2</sup>; SATO, Tsutomu<sup>3</sup>; ITO, Kazumi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 原環センター, <sup>3</sup> 北海道大学, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>RWMC, <sup>3</sup>Hokkaido University, <sup>4</sup>AIST

地球科学において用いられる各種現象に対しての時間軸を与える要素を年代と呼ぶ。年代値をもとにして、地球や惑星さらには人類の進化等をさぐる事が可能である。そのため年代値は地球科学において最も基本的なデータの1つである。

熱ルミネセンス年代測定法とは、放射線を受けた鉱物を加熱するときに出るルミネセンスの量から年代を算出する方法である。炭酸塩鉱物を用いた熱ルミネセンス年代測定は、<sup>14</sup>C年代測定で欠落している年代を補填できることから、利用されてきた。

しかし、方解石の熱ルミネセンス年代測定には様々な問題がある;例えば、加熱中の相変化による感度変化やフェーディング、各放射線( $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線やX線)に対する熱ルミネセンス特性の差などの問題がある。

本研究では、方解石熱ルミネセンス年代測定法の精度確度を向上させることを目的とし、微量元素濃度の異なる様々な方解石(フィリピン, モンゴル, 合成方解石)を用い以下の研究を行った。

1. 各方解石のX線誘起熱ルミネセンス特性の測定。
2. 各放射線に対する方解石熱ルミネセンス特性の差を測定(X線に対する $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 線のルミネセンス効率をa-x-value, b-x-value, c-x-valueとする)。
3. 各不純物濃度と方解石ルミネセンス特性の相関関係を考察する。  
結果は以下に示す。
  - i) ほとんどの方解石熱ルミネセンスは80と230℃のピークを示す。
  - ii) 方解石熱ルミネセンスの80℃ピークはフェーディングの影響を受ける。
  - iii) a-x-value, b-x-value, c-x-valueはMg, Mn, Fe, Srと相関関係を示す
  - iv) Feにはルミネセンス抑制効果が存在する。

Feは方解石熱ルミネセンスに大きな影響を与える。また方解石熱ルミネセンスの特性は複数の要因(Mg, Mn, Sr)によって決定されることが考えられる。様々な不純物濃度を示す方解石の分析を行い不純物濃度と方解石熱ルミネセンス特性の関係を評価することが必要である。

キーワード: 熱ルミネセンス, 方解石, 年代学

Keywords: thermoluminescence, calcite, dating



## 原子間力顕微鏡によるジルコンの観察：フィッショントラック？ それとも $\alpha$ リコイルトラック？ Zircon observation by atomic force microscope: Fission track or alpha recoil track?

長谷部 徳子<sup>1\*</sup>; 伊藤 健太郎<sup>1</sup>; 大石 新之介<sup>1</sup>; 本田 千晶<sup>1</sup>; 松木 篤<sup>1</sup>; 福間 剛士<sup>1</sup>  
HASEBE, Noriko<sup>1\*</sup>; ITO, Kentaro<sup>1</sup>; OHISHI, Shinnosuke<sup>1</sup>; HONDA, Chiaki<sup>1</sup>; MATSUKI, Atsushi<sup>1</sup>; FUKUMA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学

<sup>1</sup>Kanazawa University

フィッショントラック (FT) 法は鉱物中に含まれる  $^{238}\text{U}$  が自発核分裂を起こすことによって生じた損傷の計数に基づく年代測定法である。FT の密度が高くなるにつれ FT 同士が重なり合い計数が困難になるため、現在行われている光学顕微鏡を用いた FT 法では、必要なエッチング時間と分解能の限界により、測定できる密度がある程度制限される。原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) はナノオーダーの高い分解能を有し、より高密度の FT を計数することができる。しかし密度が高くなるのに合わせてエッチング時間を短くすると、期待される年代から予測される FT 数より多いトラックが計数される。これはエッチングが短いために、 $\alpha$  リコイルトラックと FT の形状の違いがでるに至らない状態で観察することになり適切な計数が行えないことが原因であると思われる。一方若い火山岩から採取したジルコンには、古いジルコンで観察される  $\alpha$  リコイルトラックが原因と思われる表面構造がなく、そこでまれに見つけられる、10nm 深さの、計数可能な凹は  $\alpha$  リコイルトラックである可能性があり、年代測定に結びつけられるかもしれない。

キーワード: ジルコン, フィッショントラック, アルファリコイルトラック, 原子間力顕微鏡

Keywords: zircon, fission track, alpha recoil track, atomic force microscope

三波川エクロジャイト中フェンジャイトの過剰アルゴン：沈み込み帯変成作用におけるアルゴン挙動についての制約  
Excess argon in phengite from the Sanbagawa eclogites: Constraints on argon behavior during subduction zone metamorphism

板谷 徹丸<sup>1\*</sup>; 辻森 樹<sup>2</sup>  
ITAYA, Tetsumaru<sup>1\*</sup>; TSUJIMORI, Tatsuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学, <sup>2</sup> 岡山大学  
<sup>1</sup>Okayama University of Science, <sup>2</sup>Okayama University

K-Ar system dating of phengitic mica is a powerful tool to determine cooling ages of HP/UHP metamorphic rocks. However, discordant ages in a same metamorphic unit have been often reported, particularly from rocks in Alpine-Himalayan type collisional metamorphic belts. For example, UHP-metamorphosed continental crust materials of the Dola Maira massif (western Alps, Italy) show the discrepancy due to the existence of excess argon in metamorphic minerals that has been inherited from the precursor rocks with polyphase metamorphic records. Over the last two decades, we have addressed an excess-argon free hypothesis in oceanic petrogenesis of Pacific-type convergent margins. According to the hypothesis, metamorphosed oceanic materials in Pacific-type HP metamorphic belts with only a monophase metamorphic records do not contain significant amount of excess <sup>40</sup>Ar; in other words, the K-Ar system in syn-metamorphic phengitic mica is significantly reset during fluid-induced metamorphic recrystallization at a Pacific-type convergent margin. Well-documented geological examples are of schists from Sanbagawa, Suo and Renge metamorphic belts in SW Japan, and from Otago metamorphic belt in New Zealand. Ar-Ar phengite analyses of HP-UHP metamorphosed oceanic lithologies of the Lago di Cignana (western Alps, Italy) also show negligible excess <sup>40</sup>Ar in eclogite-facies syn-metamorphic phengitic mica.

In the year 2000, as a preparation to guide participants for the IEC Conference in Japan, we have determined K-Ar ages of phengite and paragonite from the eclogite-facies Sanbagawa metamorphic rocks in Shikoku; the twenty-two results were obtained from four localities including Seba (84-89 Ma), Gongen (123-136 Ma) and Western Iratsu (78-80 Ma), and Kotsu/Bizan (82-88 Ma). Excepting for the quartz-rich kyanite eclogite from Gongen (GO), phengite and/or paragonite yields similar cooling-age ranges of metasedimentary rocks of the Sanbagawa metamorphic rocks in central Shikoku. Phengite K-Ar ages of GO eclogites are significantly older than syn-metamorphic zircon U-Pb ages at the same unit. These old ages are interpreted as the presence of excess <sup>40</sup>Ar in phengitic mica. The bulk-rock compositions of GO eclogites suggest a sedimentary protolith such as greywacke. When, where and how has the excess argon been trapped in phengite crystals? Considering the geological fact that the GO eclogites are closely associated with the Higashi-Akaishi (HA) meta-peridotite body, the false age obtained from phengite were likely attributed to an interaction between the meta-sediment (GO eclogite) and the meta-peridotite (HA peridotite) at eclogite-facies depth. We postulate that the fluids exchange between deep-subducted sediments and mantle material enhanced a hydration of peridotite and mantle-derived noble gas (including extreme <sup>40</sup>Ar) was diffused from mantle material to the sediments. During the exhumation of them, the rigid HA peridotite might have prevented a ductile deformation of GO eclogite and consequently mantle-derived argon gained from HA peridotite in GO eclogite might have been inherited by the limited-argon-depletion due to less deformation. This is not only very rare example of false K-Ar age of metamorphosed oceanic materials but also remarkable observation to explain argon behavior during sediments/peridotite interaction at a deep portion of subduction zone environment.

キーワード: 三波川帯, エクロジャイト, フェンジャイト, 過剰アルゴン  
Keywords: Sanbagawa belt, eclogite, phengite, excess argon

## 短寿命放射性同位体系列を用いた初期地球分化の研究 Deciphering early Earth's differentiation using short-lived isotope systematics

飯塚 毅<sup>1\*</sup>  
IIZUKA, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 飯塚 毅  
<sup>1</sup>Tsuyoshi IIZUKA

Knowledge of the timescale and nature of early Earth's differentiation is central to understanding the evolution of the young Earth. Here I discuss short-lived isotope systematics of terrestrial samples that extended our knowledge of early Earth's differentiation. Recent high-precision W isotopic studies revealed positive  $^{182}\text{W}$  anomalies of up to 0.15 epsilon unit in ca. 3.8 Ga Itsaq rocks from West Greenland and 2.8 Ga Kostomuksha komatiites from Russia. I explored the geologic significance of the  $^{182}\text{W}$  anomalies by combining with trace element and other isotopic data. In this context, the W isotopic data are interpreted to reflect early silicate differentiation events on Earth. Under the assumption that the bulk silicate Earth has a 5% higher Sm/Nd than the chondrite average, the  $^{182}\text{W}$ - $^{142}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}$  chronometry constrains the age of the source mantle differentiation for the Itsaq samples to 4.53-4.49 Ga. The age may reflect the timing of silicate differentiation during a sequence of magma ocean solidification.

キーワード: 冥王代, 初期分化, 消滅核種, 非コンドライト質地球  
Keywords: Hadean, early differentiation, extinct radionuclides, non-chondritic Earth

台湾中央山脈東部、豊田ネフライトの形成年代：NanoSIMSを用いたジルコンの低温リム (<20  $\mu\text{m}$ ) の年代測定  
Formation age of Fengtien Nephrite, Taiwan: Dating low-temperature thin (<20  $\mu\text{m}$ ) zircon rims by NanoSIMS

YUI Tzen-Fu<sup>1</sup>; 白杵直<sup>1\*</sup>; CHEN Chun-Yen<sup>1</sup>; 石田章純<sup>2</sup>; 佐野有司<sup>2</sup>  
YUI, Tzen-fu<sup>1</sup>; USUKI, Tadashi<sup>1\*</sup>; CHEN, Chun-yen<sup>1</sup>; ISHIDA, Akizumi<sup>2</sup>; SANO, Yuji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 台湾中央研究院地球科学研究所, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan, <sup>2</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Nephrite in the Fengtien area is associated with serpentinites within the subduction-accretionary complex in eastern part of the Central Mountain Range, Taiwan. In addition to nephrite, there are also other metasomatic rocks, such as diopsidefels and epidotite, present between serpentinites and their country rocks (metapelites and metapsammites). Among these metasomatic rocks, diopsidefels is the most common one observed, while nephrite and epidotite are less frequently present in association with diopsidefels. When all these rocks are present at one outcrop, the common lithologic sequence is serpentinite-nephrite-diopsidefels-epidotite- metasedimentary rocks. Nephrite, diopsidefels and epidotite were interpreted resulting from fluid-rock (serpentinite+country rocks) interactions during subduction metamorphism. Field occurrence and petrographic observations clearly showed that while nephrite and diopsidefels are mainly metasomatic products after serpentinite, epidotite is after metapsammite. The formation temperature has been estimated to be 300 - 400 °C based on regional geology and thermodynamic calculations by previous studies. Timing of these metasomatic processes, however, has not been constrained, although the hosting subduction-accretionary complex was thought to be of late Cretaceous in age due to paleo-Pacific subduction beneath the Eurasia continent and to be correlated with the Sambagawa belt in Japan. Zircons were separated from one epidotite sample in this study. Most of these detrital zircons were shown to have a thin zircon rim, which is less than 15 - 20  $\mu\text{m}$  in thickness. These zircon rims were considered to be newly formed during metasomatic interactions between serpentinite and country rocks, which also led to nephrite/diopsidefels/epidotite formation. The CAMECA NanoSIMS NS50 at AORI, the University of Tokyo was employed to date these low-temperature thin zircon rims with a  $\sim 5$  nA O- primary beam confined to a  $\sim 15$   $\mu\text{m}$  diameter. Sample surface was pre-ablated for 5 minutes to remove the surface Au coating and any possible surface contaminants. Data acquisition time was 500 seconds. The resulting  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ - $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  inverse isochron gave a young age of  $3.3 \pm 1.7$  Ma (MSWD = 2.1, n = 5). The date clearly showed that the Fengtien nephrite would have formed during the (initial) exhumation of the subduction-accretionary complex, which should be of late Cenozoic in age related to subduction of the South China Sea plate beneath the Luzon arc. The present study gave a good example that NanoSIMS is able to date zircon rims with a thickness about 15  $\mu\text{m}$  formed under low temperature conditions only a few million years ago. The instrument has a great potential in future studies dating various low-temperature hydrothermal, metasomatic or metamorphic zircon overgrowths.

キーワード: NanoSIMS, ジルコン, U-Pb 年代測定, ネフライト, 中央山脈, 台湾

Keywords: NanoSIMS, zircon, U-Pb dating, Nephrite, Central Mountain Range, Taiwan



## 高精度 U-Pb ジルコン年代測定における結晶形態観察および微量元素存在度分析の意義：石鎚コールドロンに産する火成岩類を例に Significance of external morphology and zircon chemistry for precise U-Pb zircon dating

竹原 真美<sup>1\*</sup>; 堀江 憲路<sup>2</sup>; 谷 健一郎<sup>3</sup>; 吉田 武義<sup>4</sup>; 外田 智千<sup>2</sup>; 清川 昌一<sup>5</sup>  
TAKEHARA, Mami<sup>1\*</sup>; HORIE, Kenji<sup>2</sup>; TANI, Kenichiro<sup>3</sup>; YOSHIDA, Takeyoshi<sup>4</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>2</sup>; KIYOKAWA, Shoichi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>国立極地研究所, <sup>3</sup>海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>4</sup>東北大学 大学院理学科 地学専攻, <sup>5</sup>九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>4</sup>Institute of Earth Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

Improvement of U-Pb zircon dating by microbeam analysis has been provided opportunity of discussion about more detailed geological events. Recent analytical precision of less than 2% at Paleogene zircon allows us to investigate shorter period events such as crystallization differentiation in magma chamber. However, the highly precise U-Pb age data yield an importance of confirming their accuracy and assaying disturbance of U-Pb system and incorporation of exotic components. In this study, we introduce data processing method of the highly precise ages based on zircon morphology, trace element abundances as well as statistics.

The precise U-Pb zircon dating by using a sensitive high-resolution ion microprobe (SHRIMP II) at National Institute of Polar Research, Japan, was applied to igneous rocks of the Tertiary Ishizuchi Cauldron in the Setouchi volcanic belt of Miocene age in northwestern Shikoku. A primary ion beam of about 10 nA was used to sputter an analytical spot of about 40  $\mu\text{m}$  diameter. A retardation lens system was utilized as a means to increase signal-to-noise ratio, and a secondary ion optics including slits of source and collector was adjusted to maximum transmission of the secondary ion under suitable mass resolution avoiding isobaric interferences on Pb isotopes. The surfaces of grain mounts were carefully washed with diluted HCl and ultra pure water to remove Pb contamination. A correction for common Pb was made on the basis of the measured  $^{204}\text{Pb}$  and the model for common Pb composition.

Weighted mean ages were calculated from  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ratios corrected by  $^{207}\text{Pb}$ . In order to ensure the accuracy of U-Pb age, age known zircon, OD-3, was analyzed together with unknown sample. Concentrations of Hf and rare earth element (REE) in zircons were also measured at the same analytical spot of U-Pb dating by SHRIMP.

Zircon grains from the Bansyodani-biotite-rhyolite were divided to two types based on the external morphology: sharply euhedral type and relatively rounded edge of prism and pyramid type.  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  data of whole zircon grains were widely scattered beyond analytical uncertainty and show a weighted mean of  $14.78 \pm 0.18$  Ma (mean square weighted deviation, MSWD: 3.4). On the other hand, the euhedral zircons yielded the weighted mean of  $14.21 \pm 0.19$  Ma (MSWD: 1.0), whereas the relatively rounded zircons were older than the euhedral zircons, which suggests the incorporation of exotic components.

Zircon chemistry supported the classification by the morphology and the U-Pb dating. An average of Hf contents of the euhedral zircons were 9523 ppm ranging from 8883 to 10496 ppm and those of the relatively rounded zircons were 8475 ppm ranging from 7616 to 8803 ppm. Hf contents of the euhedral zircons were higher than those of relatively rounded zircons. C1 chondrite-normalized REE patterns of the euhedral zircons were characterized by a large fractionation between light REE and heavy REE, large positive Ce anomalies and large negative Eu anomalies. In contrast, those of the relatively rounded zircons were enrichment of light REE, weaker anomalies of Ce and Eu. Difference of the zircon chemistry between the euhedral zircons and the relatively rounded zircons reflects source melt composition. Therefore, the external morphology, Hf content, and REE abundance are useful criteria for the data processing of the highly precise U-Pb age data.

## ジルコンの外部面を用いた LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定：隠岐島前火山への適用 LA-ICP-MS U-Pb dating of Oki Dozen volcano using non-polished zircons

伊藤 久敏<sup>1\*</sup>; Brenna Marco<sup>2</sup>; 三浦 大助<sup>1</sup>; 土志田 潔<sup>1</sup>; 中田 節也<sup>2</sup>  
ITO, Hisatoshi<sup>1\*</sup>; BRENNNA, Marco<sup>2</sup>; MIURA, Daisuke<sup>1</sup>; TOSHIDA, Kiyoshi<sup>1</sup>; NAKADA, Setsuya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所, <sup>2</sup> 東京大学

<sup>1</sup>CRIEPI, <sup>2</sup>Univ. of Tokyo

LA-ICP-MS によるジルコンの U-Pb 年代測定法は、今や広く使われ、大いに成功している。この方法は、通常、ジルコンを研磨した状態で用いるが、これは、恐らく、common Pb や Pb loss といった結晶表面付近で生じるマイナス要因を避けるためであり、また、SHRIMP のような極少量の体積（深さ 1~2  $\mu\text{m}$  が掘削される）を消費する分析法では必須である。SHRIMP に比べると、LA-ICP-MS は格段に多くの体積を消費する（掘削される深さは 10  $\mu\text{m}$  以上）ため、このことは、逆に、ジルコンの表面から内部までを容易に年代測定できることを意味する。従って、研磨しないジルコンを利用すれば、結晶内部の inherited core の存在やジルコンのマグマ中での成長速度の検討にも適用可能と思われる。今回、研磨しないジルコンを対象に標準試料（Fish Canyon Tuff と OD-3）と隠岐島前火山の試料について LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定を行った。ジルコンは波長 213nm の Nd-YAG レーザー（repetition rate: 10Hz, エネルギー密度: 4~5 J/cm<sup>2</sup>）で 30 秒間アブレーションを行った。エネルギー密度 5 J/cm<sup>2</sup> では、最終的な掘削深度は 27  $\mu\text{m}$  になり、深さ 9-18  $\mu\text{m}$  の <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 比を用いて年代値を求めた。その結果、研磨しないジルコンを利用した場合でも信頼性の高い年代が得られることが標準試料の年代値が一致することから確かめられた。また、隠岐島前試料は 6~7 Ma の年代を示し、既存の K-Ar 年代（5.4~7.4 Ma）と一致もしくは少し古い年代が得られたことを報告する。

キーワード: U-Pb 年代測定, ジルコン, LA-ICP-MS, 隠岐島前火山

Keywords: U-Pb dating, zircon, LA-ICP-MS, Oki Dozen volcano

## 東北地方太平洋沖地震の余震による大気のAr同位体変化 Crustal noble gases anomaly associated with fault movement and aftershock the 3.11 Northeast Japan Earthquake

佐藤 佳子<sup>1\*</sup>; 熊谷 英憲<sup>2</sup>; 岩田 尚能<sup>3</sup>; 兵藤 博信<sup>4</sup>; 鈴木 勝彦<sup>2</sup>; 高岡 宣雄<sup>5</sup>  
SATO, Keiko<sup>1\*</sup>; KUMAGAI, Hidenori<sup>2</sup>; IWATA, Naoyoshi<sup>3</sup>; HYODO, Hironobu<sup>4</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>2</sup>; TAKAOKA,  
Nobuo<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構、海底資源研究プロジェクト, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構、地球内部ダイナミクス領域, <sup>3</sup> 山形大学理学部, <sup>4</sup> 岡山理科大学、自然科学研究所, <sup>5</sup> 九州大学理学府

<sup>1</sup>JAMSTEC, SRRP, <sup>2</sup>JAMSTEC, IFREE, <sup>3</sup>Faculty of Science, Yamagata University, <sup>4</sup>Okayama University of Science, <sup>5</sup>Faculty of Science, Kyusyu University

Noble gases have unique characteristics that they are rarely combined with other chemicals as their very stable nature. Because its main reservoir is atmosphere, their isotopic composition is well defined and believed to be uniform all over the world insensitive to disturbance from anthropogenic and/or natural emission of geologically trapped noble gases in the earth interior. Based on our preliminary friction experiment, however, detectable amount of noble gases seem to be emitted accompanied with a fault motion (Sato et al., 2009). After the extreme Northeast Japan Earthquake occurred on March 11, 2011, extraordinary increase of seismic activity as numerous aftershocks e.g. over 4000 felt earthquakes in four months, which may be a source of non-atmospheric component preserved in the earth interior. In terms of anthropogenic component, Nuclear Power Plant) is a potential source, which is frequently monitored by radioactive species of noble gases.

We widely collected atmosphere samples all over Japan from Hokkaido, Honsyu, Chugoku and Kyusyu Is. The atmospheres have been sampled into vacuumed containers, Isotube®, at each sampling site to evaluate time-series changes. The elemental and isotopic compositions of the samples were analyzed mainly by quadrupole residual gas analyzers (RGA-200, SRS Co.) and partly confirmed by sector-type mass spectrometers (GVI-5400, GV instruments). In the duplicated analyses of the selected a few samples, the measured elemental and isotopic compositions were consistent within analytical uncertainties.

The relative elemental abundances were changed at least in heavier noble gases. Argon was enriched to pre-3.11 Earthquake atmospheres associating with a high  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  ratio. It might be contributed by emission of crustal Ar at aftershock earthquakes, deformation and fault movements. In addition, a frictional melting was occurred in a >M5 earthquake as reported by Kanamori et al. (1998). Further, radioactive Ar isotopes ( $^{42}\text{Ar}$  and  $^{39}\text{Ar}$ ) were slightly abundant than those in "pre" 3.11 Earthquake atmospheres. These radioactive Ar isotopes were regarded to be detected limitedly in neutron irradiated geological samples especially in Ar - Ar dating. These altered atmospheric Argon isotopic composition in Eastern Japan area were observed until typhoon season.

Keywords: noble gas, 3.11 Northeast Japan Earthquake, aftershock earthquake, nuclear power plant disaster, Ar Isotope

## Ar-Ar及びI-Xe年代測定法の拡張による極微量ハロゲン・希ガス多元素同時分析 Ultrahigh-sensitive simultaneous determination of halogens and noble gases by an extension of Ar-Ar and I-Xe methods

角野 浩史<sup>1\*</sup>; 小林 真大<sup>1</sup>; 齋藤 健彦<sup>1</sup>; 長尾 敬介<sup>1</sup>; 遠山 知亜紀<sup>2</sup>; 村松 康行<sup>2</sup>

SUMINO, Hirochika<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Masahiro<sup>1</sup>; SAITO, Takehiko<sup>1</sup>; NAGAO, Keisuke<sup>1</sup>; TOYAMA, Chiaki<sup>2</sup>; MURAMATSU, Yasuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 学習院大学理学部化学科

<sup>1</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Chemistry, Gakushuin University

Noble gas isotope ratios in various geochemical components in the Earth are significantly different, making them useful tracers to constrain origin of volatiles in the mantle. The development of noble gas mass spectrometry during the last two decades has enabled us to detect less than 10000 noble gas atoms (e.g., [1]).

An extension of Ar-Ar and I-Xe dating methods allows us to simultaneously determine trace amounts of noble gases, halogens, K, Ca, Ba, and U by use of ultrahigh-sensitive noble gas mass spectrometry on neutron-irradiated samples. This method has several advantages: (i) detection limits for halogens are three or four orders of magnitude lower than those of other conventional analytical methods, (ii) several components of different origin can be distinguished based on their relations with specific noble gas isotopes such as mantle-derived <sup>3</sup>He and by using various noble gas extraction methods such as laser microprobe [2], and (iii) in-situ production of radiogenic noble gas isotopes (such as <sup>4</sup>He and <sup>40</sup>Ar) after the entrapment of the noble gas component of interest in the sample can be corrected by the simultaneously determined their parent elements, such as U and K, when the age of the entrapment is known or can be assumed.

We have developed a new noble gas mass spectrometric system for this method based on an Ar-Ar and I-Xe dating system [3]. Accuracy and precision of our method were examined by analyzing GSJ and USGS reference materials, their original rocks, and scapolite standards [4] and by comparing the halogen data with those obtained with ion chromatography and ICP-MS followed by pyrohydrolysis extraction [5].

By using this method, we analyzed halogens and noble gases in exhumed mantle wedge peridotites and eclogites from the Sanbagawa-metamorphic belt, southwest Japan and those in mantle-derived xenoliths from Kamchatka and N. Philippines, in all of which relicts of slab-derived water are contained as hydrous mineral/fluid inclusions. The striking similarities of the observed noble gas and halogen compositions with marine pore fluids [6,7] challenge a popular concept, in which the water flux into the mantle wedge is controlled only by hydrous minerals in altered oceanic crust and sediment (e.g., [8]).

On the other hand, halogen ratios of olivines in lavas from the northern Izu-Ogasawara arc [9] indicate insignificant contribution to the mantle wedge of pore fluid-derived halogens. This implies a relatively small amount of the pore water subduction fluids would be released from the Izu slab at a sub-arc depth resulting in further subduction to great depths in the mantle, possibly resulting in the seawater-like heavy noble gas composition of the convecting mantle [10].

Based on the relation with <sup>129</sup>Xe produced from decay of short-lived nuclide <sup>129</sup>I during stepwise heating noble-gas extraction of the Allende and Shallowater meteorites, intrinsic I and U to the meteorites were distinguished from those of terrestrial contamination origin.

These results demonstrate that simultaneous determinations of noble gases, halogens, K, Ca, Ba, and U in mantle-derived rocks and meteorites provide important information about their origins.

[1] Sumino et al. (2001) *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* 49, 61-68. [2] Sumino et al. (2008) *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 175, 189-207. [3] Ebisawa et al. (2004) *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* 52, 219-229. [4] Kendrick (2012) *Chem. Geol.* 292-293, 116-126. [5] Muramatsu & Wedepohl (1998) *Chem. Geol.* 147, 201-216. [6] Sumino et al. (2010) *Earth Planet. Sci. Lett.* 294, 163-172. [7] Kobayashi et al. (2013) *Mineral. Mag.* 77, 1484. [8] Schmidt & Poli (1998) *Earth Planet. Sci. Lett.* 163, 361-379. [9] Sumino et al. (2013) *Mineral. Mag.* 77, 2285. [10] Holland & Ballentine (2006) *Nature* 441, 186-191.

キーワード: 希ガス, ハロゲン, 質量分析, Ar-Ar年代測定法, I-Xe年代測定法

Keywords: noble gas, halogen, mass spectrometry, Ar-Ar dating, I-Xe dating



## 蔵王火山溶岩の感度法による K-Ar 年代測定 Unspiked K-Ar dating for lavas from Zao volcano

山崎 誠子<sup>1\*</sup>; 及川 輝樹<sup>1</sup>; 伴 雅雄<sup>2</sup>  
YAMASAKI, Seiko<sup>1\*</sup>; OIKAWA, Teruki<sup>1</sup>; BAN, Masao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産総研 地質情報研究部門,<sup>2</sup>山形大学 理学部  
<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Faculty of Science, Yamagata Univ.

蔵王火山は東北日本の火山フロントの中央部に位置する複成火山である。先行研究では、約 80 万年前に活動を開始し、主となる山体は約 30-10 万年前に形成され、その後、約 3 万年前から現在までの最新活動期が続くと考えられている。本火山は初めて K-Ar 法における質量分別補正の必要性が示された火山であり、約 50 試料の年代値が報告されているが、未調査地域も残っており、一部カリウム含有量が低い試料や過剰アルゴンの混入が疑われる試料等について層序や古地磁気データと矛盾する場合もあった。本研究では、蔵王火山の活動史の全体像を明らかにするために、これまで未調査だった地域を含めて調査・試料採取を行ない、感度法による K-Ar 年代測定を実施したので、その結果を報告する。

キーワード: 蔵王火山, K-Ar 年代測定  
Keywords: Zao volcano, K-Ar dating

## 段階加熱による拡散実験と白雲母 Diffusion experiment by stepwise heating and muscovite

兵藤 博信<sup>1\*</sup>  
HYODO, Hironobu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学自然科学研究所  
<sup>1</sup>RINS, Okayama Univ. of Sci.

一般に結晶水を含む鉱物のアルゴンの拡散パラメーターを決定するとき真空中での段階加熱実験は加熱中に結晶格子の破壊が起きるため正確な値が得られず不相当であるとされてきた。以前報告したレーザー段階加熱による単結晶黒雲母の結果では冷却速度を考慮すると実際の値と変わらない範囲に収まることがわかっている。一方、真空下での白雲母の拡散実験の結果は従来のデータとの不一致が大きく実用的な適用が難しいと考えられた。白雲母のレーザー加熱による実験での大きな問題は脱水反応もしくは構造相転移による脱ガスが 600°C 以上で急激に進行し、拡散現象では解釈できなくなる要素が大きい。真空中の実験の場合、拡散パラメーターを見積もる Arrhenius 実験では脱水の影響が顕著でない 600°C 以下でのデータを用いたが、拡散するガス量が少なく誤差が大きい問題があった。ほとんどの場合、活性化温度は 30-40 kcal/mole の領域であり、その値から得られる閉止温度は 300°C を超える値は少ない結果となった。むしろ 400°C 以上の高い温度は温度領域を 600-700°C にして急激な拡散を起こす状態でのデータから得られた。近年、熱水環境下での実験で活性化エネルギーは 63 kcal/mole、冷却速度、拡散半径に依存するが閉止温度は、400°C と見積もられている。(Harrison et al., 2009)。このデータは 600-700°C の値を使用し、構造的な変化が起きていないという保証はない。熱水環境下で仮に結晶格子が安定的に存在したとしても同じ温度領域で構造相転移がおきるとすれば拡散パラメーターは独立に分離できない。単に数学的側面からは Arrhenius plot で大きな活性化エネルギー E もしくは周波数因子  $D_0/a^2$  を得るには急な傾きすなわち急激な脱ガスが必要となる。これは実は拡散においてゆっくりとした振る舞い (E,  $D_0/a^2$  が大きい) をすることは矛盾する領域で拡散現象を見ていることになる。一方、野外においては白雲母が高い閉止温度を示している証拠もみついている。すなわち単に実験室において条件をみただけでなく、野外での条件に基づく考察を平行して行う必要があり、白雲母の閉止温度の意味を再考する必要がある。

キーワード: 拡散実験, アルゴン, 閉止温度, 段階加熱, 白雲母  
Keywords: diffusion experiment, argon, closure temperature, stepwise heating, muscovite

滋賀県余呉湖細粒堆積物のルミネッセンス年代測定と環境変動解析  
Luminescence dating and analysis of environmental change of fine grained sediments  
from Lake Yogo, Japan

伊藤 一充<sup>1\*</sup>  
ITO, Kazumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

We applied optically stimulated luminescence (OSL), infrared stimulated luminescence (IRSL), post-IR IRSL (pIRIR) and <sup>14</sup>C dating to the sediment core YG11-3 (294cm) from Lake Yogo, Japan. The fine grained quartz and polymineral sample are used for equivalent dose ( $D_e$ ) estimation. As a result of several basically test, the preheat temperature of 200 °C for 10 s and a cut heat of 160 °C were suitable to all OSL measurements. The accepted aliquots are about 90 % per measurement discs and the range of  $D_e$ s are 0.3 ~3.5 (Gy). The bulk <sup>14</sup>C ages are ca. 300 years older than these of plant residue. After subtracting this age difference from bulk <sup>14</sup>C ages, the corrected ages agree with the OSL ages except the ages of sediments from some depths. Two excepted OSL ages are older than the corrected bulk <sup>14</sup>C ages (YG11-3-245, YG11-3-343) and these layers include a lot of plant residue enough to analyze the plant residue <sup>14</sup>C ages. It seems that these sediments from two layers have been transported quickly in muddy stream based on a temporary environmental event. Additionally, the result of the IRSL<sub>50/225</sub> and pIRIR<sub>225</sub> age confirms the existence of this temporary event. By comparing the OSL ages with <sup>14</sup>C, IRSL and pIRIR ages, the quartz from the small catchment area can be applied to reconstruct the age model of sediment core in Japan.

キーワード: OSL 年代測定, pIRIR 年代測定, 湖沼堆積物  
Keywords: OSL dating, pIRIR dating, lake sediments

## NanoSIMS を用いた太古代ジルコンの U-Pb 年代測定 -包有物中揮発性元素の測定を目指して U-Pb dating of Eoarchaeon zircon using a NanoSIMS -implication for the measurement of volatile in the inclusions

石田 章純<sup>1\*</sup>; 高畑 直人<sup>1</sup>; 佐野 有司<sup>1</sup>; David Jean<sup>2</sup>; Pinti L. Daniela<sup>2</sup>  
ISHIDA, Akizumi<sup>1\*</sup>; TAKAHATA, Naoto<sup>1</sup>; SANO, Yuji<sup>1</sup>; DAVID, Jean<sup>2</sup>; PINTI L., Daniela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> モントリオール大学  
<sup>1</sup>AORI the University of Tokyo, <sup>2</sup>University of Montreal

太古代火成岩中の水素や硫黄などの揮発性成分の同位体比値を明らかにすることは、初期地球の内部進化を解釈する重要な手掛かりの内の一つである。火成岩中に産するジルコン中のアパタイトやガラスなどの包有物はそのような揮発性成分を保持していると期待されるが、これらはしばしばマイクロスケールで存在するため、高空間分解能な分析手法が求められる。同時に、そうした包有物が初生的な情報を残しているかを評価することも重要である。本研究では NanoSIMS50 を用いてこれらの問題へのアプローチを行っている。

測定は、カナダ、Nuvvuagittuq supracrustal belt のトーナル岩から分離されたジルコンを対象に行った。過去の研究で報告されているこのトーナル岩の年代は、LA-MC-ICP-MS を用いた U-Pb 年代測定法で  $3661 \pm 4$  Ma である [1]。測定では、自形から半自形で結晶の長軸方向の長さが 50 から 200  $\mu\text{m}$  程度のジルコンを対象とした。いくつかのジルコンには直径 10  $\mu\text{m}$  以下のアパタイトやガラスの包有物がみられ、年代測定はこれら包有物を避けて行われた。

<sup>238</sup>U-<sup>206</sup>Pb 及び、<sup>207</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb の 2 種類の年代測定を同スポットに対して行った。測定手法は Takahata et al.(2008) に準じた [2]。1 次イオンビームとして 5 nA の酸素イオンを用いた。<sup>238</sup>U-<sup>206</sup>Pb の年代測定では、<sup>30</sup>Si<sup>+</sup>, <sup>90</sup>Zr<sup>16</sup>O<sup>+</sup>, <sup>204</sup>Pb<sup>+</sup>, <sup>206</sup>Pb<sup>+</sup>, <sup>238</sup>U<sup>16</sup>O<sup>+</sup>, <sup>238</sup>U<sup>16</sup>O<sub>2</sub><sup>+</sup> を多重検出器で同時に測定し、<sup>207</sup>Pb-<sup>204</sup>Pb の年代測定では <sup>204</sup>Pb<sup>+</sup>, <sup>206</sup>Pb<sup>+</sup>, <sup>207</sup>Pb<sup>+</sup> を一つの検出器で磁場を変化させながら測定した。

測定の結果、<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 比は 0.4932 から 0.7993 とバリエーションをとり、<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 比は 0.3052 から 0.3443 の値をとることが分かった。得られたそれぞれの値を Tera-Wasserburg コンコーディア図にプロットすると、過去の研究と良く一致する  $3638 \pm 19$  Ma の年代が得られた。一方で、一部の試料において 2 つの年代値の不一致 (ディスコード) が見られた。こうした試料では鉛を失うような変成作用を経験しているため、包有物中の揮発性元素の始原性は失われている可能性が高いと考えられる。U-Pb 年代測定の結果をもとに、ジルコン中包有物の揮発性元素の分析を進めている。

[1] David et al., GSA Bulletin, 121, 150-163, 2009.

[2] Takahata et al., Gondwana Res., 14, 587-596, 2008.

キーワード: ウラン鉛年代測定, ナノシムス, ジルコン, 包有物, 太古代  
Keywords: U-Pb dating, NanoSIMS, zircon, inclusion, Archaean



## 東南極ナピア岩体西部における原生代の年代的・地球化学的特徴 Geochronological-geochemical characterization of Proterozoic age, western part of the Napier Complex, East Antarctic

堀江 憲路<sup>1\*</sup>; 外田 智千<sup>1</sup>; 廣井 美邦<sup>2</sup>; 本吉 洋一<sup>1</sup>; 白石 和行<sup>1</sup>

HORIE, Kenji<sup>1\*</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>1</sup>; HIROI, Yoshikuni<sup>2</sup>; MOTOYOSHI, Yoichi<sup>1</sup>; SHIRAIISHI, Kazuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 千葉大学理学部

<sup>1</sup>NIPR, <sup>2</sup>Chiba University

The Napier Complex in East Antarctica has attracted considerable interest from a viewpoint of long Archaean crustal history from 3800 Ma to 2500 Ma (e.g., Harley & Black 1997) and >1000 °C ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism in a regional scale (e.g., Sheraton et al., 1987; Harley & Hensen 1990). The timing of ultrahigh-temperature metamorphism is in argument either >2550 Ma or <2480 Ma (Kelly and Harley, 2005). However, some previous works reported relatively younger ages, such as 2380 Ma, ~2200 Ma, and ~1820 Ma (e.g., Grew et al., 2001; Owada et al., 2001; Suzuki et al., 2001, 2006; Carson et al., 2002; Hokada and Motoyoshi, 2006). In addition, Horie et al. (2012) reported similar ages in felsic orthogneiss from Fyfe Hills and quartzite from Mt. Cronus via zircon U-Pb dating. In this study, we try to characterize the "younger ages" in order to interpret thermal history after the UHT metamorphism in the Napier Complex.

A quartzo-feldspathic gneiss, YH05021606A, collected from Fyfe Hills by Y.H. during the field work at the 2004-2005 Japanese Antarctic Research Expedition was analyzed by using a high-resolution ion microprobe (SHRIMP II) at the National Institute of Polar Research, Japan. The zircon U-Pb ages of the YH05021606A sample are already reported in Horie et al. (2012). The sample shows multiple age peaks centered at ca. 3025, 2943, 2883, 2818, 2759, 2674, 2518, and 2437 Ma, and evidence of the "younger ages" has never been reported. In this study, primary ion beam was focused up to 10 μm in order to observe detailed zircon structure. The U-Pb analysis of zircon yielded similar age population to the previous work and revealed the "younger ages" of ca. 2273, 2195, 2106, and 1980 Ma. Distribution of the "younger ages" is consistent with those of a felsic orthogneiss, YH05021603A, in Fyfe Hills and those of a quartzo-feldspathic gneiss, YH05021701A, and a quartzite, YH05021701H, in Mt. Cronus (Horie et al., 2012). The "younger ages" in this sample could be found in overgrowth rim and single grain, which indicates that both of Fyfe Hills and Mt. Cronus had been affected by any geological events after the UHT metamorphism. Previous workers suggested that the ca. 2200 Ma age that they obtained for beryllium syn-metamorphic pegmatites reflects post-emplacement deformation and metamorphism (Grew et al., 2001), and a ca. 1930-1800 Ma U-Pb upper intercept age for zircons were affected by aqueous fluid from Paleozoic pegmatite (Carson et al., 2002). Horie et al. (2012) only suggests that these 2380-820Ma ages represent local fluid infiltration or a local deformation events. We will discuss about character of the "younger ages" zircon with trace element signature.

キーワード: 東南極, ナピア岩体, ジルコン, U-Pb 年代測定, 希土類元素, 変成作用

Keywords: East Antarctica, Napier Complex, zircon, U-Pb dating, rare earth element, metamorphism

## 変成炭酸塩岩中のストロンチウム、ネオジウム同位体を用いた古海洋の復元 —東西ゴンドワナ間のモザンビーク海— Sr and Nd isotope systematics of metacarbonate rocks as proxies for reconstructing extinct oceans: Mozambique Ocean

大辻 奈穂<sup>1\*</sup>; 亀井 淳志<sup>2</sup>; 土屋 範芳<sup>3</sup>; G.H. Grantham<sup>4</sup>; 河上 哲生<sup>5</sup>; 石川 正弘<sup>6</sup>  
OTSUJI, Naho<sup>1\*</sup>; KAMEI, Atsushi<sup>2</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>3</sup>; G.H., Grantham<sup>4</sup>; KAWAKAMI, Tetsuo<sup>5</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>6</sup>

<sup>1</sup>新潟大学, <sup>2</sup>島根大学, <sup>3</sup>東北大学, <sup>4</sup>Council for Geoscience, 南アフリカ, <sup>5</sup>京都大学, <sup>6</sup>横浜国立大学  
<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Shimane University, <sup>3</sup>Tohoku University, <sup>4</sup>Council for Geoscience, South Africa, <sup>5</sup>Kyoto University, <sup>6</sup>Yokohama National University

Geochemistry of sedimentary rocks is widely used for understanding the depositional environment and tectonic setting, including source rock composition and paleo-ocean signature. In particular, chemically deposited carbonate rocks are directly precipitated from saturated seawater are supposed to hold key information of extinct paleo-oceans. An important geochemical tool that can lead to the identification of contemporaneous seawater is isotopic composition of strontium and neodymium in carbonate rocks, because these elements have distinct residence and mixing time in seawater and also characterized by surrounding continents.

In the Sor Rondane Mountains (SRMs), East Antarctica, metasedimentary rocks including metacarbonate rocks are widely distributed. These rocks were supposed to have formed in the paleo-ocean called as "Mozambique Ocean". SRMs are divided into two terranes, the SW and NE terranes, by the Main Tectonic Boundary (MTB). In the SW terrane, metaigneous rock that were formed at ca. 1000 Ma and metasedimentary rocks occur as main lithological units, which underwent metamorphic evolution along a anticlockwise *P-T* path, whereas the NE terrane is dominated by metasedimentary rocks, with a characteristic clockwise of *P-T* path. Additionally, metapelitic rocks in the SW terrane have similar detrital age population with the nearby metaigneous rocks, in contrast to those in the NE terrane show older detrital ages (ca. 3300Ma)(Osanaï et al., 2013). If it is possible to reveal the relationship between ocean and continents during depositional timing of carbonate rocks in both terranes, we will be able to put forward a model to explain the difference in depositional setting between SW and NE terranes. To achieve this, analyzed detailed study of Sr and Nd isotopic composition of metacarbonate and metamorphosed silicate rocks, such as pelitic, felsic, mafic and ultramafic rocks, from several important outcrops throughout SRMs were carried out. Based on these data, we discuss about the relationship with continent and depositional basin of carbonate sediments before the final amalgamation of Gondwana.

After geochemical screening for post-depositional alteration, using oxygen isotopes, trace elements and REE + Y patterns, strontium isotope chemostratigraphy was applied to the metacarbonate rocks from SRMs and depositional ages of 880-850 Ma and 820-790 Ma (late-Tonian and early-Cryogenian age) were estimated (Otsuji et al., 2013). Metacarbonate rocks in the Bratnipene and Tangarden regions in the SW terrane are showing typical seawater-rock mixing relationship in a  $\epsilon\text{Sr}$  vs.  $\epsilon\text{Nd}$  cross-plot indicating the deposition of metacarbonate rocks nearby meta-tonalitic and orthogneiss dominated continental arc. By contrast, the Perlebandet region exhibits an extremely different depositional setting of a seamount based on Nd model and depositional age and REE and  $\epsilon\text{Nd}$  compositions. Moreover, the Balchen metacarbonate rocks show a signature of depositional setting surrounding a continent, based on the comparison of metacarbonate rocks with continental and oceanic derived rock units. A comparison of isotopic characteristics of Balchen carbonate rocks with the basement rocks from neighboring Gondwana regions suggested the presence of an ancient continent that is different from Kalahari and Dharwar Craton.

Thus, the Sr and Nd isotopic compositions of carbonate rocks deposited in the Mozambique Ocean have preserved important information about depositional setting of sedimentary rocks and relationship with surrounding basement and continents. In summary, geochemical proxies such as Nd and Sr isotopes of metacarbonate rocks can yield key information not only of paleo-oceans but also about the surrounding rocks during depositional timing, which can lead to a better understanding of oceanic closure during the formation of supercontinents.

Reference cited: Osanaï et al., 2013. PR, 234, 8-29. Otsuji et al., 2013. PR, 234, 257-278.

Keywords: Sr and Nd isotope ratios, metacarbonate rocks, the Sor Rondane Mountains, Mozambique Ocean, Gondwana

## 南インドダールワークラトン中の縞状鉄鉱層を用いた地球化学的研究 Geochemistry of Archaean Banded Iron Formations in the Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, Southern India

鯉沼 健太郎<sup>1\*</sup>; Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>1</sup>; 三島 郁<sup>2</sup>; 上野 雄一郎<sup>2</sup>; 外田 智千<sup>3</sup>

KOINUMA, Kentaro<sup>1\*</sup>; MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>1</sup>; MISHIMA, Kaoru<sup>2</sup>; UENO, Yuichiro<sup>2</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>新潟大学, <sup>2</sup>東京工業大学, <sup>3</sup>国立極地研究所

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>National Institute of Polar Research

Banded iron formations (BIF) are marine chemical sediment rocks precipitated mostly in Archaean and early Paleoproterozoic between 2.7Ga and 2.3Ga. This time interval record profound changes in the redox state of the oceans and atmosphere, such as the Great Oxidation Event (GOE). We present here the geochemical data obtained from 3.0 Ga banded iron formation (BIF) in the Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, Southern India. This region exposes the Archaean strata predominated by supracrustal greenstone belts, stratigraphically overlying the Peninsular gneiss. Chitradurga schist belt comprises of three important BIF layers distributed in the Bababudan and Chitradurga groups. We present here the salient geochemical characteristics and strontium and neodymium isotope results of the BIFs and discuss the depositional environment.

BIF contain very low content of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<1wt.% except 1 sample) indicating less detrital components. The PAAS-normalized REY patterns shows positive La and Eu anomaly, low concentration of rare earth element, depletion of light rare earth elements (LREEs) relative to heavy rare earth elements (HREEs). These features differ with other Archaean BIFs in terms of lack of positive Y anomaly. The large positive Eu anomalies in Archean BIF of Chitradurga schist belt attribute to high-T hydrothermal fluid fluxes (>250 °C), while the negative Ce anomaly reflects the lack of significant oxidizing agents.

Sr isotopic composition of BIF shows large variations suggesting post depositional alterations, whereas Nd isotope ratios gave consistent information. Most of the samples show  $\epsilon\text{Nd}(3000\text{Ma})$  in the range of +2 to +4 and  $T_{DM}$  model age in accordance with sedimentation age. The  $\epsilon\text{Nd}(3000\text{Ma})$  of depleted mantle is about +4, which suggests that most of the Chitradurga BIFs were deposited in an environment strongly affected by input from a depleted mantle. However samples with different REY pattern show higher  $\epsilon\text{Nd}(3000\text{Ma})$  between +6 and +14 and their  $T_{DM}$  model age are not equal to the sedimentation age. The geochemical results thus suggest that the BIFs in the Chitradurga schist belt were deposited near possible ridges affected by hydrothermal activities.

キーワード: 縞状鉄鉱層, ダールワークラトン, 太古台, Nd 同位体

Keywords: Banded Iron Formations, Dharwar Craton, Archaean, Nd isotope

## Tectonic evolution of Karwar and Coorg blocks, southern India Tectonic evolution of Karwar and Coorg blocks, southern India

C, Ishwar-kumar<sup>1\*</sup>; K, Sajeev<sup>1</sup>; B.F, Windley<sup>2</sup>; M, Satish-kumar<sup>3</sup>; T, Hokada<sup>4</sup>; K, Horie<sup>4</sup>; T, Itaya<sup>5</sup>  
C, Ishwar-kumar<sup>1\*</sup>; K, Sajeev<sup>1</sup>; B.F, Windley<sup>2</sup>; M, Satish-kumar<sup>3</sup>; T, Hokada<sup>4</sup>; K, Horie<sup>4</sup>; T, Itaya<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Centre for Earth Sciences, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India, <sup>2</sup>Department of Geology, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK, <sup>3</sup>Department of Geology, Niigata University, 2-8050, Ikarashi, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan, <sup>4</sup>National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo190-8518, Japan, <sup>5</sup>Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0

<sup>1</sup>Centre for Earth Sciences, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India, <sup>2</sup>Department of Geology, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK, <sup>3</sup>Department of Geology, Niigata University, 2-8050, Ikarashi, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan, <sup>4</sup>National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo190-8518, Japan, <sup>5</sup>Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0

The Karwar and Coorg blocks in western India are important terranes in the point of paleogeographic study of India and Madagascar. The c. 1300 Ma Kumta suture separates the Karwar and Dharwar blocks within the western Dharwar craton of India (Ishwar-Kumar et al., 2013a). The major rock types are quartz phengite schist, chlorite schist, fuchsite schist, garnet biotite schist etc. Isochemical phase diagram estimates of the quartz phengite schist suggest peak metamorphic *P-T* conditions were c. 18 kbar and 550° C. Towards the east of the suture Sirsi shelf contains weakly deformed sedimentary rocks, unconformable on high-grade gneisses of the Dharwar craton. The Karwar block to the west of the Kumta suture is mainly composed of undeformed tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) with minor enclaves of amphibolite cut by later granites. Whole-rock major and trace element data suggest that the TTGs were derived from a volcanic arc, and that the granites have within-plate signatures. Amphibolites have a chemical composition comparable to basalts to basaltic andesites with MORB signatures. The TTGs from Karwar block show a U-Pb zircon magmatic ages of ca. 3200 Ma (Ishwar-Kumar et al., 2013a). The K-Ar biotite age from the TTGs (1746 Ma and 1796 Ma) and amphibolite (ca. 1697 Ma) represents late-stage c. 1700 Ma uplift event of both TTGs and amphibolites. The Coorg block, which is about 100 km south of Karwar block, contains mainly granulite grade rocks (Chetty et al., 2012; Ishwar-Kumar et al., 2013b; Santosh et al., 2014). Major rocks types are charnockite, mafic granulites, hornblende-biotite gneiss, garnet-hornblende gabbro, anorthosite and granite. The Coorg (Mercara) suture which separates the Coorg block from the Dharwar craton to the east contains garnet-kyanite-sillimanite gneiss, mylonitic gneiss, calc-silicate granulite, mafic granulite, granite and syenite. Pseudosection calculations indicate that the constituent calc-silicate granulite and mafic granulite were re-equilibrated under high-pressure conditions of 15-20 kbar at a temperature of 800-900° C (Ishwar-Kumar et al., 2013b). Santosh et al. (2014) recorded a metamorphic age of c.1200 Ma from metapelites from the Coorg (Mercara) suture zone. Integration of our structural, geological and geochronological results integrated with published data suggests the presence of a 1300-1200 Ma paleosubduction zone in western India. We propose that the Kumta and Coorg sutures are an eastern extension in western India of the northern and southern parts of the Betsimisaraka suture of north-eastern Madagascar.

キーワード: Karwar block, Coorg block, Kumta suture, Dharwar craton, Southern India, India-Madagascar  
Keywords: Karwar block, Coorg block, Kumta suture, Dharwar craton, Southern India, India-Madagascar



## 南部北上山地, 大船渡市甫嶺付近から見いだされたカンブリア紀のU-Pb ジルコン年代を示すトータル岩について Cambrian tonalite from Horei, Ofunato in southern Kitakami Mountains, Japan

土谷 信高<sup>1\*</sup>; 武田 朋代<sup>1</sup>; 佐々木 惇<sup>1</sup>; 足立 達朗<sup>2</sup>; 中野 伸彦<sup>2</sup>; 小山内 康人<sup>2</sup>; 足立 佳子<sup>3</sup>  
TSUCHIYA, Nobutaka<sup>1\*</sup>; TAKEDA, Tomoyo<sup>1</sup>; SASAKI, Jun<sup>1</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>2</sup>; NAKANO, Nobuhiko<sup>2</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>2</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 岩手大・教育, <sup>2</sup> 九州大・比文, <sup>3</sup> 新潟大・超域

<sup>1</sup>Iwate University, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>Niigata University

南部北上帯の大船渡市東部の綾里付近には、前期白亜紀の大船渡層群に属する火山岩類とそれに貫入する斜長石石英閃緑斑岩の岩脈が分布している。大船渡層群に属する火山岩類は、安山岩～玄武岩および同質の火山岩類を主体とし、斜長石石英閃緑斑岩の岩脈に貫入されている。大船渡市東部の越喜来湾に面する甫嶺付近には、約40mの範囲にわたって大船渡層群の火成岩類とは異質な珪長質火砕岩類とトータル岩が分布する。これらは、大船渡層群に属すると考えられる安山岩および玄武岩のほか斜長石石英閃緑斑岩岩脈に貫かれており、数10cmから10mに至る大小様々なブロックとして産する。これらのブロックの主体をなすのは珪長質火砕岩類であり、トータル岩は最大1×2mのブロックとして3か所から見いだされるのみである。トータル岩と珪長質火砕岩との関係は観察されない。甫嶺付近は、北部北上帯と南部北上帯の境界である早池峰東縁断層の南方延長部に相当することから、南部北上帯に属する古期岩類が前期白亜紀の大船渡層群の火山岩類に取り込まれて残存しているものと考えられる。

珪長質火砕岩類は、破片状の石英、斜長石を主とし、角閃石仮像を伴うデイサイト質～流紋岩質の火山砕屑岩であり、しばしば砂岩を伴う。トータル岩は斜長石・石英を主とし、デカッセイト組織を示す黒雲母と角閃石仮像と思われるアクチノ閃石細粒集合体、二次的な黄鉄鉱などからなり、カリ長石は認められない。全岩化学組成はSiO<sub>2</sub>に富み(73.1～73.4%)、Pearce et al. (1984)による微量元素の特徴では火山弧花崗岩の領域に入るが、通常の花崗岩よりもK<sub>2</sub>O(0.72～1.27wt%), Rb(16～32ppm), Ba(91～97ppm)などのLIL元素に著しく乏しい特徴がある。以上の特徴から、大陸地殻物質の影響の少ない海洋性の未成熟な火山弧での島弧性火山活動に由来する可能性が高い。

トータル岩から分離されたジルコン結晶について、九州大学比較社会文化研究院のLA-ICPMS(Adachi et al., 2012)によってU-Pb年代を測定したところ、ジルコン8粒子8点の分析値から498±7Maのコンコーディア年代が得られた。この年代はカンブリア紀最末期に相当し、同時代の花崗岩質岩としては、Sakashima et al. (2003)によってジルコンU-Pb SHRIMP年代が得られた日立変成岩類中の大雄院花崗岩(490.8±6.1Ma)、九州肥後帯の氷川花崗岩(502.5±9.6Ma)などがある。また日立変成岩からは、田切ほか(2010)により変成ポーフィリー(505.1±4.4Ma)、変成花崗岩礫(499.6±5.6Ma)、およびTagiri et al. (2011)により長石質片岩(510.0±4.0Ma)のジルコンU-Pb SHRIMP年代が得られている。これらの花崗岩質岩の年代は、日本列島の沈み込み起源の花崗岩としては最も古いものである。これらは、原日本のカンブリア紀の海洋性島弧-海溝系で形成された島弧性花崗岩類であると考えられる(磯崎ほか, 2010)。一方南部北上山地においては、下條ほか(2010)による早池峰複合岩類、神楽複合岩類のトロニウム岩から466±6MaのジルコンU-Pb SHRIMP年代が得られている。また佐々木ほか(2013)は、LA-ICPMSによるジルコンU-Pb年代の検討から、氷上花崗岩類の固結年代が約450Maであることを明らかにした。さらに小山内ほか(2014)は、LA-ICPMSによるジルコンU-Pb年代の検討から、九州黒瀬川構造帯の花崗岩類の活動年代を446～472Maとした。以上のことから、原日本の古生代前期の花崗岩活動には、約500Maと約450Maの2回のイベントがあったと考えることができる。これらの花崗岩類の岩石学的性質を明らかにすることは、古生代前期における原日本がどのようなテクトニクス場に置かれていたのかを解明するために重要であると考えられる。

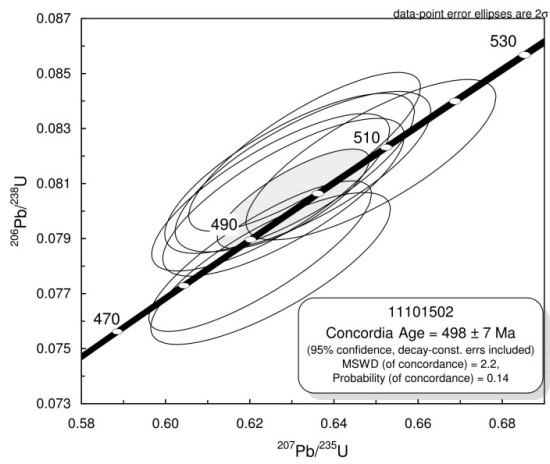
キーワード: 北上, カンブリア紀, ジルコン, U-Pb年代, トータル岩

Keywords: Kitakami, Cambrian, zircon, U-Pb age, tonalite

SGL43-02

会場:411

時間:5月1日 14:30-14:45



## 南部阿武隈山地に分布する阿武隈深成岩類のジルコン, U-Pb 年代 U-Pb ages of zircon in plutonic rocks within the southern Abukuma Mountains

高橋 浩<sup>1\*</sup>; 御子柴 真澄<sup>1</sup>; 久保 和也<sup>1</sup>; 壇原 徹<sup>2</sup>; 岩野 英樹<sup>2</sup>; 平田 岳史<sup>3</sup>  
TAKAHASHI, Yutaka<sup>1\*</sup>; MIKOSHIBA, Masumi<sup>1</sup>; KUBO, Kazuya<sup>1</sup>; DANHARA, Toru<sup>2</sup>; IWANO, Hideki<sup>2</sup>; HIRATA, Takefumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>産総研地質調査総合センター, <sup>2</sup>京都フィッショントラック (株), <sup>3</sup>京都大学

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Kyoto Fission Track Co., Ltd., <sup>3</sup>Kyoto University

南部阿武隈山地には、阿武隈深成・変成岩類が広く分布しており、古くから詳しく研究されてきた (Miyashiro, 1958 : 総研阿武隈グループ, 1969; 加納ほか, 1974; 丸山, 1979 など)。南部阿武隈山地の深成岩類の放射年代については、河野・植田 (1965) の K-Ar 年代報告をはじめとして、Maruyama (1978), 柴田・内海 (1983), 柴田 (1987), 柴田・田中 (1987) などによって多くの放射年代が報告され、これらは 90-120 Ma の年代値を示すことが明らかになった。また、最近では、阿武隈山地北部の三春町及び船引町周辺の深成岩類中の角閃石 Ar-Ar 年代 (Takagi and Kamei, 2008) 及びジルコンの U-Pb 年代 (Kon and Takagi, 2012) が報告され、斑れい岩と花崗岩類の間で年代差がほとんど無いことが示された。しかし、南部阿武隈山地の深成岩類については未だジルコン, U-Pb 年代は報告されていない。今回、南部阿武隈山地の主要な深成岩体についてジルコンの U-Pb 年代を測定したのでその結果を報告するとともに深成岩類の冷却史に基づいた南部阿武隈山地のテクトニクスについて考察する。

南部阿武隈山地に分布する深成岩類は、貫入関係に基づいて、古い順に斑れい岩及び閃緑岩、細粒閃緑岩、角閃石黒雲母花崗閃緑岩 (入四間岩体, 上君田岩体, 田人岩体, 石川岩体, 宮本岩体, 鮫川岩体), 黒雲母花崗閃緑岩 (鳥曾根岩体及び埴岩体), 黒雲母花崗岩及び細粒優白質花崗岩である。ジルコン, U-Pb 年代は、斑れい岩で  $102.7 \pm 0.8$  Ma (田人岩体),  $109.0 \pm 1.1$  Ma (埴岩体),  $114.2 \pm 0.8$  Ma (宮本岩体), 角閃石黒雲母花崗閃緑岩で  $105.3 \pm 0.8$  Ma (入四間岩体),  $105.2 \pm 0.8$  Ma (上君田岩体),  $113.8 \pm 0.7$  Ma (田人岩体),  $104.4 \pm 0.7$  Ma (石川岩体),  $106.4 \pm 0.8$  Ma (宮本岩体), 黒雲母花崗閃緑岩 (埴岩体) で  $105.7 \pm 1.0$  Ma, 黒雲母花崗岩で  $104.5 \pm 0.8$  Ma, 細粒優白質花崗岩で  $100.2 \pm 0.8$  Ma であり、斑れい岩とその周辺の花崗岩類との間で年代差が小さいことが明らかとなった。さらに、同一試料中の黒雲母 (及び角閃石) の K-Ar 年代, フィッショントラック年代を併せて測定し、各岩石の冷却曲線を求めた結果、これらすべての岩石が高温部 (>300 °C) で急激な冷却を示しており、このことは、深成岩類の貫入固結後に阿武隈山地が急激に上昇したことを示唆している。

### 文 献

加納 博ほか (1973) 竹貫地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 116 p.

Kon Y. and Takagi, T. (2012) Jour. Mineral. Petrol. Sci., vol. 107, 183-191.

Maruyama, T. (1978) Jour. Min. Coll. Akita Univ., Ser. A, 5, p. 53-102.

丸山孝彦 (1979) 日本列島の基盤, p. 523-558.

Miyashiro, A. (1958) Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. C, vol. 8, p. 245-268.

柴田 賢 (1987) 岩鉱, vol. 82, p. 36-40.

柴田 賢・田中 剛 (1987) 岩鉱, vol. 82, p. 433-440.

柴田 賢・内海 茂 (1983) 岩鉱, vol. 82, p. 405-410.

総研阿武隈グループ (1969) 地質学論集, no. 4, p. 83-97.

Takagi, T. and Kamei, A. (2008) Jour. Mineral. Petrol. Sci., vol. 103, 307-317.

キーワード: 阿武隈花崗岩類, 斑れい岩, 阿武隈帯, U-Pb 年代, ジルコン  
Keywords: Abukuma Granites, Gabbro, Abukuma Belt, UU-Pb age, zircon

## 津川一會津区北西部の中新世堆積盆地形成トレンドとインバージョン Structural trends and tectonic inversion in Miocene sedimentary basins in the Tsugawa-Aizu province, Niigata prefecture

成沢 紗也佳<sup>1\*</sup>; 栗田 裕司<sup>2</sup>  
NARISAWA, Sayaka<sup>1\*</sup>; KURITA, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 新潟大学理学部地質科学科  
<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Niigata University

新潟県北東部に位置する津川・三川盆地は、主にグリーンタフからなる中新世前期～中期の堆積盆地である。既存研究では、基盤中にできたNW－SEの段差が津川盆地を作ったと強調されている。本研究は、新潟県阿賀町三川地域に分布する第三系を対象に野外調査を行い、堆積盆地の発生～発達過程を明らかにすることを目的とする。本調査地域に分布する新第三系を下位より、鹿瀬層・津川層・新谷層・五十島層（新称）に区分した。

最下位層である鹿瀬層と津川層は堆積相解析の結果からハーフグラベンまたはグラベンを埋積したと推定され、その分布は、N－SまたはNNE－SSW方向のマップスケールの断層で規制されている。一方、NW－SE方向の断層は基盤の小規模な段差や小断層を形成したり、ダイクの貫入方向に影響を与えている。つまり本地域の盆地形成には2方向の要素が関与したと言え、そのうち、主要な方向性はN－SまたはNNE－SSWである。

これらの新第三系は、現在その分布が逆断層で断たれ、基盤と接していることが多い。こうした逆断層が rift-border fault が推定される場所に位置していることは、2方向の要素のうちN－SまたはNNE－SSW方向の rift-border fault の再活動によってインバージョンが起こったことを示唆する。このとき再活動した断層の方向性からみて、本地域の盆地形成期は新発田－小出構造線の影響を受けていた可能性がある。

キーワード: 新潟堆積盆地, 中新世, リフト, 構造トレンド, インバージョン  
Keywords: Niigata sedimentary basin, Miocene, rift, structural trend, inversion



## 関東山地北東縁部寄居 - 小川地域の変成岩の年代 K-Ar whole rock dating of the metamorphic rocks in the Yorii-Ogawa area of the north-eastern part of the Kanto Mountains

小野 晃<sup>1\*</sup>  
ONO, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし  
<sup>1</sup> none

関東山地北東縁部の寄居-小川地域には跡倉ナップが三波川変成岩の構造的上位にかなり広く分布している。跡倉ナップには小規模ではあるが広域変成岩が認められる。添付の地質図に肥後-阿武隈花崗岩と変成岩と表示されているものがその一例である。木呂子緑色岩メランジュの木呂子変成岩やひすい輝石-石英岩など高圧型変成岩も存在する。木呂子変成岩の変成年代は約 60Ma と考えられている。ただし、スレートの K-Ar 全岩年代値は 117Ma であり、この古い年代値は碎屑性白雲母の存在が原因であると推定されている [1]。K-Ar 全岩年代から判断して、木呂子変成岩は三波川変成岩の一員とみなすことができる。したがって三波川変成岩も跡倉ナップのテクトニクスを受けたことになる。この結論は重要であるので、今回、木呂子変成岩のスレートについて、K-Ar 全岩年代を追加測定した。

白亜紀後期の西南日本の前弧域では、跡倉ナップの形成以前にもナップテクトニクスが発生していた可能性が高い。その際にも三波川変成岩の一部はナップテクトニクスに巻き込まれた可能性がある。関東山地北東部ではみかぶ緑色岩類の構造的上位に秩父帯の弱変成岩が衝上断層で重なっている [2, 3]。衝上断層には断層ガウジや断層粘土が認められ、地殻表層部で形成されたと推定される。この衝上断層の形成をもたらしナップテクトニクスは、高圧型変成岩が地殻表層部に上昇した後に起きたと考えられる。このナップの形成時期は明らかではない。しかも、関東山地北東部では、みかぶ緑色岩類や秩父帯の弱変成岩の K-Ar 年代データはほとんど存在しない。そこで跡倉ナップ周辺のみかぶ緑色岩に挟まっている泥質片岩と秩父帯のスレートの K-Ar 全岩年代を測定した。

以上の様に、泥質変成岩 3 個の K-Ar 全岩年代を測定したので、ここにその結果を報告する。

調べられた泥質変成岩は木呂子南方 (文献 1 の地点 d) の微細な白雲母と炭質物に富むスレート (木呂子変成岩 Suguro-P2)、寄居町荒川右岸のみかぶ帯の白雲母-緑泥石片岩 (Yorii-Mikabu)、小川町の石尊山の登山口付近に露出していたスレート (秩父帯の弱変成岩 Sekisonzan) の 3 個である。年代測定結果は添付図の左側に提示されている。岩石採集地点は地質図の星印の位置である。

年代測定された木呂子変成岩のスレートについて、白雲母の粒径は去年調べられたスレートのものよりも細粒であるが、K-Ar 年代値は去年発表したもの [1] とほぼ同じである。なお、このスレートについても、白雲母の粒径のバラツキは明瞭に認められる。秩父帯の弱変成岩の K-Ar 年代値は 146Ma であり、想定される変成年代値 115Ma よりも著しく古い。このスレートの白雲母の粒径は木呂子変成岩のものよりもずっと細粒である。また白雲母の粒径のバラツキはかなり顕著である。これは再結晶作用が不十分であることを意味しており、古い年代値の理由と考えられる。みかぶ帯の泥質片岩については、再結晶作用は良好であり、K-Ar 年代値はほぼ変成年代と推定される。

[1] 小野, 2013, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集, SMP43-P16.

[2] 須藤・松丸, 1973, 秩父自然科学博研報, 17, 13-24.

[3] 木村敏雄, 1977, 日本地質学会第 84 年学術大会, p. 104.

キーワード: 関東山地北縁部, 寄居-小川地域, みかぶ緑色岩, 秩父帯の泥岩, K-Ar 年代, ナップ構造  
Keywords: Kanto Mountains, Yorii-Ogawa area, Mikabu greenstones, Chichibu Complex, K-Ar dating, Nappe

SGL43-P01

会場:3 階ポスター会場

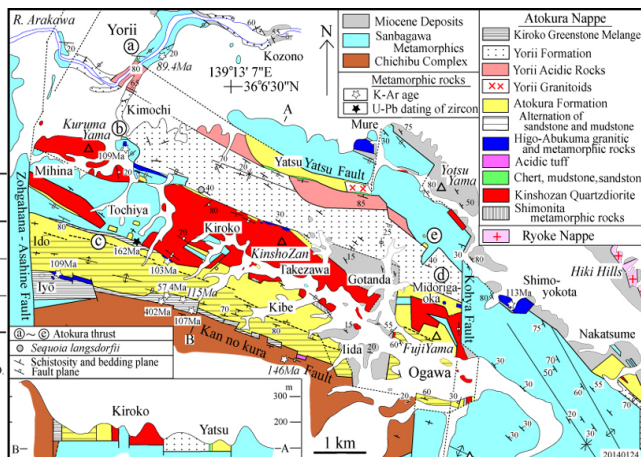
時間:5 月 1 日 18:15-19:30

New K-Ar whole rock ages of metamorphic rocks from the Yorii-Ogawa area

Sample	Age (Ma)	$^{40}\text{Ar}$ rad (scc/g $\times 10^{-5}$ )	$^{40}\text{Ar}$ rad (%)	K (%)
Yorii-Mikabu	89.4 $\pm$ 2.2	1.34	95.9	3.76
		1.34	95.1	3.76
Sekisonzan	146 $\pm$ 4.0	1.60	95.2	2.75
		1.66	95.4	2.76
Suguro-P2	115 $\pm$ 3.0	1.86	97.4	4.01
		1.84	97.9	4.01

$\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ ,  $\lambda_{\epsilon} = 0.581 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$   
 $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.01167 \text{ atom\%}$

Geospace Science CO.,LTD



## 砕屑性ジルコン年代から推定した福井県、富山県の手取層群の後背地 Detrital zircon geochronology of the Tetori Group in the Arimine and Itoshiro areas, central Japan

川越 雄太<sup>1</sup>; 佐野 晋一<sup>2</sup>; 折橋 裕二<sup>3</sup>; 高地 吉一<sup>1\*</sup>; 上田 哲也<sup>1</sup>; 山本 鋼志<sup>4</sup>; 大藤 茂<sup>1</sup>  
KAWAGOE, Yuta<sup>1</sup>; SANO, Shin-ichi<sup>2</sup>; ORIHASHI, Yuji<sup>3</sup>; KOUCHI, Yoshikazu<sup>1\*</sup>; UEDA, Tetsuya<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Koshi<sup>4</sup>  
; OTOH, Shigeru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学教育部, <sup>2</sup> 福井県立恐竜博物館, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 名古屋大学環境学研究科  
<sup>1</sup>Grad. School Sci. Eng., Univ. Toyama, <sup>2</sup>Fukui Prefectural Dinosaur Museum, <sup>3</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>4</sup>Grad. School Env. Stu., Nagoya Univ.

**はじめに** 砕屑性ジルコン年代分布から、福井県石徹白地域と富山県有峰地域の手取層群の後背地を解析した。また、後背地解析の一環として、有峰地域周辺の飛騨片麻岩類・花崗岩類のジルコン U-Pb 年代を測定した。

**地質概説** 手取層群は、西南日本内帯の飛騨帯～飛騨外縁帯に分布する中期ジュラ紀～前期白亜紀の浅海成～陸成層である。本層群は、石徹白地域では下位より九頭竜・石徹白・赤岩亜層群(前田, 1961)に、有峰地域では下位より東坂森・長棟川・跡津川層(河合・野沢, 1958)に三分され、それぞれ対比される。長棟川・跡津川層の下部層は現在の方位で西方から供給された網状河川堆積物(礫質堆積物)から、上部層は北方から供給された蛇行河川堆積物(砂岩泥岩互層)から成る。跡津川層上部(和佐府互層部層)の凝灰岩は、 $120.0 \pm 1.2$  Ma の U-Pb 年代を有する。

**周辺地域からのジルコン年代** 有峰地域西方の飛騨片麻岩類は 250-220 Ma のジルコンを多く含み(Sano et al., 2000)、朝鮮半島の広範囲を占める狼林地塊と嶺南地塊は、太古代～古原生代の基盤岩類、カンブリア～ジュラ系堆積岩類、および 250-160 Ma の花崗岩類からなる(e.g., Zhao et al., 2005)。一方、中国東北部は「顕生累代の地殻成長」が顕著な地域で(Wu et al., 2000)、主に 250-160 Ma の花崗岩類からなり、先カンブリア時代の岩石に乏しい(e.g., Wu et al., 2000)。

**測定試料・手法** 有峰地域および石徹白地域の手取層群の各層から採取した砂岩および砂質シルト岩、有峰地域北方の飛騨花崗岩類下之本・船津岩体、西方の打保岩体、および北方の飛騨変花崗岩よりジルコンを抽出し、東京大学地震研究所及び名古屋大学環境学研究科の LA-ICP-MS で U-Pb 年代を測定した。

**結果** 九頭竜亜層群および東坂森層は、上部ほど先カンブリア時代のジルコンの割合(%Pc)が減少する共通の傾向をもった。一方、石徹白・赤岩亜層群および長棟川・跡津川層について、石徹白地域では先カンブリア時代ジルコンの割合(%Pc)が 80 以上になるのに対し、有峰地域では 10 未満となった。先カンブリア時代のジルコンは、2500-1500 Ma のものが卓越したが、石徹白地域では 3500-2500 Ma (太古代)のものも散見された。また、九頭竜亜層群を含む全ての試料で 250-220 Ma および 190-170 Ma に共通のピークが見られた。中でも、有峰地域の網状河川堆積物では 250-220 Ma のピークが、蛇行河川堆積物では 190-170 Ma のピークがそれぞれ高い。飛騨片麻岩類は主に 250-180 Ma、飛騨変花崗岩類は 280-220 Ma のジルコンをそれぞれ多く含み、180-170 Ma のジルコンは乏しかった。飛騨花崗岩の下之本岩体は主に 200-180 Ma、船津岩体は主に 250-190 Ma、打保岩体は主に 205-185 Ma のジルコンをそれぞれ含む。また、有峰地域北方の飛騨変花崗岩は 280-220 Ma のジルコンを多く含む。飛騨帯に、180-170 Ma のジルコンは乏しい。

**考察** 石徹白地域の九頭竜亜層群と有峰地域の東坂森層は、岩相が類似し、上部ほど %Pc が減少するという共通した特徴をもつため、同様な後背地をもったと考えられる。

長棟川・跡津川層の砕屑性ジルコンは、%Pc が低く、ほぼ 250-160 Ma (三畳～ジュラ紀)の年代を有する。従って、両層をもたらし河川の流域には、三畳紀～ジュラ紀の岩石が広く露出していたと見られる。また、長棟川・跡津川層の蛇行河川堆積物は、北方からの古流向を示し 190-170 Ma の年代ピークを有する。飛騨帯には 180-170 Ma の岩体が乏しいため、190-170 Ma のジルコンは、飛騨帯より更に大陸側から供給されたと考えられる。アジア大陸東縁で先カンブリア時代の岩石に乏しい候補地は、中国東北部が最も考え易い。一方、長棟川・跡津川層の網状河川堆積物は、西方からの古流向を示し 250-220 Ma の年代ピークが高い。250-220 Ma のジルコンは、有峰西方の飛騨片麻岩類を特徴づける。有峰地域では、平時に中国東北部からの蛇行河川により砂岩泥岩互層が堆積し、西方の飛騨片麻岩分布域が隆起するイベントにより網状河川の礫質堆積物が堆積したものと見られる。

石徹白・赤岩亜層群は、2500-1500 Ma、250-220 Ma および 190-170 Ma に年代ピークをもち、有峰地域の長棟川・跡津川層とは対照的に %Pc が非常に高い。また、太古代のジルコンも少量含む。飛騨帯の岩石中に先カンブリア時代のジルコンが乏しいため、これらの起源も大陸に求めざるを得ない。アジア大陸東縁で先カンブリア時代の岩石が広く分布する場所として、朝鮮半島の狼林地塊や嶺南地塊が挙げられる。石徹白地域の石徹白・赤岩亜層群は、朝鮮半島に起源をもつ河川の堆積物であると考えられる。以上のように、石徹白地域と有峰地域の手取層群中・上部は異なる河川系の堆積物である。

キーワード: ウラン—鉛年代, 砕屑性ジルコン, レーザー誘導結合プラズマ質量分析計, 手取層群, 中国東北部, 東アジア  
Keywords: U-Pb age, detrital zircon, LA-ICP-MS, Tetori Group, Northeast China, East Asia

## 中央日本北部の第四紀造構環境の変遷 Quaternary Tectonic Environments in North-Central Japan

竹内 章<sup>1\*</sup>  
TAKEUCHI, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部

<sup>1</sup> Graduate school of Science and Engineering for Research, University of Toyama

中央日本（本州中部）は4枚のプレートが収束する地球上でも特異な場所である。第四紀前半の内帯では、西日本側と東日本側で全く異なる造構環境にあったが、1.5Ma頃から次第に現在に近い状態に移行し、0.5Ma以降はほぼ現在と同等の地殻変動場となった。中部日本北部、富山トラフ-フォッサマグナ地域は、オホーツクプレート上の東北日本弧およびアムールプレート上の西南日本弧という対照的な地体構造区を画する主要な構造凹地であり、新生代後期に形成された逆断層/褶曲帯の発達で特徴づけられる。

東北日本弧においては、鮮新世後期以降、NE-SW 走向をもつ中新世堆積盆地の境界断層に沿って典型的な盆地反転が進行した。一方、中期中新世初頭に著しい回転運動があった西南日本弧では、更新世初期以降、フィリピン海プレートの北進と沈み込みによる南北圧縮や、アムールプレートの東進運動による東西圧縮が働く環境では、前期中新世堆積盆地の境界断層が復活することは稀で、別系統の断裂が再利用されて逆断層および横ずれ断層の活動を行っている。第四紀におけるユーラシア（アムール）プレートとフィリピン海プレートとの間の相対運動変化に関係した一連の反転ないし転換テクトニクスの結果と見なされる。さらに太平洋プレートの沈み込みと関係があると考えられる新潟-神戸構造帯での地震活動も顕著である。

中央日本について、発震機構解に示されるような横ずれ断層型の広域地殻応力場をもつ第四紀構造環境の成り立ちをうまく説明するためには、現在の弧-弧衝突帯のマントルにある種の調節メカニズムが働いていると考える必要がある。

本報告では、こうしたネオテクトニクスの経緯について、地殻変動の変遷を記述するとともに、中央日本北部の構造反転の有無、地震発生層の応力場などから考察するとともに、アムールプレート東進説や日本海東縁新生プレート境界説などプレート構造の枠組みに関する既存の仮説を評価する。

キーワード: アムールプレート, 富山トラフ, フォッサマグナ, 第四紀, ネオテクトニクス, 中央日本北部

Keywords: Amur Plate, Toyama Trough, Fossa Magna, Quaternary, neotectonics, north-central Japan



## 日向峠-小笠木峠断層周辺の早良花崗岩中に発達する断裂系 Fracture system in the Sawara Granite at the area beside the Hinatatoge-Okasagitoge Fault, northern Kyushu

柚原 雅樹<sup>1\*</sup>; 宮崎 崇大朗<sup>1</sup>; 鮎沢 潤<sup>1</sup>  
YUHARA, Masaki<sup>1\*</sup>; MIYAZAKI, Sotaro<sup>1</sup>; AIZAWA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 福岡大学理学部地球圏科学科

<sup>1</sup>Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University

近年の調査により、日向峠-小笠木峠断層の存在が明らかになった。その後、地形ならびに地質調査によって、本断層は北西に分布する糸島沖断層群および前原断層に連続する活断層帯を形成しており、活動度はC級であるとされた(下山ほか, 2013)。このような規模の大きな断層の周辺には、その活動に伴う様々な変形構造が形成されており、それらの解析により断層の活動史全体を解明することが可能である。さらに、そのような断裂を通路とした熱水活動は、北部九州の白亜紀花崗岩体内で起こっている(柚原ほか, 2003, 2004, 2005a, 2005b, 2006a, 2006b, 2007; Yuhara et al., 2013; 佐古・柚原, 2004)。そこで、室見川流域において、日向峠-小笠木峠断層周辺に分布する早良花崗岩中に発達する断裂系の記載を行い、断裂系の形成史の解析を行った。

調査地域には、NNW-SSE から NW-SE 走向で高角な断裂 (NW 系)、ENE-WSW 走向で高角な断裂 (ENE 系) および低角で西に傾斜する断裂が卓越する。NW 系は日向峠-小笠木峠断層の一般走向と類似するため、これらの断裂は同断層の活動に関連して形成されたと考えられる。さらに、これらの断裂はカタクレーサイトを伴う小断層、断層ガウジを伴う小断層、節理に区分される。カタクレーサイトを伴う小断層は NW 系に卓越するが、NNE-SSW 走向のものも認められる。カタクレーサイトは厚さ 10cm 以下で、緑れん石、緑泥石、源岩である早良花崗岩の残存鉱物と考えられる石英、斜長石、カリ長石やそれらの集合体と細粒基質からなる。条線には SSW 方向に低角にプランジするものと NNE 方向に高角にプランジするものがある。断層ガウジを伴う小断層は、NW 系と ENE 系が卓越するが、低角のものも認められる。断層ガウジは厚さ最大 10cm に達し、主に源岩の残存鉱物、イライト、スメクタイトから構成されるが、濁沸石や束沸石が含まれる場合がある。断層ガウジを伴う小断層は、カタクレーサイトを伴う小断層や濁沸石脈や束沸石脈を切り、水平隔離最大 17cm で、ほとんどが左横ずれを示す。条線はいずれも走向方向に水平から低角にプランジすることが多いが、NW 系では走向と直交する方向に高角にプランジする場合もある。節理は、NW 系、ENE 系および低角で西に傾斜するものが卓越する。高角な節理には、主に濁沸石からなる鉱物脈が伴われることが多いが、束沸石を主体とする鉱物脈も認められる。

これらの断裂の切断関係から、次のような断裂の形成史が推定される。カタクレーサイトを伴う小断層の形成→濁沸石からなる鉱物脈の形成→断層ガウジを伴う小断層の形成→濁沸石からなる鉱物脈の形成→断層ガウジを伴う小断層の形成。

キーワード: 日向峠-小笠木峠断層, 早良花崗岩, 断裂系, 熱水活動

Keywords: Hinatatoge-Okasagitoge Fault, Sawara Granite, fracture system, hydrothermal activity

## 岡山県柵原地域における白亜紀火山岩類分布地域の重力異常 Bouguer gravity anomaly related to Cretaceous volcanic rocks in the Yanahara area, Okayama prefecture, SW Japan

石川 敦代<sup>1\*</sup>; 小室 裕明<sup>1</sup>; 山本 明彦<sup>2</sup>  
ISHIKAWA, Nobuyo<sup>1\*</sup>; KOMURO, Hiroaki<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Akihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 島根大学・総理・地球, <sup>2</sup> 愛媛大学・理工・地球

<sup>1</sup>Dept. of Geoscience, Shimane Univ., <sup>2</sup>Dept. of Earth's Evolution Environment, Division of Mathematics, Physics, Earth Science, Ehime Univ.

中国地方中央部, 岡山県~兵庫県にかけての地域には, 白亜紀の火山岩類(火山岩, 火砕岩, 少量の堆積岩)が基盤の舞鶴層群・夜久野岩類を不整合に覆って広く分布する。これらの火山岩類分布域に対応して顕著な低重力異常域がいくつか見られ, 複数のコールドロンが存在することを示唆する。これらの低重力異常を示す地域の中から, 観測点数が十分ではない岡山県北部の柵原地域で新たに重力観測を行い, ブーゲー重力異常図から地下構造の推定を行なった。新規の411点と既存の公表された観測点(地質調査所編, 2000; Shichi and Yamamoto, 2001)199点の計610点をもとに, 仮定密度2670kg/m<sup>3</sup>で地形補正とブーゲー補正を行ない, ブーゲー重力異常図を描いた。火山岩類は流紋岩質の火砕岩を主体としているが, 溶結しているか, または貫入岩による熱変成を受けて堅牢緻密であり, 密度2670kg/m<sup>3</sup>とみなして問題ないと判断した。さらに, 広域トレンドと短波長ノイズの除去のため, 1~30kmのバンドパスフィルターをかけた。

新規作成した重力異常図により, 柵原地域では白亜紀火山岩類および花崗岩質の貫入岩類に対応して低重力異常が認められることがはっきりした。一方, 舞鶴層群の変成岩や堆積岩, 夜久野岩類からなる基盤岩地域は, 高重力異常を示している。

柵原地域の低重力異常域は, 西部と北東部の2カ所に分かれている。西部の重力異常域は, 南北約20km, 東西約7kmの範囲で, 東西南の3方向を急勾配で囲まれ, その内側が周囲に比べて8mgal低い平底型である。これは, 厚い流紋岩質火山岩類が, 平底鍋状のカルデラを埋積したことを示唆し, ここには一つのコールドロンが存在する可能性がある。また, この地域の火砕岩には, 79.8 ± 1.8Maの角閃石 K-Ar 年代値を示す石英閃緑岩が貫入している。したがってこの推定コールドロンは, 80Ma頃に形成された可能性がある。

柵原北東部には, 南北約6km, 東西約10kmの低重力異常域が見られる。この低重力異常は, 周囲が急勾配をもつ平底型ではない。だが, その値は, 周囲に比べて7mgal低く, 柵原西部の推定コールドロンで観測された低重力異常に匹敵する。したがって, 柵原北東部にも, 流紋岩質の火山岩類で埋積されたやや小規模なコールドロンが存在する可能性が高い。

## 房総半島における中期更新世の泉谷層（泉谷泥層）の地層単元とヒ素濃度 Distribution of stratigraphic units of Middle Pleistocene Izumiyatsu Formation and their arsenic concentrations

吉田 剛<sup>1\*</sup>; 楠田 隆<sup>2</sup>; 楡井 久<sup>3</sup>  
YOSHIDA, Takeshi<sup>1\*</sup>; KUSUDA, Takashi<sup>2</sup>; NIREI, Hisashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 千葉県環境研究センター地質環境研究室, <sup>2</sup> 元千葉県環境研究センター地質環境研究室, <sup>3</sup> 医療地質研究所  
<sup>1</sup>Research Institute of Environmental Geology, Chiba, <sup>2</sup>Former Research Institute of Environmental Geology, Chiba, <sup>3</sup>Institute of medical geology

房総半島の中央部から北部には、前期更新世—中期更新世の上総層群とその上位に中期更新世—後期更新世の下総層群が分布する。これら両者の境界は、楡井（1981）によると、地下から発見された東京湾不整合によって区分されている。この東京湾不整合は、楡井ほか（1975）・楡井（1981）では千葉県船橋市の地下約400m前後に分布する船橋礫層の基底であるとし、地上では市宿層と下位の上総層群梅ヶ瀬層相当層岩坂層との不整合であると提唱した（楡井，1981）。しかし、楡井（2004）では、この地下の東京湾不整合は万田野砂礫層の下面に位置すると再定義している。さらに、楡井（1981）は下総層群を下総層群下部と下総層群上部に区分している。この下部と上部の境界は、泉谷泥層の下面であるとしている。

一方、三梨（1973）や徳橋・遠藤（1984）では、堆積サイクルの観点から、上総層群と下総層群を区分し、両者の境界は、地蔵堂層の下面であるとし、地蔵堂層の下部は泉谷泥層で構成されているとしている。つまり、泉谷泥層の下面が徳橋・遠藤（1984）の定義する上総層群と下総層群の境界となる。

楡井（1981）の下総層群上部、または、徳橋・遠藤（1984）の下総層群は、7つの累層（下位より地蔵堂層・藪層・上泉層・清川層・横田層・木下層・姉崎層）に区分され、姉崎層を除くこれらの累層は、下部に淡水成ないし汽水成の泥層と上部に貝化石がしばしば多産する浅海成砂層の堆積サイクルをもつ（徳橋・遠藤，1984）。

房総半島の中央部から北部にかけて分布する下総層群は、徳橋・遠藤（1984）が提唱した1累層=1堆積サイクルの原則によって、累層が名づけられている。一方、シーケンス層序学において、1堆積サイクルは、一つの高潮から海進、そして、次の海退（すなわち、1堆積シーケンス）である。徳橋・遠藤（1984）後の研究者によって、下総層群中の一累層中にいくつかの堆積サイクルが認定されている。たとえば、鎌滝・近藤（1997）は徳橋・遠藤（1984）の定義する下総層群の中の地蔵堂層のなかに3つの堆積サイクルを認定している。しかし、鎌滝・近藤（1997）は、この地蔵堂層のシーケンス境界の認定が必ずしも容易ではないことや地質図上に分布を表すことが困難な場合があることから、これら3つの堆積サイクルを3つの累層にすることは妥当ではないとしている。

近年問題となっている地下水利用や地下水汚染の機構解明、そして、土木工学の分野においては、部層の連続性を把握することが極めて重要であり、堆積サイクルの解釈や地層名の変更による混乱はできるだけ避けたいところである。このため、これらの解釈には左右されない部層の連続性を捉えている地質図が必要といえる。

本論では、これまで述べてきたような層序名の問題を抱え、地下水利用等の地質環境的観点から重視されている下総層群の泉谷層に焦点を当てた。泉谷層の中に認められるいくつかの層相とその分布の調査研究を行い、それらの地質図を作成し、その地層単元に併せヒ素濃度の分析を行った。

キーワード: 部層単元, 地下水流動, ヒ素  
Keywords: Member unit, Groundwater flow, Arsenic

## 堆積物に記録されたブルン松山地球磁場逆転境界の年代と気候変動 Chronology of Brunhes-Matuyama geomagnetic polarity transition recorded in sedi- ments and climate change

小田 啓邦<sup>1\*</sup>  
ODA, Hirokumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Channell et al. (2010) suggested that the midpoint of the M-B boundary lies at 773.1 ka, ~7 kyr younger than the previously accepted astrochronological age for this polarity reversal (780-781 ka). Their results are based on the five high-resolution Matuyama-Brunhes polarity transition records from the North Atlantic placed on isotope age models produced by correlation of the  $\delta^{18}O$  record to an ice volume model. They further inferred that the  $^{40}Ar/^{39}Ar$  Fish Canyon sanidine (FCs) standard age that best fits the astrochronological ages is 27.93 Ma, which is younger than the two recently proposed FCs ages of 28.201 ± 0.046 Ma (Kuiper et al., 2008) and 28.305 ± 0.036 Ma (Rene et al., 2010). However, recent study by Ganerod et al. (2011) suggested an age of 28.393 ± 0.194 Ma for FCs based on paired  $^{40}Ar/^{39}Ar$  and  $^{206}Pb$ - $^{238}U$  radiometric dating supporting the calibrations of Kuiper et al. (2008) and Renne et al. (2010). Furthermore, recent study by Rivera et al. (2011) suggested an age of 28.172 ± 0.028 Ma for FCs based on cross-calibration with an astronomically tuned age of A1 tephra sanidines in the studied sequence of Faneromeni section in Crete. The discrepancy is significant that needs to be investigated carefully especially in terms of climate system involved.

On the other hand, the age model for relative paleointensity stack PISO-1500 (Channell et al., 2009) is based on IODP U1308 from North Atlantic. Channell et al. (2008) developed the age model for U1308 by correlating the benthic oxygen isotope curve with LR04 oxygen isotope stack (Lisiecki & Raymo, 2005). LR04 stack is known as oxygen isotope stack for benthic foraminifera, whose age model is dependent on ice volume model with a certain time lag. Caballero-Gill et al. (2012) developed an absolute age model based on U-Th dating for stalagmites from China and correlated the oxygen isotope curve with that on planktonic foraminifera for a deep-sea core from South China Sea. On the basis of the radiometrically calibrated chronology, they estimated that the time constant of the ice sheet is 5.4 kyr at the precession band and 10.4 kyr at the obliquity band. These values are significantly shorter than the single 17 kyr time constant originally estimated by Imbrie et al. (1984), based primarily on the timing of terminations I and II and the 15 kyr time constant used by Lisiecki and Raymo (2005) for LR04 stack.

In the presentation, the chronology of Brunhes-Matuyama geomagnetic polarity transition will be further discussed in relation to the chronology of  $^{10}Be$  records of EPICA Dome C (Dreyfus et al., 2008).

キーワード: ブルン松山地球磁場逆転境界, 年代, 堆積物, 酸素同位体, 氷床, 天文年代校正

Keywords: Brunhes-Matuyama polarity transition, chronology, sediment, oxygen isotope, ice sheet, astronomical calibration



## 白尾テフラの単結晶ジルコン SHRIMP U-Pb 年代を用いた B-M 境界年代地の高精度決定

### SHRIMP U-Pb zircon dating for Byakubi tephra: implication for refined chronology for the Matuyama-Brunhes boundary

菅沼 悠介<sup>1\*</sup>; 岡田 誠<sup>2</sup>; 堀江 憲路<sup>1</sup>; 海田 博司<sup>1</sup>; 竹原 真美<sup>3</sup>; 仙田 量子<sup>4</sup>; 木村 純一<sup>4</sup>; 風岡 修<sup>5</sup>  
SUGANUMA, Yusuke<sup>1\*</sup>; OKADA, Makoto<sup>2</sup>; HORIE, Kenji<sup>1</sup>; KAIDEN, Hiroshi<sup>1</sup>; TAKEHARA, Mami<sup>3</sup>; SENDA, Ryoko<sup>4</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>4</sup>; KAZAOKA, Osamu<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 茨城大学, <sup>3</sup> 九州大学, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 千葉県環境研究所

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Ibaraki University, <sup>3</sup>Kyushu University, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>Research Institute of Environmental Geology, Chiba

Paleomagnetic records from marine sediments have contributed to improved understanding of variations in the Earth's magnetic field and have helped to establish age models for marine sediments. However, lock-in of the paleomagnetic signal at some depth below the sediment-water interface in marine sediments through acquisition of a post-depositional remanent magnetization (PDRM) adds uncertainty to synchronization of marine sedimentary records (e.g., Roberts and 2004; Sugauma et al., 2011; Roberts et al., 2013). Recently, Sugauma et al. (2010) presents clear evidence for a downward offset of the paleointensity minimum relative to the <sup>10</sup>Be flux anomaly at the Matuyama-Brunhes (M-B) geomagnetic polarity boundary, which they interpret to result from a 16 cm PDRM lock-in depth. This indicates that a certain age offset probably occurs when a paleomagnetic record is used for dating marine sediments. This phenomenon also suggests that the accepted ages for the geomagnetic polarity boundaries, including the M-B boundary, should be revised (ca. 10 kyr younger in case of the M-B boundary). Contrary, two recently proposed revisions of the age of the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Fish Canyon sanidine (FCs) standard (Kuiper et al., 2008; Renne et al., 2010) would adjust <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of the M-B boundary from Maui (Singer et al., 2005) to 781 ± 2 ka and 784 ± 2 ka, respectively.

Plio-Pleistocene marine sedimentary sequences are widely distributed in the Boso and Miura Peninsula, central Japan. Because these sequences have a significantly high sedimentation rate with well-preserved planktonic and benthic foraminifera fossils, it is possible to reconstruct a detailed geomagnetic behavior along the polarity boundaries such as M-B with high resolution oxygen isotope records. In addition, a number of tephra layers are accompanied with these sedimentary sequences, which make it possible to provide absolute age constraints for the boundaries. The Byakubi tephra, located few tens of cm above the M-B boundary, has been investigated based on SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe) U-Pb dating of single zircon crystals from the tephra. The initial U-Th ratio is also corrected by using ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) analysis of volcanic glasses of the tephra. The <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ratio corrected by <sup>207</sup>Pb assuming <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U-<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U age concordance from 20 grains are equivalent with a weighted mean of 761.1 ± 7.6 ka. Although this M-B boundary age is ~23 kyr younger than previously accepted <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages, this is almost consistent with a younger ice core derived age of 770 ± 6 ka (Dreyfus et al., 2008), marine sediments age of 770 ka based on <sup>10</sup>Be anomaly (Sugauma et al., 2010), and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of 761 ± 2 ka adjusted by the K-Ar based FCs standard ages (27.5 Ma: Mochizuki et al., 2010).

房総半島上総層群に記録された Matuyama-Brunhes 極性反転境界の岩石磁気・古地磁気学的検討  
Rockmagnetic and Paleomagnetic examinations for the Matuyama-Brunhes polarity transition recorded in the Kazusa Group

岡田 誠<sup>1\*</sup>; 菅沼 悠介<sup>2</sup>; 丸岡 亨<sup>1</sup>; 羽田 裕貴<sup>1</sup>; 風岡 修<sup>3</sup>  
OKADA, Makoto<sup>1\*</sup>; SUGANUMA, Yusuke<sup>2</sup>; MARUOKA, Toru<sup>1</sup>; HANEDA, Yuki<sup>1</sup>; KAZAOKA, Osamu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>茨城大学, <sup>2</sup>国立極地研, <sup>3</sup>千葉県環境地質研

<sup>1</sup>Ibaraki University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Research Institute of Environmental Geology, Chiba Pref.

本研究では房総半島上総層群国本層における Matuyama-Brunhes 極性反転記録を検討するために詳細な岩石磁気実験および古地磁気実験を行った。試料は千葉県市原市田淵の養老川沿いおよび市原市柳川に分布する砂質シルト岩から、白尾タフ (TNTT) を挟む層厚 13 m の区間より層厚間隔約 10cm で合計 130 本の定方位ミニコア試料を採取した。熱磁気分析および 3 軸 IRM 段階熱消磁の結果からは、試料に硫化鉄が含まれることと、磁鉄鉱が主要な磁化を担い赤鉄鉱は含まれないことが示された。磁気ヒステリシス実験より磁区構造を推定すると、殆どの試料が疑似単磁区の領域であることを示した。段階交流消磁の結果では先行研究と同様に TNTT の下位 1.5m 付近で逆極性から正極性への反転が見られたが、段階熱消磁では反転境界は TNTT 周辺に見られた。両者の結果が不一致であった試料では、いずれも段階交流消磁で見られた正帯磁成分が段階熱消磁では 300-400 °C 程度で消磁され、磁鉄鉱による異なる方位を持つ成分が抽出された。この原因は以下のように解釈できる。この地磁気反転境界周辺では堆積当時の地磁気強度は大変微弱であったため、磁鉄鉱によって獲得された逆帯磁した成分は僅かであった。これに対して、時間的に遅れて生成された硫化鉄起源の磁性鉱物が、極性反転後のより強い磁場のもと正帯磁成分を持つ磁化を獲得した。両者の保磁力分布はほぼ一致するため、交流消磁では正帯磁成分のみが抽出された。以上より、国本層における Matuyama-Brunhes 極性反転境界は、従来いわれていた層準より上位の TNTT 付近に位置する可能性が高いことが明らかとなった。

Keywords: Matuyama-Brunhes boundary, rockmagnetism, paleomagnetism, L-M Pleistocene boundary, Boso Peninsula, Kazusa Group

## 定方位掘削コアによる千葉セクションの高解像度磁気層序 High-resolution magnetostratigraphy across the Matuyama-Brunhes polarity transition from the Chiba Section

兵頭 政幸<sup>1\*</sup>; 高崎 健太<sup>2</sup>; 松下 隼人<sup>2</sup>; 北場 育子<sup>1</sup>; 加藤 茂弘<sup>3</sup>; 北村 晃寿<sup>4</sup>; 岡田 誠<sup>5</sup>  
HYODO, Masayuki<sup>1\*</sup>; TAKASAKI, Kenta<sup>2</sup>; MATSUSHITA, Hayato<sup>2</sup>; KITABA, Ikuko<sup>1</sup>; KATOH, Shigehiro<sup>3</sup>; KITAMURA,  
Akihisa<sup>4</sup>; OKADA, Makoto<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環内海域環境教育研究センター, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 兵庫県立人と自然の博物館自然・環境評価研究部, <sup>4</sup> 静岡大学理学部地球科学教室, <sup>5</sup> 茨城大学理学部理学科  
<sup>1</sup>Research Center for Inland Seas, Kobe University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, <sup>3</sup>Division of Natural History, Hyogo Museum of Nature and Human Activities, <sup>4</sup>Institute of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, <sup>5</sup>Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Ibaraki University

An oriented 54-m core was collected from the Kokumoto Formation of the Kazusa Group, near the Chiba Section, a candidate for the GSSP of the Early-Middle Pleistocene boundary. The core spans in stratigraphy from a thick sand layer below a mud clast layer up to just below the Ku-2B tuff. A detailed Matuyama-Brunhes (MB) geomagnetic reversal record was obtained, using u-channel samples of 1 m long cut out from 1-m core section. Magnetization components were separated by stepwise alternating field demagnetization (AFD). Low field magnetic susceptibility and anhysteretic remanent magnetization show the core consists of magnetically homogeneous sediments. Magnetizations of discrete samples of 2.2cm x 2.2cm x 2.2cm were also measured, being subjected to progressive thermal demagnetizations (THD) and AFD. The declinations of characteristic remanent magnetization (ChRM) well agree across the boundary of 1m-sections, indicating that orientation of each 1m-core section was successful. Magnetic hysteresis measurements show magnetic grains are of PSD size. THD shows that hematite is included besides magnetite, a main magnetic carrier. Thermomagnetic measurements and THD suggest that the sediments include greigite, ferrimagnetic iron sulfide, which may cause a false reversal due to self-reversal of magnetic minerals. The paleomagnetic results show that the upper boundary of the MB transition lies above the Byakubi volcanic ash layer, which is much higher than the previous result. Our data show normal polarity continues from a depth of about 1m below the Byakubi, but several polarity swings exist above it. From about 70cm above the Byakubi to the top of the core, normal polarity continues. Relative paleointensity data show the lower end of the MB transition lies below the base of the core. The relative paleointensity keeps low values in the lower part below the Byakubi, and gradually increases upward above it, reaching a maximum value at about 39 m above the Byakubi. This linear increase feature is similar to the post-MB reversal intensity pattern observed in the paleointensity stack Sint-2000 (Valet et al., 2005). The low paleointensity kept throughout the basal part suggests the beginning of the MB transition lies much below the base of the core.

キーワード: マツヤマブリュンヌ境界, 磁気層序, チバセクション, 定方位コア  
Keywords: Matuyama-Brunhes boundary, magnetostratigraphy, Chiba section, oriented core

## 下北半島沖海底コア C9001C に挟在する更新世テフラ群の同定 Identification of Pleistocene tephra layers in marine sediment core C9001C, offshore Shimokita Peninsula, NE Japan

長谷川 健<sup>1\*</sup>; 菅谷 真奈美<sup>1</sup>; 岡田 誠<sup>1</sup>; 望月 伸竜<sup>2</sup>; 藤井 哲夢<sup>2</sup>; 渋谷 秀敏<sup>2</sup>  
HASEGAWA, Takeshi<sup>1\*</sup>; SUGAYA, Manami<sup>1</sup>; OKADA, Makoto<sup>1</sup>; MOCHIZUKI, Nobutatsu<sup>2</sup>; FUJII, Satomu<sup>2</sup>; SHIBUYA, Hidetoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>茨城大学理学部, <sup>2</sup>熊本大学

<sup>1</sup>Faculty of Science, Ibaraki University, <sup>2</sup>Kumamoto University

地球深部探査船「ちきゅう」が2005年から約2年間行った慣熟航海により下北半島東方沖で海底コア(C9001)が得られた。本コアはMatuyama-Brunhes境界付近まで遡り、日本近海における中～上部更新統を連続的かつ長期にカバーするきわめて重要なコアである。特にC9001C孔(全長386m)では、酸素同位体比分析が行われ、LR04標準カーブとの対比による連続的なモデル年代(LR04年代)が作成されている(Domitsu et al., 2011)。我々は、同コア中のテフラを採取し、岩石学的検討により複数層準においてテフラ同定ができたので報告する。

本コアは全体的にオリーブ黒色～オリーブ灰色の珪藻質シルト質粘土からなる。この単調な岩相中に、しばしば数mm～数cmの厚さの明色でガラス質なテフラ層が挟在する。我々は、採取試料のうち、20～150mbsf(LR04年代=約30～240ka)について、比較的厚く粗粒なテフラのみを対象に、火山ガラスの化学組成分析や鉍物組み合わせなどの岩石学的特徴の記載を行った。さらに、テフラの給源となりうる北海道の火山を調査し、給源近傍の噴出物試料も採取・分析した。既存のテフラデータベース(町田・新井, 2003; 青木・町田, 2006, など)に加え、これら近傍試料も用いることで、より正確なテフラ同定を試みた。

従来、本コアからはSpfa-1(支笏第1)とAso-4(阿蘇4)が見出されていたが(Domitsu et al., 2011)、今回新たに、19.6mbsfからTo-Of(BP1)(十和田-大不動(ビスケット1)), 24.8mbsfからTo-GP(十和田-合同), 25.5mbsfからKo-i(北海道駒ヶ岳-i), 61.4mbsfからToya(洞爺), 73.9mbsfからAso-3(阿蘇3), 115.6mbsfからMb-1(紋別1), そして145.9mbsfからTn-C(田名部C), と考えられるテフラを見出した。

19.6mbsfのテフラは層厚約6cmで中粒砂サイズの結晶ガラス質火山灰である。重鉍物組み合わせ(Cpx, Opx)およびガラス組成(SiO<sub>2</sub>=77.5%, K<sub>2</sub>O=1.2%:100%換算(以下同様))からみて、To-Of(或いは直下の降下軽石であるTo-BP1)に対比される。24.8mbsfのテフラは層厚約3cmで中粒砂サイズのガラス結晶質火山灰である。重鉍物組み合わせ(Cpx, Opx)およびガラス組成(SiO<sub>2</sub>=75.4%, K<sub>2</sub>O=1.1%)とTo-Ofとの層序関係から、To-GPに対比される。25.5mbsfのテフラは層厚約5mmで細粒砂サイズのガラス質火山灰で、珪藻質シルト中にパッチ状に存在する。重鉍物は含まれないが、ガラスの化学組成(SiO<sub>2</sub>=76.2%, K<sub>2</sub>O=2.1%)と層序から、Ko-iに対比される可能性がある。61.4mbsfのテフラは層厚約1.5cmで細粒砂サイズのガラス質火山灰である。重鉍物はほとんど含まれないがOpxが確認できる。火山ガラスの化学組成(SiO<sub>2</sub>=79.0%, K<sub>2</sub>O=2.7%)と層序からToyaに対比される。73.9mbsfのテフラは層厚約2cmで中細砂サイズのガラス結晶質火山灰である。重鉍物組み合わせ(Cpx, Opx)と高カリウムのガラス組成(SiO<sub>2</sub>=70.3%, K<sub>2</sub>O=4.6%)および層準からAso-3に対比される。115.6mbsfのテフラは、層厚約4cmで中細砂サイズのガラス結晶質火山灰である。重鉍物には輝石のほか黒雲母・角閃石を含むことと、ガラス組成(SiO<sub>2</sub>=78.1%, K<sub>2</sub>O=3.9%)および層準からMb-1(奥村, 1991, 第四紀研究)に対比される可能性がある。145.9mbsfのテフラは層厚約20cmで中～粗粒砂サイズのガラス結晶質火山灰である。厚く粗粒な岩相と重鉍物組み合わせ(Cpx, Opx)およびガラス組成(SiO<sub>2</sub>=78.4%, K<sub>2</sub>O=1.5%), 層準から恐火山起源のTn-Cに対比される。

LR04年代に基づいて対比結果の意義を考察する。To-Ofは、これまでMIS3(>32ka)とされていたが、MIS2初期のテフラ(<29ka)と判断できる。Aso-3は、下北沖で見つかったことにより分布域と噴出量の見直しが求められる上、MIS5或いは5/6境界(130ka)とされていた従来年代よりも古く、MIS6末期と判断できる。これまでMIS8とされ、詳細な年代は不明であったTn-Cは、今回MIS7に対比され、240kaよりも新しい年代となる。まだ対比に検討の余地があるKo-iやMb-1の他、採取したが同定作業を行っていない多数のテフラについても現在検討を進めている。

キーワード: 下北半島沖, 海底コア, 更新世, テフラ, ちきゅう, 火山ガラス

Keywords: Shimokita Peninsula, marine sediment core, Pleistocene, tephra, CHIKYU, glass chemistry



## 上総層群のテフロクロノロジーに関する研究レビューと今後の課題 Overview of tephrochronological study on Kazusa Group, the standard Quaternary marine sediments, central Japan

鈴木 毅彦<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Takehiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京  
<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan University

上総層群は関東平野のほぼ全域に広く分布し、ところにより 1000 m 以上の層厚をもつ。このような上総層群の層序・年代・構造を明らかにすることは、関東積成盆地ともよばれる陸化した前弧海盆の形成過程、すなわち関東造盆地運動を理解する上で欠かせない。またその連続性から、シーケンス・生層序・古地磁気・テフラなどの第四紀における層序編年の模式堆積物にもなり得る。本発表では、この様な上総層群の編年研究のうち、テフロクロノロジーに関わる部分について、レビューと今後の課題点を指摘する。なお、上総層群の層序・年代は模式地となる房総半島にて伝統的に研究が進められてきたが近年では、房総半島に比べてより有利な条件をもつ銚子地域においても各種の研究が進められている。したがってここでは犬吠層群も広義の上総層群として扱う。

房総半島を模式地とする上総層群は、層序・古生物・構造に関する研究史が長く（例えば、植田, 1933）、数多く含まれるテフラに関しても三梨ほか（1959）による古い研究がある。それ以降、露頭位置・柱状図などをカタログ化した千葉県立中央博物館（1991）、テフラの記載岩石学的性質を系統的に明らかにした里口（1995）がある。東京湾を挟んだ多摩丘陵の上総層群に関してのテフラ研究にも、神奈川県知事公室企画審議課（1955）以降多くの研究があり、房総半島の上総層群中のテフラとの対比案も示され（三梨ほか, 1979; 三梨・菊地, 1982 など）、また基本的なテフラ層序も示された（高野, 2004）。その他、横浜地域、銚子地域、関東平野中央部などでもテフラの存在が指摘されてきた。上記の地域毎のテフラ層序の確立を経た以降、記載岩石学的データの充実とともに、上総層群のテフラ研究は関東各地間のテフラ対比や、給源域への対比に関心が持たれるようになった。前者の例としては、多摩丘陵・房総間の高野（2002）、横浜・房総間の藤岡ほか（2003）、銚子・房総間の藤岡・亀尾（2004）、東京地下・房総間の佐藤ほか（2004）、村田ほか（2007）などがあげられ、最近で複数の地域間でのテフラ対比が進められている（鈴木・村田, 2011; Suzuki et al., 2011; 水野・納谷, 2011 など）。給源域への対比例としては、長橋ほか（2000）、鈴木・中山（2007）、鈴木・村田（2008）、村田鈴木（2011）などがあげられる。

今後の課題は数多くあるが、上総層群のテフラ研究の基本としては関東平野全域をカバーする層序の確立が優先的事項と考える。少なくとも野外で視認できる全てのテフラの記載岩石学的データの整備と、それに基づく関東平野全域での対比が急がれる。鈴木・村田（2011）ではこの様な視点から、約 1.3?1.6 Ma にかけて 22 のテフラについて記載岩石学的データを示し、多摩丘陵・東京地下・房総・銚子間での対比を試みた。これはおおよそ 2.5?0.5 Ma に堆積した上総層群中テフラの中では一部である。講演では鈴木・村田（2011）以降の層序・対比も報告したい。今後こうした研究が進めば、第四紀の模式堆積物としての重要性がさらに高まると思われる。

キーワード: 上総層群, テフロクロノロジー, 第四紀層  
Keywords: Kazusa Group, Tephrochronology, Quaternary sediments

## 広域火山灰層序の基準層序としての上総層群 The Kazusa Group as a standard tephrostratigraphy of Japanese Lower to Middle Pleistocene formations

里口 保文<sup>1\*</sup>  
SATOGUCHI, Yasufumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 琵琶湖博物館  
<sup>1</sup> Lake Biwa Museum

日本の鮮新-更新統の層序は、テフラ層を鍵層として組み立てられてきた。また、広域テフラの認定や異なる堆積盆地間のテフラ対比によって、九州および本州に分布する主要な鮮新-更新統を対象にした詳細な層序が確立された (Satoguchi and Nagahashi, 2012 など)。このような広域層序の確立には、火山灰層序のみならず生層序や古地磁気層序を含め多くの層序学的研究を地域間で矛盾なく総合的に組み立てる必要があるが、全体の構築のための初期段階では、それらの研究が詳細に行われている地域を層序と年代の基準にすることが有効である。Satoguchi and Nagahashi (2012) は、とくに前期更新世については房総半島に分布する上総層群を基準層序とした。

上総層群は露頭条件がよく海成層であることから古地磁気層序、生層序、酸素同位体ステージとの対比など、年代が議論できる多くの層序学的研究が行われており、豊富な年代および層序データを有する。また、上総層群には多くのテフラ層が挟在しており、それらの基礎的データが蓄積されている (里口, 1995 など)。これらのテフラ層は広域対比の検討が行われ、多くの対比が行われてきた。また、それらの中には給源地域が明らかにされているものもある。たとえば、九州地方を給源とする Ss-Pnk (Hayashida et al., 1996), Ss-Az (鎌田ほか, 1994), Kb-Ks テフラ (吉川ほか, 1991), 中部山岳地域を給源とする Ho-Kd39, Eb-Fukuda, Om-SK110 テフラ (長橋ほか, 2000), 北関東を給源とする JA-O18L テフラ (中村・新井, 1998), 東北地方を給源とする As-Kd8 テフラ (村田・鈴木, 2011), Hkd-Ku テフラ (Suzuki et al., 2005) などがある。このように多くの地域のテフラを含むことも重要である。たとえば、九州地方を給源とするテフラの降灰範囲が房総半島よりも東方にはない場合、東北地方を給源とするテフラとの層序関係を理解する上で重要となる。すなわち、上総層群は西南日本と東北日本の層序関係を知る上でハブ機能を果たしうる。また、前述のテフラは 500km 以上離れた複数の地層をむすぶものであるが、複数の堆積盆は見つかっていないが、給源火山地域との対比が行われた例もある。下部?中部更新統境界の GSSP 候補となっている地点の層準にある BYK (白尾テフラ) は古期御岳火山が給源とされた (竹下ほか, 2005)。古期御岳火山噴出物との対比は、その上位にある Ks12 テフラも行われている。これら給源が明らかにされたテフラは、給源地域の爆発的火山活動史を理解する上で、重要な情報を提供する。

以上のように、上総層群は日本の更新統にとって層序学的に重要であり、テフラからみた火山活動史の研究などにとっても、その重要性は今後増していくと考えられる。

REFERENCES : Hayashida, A. et al. (1996) *Quaternary International* 34?36, 89?98. ; 鎌田浩毅ほか (1994) *地質学雑誌*, 100, 848?866. ; 吉川清志ほか (1991) *月刊地球*, 13, 228?234. ; 村田昌則・鈴木毅彦 (2011) *第四紀研究*, 50, 49?60. ; 長橋良隆ほか (2000) *地質学雑誌*, 106, 51-69. ; 中村正芳・新井房夫 (1998) *地球科学*, 52, 153-157. ; 里口保文 (1995) *地質学雑誌*, 101, 767-782. ; Satoguchi, Y. & Nagahashi, Y. (2012) *Island Arc*, 149-169. ; Suzuki, T. et al. (2005) *Island Arc*, 14, 666?78. ; 竹下欣宏ほか (2005) *地質学雑誌*, 111, 417-433.

キーワード: 上総層群, 広域テフラ, 更新統, 白尾テフラ

Keywords: Kazusa Group, widespread tephra, Pleistocene, Byakubi tephra

## テフラ層序に基づく関東地域における 1.6 Ma 前後の古地理復元 Reconstruction of paleogeography of Kanto district about 1.6 Ma based on tephrostratigraphy

中島 絵理<sup>1\*</sup>; 鈴木 毅彦<sup>2</sup>  
NAKAJIMA, Eri<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Takehiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京・院, <sup>2</sup> 首都大学東京

<sup>1</sup>Graduate student, Tokyo Metropolitan University, <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University

関東地域における前期更新世の古地理を復元するためには、関東平野に広く分布する上総層群の編年学的研究および堆積学的研究が役立つ。とくに等時間面を示すテフラとその上下の堆積物に着目することは正確な古地理を復元する上できわめて有効な手段となる。本研究ではこのような視点から第1堀之内タフ(HU<sub>1</sub>)とそれに近接するテフラの対比を行った。HU<sub>1</sub>は関東平野西部の多摩丘陵において、上総層群小山田層に挟在し、1.63 Maに噴出したテフラであり、関東地域の各地で分布が確認されている(鈴木・村田 2011)。HU<sub>1</sub>模式地である東京都立川市の多摩川河床で採取した試料(降下軽石堆積物)からは、火山ガラスの屈折率として1.504-1.509、ホルンブレンドの屈折率として1.667-1.673、斜方輝石の屈折率として1.701-1.707、カミングトン閃石の屈折率として1.657-1.663の値が得られた。本研究では火山ガラスと斑晶鉱物の屈折率、火山ガラスとチタン磁鉄鉱の主成分化学組成に基づき、東京都立川市の多摩川河床(小山田層)、武蔵野台地西部の狭山丘陵(狭山層)、横浜地域南部の瀬上(小柴層)、銚子地域屏風ヶ浦の地表部(小浜層)、また地下試料として、武蔵村山市榎の榎トレンチコア、立川市富士見の立川コア、東大和市の東大和コアに挟在するテフラとの対比を検討した。その結果、狭山丘陵の狭山ゴマシオ火山灰、立川コアの15.24-15.48 mに挟在する降下軽石、東大和コアのHY-1.1 - HY-1.6が新たにHU<sub>1</sub>と対比されることが明らかになった。また、HU<sub>1</sub>の給源火山付近の噴出物候補として長野県美ヶ原高原南部に分布する扉峠火山碎屑岩類、三城火山碎屑岩類の分析を行った。その結果、火山ガラスと普通角閃石の屈折率、火山ガラスの主成分化学組成から、両方ともHU<sub>1</sub>とは対比されず、HU<sub>1</sub>の給源は美ヶ原高原付近の火山ではない可能性が高いことが明らかになった。対比されたテフラから調査地における堆積速度を推定したところ、横浜地域瀬上では46.3 cm/kyr、立川コアでは59.0 cm/kyr、大田区萩中公園コアでは2.5-10.3 cm/kyr、銚子地域屏風ヶ浦では3.8-6.7 cm/kyrの値が得られた。これらの堆積速度の違いは、当時の堆積環境の違いを反映している。さらに、東大和コア、狭山丘陵の周辺は沿岸浅海部に堆積したため、テフラが一次堆積した後も波の作用によって移動を繰り返し、他の地域に比べて再堆積部が厚くなったと考えられる。

キーワード: テフラ, 上総層群, 第1堀之内タフ, 古地理復元

Keywords: tephra, Kazusa Group, First Horinouchi Tuff, paleogeography



## 更新世前期-中期境界を含む上総層群国本層中部の層序と白尾火山灰層・TNTT火山灰層の再定義 Stratigraphy of the L-M Pleistocene boundary section in the Kokumoto Formation with re-definition of the Byk-TNTT tephra

風岡 修<sup>1\*</sup>; 岡田 誠<sup>2</sup>; 亀山 瞬<sup>1</sup>; 菅沼 悠介<sup>3</sup>; 会田 信行<sup>4</sup>; 森崎 正昭<sup>1</sup>; 香川 淳<sup>1</sup>; 熊井 久雄<sup>5</sup>; 楡井 久<sup>6</sup>  
KAZAOKA, Osamu<sup>1\*</sup>; OKADA, Makoto<sup>2</sup>; KAMEYAMA, Shun<sup>1</sup>; SUGANUMA, Yusuke<sup>3</sup>; AIDA, Nobuyuki<sup>4</sup>; MORISAKI, Masaaki<sup>1</sup>; KAGAWA, Atsushi<sup>1</sup>; KUMAI, Hisao<sup>5</sup>; NIREI, Hisashi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 千葉県環境研究センター地質環境研究室, <sup>2</sup> 茨城大学, <sup>3</sup> 国立極地研究所, <sup>4</sup> 秀明大学, <sup>5</sup> 大阪市立大学, <sup>6</sup> Officer of IUGS-GEM  
<sup>1</sup> Research Institute of Environmental Geology, Chiba, <sup>2</sup> Ibaraki University, <sup>3</sup> National Institute of Polar Research, <sup>4</sup> Shumei University, <sup>5</sup> Osaka City University, <sup>6</sup> Officer of IUGS-GEM

房総半島中部に広く分布する上総層群は、金原ほか(1949)以降、多数の火山灰鍵層によって詳細な層序が編まれてきた(品田ほか, 1951; 三梨ほか, 1959; 三梨ほか, 1961; 石和田ほか, 1971; 三梨ほか 1979)。特に、黄和田層・大田代層・梅ヶ瀬層・柿ノ木台層には、厚さ 20cm を超え特徴があり目立つ火山灰層がしばしば挟まれ、詳しい層序が編まれてきたが、国本層中には厚く特徴ある目立つ火山灰層は少ない。

国本層の中部は、層厚約 80m のシルト優勢な地層からなる。中部のほぼ中位に、Ku2 火山灰層を挟む。そして、この国本層中のシルト優勢部は房総半島の中部~東部にかけてよく連続する。房総半島では上総層群は露出がよく、模式ルートである養老川沿いを中心に各種の微化石層序が確立され(Oda, 1977; Takayama, 1967; 佐藤ほか, 1988; Cherepanova et al., 2002)、国際対比が可能となってきた。WQSB (1996) は、それらを総括する過程で、この国本層の泥層中にガラス質細粒火山灰層や軽石やスコリアが散在する層準などが合わせて 20 以上の火山を見つけてきている。

その中でも、Ku2 火山灰層の約 27m 下位には、厚さ 1-4cm でガラス質な粗粒シルト粒径の火山灰層がみつきり養老川沿いの分布地の地名より白尾火山灰層と名付けた。

新妻(1976)は、古地磁気測定から、M/B 境界付近について養老川の西隣の露出の良い柳川ルートの詳細に調べた。Ku2 の下位の泥層中に見出した白色の火山灰層を TNTT と名付け、この火山灰層のやや下位に M/B 境界が存在することを示した。さらに、Okada&Niitsuma (1986) は養老川の東方の平蔵川ルート・長南ルートにおいても、TNTT 火山灰層と M/B 境界の側方への連続性を確認した。

その後、会田(1997)は養老川沿いに古地磁気測定を行った中川ほか(1969)を参考に、洪水のため露出条件が変わった養老川における国本層全般の詳細な古地磁気測定の結果、Byk 火山灰層のやや下位に M/B 境界が位置することを示した。

白色細粒火山灰層は上総層群中に多数挟まれることから、TNTT 火山灰層と Byk 火山灰層が同一かどうかを検討するため、現地調査を行った。その結果、これらの各白色火山灰層の上位 3.6m の間に、3 層のスコリアと 1 層の赤灰色のガラス質細粒火山灰層が柳川ルートと養老川ルートにおいて同じ順に堆積していることが明らかとなり、厳密な層序を編むことが可能になってきた。よって、これら 5 枚組の火山灰層束をもって Byk とし、上位より Byk-A, Byk-B, Byk-C, Byk-D, Byk-E とする。すなわち従来の TNTT および Byk は Byk-E となる。なお、Byk-A と Byk-B の間は厚さ 2.15m, Byk-B と Byk-C の間は 0.44m, Byk-C と Byk-D との間は 0.58m, Byk-D と Byk-E との間は 0.14m である。以下に、上総層群の模式ルートである養老川における Byk 全体の層相を示す。

Byk-A は、厚さ 9cm で、3 ユニットから構成される。下部ユニットは厚さ 2~4cm で、シルト粒径の紫がかかった灰白色ガラス質火山灰層からなり、中粒砂粒径の重鉱物や火山岩片を 1 割程度含む。中部ユニットは厚さ 0.5~1cm で、中粒砂粒径の黒色スコリアからなる。上部ユニットは厚さ 5~7cm で、シルト粒径の赤みがかかった灰色のシルト混じりガラス質火山灰からなる。なお、この直下は中粒シルト層であるものの、生物擾乱がみられ、厚さ 2cm に渡ってシルトの粒径の白色ガラス質火山灰質となっている。

Byk-B は、厚さ 5cm で、シルト中に約 10% 含まれる中粒砂粒径のスコリアから構成される。

Byk-C は、厚さ 16cm で、シルト中に約 4% 含まれる中粒砂粒径のスコリアから構成される。

Byk-D は厚さ 1-4cm で、シルト中に約 3% 含まれる中粒砂粒径のスコリアから構成される。

Byk-E は、厚さ 1-4cm で、粗粒シルト粒径の白色のガラス質火山灰から構成される。この直下は中粒シルトで、生痕に伴い細粒火山灰が厚さ 3cm にわたってまじる。また、層理に対し直行方向に延びる直径 1cm で長さ 3cm 程度の生痕がみられ、この中に上位の白色ガラス質火山灰が詰まっている。

\*引用文献: デジタルブック最新第四紀学(日本第四紀学会編)の「上総層群」参照。

キーワード: 更新世前期-中期境界, 国本層, 上総層群, 白尾火山灰層, TNTT 火山灰層, 白尾火山灰東層



---

SGL44-10

会場:421

時間:5月2日 16:45-17:00

Keywords: L-M Pleistocene boundary, Kokumoto Formation, Kazusa Group, Byakubi tephra, TNTT tephra, Byk tephra zone

## 千葉セクションにおける下部-中部更新統境界と白尾火山灰層の分布状況 Lower - Middle Pleistocene Boundary at Chiba Section and distribution situation of Byakubi Ash, central Japan

木村 英人<sup>1\*</sup>; 風岡 修<sup>2</sup>; 楡井 久<sup>3</sup>

KIMURA, Hideto<sup>1\*</sup>; KAZAOKA, Osamu<sup>2</sup>; NIREI, Hisashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東邦地水株式会社関東支社, <sup>2</sup> 千葉県環境研究センター地質環境研究室, <sup>3</sup> 国際地質科学連合環境管理研究委員会

<sup>1</sup>Toho Chisui Co., Ltd. Kanto office, <sup>2</sup>Research Institute of Environmental Geology, Chiba, <sup>3</sup>International Union of Geological Science for Environmental Management(IUGS-GEM)

白尾火山灰層は市原市南部に分布し、上総層群国本層中上部層の基底付近に位置する。国本層は層相から4区分でき、上位より上部層(砂勝ち砂泥互層)、中上部層(塊状泥層)、中下部層(砂勝ち砂泥互層)、下部層(塊状泥層)となっている(三梨他, 1959; 徳橋・遠藤, 1983; 木村他, 2012)。ブリュンヌ正磁極期と松山逆磁極期の境界付近に下部-中部更新統境界が設定され、本境界が白尾火山灰層の下底付近に引かれる(会田ほか, 2010)。本調査範囲内において、白尾火山灰層の分布が養老川(田淵)から田淵川(田淵)、西川(月出)、古敷谷川(古敷谷)まで確認された(木村他, 2012)。

今後の追跡調査は、丹念な踏査が必要となってくるが、白尾火山灰層の上位に挟在するKu2(Ku2B'・Ku2B)の分布状況がかなり確認されているため(三梨他, 1961; 石和田他, 1971; 三梨・菊池, 1971; 三梨編, 1979; 徳橋・遠藤, 1983; 中嶋・渡辺, 2005)、追跡の重要な手がかりになると考えられる。

会田信行・井上進・宇澤政晃・香川淳・風岡修・木村和也・木村英人・楠田隆・葛岡等・小玉喜三郎・酒井豊・佐久間豊・高島英世・塚定良治・楡井久・楡山知代・古野邦雄・堀内正貫・丸井敬司・安田敬一・吉田剛・吉野秀夫, 2011, 中・下部更新統境界模式セクション候補地(千葉県市原市田淵)の認定に向けた取り組みとジオパーク, 第20回環境地質学シンポジウム論文集, 31-34.

木村英人・風岡修・楡井久, 2012, 下部-中部更新統境界模式候補地と白尾火山灰層の分布状況, 第21回環境地質学シンポジウム論文集, 201-206.

石和田靖章・三梨昂・品田芳二郎・牧野登喜男編, 1971, 日本油田・ガス田図10「茂原」, 地質調査所.

三梨昂・安国昇・品田芳二郎, 1959, 千葉県養老川・小櫃川の上総層群の層序-養老川・小櫃川流域地質調査報告一, 地質調査所月報, 10, 83-98.

三梨昂・矢崎清貴・影山邦夫・島田忠夫・小野暎・安国昇・牧野登喜男・品田芳二郎・藤原清丸・鎌田清吉, 1961, 5万分の1日本油田・ガス田図10「富津-大多喜」, 地質調査所.

徳橋秀一・遠藤秀典, 1983, 姉崎地域の地質, 地域地質研究報告, 5万分の1図幅, 地質調査所.

キーワード: 白尾火山灰, 国本層中上部層, 養老川, 千葉セクション

Keywords: Byakubi Ash, Kokumoto Formation middle-upper member, Yoro River, Chiba Section

## 茂原地域の国本層テフラ Tephra of the Kokumoto Formation in the Mobarra area

中里 裕臣<sup>1\*</sup>; 七山 太<sup>2</sup>  
NAKAZATO, Hiroomi<sup>1\*</sup>; NANAYAMA, Futoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 農研機構, <sup>2</sup> 産総研  
<sup>1</sup>NARO, <sup>2</sup>AIST

演者らは5万分の一茂原地域の地質図幅調査の一環として、大田代層以上の上総層群テフラの検討を行っている。本地域における国本層についてはKu0.6~Ku6Eのテフラを確認した。B/M境界直上のテフラTNTT(Niitsuma,1971)は、Okada and Niitsuma(1989)により長南町小生田まで追跡されている。TNTTは角閃石斑晶および軽石型火山ガラスに富むガラス質細粒テフラで、角閃石の屈折率は1.680-1.703(モード1.688-1.690)、火山ガラスは1.505-1.510(1.507)を示し、角閃石の化学組成から古期御岳火山起源テフラと対比されている(竹下ほか, 2005)。茂原地域の国本層では石和田ほか(1971)により全域でKu2およびKu3が追跡されており、TNTTおよびB/M境界層準はこの間で追跡が可能である。これまでの調査では、TNTTを睦沢町馬場まで確認した。国本層分布の北東端である茂原市寺崎ではKu0.6および0.9とKu2.5を確認しており、この間でのTNTTの検出を試みている。

キーワード: テフラ, 層序, TNTT  
Keywords: tephra, stratigraphy, TNTT

## 上総層群百尾テフラ層の年代と給源火山 The source volcano and age of the Byakubi tephra in the Kazusa Group in Boso Peninsula, central Japan

内山高<sup>1\*</sup>; 竹下欣宏<sup>2</sup>; 熊井久雄<sup>3</sup>  
UCHIYAMA, Takashi<sup>1\*</sup>; TAKESHITA, Yoshihiro<sup>2</sup>; KUMAI, Hisao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 山梨県環境科学研究所, <sup>2</sup> 信州大学, <sup>3</sup> 大阪市立大学大学院名誉教授  
<sup>1</sup>Yamanashi Institute of Environmental Sciences, <sup>2</sup>Shinshu University, <sup>3</sup>Prof. Emeritus, Osaka City University

### Introduction

The Kazusa Group in the Boso Peninsula, central Japan is composed of Lower- Middle Pleistocene marine sediments that contain numerous tephra layers (Mitsunashi et al.1959; Machida et al. 1980; Satoguchi 1995; Satoguchi 1996 and so on). One of numerous tephra layers, Byakubi tephra (BYK; Takeshita et al. 2005) is intercalated just above Brunhes/ Matuyama (B/M) boundary in middle part of the Kokumoto Formation (Okada and Niitsuma 1989; Aida et al. 1996). BYK was correlated with YUT4 or 5 from the Older Ontake Volcano, which provide a datum plane of the Lower-Middle Pleistocene boundary in central Japan (Takeshita et al. 2005).

### Correlation of the tephra beds in the Kazusa Group with those from the Older Ontake Volcano

Heavy mineral assemblage and chemical compositions of hornblende of nine Lower-Middle Pleistocene tephra beds (Ku6E, Ku5C, BYK, Ka2.4A, Ka2.4B, Ch3, Ch1.5, Ks18, Ks12) from the Kazusa Group, in Boso Peninsula were examined in order to correlate with the tephra from the Older Ontake Volcano in central Japan by Takeshita et al. (2005). Conclusively, hornblende compositions from the nine tephra beds were distinguishable. Two of the nine beds, BYK and Ks12 tephra, were correlated with two tephra from the Older Ontake Volcano, YUT4 or 5 and KZT, respectively. The age of these tephra beds of the Kazusa Group could be inferred from the stratigraphic relationships with 47 dated lava flows on the foot of the Older Ontake Volcano, and from presence of well-known widespread tephra and magnetostratigraphy in the Boso Peninsula. Correlated these two tephra beds became valuable marker tephra for geochronological studies in inland and marine sediments from central Japan. It was also emphasized that the BYK and YUT4 or 5 could provide a datum plane of the Lower-Middle Pleistocene boundary in this region.

キーワード: 第四紀前・中期更新世境界, 上総層群, 百尾テフラ, 御岳火山, 房総半島

Keywords: Lower-Middle Pleistocene Boundary GSSP, Kazusa Group, Byakubi tephra, Ontake Volcano, Boso Peninsula



## 海洋における酸化還元環境の変遷と元素濃集 Concentration of Elements Related to Redox Evolution in Oceanic Environments

大竹 翼<sup>1\*</sup>  
OTAKE, Tsubasa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院工学研究院

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Hokkaido University

海洋や熱水からの沈殿物で構成させる化学堆積岩は、様々な有用元素を濃集させるだけでなく、地球表層環境の変遷を記録している。例えば、鉄に富む化学堆積岩である縞状鉄鉱層は初期地球において大気や海洋環境の進化を記録していると考えられ、これまでに様々な研究が行われてきた。しかしながら、これまでの研究対象となってきた太古代の縞状鉄鉱層は主に深海層に限られていたが、海洋環境の変遷をより詳細に明らかにするためには様々な堆積環境における縞状鉄鉱層を対象にする必要がある。本研究では、当時の地球表層環境についての情報をより保持していると考えられる浅海性の堆積岩に着目し、南アフリカ・バーバトン緑色片岩帯に見られる約32億年前の浅海性堆積岩の地質学的、岩石学および地球化学的特徴を調べた。その結果、砂岩などの堆積岩に挟まれている縞状鉄鉱層のCr/Ti比やU/Th比は、その前後の碎屑性堆積岩と比較して最大で1桁ほど高い値を示した。また、SIMSを用いて測定したCrのホスト鉱物であるクロム鉄鉱の粒子ごとの酸素同位体比は、火成起源のものと比較して軽い値を示し、熱水条件下での形成を示唆する結果となった。これらのことより、32億年前の浅海域ではすでに酸化的な海洋が存在し、酸化的な環境では溶解度の高いクロムやウランなどが溶存しており、鉄酸化物の沈殿時に吸着・共沈することによってCrやUの濃集が起こったと考えられる。

秋田県北鹿地域にみられる黒鉄鉱床は、中新世の海底熱水活動により形成した塊状硫化物鉄床である。主な鉄鉱物は黄鉄鉱や黄銅鉱などの硫化鉄であり、還元的な環境で安定な鉄鉱物である。したがって、大規模海底熱水鉄床の形成や保存は海洋の環境変動、特に深海の貧酸素化と関連していると考えられているが、これらの地球化学的な証拠は未だ得られていない。黒鉄鉱床の周辺部には、熱水性の鉄やマンガンを富む化学堆積岩がみられるため、これらのレアースパターンと鉄安定同位体比から黒鉄鉱床時やその後の北鹿海盆の酸化還元環境の変遷について検討を行った。MC-ICPMSによる鉄同位体比の分析の結果、黒鉄鉱床形成直後の試料は、火成起源の岩石と同様の $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を持つ標準試料から大きな分別を示した。鉄安定同位体比は、溶存二価鉄から酸化鉄として部分酸化する際に同位体分別を起こす事が知られており、当時の北鹿海盆深部に還元環境が広がっていたことを示唆する。また、これらの試料においてREEパターンが負のCe異常を示したことから、還元的なリザーバー中の溶存鉄が酸化的な海水との混合によって部分酸化されたことを示している。その一方で、その後の200?300万年の間に堆積した化学堆積岩の $\delta^{56}\text{Fe}$ 値は熱水中の鉄同位体比と同様の-0.8?0.3‰であり、酸化的な海洋中で溶存二価鉄のほぼ完全に酸化されたことを示唆している。これらの結果より、北鹿海盆は黒鉄鉱床形成時の還元的な環境から、海盆の浅化に伴い酸化的な環境へと変化していったと考えられ、このような大規模塊状硫化物鉄床の形成において還元的な堆積環境が重要な要因の一つであることを示唆している。

キーワード: 化学堆積岩, 縞状鉄鉱層, バーバトン緑色片岩帯, クロム, 黒鉄鉱床, 鉄同位体

Keywords: Chemical sedimentary rock, Banded Iron Formation, Barberton Greenstone Belt, Chromium, Volcanogenic Massive Sulfide deposit, Iron isotope

## Mn クラストの Os 同位体層序学：その原理と応用 Os isotope stratigraphy of a ferromanganese crust: Its principles and applications

野崎 達生<sup>1\*</sup>; 後藤 孝介<sup>2</sup>; 得丸 絢加<sup>3</sup>; 高谷 雄太郎<sup>4</sup>; 鈴木 勝彦<sup>1</sup>; 常 青<sup>1</sup>; 木村 純一<sup>1</sup>; 加藤 泰浩<sup>4</sup>; 下田 玄<sup>2</sup>; 豊福 高志<sup>5</sup>; 白井 朗<sup>6</sup>; 浦辺 徹郎<sup>3</sup>

NOZAKI, Tatsuo<sup>1\*</sup>; GOTO, Kosuke T.<sup>2</sup>; TOKUMARU, Ayaka<sup>3</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>4</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>1</sup>; CHANG, Qing<sup>1</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>1</sup>; KATO, Yasuhiro<sup>4</sup>; SHIMODA, Gen<sup>2</sup>; TOYOFUKU, Takashi<sup>5</sup>; USUI, Akira<sup>6</sup>; URABE, Tetsuro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JAMSTEC・IFREE, <sup>2</sup>AIST・GSJ, <sup>3</sup>東大・理, <sup>4</sup>東大・工, <sup>5</sup>JAMSTEC・BIOGEOS, <sup>6</sup>高知大・理

<sup>1</sup>JAMSTEC/IFREE, <sup>2</sup>AIST/GSJ, <sup>3</sup>Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Univ. of Tokyo, <sup>5</sup>JAMSTEC/BIOGEOS, <sup>6</sup>Kochi Univ.

Sedimentation age determination by using an Os isotope stratigraphy is one of the effective dating methods for a ferromanganese crust. This dating method is applicable to the almost whole sedimentation age of a ferromanganese crust from the Late Cretaceous to present. So far, we have applied the Os isotope dating method to various ferromanganese crust samples collected from Northwestern Pacific, South Atlantic Oceans and Philippine Sea. In this presentation, we introduce the principles and applications of the Os isotope dating method, and discuss our recent results especially focusing on the growth hiatus of a ferromanganese crust.

キーワード: Mn クラスト, Os 同位体, 地球化学, 成長ハイエタス, 古海洋環境

Keywords: ferromanganese crust, Os isotope, geochemistry, growth hiatus, paleoceanography

## 沖縄トラフ伊是名海穴 Jade 熱水域における表層堆積層中の熱水変質鉱物 Occurrence of hydrothermal alteration minerals at the Jade hydrothermal field, in the Izena Hole, mid-Okinawa Trough

三好 陽子<sup>1\*</sup>; 石橋 純一郎<sup>2</sup>; 横山 由佳<sup>3</sup>; 高橋 嘉夫<sup>3</sup>

MIYOSHI, Youko<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>2</sup>; YOKOYAMA, Yuka<sup>3</sup>; TAKAHASHI, Yoshio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門鉱物資源研究グループ, <sup>2</sup> 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

沖縄トラフ伊是名海穴 Jade 熱水域では、硫化物からなるチムニーやマウンドが多数みつき、それらの鉱物学的特徴は黒鉱鉱床のものに類似していることが指摘されている。黒鉱鉱床では、鉱床周囲に熱水変質作用によって形成された粘土鉱物が帯状分布していることが知られ、その出現分布は多くの研究により明らかにされている。本研究では、沖縄トラフ伊是名海穴 Jade 熱水域における海底下の粘土鉱物の出現分布を明らかにすることを旨として、まずは熱水域海底から表層堆積物を採取して、粘土鉱物を同定した。

表層堆積物試料は 2010 年 9 月の NT10-17 航海にて採取されたものを用いた。海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の無人潜水艇ハイパードルフィンに付属する MBARI コアラーを用いて、表層 30cm 程度のコア試料を採取した。コア試料から堆積物試料を取り出し、試料中の鉱物を X 線回折法 (XRD) によって同定した。いくつかの堆積物試料については、試料から 2 $\mu$ m 以下の粘土粒子だけを水ひで集め、XRD を用いて粘土鉱物を同定し、透過型電子顕微鏡 (TEM) に付属するエネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) を用いて粘土鉱物の化学組成を分析した。

硫化物チムニーから 320°C の高温熱水の噴出が見られる地点で採取された表層堆積物試料からは、カオリナイトが閃亜鉛鉱や方鉛鉱を伴って見出された。カオリナイトは酸性条件下で安定な熱水変質鉱物であることが知られている。実際、このコアの堆積物から抽出した間隙水は低い pH を示した。間隙水の低い pH は、堆積層中の硫化物が海水によって酸化されて溶解することによって作り出されたと推定される。

高温熱水を噴出する硫化物チムニーから 400m 離れた地点では、100°C 程度の低温熱水の湧出や液体 CO<sub>2</sub> の湧出が確認されている。この地点で採取された表層堆積物試料からは、クロライトやスメクタイトが見出された。これらのクロライトやスメクタイトは Al に富む化学組成を示した。とくにクロライトはいくつかの黒鉱鉱床で報告される Al-クロライト (スドーアイト) に似た化学組成を示した。スドーアイトはいくつかの黒鉱鉱床においてカオリナイトやパイロフィライトといった酸性環境で安定な熱水変質鉱物とともに産することが知られる。本研究により、沖縄トラフ伊是名海穴 Jade 熱水域の表層堆積層中に酸性環境で安定な熱水変質鉱物が出現することが明らかになった。

キーワード: 粘土鉱物, 熱水変質作用, 沖縄トラフ

Keywords: clay mineral, hydrothermal alteration, Okinawa Trough

## 伊豆小笠原弧の海底火山に伴う熱水地球化学 Geochemistry of hydrothermal fluids collected from submarine volcanoes in the Izu-Bonin Arc

石橋 純一郎<sup>1\*</sup>; 永富 健太郎<sup>1</sup>; 高橋 稔<sup>1</sup>; 児玉谷 仁<sup>2</sup>; 富安 卓滋<sup>2</sup>; 武内 章記<sup>3</sup>; 山中 寿朗<sup>4</sup>  
ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>1\*</sup>; NAGATOMI, Kentaro<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Minoru<sup>1</sup>; KODAMATANI, Hitoshi<sup>2</sup>; TOMIYASU, Takashi<sup>2</sup>  
; TAKEUCHI, Akinori<sup>3</sup>; YAMANAKA, Toshiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府, <sup>2</sup>鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>3</sup>国立環境研究所, <sup>4</sup>岡山大学大学院自然科学研究科  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyushu University, <sup>2</sup>Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, <sup>3</sup>National Institute for Environmental Studies, <sup>4</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

我が国周辺の海底熱水活動域は、伊豆小笠原弧と沖縄トラフに集中している。本州南方に延びる伊豆小笠原弧は、太平洋プレートの沈み込みに伴う海洋性島弧である。火山フロント上のいくつかの海底火山で、現在も熱水を噴出する熱水活動域が確認されている。このうち水曜海山と明神海丘の熱水域から採取した熱水試料の化学分析を行った。本講演では、その化学的特徴を、沖縄トラフの熱水域における熱水地球化学と比較しながら報告する。

熱水試料は、水曜海山で2007年に実施されたNT07-08航海の潜航調査、および明神海丘で2012年に実施されたNT12-10航海で採取した。無人潜水(ROV)Hyper-Dolphin(JAMSTEC)にROCS採水器と呼ばれる吸引式の採水器を搭載して、試料の採取を行った。熱水の最高温度は、水曜海山で296℃、明神海丘で235℃であった。

熱水の化学的特徴として、1) Mg, SO<sub>4</sub>を欠く、2) K, Caの濃度がともに海水より高いが、とりわけCaの増加が顕著である、3) NH<sub>4</sub>などの有機物由来と考えられる成分の濃度が低い、ことがあげられる。これらの特徴は、熱水の化学組成が海水由来の熱水と岩石の高温反応に支配されている、という従来のモデルで説明できる。すなわち、Caに富む特徴は伊豆小笠原弧の火山岩が低~中アルカリであることを反映しており、NH<sub>4</sub>の濃度が低いことは陸源有機物がほとんどないことを反映している。講演では金属元素や微量元素の濃度についても検討し、鉱床の化学的特徴との関連について議論する。

キーワード: 熱水鉱床, 水曜海山, 明神海丘, 熱水岩石反応

Keywords: seafloor massive sulfide deposit, Suiyo Seamount, Myoujin Knoll, fluid-rock interaction



## 沈み込み帯における水銀鉱床形成と有機鉱物産出の関連性 Relationship between the formation of mercury deposits and the occurrences of organic minerals in subduction zones

越後 拓也<sup>1\*</sup>  
ECHIGO, Takuya<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 滋賀大学教育学部

<sup>1</sup> Faculty of Education, Shiga University

炭化水素分子や有機酸イオンなどの炭素-炭素結合を有する構造ユニットからなる鉱物群は、有機鉱物 (organic minerals) と呼ばれ、これまでに 45 種類の鉱物種が報告されている (Gaines et al. 1996, Bojar et al. 2010)。有機鉱物の中でも、様々な金属イオンとシュウ酸やクエン酸などの有機酸イオンが結びついたものはイオン性有機鉱物に分類され、アミドやキノンなどの有機分子が分子間力によって結びついているものは分子性有機鉱物として分類される (Echigo and Kimata 2010)。現在、27 種類のイオン性有機鉱物と 18 種類の分子性有機鉱物が知られており、海底堆積物や石灰岩コンクリーション、石炭などの有機物に富む環境で続成作用によって生成したものが広く産出する。しかし、有機鉱物の中には、後述するカーパタイトやイドリアライトのように、熱水性水銀鉱床にのみ産出するものも存在する。本研究では、このような水銀鉱床に産出する有機鉱物および有機物に焦点を当て、鉱床の形成機構と有機物の挙動の関連性を考察することを目的とする。

カーパタイト (karpatite:  $C_{24}H_{12}$ ) およびイドリアライト (idrialite:  $C_{22}H_{14}$ ) はいずれも分子性有機鉱物に分類され、カーパタイトは 6 つのベンゼン環が環状に連結したコロネン (coronene:  $C_{24}H_{12}$ ) の分子結晶であり、イドリアライトは 5 つのベンゼン環が直鎖状に連結したピセン (picene:  $C_{22}H_{14}$ ) の分子結晶である。コロネンやピセンのように、複数のベンゼン環が重合した化合物は多環芳香族炭化水素 (polycyclic aromatic hydrocarbon: PAHs) と呼ばれ、河川水や土壌、堆積岩などに広く存在する安定性の高い有機化合物である。なお、PAHs を主成分とする有機鉱物はこれまでに 8 種類が知られており、分子性有機鉱物の中で最も大きい鉱物グループを形成している。前述したように、カーパタイトはウクライナの Trans-Carpathia (Piotrovskii 1955)、カリフォルニア州の San Benito (Murdoch and Geissman 1967)、カムチャッカ半島の Tamvatnei (Gorchakov et al. 1981) といった大規模な水銀鉱床における産出が報告されている。イドリアライトも同様に、スロベニアの Idrija (Dumas 1832) とカリフォルニア州の Skaggs Springs (Wright and Allen 1930) という、大規模な水銀鉱床での産出が報告されているのみであり、他の有機鉱物のように続成作用で結晶化したとは考え難く、水銀鉱床を形成した熱水活動の影響で生成した鉱物と考えられる。

これらの有機鉱物が産出する水銀鉱床の共通点として、形成年代が新第三紀と比較的新しい点と、プレートの沈み込みに伴う火山活動で形成された浅熱性熱水鉱床である点が挙げられる。これらの特徴を有する水銀鉱床は日本列島にも存在しており、例えば、北海道のイトムカ鉱山では、形成年代や鉱床の形成機構が類似していることに加え、ケロジェン様の固相有機物が水銀鉱石から発見されている (越後ら 2007)。このように、テクトニクス場-地質年代-鉱床の形成機構が共通する水銀鉱床に有機鉱物もしくは有機物が発見されていることは、沈み込み帯における水銀鉱床の形成と有機物の挙動に深い関連があることを示唆している。

キーワード: 水銀鉱床, 有機鉱物, 沈み込み帯, 多環芳香族炭化水素

Keywords: Mercury deposits, Organic minerals, Subducting zone, Polycyclic aromatic hydrocarbons

## A pilot magnetotelluric survey for geothermal exploration in northern Thailand A pilot magnetotelluric survey for geothermal exploration in northern Thailand

AMATYAKUL, Puwis<sup>1\*</sup>; RUNG-ARUNWAN, Tawat<sup>1</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; SIRIPUNVARAPORN, Weerachai<sup>1</sup>  
AMATYAKUL, Puwis<sup>1\*</sup>; RUNG-ARUNWAN, Tawat<sup>1</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; SIRIPUNVARAPORN, Weerachai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysics Research Group, Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

<sup>1</sup>Geophysics Research Group, Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

One of Thailand's most prominent geothermal field is located in Maechan district, Chiangrai province, along the active Maechan fault which is East-West left-lateral strike-slip fault. Its surface temperature is 99.5 degree Celsius with the flow rate of 3 l/s. Magnetotelluric (MT) survey is proposed to help delineating geothermal fluid and controlling features of the hydrothermal system. In July 2013, 7 magnetotelluric stations were deployed covering the area of Maechan geothermal field. Horizontal magnetic and electric fields ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $E_x$  and  $E_y$ ) were collected with the remote reference site located 70 km away in Fang district, Chiangmai province. To obtain 3-D resistivity model, 18 periods of off-diagonal ( $Z_{xy}$  and  $Z_{yx}$ ) elements ranging from 0.003 to 300 second were applied with WSINV3DMT, a 3-D MT inversion widely used among many authors. The obtained resistivity model shows the shallow conductive zones which their locations coincide with the hot springs manifestation. These conductive zone locates from the surface to not more than 500 m and referred as the reservoir of hot geothermal fluid heated by the deeper resistive batholith granite basement. The resistivity contrast in the obtained model up to 2 km northward is corresponding to the lineament of Maechan fault. This also confirms the hypothesis from previous studies that the hot fluid is being stored in fractures of weathered granite which is the damage zone of Maechan fault and reaches the surface where the springs are located through shallow fractures and faults.

キーワード: magnetotellurics, geothermal field, three-dimensional inversion, electrical resistivity, Maechan fault  
Keywords: magnetotellurics, geothermal field, three-dimensional inversion, electrical resistivity, Maechan fault

フェムト秒 LA-MC-ICP-MS による銅同位体比局所分析法の開発と鉱石試料への応用  
Development of in-situ Cu isotope ratio measurement by femtosecond-LA-MC-ICP-MS and its applications to ore minerals

池端 慶<sup>1\*</sup>  
IKEHATA, Kei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系  
<sup>1</sup> Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

A new method for determining copper isotope compositions of copper-rich minerals (native copper, cuprite, chalcocite, chalcopyrite, cubanite and malachite) using a femtosecond LA-MC-ICP-MS has been developed. The standard-sample-standard bracketing technique was applied to correct the instrumental mass fractionation. Matrix effects found in chalcocite, chalcopyrite, cubanite and malachite can be corrected using the matrix-matched calibration standard. The analytical precision ( $<0.14\text{‰}$ ,  $2\sigma$ ) and accuracy were significantly improved compared with those of previous works using a nanosecond-LA-MC-ICP-MS.

The developed LA-MC-ICP-MS method was applied to the measurements of copper isotope ratios of minute copper ore minerals in igneous rocks (e.g., Horoman peridotite complex) and seafloor hydrothermal deposits (modern: Mariana Trough; ancient: Besshi-type and Kuroko-type volcanogenic massive sulfide deposits) in order to investigate variability of copper isotopic compositions in these samples.

The  $\delta^{65}\text{Cu}$  (where  $\delta^{65}\text{Cu} = [(^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{sample}} / (^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{NIST-SRM976-1}}] \times 1000$ ) values of copper-rich sulfide minerals of the active seafloor hydrothermal deposits are significantly large ( $\delta^{65}\text{Cu} = -0.7$  to  $4.0\text{‰}$ ) compared to those of the ancient submarine hydrothermal deposits ( $\delta^{65}\text{Cu} = -0.3$  to  $0.4\text{‰}$ ) and the igneous rocks ( $\delta^{65}\text{Cu} = -0.3$  to  $0.3\text{‰}$ ). These large copper isotope variations in the modern active seafloor hydrothermal deposits are most likely explained in terms of a redox-controlled isotope fractionation during hydrothermal reworking or alteration of precipitated copper-rich minerals. These results also suggest that sub-seafloor and metamorphic recrystallization effects probably have reduced the original range of copper isotopes.

Secondary malachite ( $\delta^{65}\text{Cu} = 2.6$  to  $3.0\text{‰}$ ) and native copper ( $\delta^{65}\text{Cu} = 1.4$  to  $1.7\text{‰}$ ) in the Besshi-type deposit have heavier copper isotope values compared to precursor copper-rich minerals. These variations are mainly due to isotope fractionation during redox reactions (weathering) at low temperatures involving the preferential incorporation of heavy copper isotope in secondary Cu(II) solutions. Therefore, copper isotope geochemistry could be a useful tool for understanding geochemical processes of copper transport and deposition in ore-forming systems.

キーワード: 銅同位体比, フェムト秒 LA-MC-ICP-MS, 鉱石鉱物  
Keywords: copper isotope ratio, femtosecond-LA-MC-ICP-MS, ore minerals

## 南鳥島沖深海底泥中に含有される高レアアース濃度アパタイトの起源 Origin of Heavy-REE-rich apatite in deep-sea mud from Minami-Torishima area, south-eastern Japan

昆慶明<sup>1\*</sup>; SHIN Ki-cheoul<sup>2</sup>; 星野美保子<sup>1</sup>; 実松健造<sup>1</sup>; 岡本信行<sup>3</sup>; 矢野信彦<sup>3</sup>; 田中幹也<sup>4</sup>; 高木哲一<sup>1</sup>  
KON, Yoshiaki<sup>1\*</sup>; SHIN, Ki-cheoul<sup>2</sup>; HOSHINO, Mihoko<sup>1</sup>; SANEMATSU, Kenzo<sup>1</sup>; OKAMOTO, Nobuyuki<sup>3</sup>; YANO, Nobuhiko<sup>3</sup>; TANAKA, Mikiya<sup>4</sup>; TAKAGI, Tetsuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>地質調査総合センター、産業技術総合研究所, <sup>2</sup>総合地球環境学研究所, <sup>3</sup>石油天然ガス・金属鉱物資源機構, <sup>4</sup>環境管理技術研究部門、産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Research Institute for Humanity and Nature, <sup>3</sup>JOGMEC, <sup>4</sup>Research Institute for Environmental Management Technology, AIST

レアアース元素(以下REE)を多く含む深海泥は太平洋の広範囲に分布しているが、近年日本の領海内である南鳥島沖でも同様の深海泥が採取された。太平洋深海泥中のREEキャリア鉱物については、これまでフィリップサイトや鉄オキシ水酸化物、アパタイトやマンガン酸化物であるという報告がなされている。しかしながら、太平洋の広範囲でREEホスト鉱物が同一であるとは限らない為、個々の地域においてより詳細な研究が必要である。

そこで産総研では、経済産業省からの事業委託を受けた(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構とともに南鳥島沖のボーリングによって採取されたREE泥についての研究を進めている。今回我々は採取されたREE泥より50-100g程度のフラクションを採取し、それぞれについて鉱物学的記載と化学分析を行う事で、本地域におけるREEキャリア鉱物の同定を試みた。

まず、XRDを用いて鉱物相の同定を行った結果、REE泥からは、フィリップサイト、フルオロアパタイト、石英、長石、イライト、モンモリロナイトが含有されることが明らかになった。また、REY泥試料全岩平均化学組成は、カルシウム、リン濃度と総REY濃度に正の相関があることが示された。REY泥試料中の相対アパタイト含有量は、リン濃度と総REY濃度と正の相関を示した。これらの結果から、アパタイトはリンとREYのホスト相であることが示された。REYホスト相であるアパタイトのREY濃度定量分析を行った結果、9300?32000 ppmのREYがアパタイト中に含まれることが明らかになった。一方で、フィリップサイトには60?170 ppmのREYしか含まれていない。その結果、アパタイトがREYホスト相であることが定量的に示された。

キーワード: レアアース, 深海底泥, アパタイト, 南鳥島, LA-ICPMS, Nd 同位体

Keywords: REE, deep-sea mud, apatite, Minami-Torishima, LA-ICPMS, Nd isotope



## Upgradation of silica rich fluvial sands of Bangladesh: Proposals for alternate uses Upgradation of silica rich fluvial sands of Bangladesh: Proposals for alternate uses

Rajib Mohammad<sup>1\*</sup>  
RAJIB, Mohammad<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Bangladesh Atomic Energy Commission / Graduate Student, Grad. Sch. Sc. Eng., Saitama University

<sup>1</sup>Bangladesh Atomic Energy Commission / Graduate Student, Grad. Sch. Sc. Eng., Saitama University

Major rivers of Bangladesh are carrying billions of tons of sediments from the Himalayan mountain range from the north, forming bars almost on every river. These bars inundate in floodwater every year, eroding some sediments as well as depositing more. Thus, almost all the rivers are getting filled with the sediment in course of time. The government of Bangladesh has undertaken a mega plan for Capital Dredging, for raising navigability of the main and important rivers across the country. But there is not enough space to keep those dredged materials. Hence, most of the time, the dredged materials are thrown only in the vicinity of dredging area. In course of very short time, those materials eventually return back to river bed with the precipitation and surface runoff. This makes wastage of time and money.

The river sediments are rich in silicate mineral, mainly quartz and feldspar, along with others, like heavy and micaceous minerals. Quartz (SiO<sub>2</sub>) is the raw material for glass production. River sands of Bangladesh also contain some heavy minerals like magnetite, ilmenite, rutile, zircon, garnet, leucosene, pyroxene etc., and some Mica group minerals like muscovite, biotite, chlorite etc. Industrial use of these minerals are widely accepted. Upgradation of river silica by some physical separation procedures like density, magnetic and electric separators, and chemical composition revealed from X-ray fluorescence analysis shows that 60-70% silica of river sediment can be easily enriched up to 94%. Very low amount of Fe, Al, Ca, Mg and absence of Cr and Ti indicates the probable use of this upgraded silica as glass producing sand.

For industrial use, advance research is necessary for potential use of such silica for silicon extraction or other silicon products e.g. silicon chip, if the upgradation can be reached more than 99%. The heavy and magnetic minerals associated with silica also can be used economically as by-products of the process. Mining of this sediment from the rivers will increase the navigability of the rivers. As dredging is a must in almost every river of Bangladesh, the mining will work as alternative work of dredging, saving huge amount of money to be spent for dredging. This will also lessen the risk of dangerous flood problem of the country.

Moreover, since fluvial sands has been used as earth filling materials for long time and is suitable in many technical aspects, potentiality of using such sediments for artificial islands can be thought. Japan has been implementing several artificial islands where materials like solid waste, soil from mountains are mostly used as filling materials which are not always environment friendly. Feasibility study for using bulk fluvial sand from Bangladesh as earth filling materials for future artificial islands of Japan can a better alternative. This will decrease the risk of potential environmental hazards that can be created from solid waste or hill-cutting. Use of dredged materials from Bangladesh will help decreasing environmental hazards like floods too. Economical sustainability can be achieved through such reduction of hazard risk.

キーワード: Fluvial Sand, Bangladesh, Silica, Heavy Minerals, Capital Dredging, Artificial Islands

Keywords: Fluvial Sand, Bangladesh, Silica, Heavy Minerals, Capital Dredging, Artificial Islands

## 南アフリカ共和国カラハリマンガン鉱床の鉄同位体組成 Iron isotopic composition of the Palaeoproterozoic Hotazel Formation in the Kalahari Manganese Field, South Africa

朝倉 純<sup>1\*</sup>; 山岡 香子<sup>2</sup>; ボロック デイビッド<sup>3</sup>; 渡辺 寧<sup>2</sup>; 川幡 穂高<sup>1</sup>  
ASAKURA, Jun<sup>1\*</sup>; YAMAOKA, Kyoko<sup>2</sup>; BORROK, David<sup>3</sup>; WATANABE, Yasushi<sup>2</sup>; KAWAHATA, Hodaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> ルイジアナ大学

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup> University of Louisiana

南アフリカの古原生代 Transvaal 累層群 Hotazel 層にあるカラハリマンガン鉱床は、縞状鉄鉱床に三つのマンガンに富んだ層が挟在する世界最大の層状マンガン鉱床である。Hotazel 層のマンガン鉱床および縞状鉄鉱床は、地球の大気中酸素が爆発的に増加した大酸化イベントとほぼ同時期に形成された。また、その形成年代からヒューロニアン氷河期のスノーボールアース事変との関連も示唆されている。鉄同位体は酸化還元状態の敏感な指標であり、縞状鉄鉱床形成時の海洋環境を推定するために適している。Hotazel 層の縞状鉄鉱床およびマンガン鉱床における鉄同位体分析に関する先行研究としては Tsikos et al. (2010) による報告があるが、縞状鉄鉱床の鉄同位体について十分なデータが集まったとは言い難い。

本研究では、南アフリカ共和国カラハリマンガン鉱床で採取されたドリルコアに対し、XRD 分析及び MC-ICP-MS を用いた鉄同位体分析を行い、その結果を Tsikos et al. (2010) と比較した。鉄同位体の測定は標準試料 IRMM-14 に対する  $\delta^{56}\text{Fe}$  値で行った。

同位体測定の結果、Hotazel 層全体を通して低い  $\delta^{56}\text{Fe}$  値 (-0.70 ‰以下) が得られた。マンガンに富んだ層に限れば、 $\delta^{56}\text{Fe}$  値は -1.66 から -2.86 ‰と特に低い値となった。 $\delta^{56}\text{Fe}$  値と鉄マンガン比との関係から、マンガンの存在比率が上がるに連れて  $\delta^{56}\text{Fe}$  値が低くなる傾向にあることが確認された。この結果は、Tsikos et al. (2010) の結果と調和的である。つまり、縞状鉄鉱床が重い鉄同位体のシンクとしての役割をもっており、マンガンの沈殿は軽い鉄同位体に富む海洋環境で起きたとする Tsikos らの説を支持するものである。

### Reference

Harilaos Tsikos, Alan Matthews, Yigal Erel, John M. Moore, 2010. Iron isotopes constrain biogeochemical redox cycling of iron and manganese in a Palaeoproterozoic stratified basin. *Earth and Planetary Science Letters* 298, 125-134. doi: 10.1016/j.epsl.2010.07.032

キーワード: 鉄同位体, 縞状鉄鉱床, カラハリマンガン鉱床

Keywords: iron isotope, banded iron formation, Kalahari manganese deposit

MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>-AlOOH系における含水H相およびδ相の固溶体による下部マントル  
底部への水素の輸送  
Hydrogen transport into the bottom of the lower mantle by phase H- phase delta solid  
solution MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>-AlOOH

大谷 栄治<sup>1\*</sup>; 天池 洋平<sup>1</sup>; 大平 格<sup>1</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 坂巻 竜也<sup>1</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>  
OHTANI, Eiji<sup>1\*</sup>; AMAIKE, Yohei<sup>1</sup>; OHIRA, Itaru<sup>1</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> スプリング8  
<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>SPring-8

Water circulation in a global scale is a key for understanding dynamics and evolution of the Earth. Subducting slabs transport water into the Earth's deep interior. There are many studies on the stability of hydrous phases under the deep mantle conditions, and several hydrous minerals such as phase D and superhydrous phase B have been reported to be stable to the top of the lower mantle. It has been reported that hydrous phase  $\delta$ -AlOOH is stable up to the bottom of the lower mantle (Ohtani et al., 2005; Sano et al., 2008). Tsuchiya (2013) theoretically predicted that Phase H, MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>, which is the iso-structure with  $\delta$ -AlOOH, is stable from 45 GPa to 55 GPa. This phase was experimentally confirmed at around 50 GPa (Nishi et al., 2014). Here, we present our recent results on synthesis experiments of hydrous phase H and a solid solution of phase H and phase  $\delta$  up to the base of the lower mantle along the normal mantle geotherm. The high pressure and high temperature in situ X-ray diffraction experiments were performed by using a double-sided laser heated diamond anvil cell at BL10XU, SPring-8. We observed that the stability field of this new candidate of water reservoir, hydrous phase H, under the lower mantle conditions up to 75 GPa and 2000 K in the MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system, although the previous studies claimed that phase H is broken down at pressures above 55 GPa. Thus, hydrous phase H is a host phase of water in the lower mantle at least up to the depth of 2000 km along both slab and normal mantle geotherms. Our experiments also revealed that the solid solution of phase H and phase  $\delta$ , AlOOH-MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>, containing 15 mol % of MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> can coexist with Mg-perovskite and/or Mg-post perovskite up to 135 GPa and 2000 K. If this hydrous phase contacts with the metallic outer core, hydrogen could be dissolved into the core by forming iron hydride, FeH (Terasaki et al., 2012).

キーワード: 水素, 含水H相, 含水デルタ相, MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>, AlOOH, 下部マントル  
Keywords: hydrogen, hydrous phase H, hydrous phase delta, MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>, AlOOH, lower mantle

## 上部マントル条件において水素が enstatite の相関係に与える影響 Influence of H<sub>2</sub> fluid on the stability of MgSiO<sub>3</sub> enstatite in the upper mantle condition

篠崎 彩子<sup>1\*</sup>; 鍵 裕<sup>1</sup>; 平井 寿子<sup>2</sup>; 大藤 弘明<sup>2</sup>; 岡田 卓<sup>3</sup>; 中野 智志<sup>4</sup>; 八木 健彦<sup>2</sup>  
SHINOZAKI, Ayako<sup>1\*</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>1</sup>; HIRAI, Hisako<sup>2</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>2</sup>; OKADA, Taku<sup>3</sup>; NAKANO, Satoshi<sup>4</sup>; YAGI, Takehiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 理学系研究科 地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 愛媛大学 GRC, <sup>3</sup> 東京大学 物性研究所, <sup>4</sup> 物質・材料研究機構  
<sup>1</sup>GRC, The university of Tokyo, <sup>2</sup>GRC, Ehime university, <sup>3</sup>ISSP, The university of Tokyo, <sup>4</sup>NIMS

C-O-H 流体はケイ酸塩鉱物の化学組成や融点に大きな影響を与えることから、地球深部でのメルトの生成や化学進化を明らかにする上で重要な物質である。還元的なマントル深部で C-O-H 流体は H<sub>2</sub>O だけでなく、H<sub>2</sub> として存在する可能性がある。本研究では、MgSiO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> 系において H<sub>2</sub> 流体がケイ酸塩鉱物の相関係に与える影響を明らかにすることを目的として、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高压実験を行った。出発物質には enstatite (MgSiO<sub>3</sub>) と水素を用いた。加熱、急後の試料の XRD, Raman 測定、回収試料の SEM, TEM を用いた組織観察から高温高压下で H<sub>2</sub> 流体と共存する相の検討を行った。

3.1-13.8 GPa, 1500-2000 K での加熱後の XRD から、enstatite が分解し forsterite と periclase、coesite および sthishovite が観察された。加熱後の Raman スペクトルから水素の分子振動が観察されたことから、この分解反応は水素が共存する条件下で起きたことを示している。enstatite のみの場合には、本研究の温度圧力条件での分解反応は観察されないことから、この反応は水素の影響により起こったと考えられる。回収試料中の coesite や sthishovite は、高温高压下で水素流体中に溶解した後、再結晶化した組織を示していた。一方で forsterite や periclase は元の enstatite の外形を保ったまま結晶化していることから、高温下で水素と共存する条件で結晶化したと考えられる。本研究の結果から、MgSiO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> 系では、水素流体に SiO<sub>2</sub> 成分が溶けて enstatite 相が分解し、periclase+ forsterite 相が生成する事が示された。

キーワード: エンスタタイト, 水素, 上部マントル, レーザー加熱 DAC  
Keywords: enstatite, H<sub>2</sub> fluid, upper mantle, laser heated diamond anvil cell



## 高温高压下における緑泥石の脱水分解反応境界とその状態方程式 Dehydration boundary and the EoS of chlorite under high pressure and temperature

末次 秀規<sup>1</sup>; 井上 徹<sup>1\*</sup>; 柿澤 翔<sup>1</sup>; 亀卦川 卓美<sup>2</sup>  
SUENAMI, Hideki<sup>1</sup>; INOUE, Toru<sup>1\*</sup>; KAKIZAWA, Sho<sup>1</sup>; KIKEGAWA, Takumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 高エネルギー加速器研究機構  
<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>High Energy Accelerator Research Organization

### 1. はじめに

スラブ中の様々な含水鉱物は沈み込みに伴い地球内部へと運搬され、各々の温度圧力条件で分解反応を生じる。含水鉱物が脱水分解反応することで発生する流体は島弧マグマの成因に影響し、また生成される含水相は水をより地球内部へと運搬すると考えられる。

含水ベリドタイト中の主要な含水鉱物の一つとして、蛇紋石 (serpentine;  $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ ) が挙げられる。この鉱物はマントル中の主要な元素で構成されており、これまで数多くの研究が報告されている。一方実際のマントル中には  $Al_2O_3$  成分がおおよそ 4 wt% 含まれており、蛇紋石の化学組成に Al を加えた緑泥石 (chlorite;  $(Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ ) の存在も重要であると考えられる。しかしながら、これまでの緑泥石単体の脱水分解反応境界は 5 GPa 以下でしか報告されておらず、それ以上の圧力では報告がない。さらに、緑泥石の状態方程式に関する過去の報告の多くは室温・高圧条件のもので、高温・高圧下での報告はわずかにしか存在しない。これらのことを踏まえ、本研究では X 線その場観察を用いて高温高压下における緑泥石の脱水分解反応境界とその状態方程式の決定を行った。

### 2. 実験方法

高温高压下における X 線その場観察実験は高エネルギー加速器研究機構、PF-AR、NE5C 設置の MAX80 を用いて行った。出発物質には天然の緑泥石を用い、反応実験では分解後の流体の放出を防ぐカプセル材として単結晶ダイヤモンドと金のキャップを使用した。緑泥石の分解反応境界は X 線その場観察時分割測定実験によって決定し、得られた回折線と回収試料の組織観察より生成相の同定を行った。状態方程式を求める実験 (P-V-T 実験) では同施設の高圧発生装置を用い、試料への差応力の影響を防ぐため試料は NaCl スリーブに封入した。

### 3. 結果 & 考察

緑泥石は 3 GPa 付近では 800 °C 付近まで安定に存在し、4 GPa 以上で脱水分解反応境界は負の  $dT/dP$  勾配となった。7 GPa 以下の圧力下ではフォルステライト、パイロプ、フルイドへの分解が確認された。一方 7 GPa 以上では Mg サーサイトと未知相に分解した。この反応境界は 450 °C 付近に位置し  $dT/dP=0$  となり、緑泥石の相平衡境界を超えた領域で確認できるカイネティック境界であると考えられる。これまでの相平衡実験では数十時間保持する実験が一般的であったが、本研究結果より 500 °C 以上の条件下では緑泥石は比較的短時間 (1 時間以内) で平衡状態となるがそれ以下の温度では極めて反応速度が遅くなると考えられる。今回の結果から緑泥石を伴う沈み込むスラブの挙動を考えると、暖かいスラブの場合緑泥石は無水鉱物の組み合わせへと分解するため、それ以深へと水を運搬することができない。しかし、7 GPa 付近で 500 °C 以下の冷たいスラブの場合、緑泥石は Mg サーサイトを含む鉱物組み合わせへと分解し、さらに地球深部へ水を運搬することが可能である。また更に高温高圧力領域では Mg サーサイトは Phase A を含む鉱物組み合わせへと分解することが報告されており、緑泥石は地球深部へと水を運搬する重要な鉱物の一つであると考えられる。発表では状態方程式の結果も報告する。

キーワード: 緑泥石, 含水相, 沈み込むスラブ, 脱水分解反応, 状態方程式, 放射光 X 線その場観察

Keywords: chlorite, hydrous phase, subducting slab, dehydration, equation of state, synchrotron X-ray in-situ experiment

## Composition and nature of melts, supercritical fluids and liquids formed by dehydration of subducted oceanic lithosphere Composition and nature of melts, supercritical fluids and liquids formed by dehydration of subducted oceanic lithosphere

ULMER, Peter<sup>1\*</sup>; SCHMIDT, Max W.<sup>1</sup>; PETTKE, Thomas<sup>2</sup>; LUGINBUEHL, Stefanie<sup>1</sup>  
ULMER, Peter<sup>1\*</sup>; SCHMIDT, Max W.<sup>1</sup>; PETTKE, Thomas<sup>2</sup>; LUGINBUEHL, Stefanie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, ETH Zurich, <sup>2</sup>Inst. Geol. Sciences, University of Bern

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, ETH Zurich, <sup>2</sup>Inst. Geol. Sciences, University of Bern

At crustal pressures, phase relations in natural rock-H<sub>2</sub>O systems involve low density aqueous fluids and/or high density hydrous melts. The wide miscibility gap between these two liquid phases leads to a dichotomy of mobile phases with quite distinct major element solubilities and trace element geochemical signatures. With increasing pressure, the fluid-melt miscibility gap closes until the crest of the miscibility gap intersects the fluid-saturated solidus, leaving a single supercritical liquid that has chemical and physical properties continuously evolving with temperature. The question is if the endpoint of the solidus is relevant for natural rock compositions. We have experimentally determined these endpoints in a variety of systems ranging from MOR basalt, to pelitic systems and to the simplified mantle systems MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (MSH) using different experimental techniques in the P-T range from 2.0 GPa/700 °C to 13.5 GPa/1300 °C. Supercriticality occurs over a wide range of P-T conditions ranging from 1 GPa/1100 °C for the SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to 12-13 GPa in the SiO<sub>2</sub>-poor part of the MSH system.

In the MORB system, major element compositions of the fluid/melt phase evolve from peralkaline, H<sub>2</sub>O-rich, granite-like compositions to metaluminous, andesitic to basaltic compositions with increasing temperature. The endpoint of the fluid-saturated solidus occurs around 5 GPa and 1000 °C; thus, the dichotomy of fluid versus melt ceases to exist in the oceanic crust. Similar conditions were determined for pelitic to greywacke systems representing deep-sea sediments. In the mantle-like system MSH critical endpoints for fluid/melt solvi along the solidus are located between 12 and 13.5 GPa at 1100 °C. Melt compositions buffered by olivine and opx remain enstatite - olivine normative below the critical endpoint; in contrast, fluids below the endpoint become progressively enriched in MgO and are silica undersaturated (Mg/Si ratios >2) at pressures exceeding 6 GPa. Supercritical liquids coexisting with forsterite and enstatite or dense hydrous silicates are strongly silica undersaturated. The P-T evolution of fluids and liquids in the MSH system allows drawing conclusions regarding the effects of Mg-Si metasomatism in the overlying mantle wedge of a subduction system.

The consequences of the various nature of hydrous mobile phases emanating from hydrated subducted oceanic lithosphere were investigated in the MORB system by determining trace element partitioning between cpx, gar, amphibole, epidote, rutile, titanite, staurolite and phengite and liquid, the latter either being an aqueous fluid, a hydrous melt, or a supercritical liquid. Hydrous melts and supercritical liquids have almost identical trace element pattern. Thus, recycling rates of these elements are not indicative of melting, and in the fast and steep circum-pacific subduction zones, they most likely testify for production of a mobile phase from the subducting crust in the supercritical liquid regime (i.e. at pressure in excess of 4-5 GPa).

Modeling of trace element signatures of fluids, melts and supercritical liquids generated in or passing through eclogitic crustal lithologies during their ascent into the overlying mantle wedge indicate that (1) the mode of fluid advection - porous flow or - focused fluid flow - produces rather contrasting trace element signatures and (2) the presence or absence of accessory phases such as epidote, staurolite, rutile/titanite controls to a large extent the concentrations of high field strength, light REE elements and Th, U. Thus, inversion of geochemical compositions of igneous products in arc settings used to constrain the nature and composition of metasomatizing agents released from the subducted oceanic lithosphere is not straightforward and it is unlikely that an unequivocal solution is obtained.

キーワード: hydrous fluid, supercritical liquid, trace element partitioning, fluid metasomatism, high pressure experiments, subducted oceanic lithosphere

Keywords: hydrous fluid, supercritical liquid, trace element partitioning, fluid metasomatism, high pressure experiments, subducted oceanic lithosphere

## 含水かんらん岩の断熱融解における微量元素の挙動：HAMMS1 モデル Trace element mass balance in hydrous adiabatic mantle melting: The HAMMS1 model

木村 純一<sup>1\*</sup>; 川畑 博<sup>2</sup>  
KIMURA, Jun-ichi<sup>1\*</sup>; KAWABATA, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 高知大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Kochi University

A numerical mass balance calculation model for the adiabatic melting of a hydrous metasomatized peridotite source was programmed in order to simulate trace element compositions of mid ocean ridge basalt, back arc basin basalt, ocean island basalt, and large igneous province basalt. The Excel spreadsheet-based calculator, Hydrous Adiabatic Mantle Melting Simulator ver.1 (HAMMS1) uses: (1) a thermodynamic adiabatic melting model of mantle peridotite; with (2) experimentally parameterized melting relationships in terms of pressure, temperature, water content, and degree of partial melting. The trace element composition of the model basalt is calculated from the accumulated incremental melts within adiabatic melting, with consideration of source mantle depletion. The mineralogic mode in the mantle in adiabat is calculated using experimental parameterization, and is incorporated into the program. Partition coefficients of the residual mantle minerals are from lattice strain model based parameterization tested by the latest compilations of experimental results. The parameters that control the trace element composition in the model are: (1) mantle potential temperature, (2) water content in the source mantle, (3) depth of termination of adiabatic melting, and (4) source mantle depletion. It is possible to obtain the above controlling parameters by using Monte Carlo fitting calculations and comparing the calculated basalt compositions with primary basalt compositions. Additionally, HAMMS1 compares those melting parameters with its major element model. HAMMS1 provides a unique estimate of the source conditions of basalt genesis using an incompatible trace element mass balance.

キーワード: かんらん岩, 水, 断熱融解, 微量元素, フォワードモデル  
Keywords: peridotite, water, adiabatic melting, trace element, forward model

## Very Large Intramolecular D-H Partitioning in Hydrated Silicate Melts Synthesized at Upper Mantle P and T

## Very Large Intramolecular D-H Partitioning in Hydrated Silicate Melts Synthesized at Upper Mantle P and T

CODY, George<sup>1\*</sup>; WANG, Ying<sup>1</sup>; CODY, Samantha<sup>1</sup>; FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>1</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>; LE LOSQ, Charles<sup>1</sup>  
CODY, George<sup>1\*</sup>; WANG, Ying<sup>1</sup>; CODY, Samantha<sup>1</sup>; FOUSTOUKOS, Dionysis<sup>1</sup>; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>; LE LOSQ, Charles<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

Hydrogen isotope fractionation during magmatic processes is key to understanding the deep Earth hydrological cycle and may place constraints on the origin of Earth's oceans. It is well established that the D/H content of water in hydrated nominally anhydrous mantle minerals is systematically lower ( $< -100$  ‰) than the standard mean ocean water (SMOW,  $D/H = 1.5576 \times 10^{-4}$ , defined as 0 ‰). Experiments have revealed significant hydrogen isotope partitioning between melts and fluids or vapors at magmatic temperatures. The origin of such fractionation, given the high temperatures of magmatic processes, is not likely due to classical isotope effects as described by bond energies via statistical mechanics.

It is well known that water has a very high affinity for silicate melts, it both dissolves in the melt as molecular water and hydrolyzes Si-O-Si linkages forming Si-OH. Whereas the molecular forms of water in melts are limited to H<sub>2</sub>O and OH, the variety of environments available for water to reside in the melt structure is surprising large. In order to study water in silicate melts one is restricted to molecular spectroscopy, e.g. Raman spectroscopy in the mid infrared regime, in windowed high pressure devices, e.g. the hydrothermal diamond anvil cell. Alternatively, one can study melts quenched to glass, where the structure of the glass corresponds to the structure of the melt at the glass transition temperature. The advantage of glasses is that one can use Solid State Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy. The hydrogen isotopes conveniently provide two stable nuclei with spin, <sup>1</sup>H (H) and <sup>2</sup>H (D), thus we can use D and H solid state NMR to analyze the nature of water in silicate melts quenched to glass. Given that glass transition temperatures for silicate melts are high (500-600 °C), one does not expect H and D to behave differently. D-NMR can, however, be useful in characterizing the molecular dynamics of water in various sites in the glass.

We studied hydrated (with D<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O) sodium tetrasilicate glasses, quenched from melts at 1400°C and 1.5 GPa, using <sup>1</sup>H, <sup>2</sup>H and <sup>29</sup>Si solid state NMR. Whereas D<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O depolymerize the silicate melt to similar degrees, as would be expected, we surprisingly find that protium (H) and deuterium (D) intramolecular partitioning between different molecular sites within the glasses is very large and controlled by a strong preferential association of deuterons to sites with short O-D-O distances. This preference is independent of total water content and D/H ratio. Substantial intramolecular D-H partitioning is also observed in a glass with a model hydrous basalt composition. Such large isotope partitioning cannot result from classic fractionation effects because of the high synthesis temperatures. Potential kinetic isotope effects are excluded via a slow quench experiment. The partitioning is likely governed by density/molar volume isotope effects, where deuterium prefers sites with smaller molar volume. Large intramolecular site partitioning in melts could lead to significant D-H partitioning between water saturated melt and exsolved aqueous fluid (where  $D/H_{W,Melt} \neq D/H_{W,Fluid}$ ) during crystallization of Earth's magma ocean, potentially controlling the D/H content of the Earth's oceans.

キーワード: Silicate Melt, D-H fractionation, NMR, Magma Ocean

Keywords: Silicate Melt, D-H fractionation, NMR, Magma Ocean



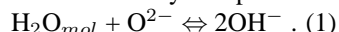
## Chemical dependence of the speciation and structural position of water in silicate melts Chemical dependence of the speciation and structural position of water in silicate melts

LE LOSQ, Charles<sup>1\*</sup> ; CODY, George<sup>1</sup> ; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>  
LE LOSQ, Charles<sup>1\*</sup> ; CODY, George<sup>1</sup> ; MYSEN, Bjorn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington  
<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

Water is the main volatile component affecting the thermodynamic, structural and rheological properties of magmatic liquids in the Earth's interior resulting in major influence on past history and present magmatic activity of the Earth. Previous experiments and modelling have shown that water can be dissolved as H<sub>2</sub>O molecules (H<sub>2</sub>O<sub>mol</sub>) and OH<sup>-</sup> groups, with the OH<sup>-</sup> groups bonded to the silicate network to form Si-OH or Al-OH bonds and perhaps alkali-OH and alkaline earth-OH complexes. However, important questions remain as to how bulk chemistry governs the link between the different OH groups and the silicate network, and the global H<sub>2</sub>O<sub>mol</sub>/OH ratio.

It is now widely accepted that dissolved water reacts with the O<sup>2-</sup> oxygen composing the silicate network following:



As O<sup>2-</sup> from the silicate network is involved in this reaction, its equilibrium constant must depend on the activities of bridging (BO), non-bridging (NBO), and free oxygen species potentially present in silicate melts, and hence on their global chemistry. Even if Al-OH and Si-OH bonding were the only variables (and, therefore, the Al/Si ratio of a melt), reaction (1) implies that the H<sub>2</sub>O<sub>mol</sub>/OH should depend on silicate melt composition. However, as the activity of NBO species is also affected by the ionic field strength of alkali and alkaline earth cations, we expect the equilibrium of reaction (1) to be affected by those cations.

To test and to quantify the occurrence and the impact of chemical effects on the speciation of water in quenched, hydrous silicate melt (glass), we analysed M<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>9</sub> glasses (M = Li, Na or K) containing different amounts of water (from 3.3 up to 17.6 mol%) with the help of <sup>1</sup>H and <sup>29</sup>Si MAS NRM, Raman and Infrared spectroscopy. Glasses were formed by temperature quenching (~100 °C/s) at 1.5 GPa. Raman and infrared spectroscopy show three different bands close to 2300, 2800 and 3600 cm<sup>-1</sup>. These are assigned to O-H stretching from OH groups bonded to silicate components and from H<sub>2</sub>O molecules. Correlation of those frequencies with the O...O distances in minerals suggests that those three bands arise from OH stretching in two main different environments: one with a mean O...O distance close to ~0.26 nm and another one with a ~0.29 nm O...O distance. In the <sup>1</sup>H MAS NMR spectra, we retrieved signals near 15 and 5 ppm arising from the ~0.26 and ~0.29 nm environments respectively. Increasing the alkali radius tends to increase the intensities of the 15 ppm <sup>1</sup>H MAS NMR peak and of the 2000-2900 cm<sup>-1</sup> Raman region, indicating an increase of the population of OH groups in the ~0.26 nm environment. In addition, the higher the alkali radius the higher the effect of water on the polymerization degree is, as testified by changes of the <sup>29</sup>Si NMR and Raman signals.

Those NMR and Raman observations suggest that the H<sub>2</sub>O<sub>mol</sub>/OH ratio in quenched hydrous silicate melts decreases in the order Li, Na, K. The greater the radius of alkali, the higher the proportion of OH<sup>-</sup> the smaller the mean O...O distance in their environment, and hence the more extensive hydrogen bonding. We propose that this structural evolution arises from a combination of steric hindrance and electron distribution around alkali elements that affects both equilibrium reaction (1), which will decrease in the order K > Na > Li, and the local environment of the formed OH<sup>-</sup> groups. This interplay between the nature of the alkali modifier, the speciation of water and the polymerization of the silicate network must result in non-negligible differences in viscosity of Li, Na and K silicate melts. Therefore, following this study, variation of the concentration of alkali and alkaline-earth elements in natural hydrous magmas, following their origin, will result in changes of their rheological properties, not only because of the different effects of alkali/alkaline earth elements on Si-O bonds, but also because of differences in the water speciation and OH<sup>-</sup> environments.

キーワード: water, silicate glass, Raman spectroscopy, NMR spectroscopy

Keywords: water, silicate glass, Raman spectroscopy, NMR spectroscopy

## 塩水による島弧下マントルへのイオン半径の大きな親石元素の移動 Large ion lithophile elements delivered by saline fluids to sub-arc mantle

川本 竜彦<sup>1\*</sup>; 三部 賢治<sup>2</sup>

KAWAMOTO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>; MIBE, Kenji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大、理・地球熱学, <sup>2</sup> 東京大、地震研

<sup>1</sup>Inst Geotherm Sci, Grad School Sci, Kyoto Univ, <sup>2</sup>Earth Research Institute, Univ of Tokyo

Geochemical signatures of arc basalts are explained by addition of aqueous fluids, melts, and/or supercritical fluids from subducting slab to sub-arc mantle. Partitioning of large ion lithophile elements between aqueous fluids and melts is crucial as these two liquid phases are present in the sub-arc pressure-temperature conditions. Using synchrotron x-ray beams, in-situ x-ray fluorescence (XRF) spectra are obtained from aqueous fluids and silicate melts at high-temperature and high-pressure conditions under varied concentrations of (Na, K)Cl (0-25 wt.%). There is a positive correlation between partition coefficients and pressure, as well as partition coefficients and salinity. In the systems with 13-25 wt.% (Na, K)Cl, partition coefficients of Rb, Cs, and Pb are greater than unity, indicating the capacity of such highly saline fluids to effectively transfer those elements. Enrichment of large ion lithophile elements in arc basalts relative to mid oceanic ridge basalts has been attributed to the mantle source fertilization by aqueous fluids from dehydrating oceanic plate. Such aqueous fluids are likely to contain Cl, although their amount remains to be quantified.

キーワード: 沈み込み帯, マグマ, 高温度高圧力, マントルウェッジ, 放射光 X 線, 塩素

Keywords: subduction zone, magma, high temperature and high pressure, mantle wedge, synchrotron X-ray, chlorine

In-situ characterization of carbon-speciation in silicate-C-O-H fluid and melt with temperature, pressure, and redox con  
In-situ characterization of carbon-speciation in silicate-C-O-H fluid and melt with temperature, pressure, and redox con

MYSEN, Bjorn<sup>1\*</sup>  
MYSEN, Bjorn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, CIW, USA  
<sup>1</sup>Geophysical Laboratory, CIW, USA

Speciation and partitioning of C-bearing volatiles species in and between silicate-saturated C-O-H fluids and (C-O-H)-saturated melts have been determined in-situ with the samples to pressures and temperatures of ~2GPa and 900°C, respectively. Structural characterization was conducted with vibrational spectroscopy of samples contained in externally-heated, hydrothermal diamond anvil cells. The redox conditions were controlled near that of the Fe+H<sub>2</sub>O=FeO+H<sub>2</sub> (reducing, RED) and Ni+H<sub>2</sub>O=NiO+H<sub>2</sub> (oxidizing, OX) equilibria, respectively. Melts are, therefore saturated in H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, and C-bearing species (redox dependent) and coexisting fluids saturated in silicate components. Solubility of volatile and silicate components depend on both temperature and pressure.

The melt/fluid partition coefficients of the C-bearing species vary with redox conditions and temperature with the  $\Delta H_{RED}^{melt/fluid} = 44(7)$  kJ/mol and  $\Delta H_{OX}^{melt/fluid} = -70(32)$  kJ/mol. Pressure is a dependent variable and increases with increasing temperature. It is assumed no pressure effect of the partition coefficients.

The solution equilibria under reducing and oxidizing conditions, respectively, were; (1)  $2CH_3^- + H_2O + Q^{n+1} = 2CH_4 + Q^n$  and (2)  $2CO_3^{2-} + H_2O + 2Q^{n+1} = HCO_3^- + 2Q^n$ , where the superscript, n, in the Q-species denotes number of bridging oxygen in the silicate species (Q-species). In the absence of H<sub>2</sub>O equilibrium (1) changes to  $CH_3^- + Q^n = CH_4 + Q^{n+1}$ . For oxidized carbon, there is an analogous expression expressing equilibrium between molecular CO<sub>2</sub> and structurally bound CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-groups. Under both oxidizing and reducing conditions, the abundance ratios, CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub><sup>-</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> increase with temperature. The enthalpy change associated with the species transformation does, however, differ for fluids and melts and also for oxidized and reduced carbon ( $\Delta H_{(1)}^{fluid} = -16(5)$  kJ/mol,  $\Delta H_{(1)}^{melt} = -49(5)$  kJ/mol,  $\Delta H_{(2)}^{fluid} = 81(14)$  kJ/mol). For the exchange equilibrium of CH<sub>4</sub> and CH<sub>3</sub><sup>-</sup> species, the temperature-dependent equilibrium constant yields  $\Delta H = 34(3)$  kJ/mol.

Reactions (1) and (2) involve changes in silicate polymerization where increasing abundance ratios, CH<sub>4</sub>/CH<sub>3</sub><sup>-</sup> and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> lead to increased silicate melt polymerization. As a result of the relations between speciation of C-bearing species and melt and fluid structure, stable isotope (C and H) and element partition coefficients between melts and fluids, which depend on and silicate polymerization and silicate speciation, also vary with speciation of C-bearing species in silicate-C-O-H systems. Pressure, temperature, and redox control on the C-speciation also govern those (and other) properties.

キーワード: COH volatiles, fluid structure, melt structure, high pressure, high temperature, redox conditions  
Keywords: COH volatiles, fluid structure, melt structure, high pressure, high temperature, redox conditions

Effect of CO<sub>2</sub> content on melting phase relations in kimberlite group I at 6.5 GPa and 1200-1600°C  
Effect of CO<sub>2</sub> content on melting phase relations in kimberlite group I at 6.5 GPa and 1200-1600°C

SHATSKIY, Anton<sup>1</sup> ; LITASOV, Konstantin<sup>1\*</sup> ; SHARYGIN, Igor<sup>1</sup> ; OHTANI, Eiji<sup>2</sup>  
SHATSKIY, Anton<sup>1</sup> ; LITASOV, Konstantin<sup>1\*</sup> ; SHARYGIN, Igor<sup>1</sup> ; OHTANI, Eiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Material Science, Graduate School of Science, Tohoku University

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Material Science, Graduate School of Science, Tohoku University

Our understanding of kimberlite petrogenesis is significantly hampered by uncertainty about the compositions of kimberlite magma. It is generally accepted that the last equilibration of kimberlite magma with surrounding mantle (garnet lherzolite) occurred beneath cratons at 6-7 GPa prior its rapid ascent (about 70 km/h) to the surface. This conclusion is based on the following facts. The deepest (170-220 km depths) and hottest (1200-1500°C) xenoliths entrapped by kimberlites are sheared garnet lherzolites originating from the lower part of lithospheric mantle. The preservation of deformation features in sheared lherzolites indicates that the rock was undergoing dynamic recrystallization just before it was picked up by the magma and that it reached the surface after less than a few days or even hours in magma rising by crack propagation (Green and Gueguen, 1983; Meyer, 1985; Sparks et al., 2006). Based on our recent study (Sharygin et al., 2013) of melting phase relations in an exceptionally fresh kimberlite group I from Udachnaya-East kimberlite (UEK) pipe at 3.0-6.5 GPa and 900-1500°C, the kimberlite melt had essentially Na-K-Ca carbonatite composition <15 wt.% SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O = 5-18 wt%, Na/K = 2, Cl >1.5 wt%, and Ca/(Ca+Mg) >0.5. However, the mineral assemblages obtained in these experiments differ from known mantle parageneses. This may be due to unaccounted CO<sub>2</sub> budget missed at shallow depth as a result of decarbonation reactions at 1.5-2.5 GPa. Therefore, in present study we examined the effect of additional CO<sub>2</sub> on melting phase relations in synthetic UEK kimberlite system at 6.5 GPa and 1200-1600°C.

Based on obtained results mineral assemblage equilibrated with kimberlite partial melt gradually changes from peridotite to eclogite paragenesis with increasing its CO<sub>2</sub> content from 13 to 35 mol %. As can be seen at 6.5 GPa kimberlite partial melt (i.e. Na-K-Ca carbonatite melt) becomes equilibrium with garnet lherzolite (i.e. olivine + enstatite + diopside + garnet + FeS + ilmenite assembly) at 1500°C and 23 mol % (20 wt%) CO<sub>2</sub>. This value is 10 mol% more than natural abundance of CO<sub>2</sub> in the Udachnaya-East kimberlite rock (group I kimberlite). In other words, the kimberlite magma lost almost half of the CO<sub>2</sub> budget during the eruption.

**We greatly thank the Global Center-of-Excellence program at Tohoku University (Sendai, Japan) for the technical and financial support of this study.**

Figure. Melting phase relations in Udachnaya-East kimberlite (kimberlite group I) versus temperature and CO<sub>2</sub> content at 6.5 GPa. 13 mol % CO<sub>2</sub> corresponds to the natural abundance of CO<sub>2</sub> in UEK rock.

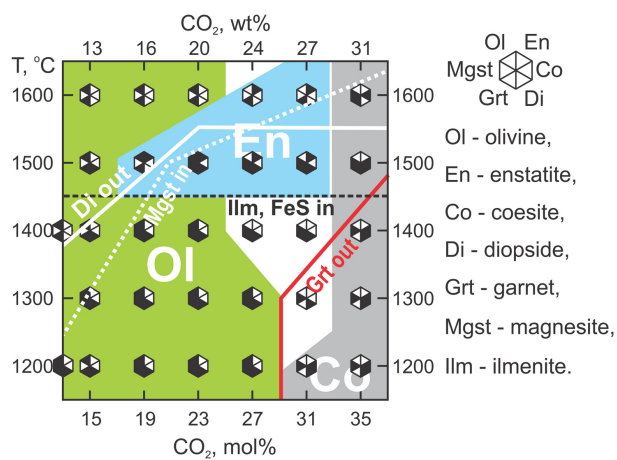
キーワード: kimberlite, carbonatite, carbon dioxide, high-pressure experiment, Earth's mantle, melting  
Keywords: kimberlite, carbonatite, carbon dioxide, high-pressure experiment, Earth's mantle, melting



SMP06-10

会場:411

時間:4月28日17:00-17:15



## Carbon dioxide in granitic magma under lower crustal conditions Carbon dioxide in granitic magma under lower crustal conditions

吉村 俊平<sup>1\*</sup>; 中村 美千彦<sup>2</sup>; 坂本 尚義<sup>3</sup>  
YOSHIMURA, Shumpei<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>2</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山形大学理学部地球環境学科, <sup>2</sup>東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学講座, <sup>3</sup>北海道大学理学研究院自然史科学部門

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Yamagata University, <sup>2</sup>Department of Earth Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

### <Introduction>

Carbon dioxide is a major volatile component in the crust and mantle. Its solubility and speciation in silicate melts are important in understanding of mechanisms of magmatism and volcanism. However, they are not well constrained under lower-crustal conditions, especially in granitic magma, which is common in the crustal magmatism. In this study, we carried out equilibrium experiments in the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-granitic melt system to investigate the solubility and speciation of CO<sub>2</sub>.

### <Experimental procedure>

High-PT experiments were performed using a piston cylinder apparatus and a cold-seal pressure vessel. Obsidian flakes of a granitic composition and oxalic acid dehydrate (fluid source) were put in a gold or platinum capsule and run at 1123 and 1473 K and 0.1-1.5 GPa. Oxygen fugacity was estimated to be close to NNO. After quench, volatiles dissolved in the glass were analysed with FTIR spectroscopy. The composition of the coexisting fluid was quantified either by manometric analysis or based on the low-pressure solubility law and volatile contents of the glass.

### <Results>

FTIR spectra showed that both CO<sub>2</sub> molecules (CO<sub>2mol</sub>) and carbonate anions (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) were present in all of the glass samples. The concentrations of CO<sub>2mol</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> and total H<sub>2</sub>O increased generally with increasing pressure; they were 9200 ppm, 2100 ppm and 6.1 wt%, respectively, at 1.5 GPa and 1473 K. Here, we used new molar absorption coefficients of 2350 cm<sup>-1</sup> (1192 ± 130 L cm<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>; CO<sub>2mol</sub>) and 1410 cm<sup>-1</sup> (91 ± 28 L cm<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) determined in this study. The fraction of CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> to total CO<sub>2</sub> in the granitic melt increased with increasing total CO<sub>2</sub> content, from 0.09 (total CO<sub>2</sub> = 260 ppm) to 0.19 (11300 ppm). The molar fractions of CO<sub>2</sub> in the fluids (X<sub>CO<sub>2</sub><sup>fluid</sup></sub>) were 0.25-0.48 for the cold-seal experiments and 0.73-0.79 for the piston cylinder experiments.

### <Discussion>

We formulated the solubility law of CO<sub>2mol</sub> based on a vapour-liquid equilibrium equation. On the basis of the reaction CO<sub>2</sub> (vapour) ⇌ CO<sub>2mol</sub> (melt), we calculated the partial molar volume of CO<sub>2mol</sub> in the granitic melt and the reaction enthalpy to be 24.9 ± 2.0 cm<sup>3</sup>/mol and -22.2 ± 6.3 kJ/mol, respectively. These values are similar to those in previous experiments carried out at <6.6 kbar (Fogel and Rutherford, 1989; Behrens et al., 2004), indicating that the low-pressure solubility law can be extrapolated to 1.5 GPa. As for the formation of CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, we assumed a reaction CO<sub>2mol</sub> + O<sup>2-</sup> (non-bridging oxygen) ⇌ CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Possible factors shifting the equilibrium to the right-hand side include the total pressure (e.g., Fine and Stolper, 1985; Guillot and Sator, 2011) and water content (King and Holloway, 1992; Behrens et al., 2004). In this study, it was difficult to evaluate these parameters separately, since the water content increased simultaneously with total pressure. If we assume that the effect of water is small enough to be neglected, the change of the partial molar volume of CO<sub>2</sub> in the melt and the reaction enthalpy can be calculated to be -8.6 ± 6.0 cm<sup>3</sup>/mol and -0.4 ± 3.1 kJ/mol, respectively.

### <Application>

Recently, unusually CO<sub>2</sub>-rich rhyolitic melt inclusions (up to 1.7 wt% total CO<sub>2</sub>) were reported by Blundy et al. (2010). The saturation pressure of this CO<sub>2</sub> content is estimated to be 1.4 GPa when CO<sub>2</sub> dissolved only as CO<sub>2mol</sub> (X<sub>CO<sub>2</sub><sup>fluid</sup></sub> = 1; T=1173 K). If we consider the formation of CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, the saturation pressure is estimated to 1.2 GPa.

キーワード: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, solubility, granitic melt  
Keywords: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, solubility, granitic melt

## Hydrogen positions in hydrous ringwoodite determined by pulsed neutron powder diffraction

PUREVJAV, Narangoo<sup>1\*</sup>; OKUCHI, Takuo<sup>1</sup>; TOMIOKA, Naotaka<sup>1</sup>; ABE, Jun<sup>2</sup>; HARJO, Stefanus<sup>3</sup>; AIZAWA, Kazuya<sup>3</sup>  
PUREVJAV, Narangoo<sup>1\*</sup>; OKUCHI, Takuo<sup>1</sup>; TOMIOKA, Naotaka<sup>1</sup>; ABE, Jun<sup>2</sup>; HARJO, Stefanus<sup>3</sup>; AIZAWA, Kazuya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, <sup>2</sup>CROSS-Tokai, <sup>3</sup>J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, <sup>2</sup>CROSS-Tokai, <sup>3</sup>J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

The transition zone in the Earth's mantle has been considered potentially large water reservoir. It was experimentally evidenced that its main constituent minerals can uptake significant amount of water as hydroxyl groups in their crystal structures. The ringwoodite [ $(\gamma\text{-Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ] is one of the high pressure polymorph of olivine, which is the most major phase in the lower part of the transition zone, between 525 to 660 km in depth. It was reported that ringwoodite can incorporate up to 2.6 wt.% of water (Kohlstedt et al., 1996). The hydration of ringwoodite strongly affects its physical and chemical properties such as electrical conductivity, compressibility and seismic velocities. However, crystallographic sites of hydrogen and its incorporation mechanism are still unclear mainly due to insensitiveness of X-ray probe for hydrogen. The previous studies of its structure refinement by X-ray diffraction demonstrated that hydrous ringwoodite has cubic spinel structure with  $Fd\text{-}3m$  space group (Kudoh et al., 2000; Smyth et al., 2003). Here we applied neutron diffraction for hydrous ringwoodite for the first time to analyze its hydrogen positions.

Deuterated ringwoodite powder samples were synthesized at 1300 °C and 18 GPa for 5 minutes using a scaled-up Kawai-type multi anvil apparatus. The run products were evaluated by micro-focused X-ray, Raman spectroscopy and powder X-ray diffractometer to confirm their purity.

Neutron powder diffraction patterns were taken at BL-19 (TAKUMI) at Materials and Life Science Experimental Facility, J-PARC. The two representative deuterated ringwoodite samples were with identical composition mixed and measured together in a sample holder made of TiZr "null" alloy. The obtained diffraction pattern has been analyzed by Rietveld refinement using the "Z-Rietveld" code in order to determine positions and site occupancies of deuterium atoms in the ringwoodite structure.

We can propose two possible models for the deuterium atomic positions, 96g and 192i. These refined models were given with almost identical R factors. They also gave similar site occupancies and temperature factors for the elements except for the deuterium. However, in terms of deuterium temperature factor, the 192i model is more preferable than the 96g model. The refinement results also showed that the (Mg+Fe)/Si ratio is lower than the ideal ratio of dry ringwoodite [(Mg+Fe)/Si = 2.0] while Si in T sites are fully occupied, which demonstrates that deuterium only substitutes Mg and Fe in M sites and Si in T sites is not affected.

### References:

- [1] Kohlstedt, et al., Contrib. Mineral. Petrol., 123, 345, 1996.
- [2] Kudoh, et al., Phys.Chem.Minerals., 27, 474, 2000.
- [3] Smyth, et al., Am Mineral., 88, 1402, 2003.

キーワード: ringwoodite, neutron diffraction, Rietveld refinement

Keywords: ringwoodite, neutron diffraction, Rietveld refinement

## Stability of Hydrous phase H MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> in the lower mantle Stability of Hydrous phase H MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub> in the lower mantle

天池 洋平<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 坂巻 竜也<sup>1</sup>; 高橋 豪<sup>1</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>  
AMAIKE, Yohei<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Suguru<sup>1</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>  
; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター (財)

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Subducting slabs transport water to Earth's deep interior and its circulation on a global scale is the key to understanding the evolution of the planet. However, it is still a matter of debate how deep water can be transported. Therefore, there are many studies on phase relationships in hydrous minerals or MORB-H<sub>2</sub>O systems. Most dense hydrous magnesium silicates (DHMS) are stable up to 50 GPa (e.g., Komabayashi et al., 2004). Recently, the synthesis of Mg- and Si-bearing  $\delta$ -AlOOH, which is a solid solution between 2AlOOH-MgSiO<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>, was reported and it might be transported with Mg-perovskite or Mg-post perovskite up to 135 GPa (Ohira et al., 2012, AGU). Tsuchiya (2013) theoretically reported Phase H, the end member of the system, was stable above 45 GPa and up to 55 GPa. And also it was experimentally synthesized at 50 GPa (Nishi et al., 2014). Although the previous studies claimed that Phase H was broken down above 55 GPa, it may be a host phase of water in the deep Earth interior. Here, we report the stability field of a new candidate phase of water reservoir at the lower mantle conditions by investigating the MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system up to 75 GPa and 2000 K.

A mixture of quartz and brucite (molar ratio 1 : 1) powders were used as starting materials. The high pressure and high temperature experiments were performed by using a double-sided Laser heated diamond anvil cell. A pellet with thickness of about 15  $\mu$  m was made by a cold compression technique. In situ XRD experiments in the MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system were performed at BL10XU, SPring-8. In this study we confirmed that hydrous phase H does exist in the MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system and its stability fields expands at least up to 75 GPa and above 2000 K in contrary with previous reports (Tsuchiya, 2013; Nishi et al., 2014).

If Phase H exists under high pressure conditions corresponding to the pressure of CMB, it may transport water to CMB and thus the core may contain hydrogen as a light element.

キーワード: hydrous phase, lower mantle, subduction

Keywords: hydrous phase, hydrous phase, subduction



Partitioning of carbon between metallic- and silicate-liquids in carbonaceous chondrite compositions at high pressure  
Partitioning of carbon between metallic- and silicate-liquids in carbonaceous chondrite compositions at high pressure

朝原 友紀<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>  
ASAHARA, Yuki<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学  
<sup>1</sup>Tohoku University

Major volatile elements in the terrestrial planets are oxygen, sulfur, carbon, hydrogen, and nitrogen. They are also candidates for light components in the earth's core which were incorporated into the core at terrestrial magma ocean stage. Partitioning behavior of carbon has not been determined well though it is one of the strong candidates for light elements in the earth's core. We investigated partitioning of carbon with sulfur and oxygen between metallic- and silicate liquids at 6 GPa and 2073 K in carbonaceous chondrite composition (Allende meteorite; CV3). Effect of nitrogen and water as accessory components were also examined. High pressure experiments were conducted with multi-anvil high pressure apparatus. Graphite was used as capsule material. Composition of coexisting metallic- and silicate liquids were measured by electron microprobe with wavelength dispersion type spectrometer except for carbon in silicate liquid. Carbon concentration of bulk recovered sample was measured by elemental analyzer. Then, carbon concentration in silicate liquid was obtained by subtraction of carbon amounts in metallic phase which obtained by electron microprobe and SEM image analyses. Present result suggests that in oxidized carbonaceous chondrite composition, partitioning coefficient of carbon [ $D^{Metallicliquid/Silicateliquid} = C^{Metallicliquid}/C^{Silicateliquid}$ ;  $C$  is concentration of carbon in wt.%] is close to 1, and it may increase with increasing the  $Fe^{metal}/Fe^{oxide}$  ratio in the carbonaceous chondrite composition.

## Microanalysis of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in silicate melt using laser Raman spectroscopy Microanalysis of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in silicate melt using laser Raman spectroscopy

吉村 俊平<sup>1\*</sup>; 加々島 慎一<sup>1</sup>; 中島 和夫<sup>1</sup>

YOSHIMURA, Shumpei<sup>1\*</sup>; KAGASHIMA, Shin-ichi<sup>1</sup>; NAKASHIMA, Kazuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 山形大学理学部地球環境学科

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Yamagata University

### <Introduction>

Water and carbon dioxide are the major volatile components in the crust and mantle. Development of microanalytical techniques of these volatiles has made it possible to investigate mechanisms of igneous and volcanic processes. FTIR has been used as a fundamental tool for this purpose, but its spatial resolution is too large (~30 μm) to analyse small melt inclusions and micro-scale volatile distribution within a high-pressure experimental sample. In this study, we developed a new technique for volatile analysis in silicate glasses with ~1 μm spatial resolution using laser Raman spectroscopy.

### <Experimental and analytical procedure>

Standard glasses were synthesized by using a piston-cylinder apparatus in M. Nakamura's laboratory. Basaltic glass powder was loaded into a platinum-sleeved nickel capsule together with oxalic acid and run at 1473 K and 0.5-1.2 GPa. After quench, the H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> (dissolved as CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) contents of the glasses were measured by using FTIR. The same glasses were then analysed with a Thermofisher DXR laser-Raman spectrometer. Wave length, power and diameter of the laser beam were 532 nm, 10 mw and 0.7 μm, respectively. We normalized the Raman spectra by the intensity of a peak at 500 cm<sup>-1</sup> (T-O-T bond) and subtracted the spectrum of the volatile-free glass. The intensities of peaks at 3550 cm<sup>-1</sup> (H<sub>2</sub>O) and 1080 cm<sup>-1</sup> (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) in the resulting spectra were compared with the H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents determined by FTIR spectroscopy.

### <Results>

The H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents were determined to be 0.7-2.1 wt% and 0.05-0.82 wt%, respectively. Raman spectroscopy showed that the intensities of peaks at 3550 and 1080 cm<sup>-1</sup> increased with increasing H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents, respectively. We fitted a linear equation to the data and obtained H<sub>2</sub>O (wt%) = (3.58±0.14)×I<sub>3550</sub> and CO<sub>2</sub>(wt%) = (4.61±0.21)×I<sub>1080</sub>.

### <Application>

We applied this technique to volatile analysis of an experimentally-produced bubble-bearing basaltic glass. In the experiment, basaltic melt was first equilibrated with H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> mixture fluid at 1473 K and 1 GPa, and then decompressed to 0.5 GPa and kept for 10 minutes. After quench, the H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> contents around bubbles were measured along the radial direction at 2-μm intervals for a total of 50 μm. The CO<sub>2</sub> contents decreased on moving towards the bubble, indicating that CO<sub>2</sub> was diffusing into the bubble. Fitting the diffusion equation to this profile, we estimated the diffusivity of CO<sub>2</sub> to be 1.2×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s. This value is consistent with that reported by Zhang et al. (2007). In contrast to CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O showed a flat profile, suggesting that H<sub>2</sub>O was already equilibrated with the fluid in the bubble. This is because the diffusivity of H<sub>2</sub>O is one order of magnitude greater than that of CO<sub>2</sub>. Such a diffusive fractionation was observed also in rhyolitic melt (Yoshimura and Nakamura, 2010).

キーワード: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, glass, Raman

Keywords: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, glass, Raman

## 地球内部の炭素含有鉱物相の循環過程 Dynamic and cyclic process of carbon-bearing phases of the terrestrial interior

三浦 保範<sup>1\*</sup>  
MIURA, Yasunori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国内外大学  
<sup>1</sup>In & Out Universities

本研究は次のようにまとめられる。

- 1) 地球内部の炭素含有鉱物相は、物質状態の動的変化（気体、液体、固体）を活動的な地球惑星上で解明するために議論する。
- 2) 本研究で用いた試料は、ダイヤモンド（コンゴ、アフリカ）、石灰岩（秋吉等、日本）、カーボナタイト（レンガイ-タンザニア-アフリカ、ヨーロッパ、北米）とシンガイト（シュンガ、ロシア）そして炭酸塩粒子を有するリビアガラス（アフリカ）などで、それらをFE分析型SEMなどで炭素含有物質のマイクロ状ナノ結晶粒等を観察している。
- 3) 本件の研究データでは、マイクロ炭素含有粒子が容易に三状態の物質相変化し、地表から内部における高圧衝撃波現象（地震、火山と衝突）で固化したガラス相等の存在を示す。
- 4) 局地的な炭素を含む流体相を含む堆積が、不規則表面および動的な地球の内部に分布するのは、原始地球の地球外衝突の動的プロセスにより物質状態を変化し、さらに進化した地球の海底衝突で固化した混合物が地球内部の動的な混合形成したことによります。
- 5) 創成期の衝突過程で形成された不均質な地表面と内部は、マクロ生命活動を安定的な動的な炭素を含む三物質状態（空気、液体や固体）を生成し、その後継続的地表や内部の変化過程で複雑で局地的な分布を示している。

キーワード: 炭素, 地球内部, 循環過程, 衝撃波現象, 不規則分布, 局部形成

Keywords: carbon, interior, cyclic process, shock wave event, irregular distribution, local deposit

## Placing time constraints on a P-T-D evolution: insights from Lu-Hf garnet and U-Th-Pb monazite dating

### Placing time constraints on a P-T-D evolution: insights from Lu-Hf garnet and U-Th-Pb monazite dating

SKRZYPEK, Etienne<sup>1\*</sup>; SZCZEPANSKI, Jacek<sup>2</sup>; ANCZKIEWICZ, Robert<sup>3</sup>; STIPSKA, Pavla<sup>4</sup>; KRONER, Alfred<sup>5</sup>  
SKRZYPEK, Etienne<sup>1\*</sup>; SZCZEPANSKI, Jacek<sup>2</sup>; ANCZKIEWICZ, Robert<sup>3</sup>; STIPSKA, Pavla<sup>4</sup>; KRONER, Alfred<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>University of Wroclaw, <sup>3</sup>Polish Academy of Sciences, Krakow, <sup>4</sup>Universite de Strasbourg, <sup>5</sup>Universitat Mainz

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>University of Wroclaw, <sup>3</sup>Polish Academy of Sciences, Krakow, <sup>4</sup>Universite de Strasbourg, <sup>5</sup>Universitat Mainz

The best approach for understanding the tectono-thermal evolution of a crustal level is through reconstructing its pressure-temperature-deformation-time (*P-T-D-t*) evolution. Whereas *P-T-D* paths can be inferred from crystallization-deformation relationships, placing absolute time constraints on such paths remains challenging, especially because a link between major element-bearing index minerals and trace element-bearing geochronometers needs to be established.

We present the example of medium-grade metasedimentary rocks (Orlica-Snieznik Dome, European Variscan Belt) for which results of Lu-Hf garnet and U-Th-Pb monazite dating are linked with prograde and retrograde stages of the *P-T-D* evolution, respectively. On the macroscopic scale, a succession of three metamorphic foliations is recognized: initial subhorizontal S1, intermediate subvertical S2, and late subhorizontal S3. A garnet±staurolite assemblage is ascribed to the S1 foliation, whereas the S2 fabric is associated with staurolite demise producing a garnet-biotite-sillimanite/andalusite assemblage. Post-S2 garnet and cordierite blastesis is followed by chlorite growth during and after the formation of the S3 foliation. Garnet porphyroblasts show a peculiar zoning pattern with a linear Mn-Ca decrease in the allanite-bearing core, an inner rim of alternating Ca-Y- and P-rich annuli, and a Ca-poor outer rim. Monazite is found as subhedral aggregates at garnet rim, and lone matrix grains close to partially resorbed garnet, staurolite or apatite. Textural observations and modelling of the garnet composition suggest that the inner rim with Ca-Y-rich annuli reflects the allanite-to-monazite transition which occurred close to the staurolite isograd. In this inner rim, a Lu oscillatory zoning pattern coincides with the zone of Ca-Y-rich annuli. Since the inner rim dominates the Lu budget of garnet, the associated Lu-Hf garnet-whole-rock isochron age of  $344 \pm 3$  Ma is ascribed to *P-T* conditions of the staurolite isograd, i.e.  $\sim 5$  kbar/575 °C in the S1 fabric. A subsequent temperature increase to peak conditions of  $\sim 5$  kbar/580-625 °C in the S2 fabric is indicated by the Ca-poor garnet outer rim that reflects staurolite breakdown. LA-ICP-MS monazite dating yields <sup>208</sup>Pb/<sup>232</sup>Th ages defining a dominant group at  $313 \pm 2$  Ma and a secondary peak at  $328 \pm 2$  Ma. Based on monazite textures, these relatively young ages are ascribed to fluid influx during retrograde chloritization.

The short time span between prograde garnet growth ( $\sim 344$  Ma) and existing Ar-Ar cooling ages on micas ( $\sim 335$  Ma) points to a tectono-thermal event of about 10 Ma. Assumed high heating and cooling rates during this event are explained by the synchronous intrusion of granitoid sheets. Nevertheless, monazite ages indicate that a low-grade overprint occurred more than 20 Ma after peak conditions.

キーワード: P-T-D-t path, prograde garnet zoning, retrograde monazite  
Keywords: P-T-D-t path, prograde garnet zoning, retrograde monazite



## 肥後変成岩からのマイクロダイヤモンドを含む超高压クロミタイト Microdiamond - bearing UHP chromitite from the Higo Metamorphic Rocks, Central Kyushu, Japan

西山 忠男<sup>1\*</sup>; 潮崎 大<sup>1</sup>; 恵口 響<sup>1</sup>; 吉朝 朗<sup>1</sup>  
NISHIYAMA, Tadao<sup>1\*</sup>; SHIOSAKI, Dai<sup>1</sup>; EGUCHI, Hibiki<sup>1</sup>; YOSHIASA, Akira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学自然科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science and technology, Kumamoto University

Microdiamond-bearing ultrahigh-pressure (UHP) chromitite was newly found from a spinifex-textured metaperidotite in the Higo Metamorphic Rocks (HMR), Central Kyushu, Japan. This is the first finding of microdiamond from Japanese metamorphic rocks and the second finding in Japan following the first one from a mantle xenolith in a Cenozoic lamprophyre dyke in Shikoku<sup>1</sup>. The HMR represents a low P/T metamorphism of Cretaceous in age, however, the precursor HP or UHP metamorphism of ca. 250Ma has been inferred<sup>2</sup>. A great deal of debate has been done on whether or how the Dabie-Sulu UHP terrane extends eastward to the Korean Peninsula and also to Japan. The HMR is one of the candidates<sup>3</sup> for the eastern extension in Japan, but no definitive evidence has been given yet.

Metaperidotites occur in two localities in the HMR: one at Yamato Town in the biotite zone and the other in Matsubase Town in the garnet-cordierite I zone<sup>4</sup>. The metaperidotites from Matsubase Town show distinct spinifex-texture with decimeter-sized elongated olivine (mostly serpentinized) and enstatite. Those from Yamato Town shows either spinifex-texture or granular texture of finer grains (several mm to 1 cm across), and is strongly serpentinized. The metaperidotite bodies occur in mostly pelitic gneisses as small lenticular bodies about several ten meters in size, which are concordant to the gneissosity. The mineral assemblage of the metaperidotite is olivine (mostly serpentinized) + enstatite with secondary tremolite and antigorite. Talc occurs locally along the cleavage of enstatite. A podiform chromitite occurs in such a strongly serpentinized metaperidotite at Yamato Town as a nodular form of about 10 cm in diameter, in which we found many inclusions of microdiamond 1 to 10  $\mu\text{m}$  in size. We have made four thin sections, polished with colloidal silica, from one chromitite sample, and found many microdiamond inclusions in all thin sections. Microdiamonds occur both in chromite and in nickeline, and they are all monocrystalline. Many euhedral to subhedral grains (mostly 1  $\mu\text{m}$  in size) of microdiamond occurs in chromite, making several lines of aligned grains. Identification of diamond was carried out with an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis (carbon peak) and Raman spectroscopy with a He-Ne laser. We observed a Raman peak at 1333.5  $\text{cm}^{-1}$ , which is comparable to the peak (1332  $\text{cm}^{-1}$ ) characteristic of diamond. They show no evidence of partial or total graphitization. The occurrence suggests that the striations represent healed cracks and that microdiamonds precipitated from a reduced C-O-H fluid<sup>5,6</sup>. Our finding presents a convincing evidence for the hypothesis that the Higo Metamorphic Rocks is an eastern extension of the Dabie-Sulu UHP terrane in Japan. The second implication of our finding is on the nature of UHP chromitite. Microdiamonds are found from several UHP metamorphic terranes<sup>5,6,7</sup>, however, microdiamond-bearing UHP chromitite has been found from ophiolites in non-UHP metamorphic terrane<sup>8</sup>, making the occurrence of UHP chromitite as an enigma<sup>9</sup>. The Higo UHP chromitite represents a deep subduction product as indicated by spinifex-texture in the host metaperidotite due to high pressure breakdown of antigorite (serpentine), instead of a product of mantle migration<sup>10</sup>. Therefore the origin of the UHP chromitite requires a specific interpretation in each case.

### References

1. Mizukami, T., et al., *Geology*, 36, 219-222, 2008; 2. Osanai, Y., et al., *Gondwana Res.*, 9, 152-166, 2006; 3. Omori, S., and Isozaki, Y., *J. Geogr.*, 120, 40-51, 2011; 4. Miyazaki, K., *JMG*, 22, 793-809, 2004; 5. Liou J.G., et al., *J. Asian Earth Sci.*, 35, 199-231; 6. Dobrzhinetskaya, L.F., *Gondwana Res.*, 21, 207-223, 2012; 7. Schertle, H-P., and Sobolev, N.V., *J. Asian Earth Sci.*, 63, 5-38, 2013; 8. Yang, J-S., et al., *Geology*, 35, 875-878, 2007; 9. Arai, S., *JMPS*, 105, 280-285, 2010; 10. Yamamoto, S. et al., *Lithos*, 109, 314-322, 2009

キーワード: マイクロダイヤモンド, 超高压クロミタイト, 肥後変成岩, 超高压変成岩, スピニフェックス組織, Dabie-Sulu 超高压変成帯

Keywords: microdiamond, UHP chromitite, Higo Metamorphic Rocks, Ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Spinifex-texture, Dabie-Sulu UHP terrane

## リーゼガンク変成作用におけるサイズグレーディング Grain Size Grading of Garnet in the Liesegang Metamorphism

鳥海 光弘<sup>1\*</sup>; 福山 繭子<sup>2</sup>  
TORIUMI, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; FUKUYAMA, Mayuko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究機構, <sup>2</sup> 秋田大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Akita univ.

The very puzzling phenomena is that the grain size of metamorphic garnet shows apparently gradational in both basic and politic schists, for bulk chemistries of large grain and small - grain layers are not different with each other and for chemical zonings of large and small grains of garnet display very similar pattern. These facts suggest that the domain structure by diffusion and growth of garnet should be formed in the layer and the spacing of the domain changes gradually across the grain - size layering in the metamorphism.

The layering shows parallel to subparallel against the schistosity plane, suggesting the parameter changes uniaxially along the normal direction against the schistosity. The length scales of the grain size layering ranges from several to several ten cm, being likely to those of the compositional banding derived from metasomatism. Judging from these facts, it seems that the size grading process in the plate boundary metamorphism is governed by the diffusion, reaction and grain growth mechanism, that is the precipitation mechanism in the Liesegang bands. The precipitation in the Liesegang band is considered as the Cahn - Hillert - Cook process (1), which is characterized by the relation of average grain size, size distribution, width of the layer, and spacing distribution among grains.

In this paper, we would like to investigate these relations of the size grading of garnet in the subduction zone metamorphism.

### References

(1), A. DEWIT, 1999, Advances in Chemical Physics, Volume109, Edited by I. Prigogine and Stuart A. Rice ISBN 0-471-32920-7 0 1999 John Wiley & Sons, Inc

キーワード: 粒子サイズ, グレーディング, リーゼガンク, 変成作用

Keywords: grain size, grading, Liesegang, metamorphism

## Metamorphism of sodic pyroxene-bearing quartz schists from the Bizan area, Sambagawa belt, eastern Shikoku, Japan

### Metamorphism of sodic pyroxene-bearing quartz schists from the Bizan area, Sambagawa belt, eastern Shikoku, Japan

KABIR, Md fazle<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KAINUMA, Masaaki<sup>1</sup>  
KABIR, Md fazle<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KAINUMA, Masaaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan

The Bizan area of the Sambagawa metamorphic belt occurs in easternmost Shikoku, southwest Japan. The Bizan and Kotsu areas are located in the same tectonostratigraphic horizon, i.e. the Kotsu Formation in eastern Shikoku. The Kotsu Formation in the Kotsu-Bizan area is structurally overlying and underlying by the Kawata Formation and the Kawatayama Formation, respectively. The main rock types in the Bizan area include pelitic, basic and siliceous schists, with minor amounts of psammitic and calcareous schists (Iwasaki, 1963). Faure (1983) suggested a melange zone containing tectonic blocks of serpentinite, metagabbro and garnet-amphibolite (garnet-glaucophane schist) occurs along a ductile shear zone between spotted and non-spotted schist zones. Sodic pyroxene-bearing quartz schists consist mainly of quartz and phengite, with minor amounts of amphibole (Fgl, Mrbk, Rbk, Mkt, Wnc, Brs, Fbrs), garnet, Na-Ca pyroxene (hereafter sodic pyroxene) (aegirine, aegirine-augite and omphacite) and albite. Hematite, chlorite, and epidote occur occasionally. A schistosity is defined by preferred orientation of phengite and quartz.

Garnets are spessartine-rich in composition, show a growth zoning with decreasing spessartine ( $X_{Sps}$  0.82-0.35) and increasing almandine ( $X_{Alm}$  0.01-0.41) and pyrope ( $X_{Prp}$  0.03-0.09) from core to the rim and contain inclusions of phengite (6.84 pfu), epidote, hematite and quartz. The garnets are occasionally replaced by chlorite and biotite along cracks and at the rims. Amphiboles occurring as inclusions in porphyroblastic albite are compositionally zoned, with Fbrs and Brs cores and Rbk rims. Matrix amphiboles are Brs and Mkt core, Fgl mantle and Rbk and Mrbk rims, and contain inclusions of phengite (6.50-6.51 pfu), hematite and quartz. Sodic pyroxenes occurring as inclusions in porphyroblastic albite are aegirine, aegirine-augite and omphacite with  $X_{Jd}$  0.08-0.37 contents. Some of them are compositionally zoned, with aegirine-augite and omphacite cores ( $X_{Jd}$  0.34-0.37) to aegirine-augite and aegirine rims ( $X_{Jd}$  0.34-0.21). Matrix sodic pyroxenes are aegirine-augite ( $X_{Jd}$  0.09-0.27), decreasing  $X_{Jd}$  from cores (0.22-0.25) to the rims (0.22-0.17). Some other sodic pyroxenes in the matrix display increasing  $X_{Jd}$  from core to the mantle (0.13-0.19) and decreasing towards the rim (0.19-0.12). They contain inclusions of amphibole (Brs, Fbrs, Rbk), phengite (6.66-6.82 pfu), hematite and quartz, and are partially replaced by chlorite along their cleavages. Porphyroblastic albite crystals up to 2 mm across contain inclusions of garnet, amphibole (Brs, Fbrs, Rbk), sodic pyroxene ( $X_{Jd}$  0.10-0.37), phengite (6.57-6.76 pfu) and quartz. Matrix phengites show relatively higher in Si (6.33-6.98 pfu) contents than inclusions.

According to the occurrence of mineral assemblage the Kwata, Kotsu and Kawatayama Formation probably correlate with the albite-biotite zone of the Besshi area (Enami *et al.*, 1994). Jadeite content in the sodic pyroxenes are significantly higher in sodic pyroxene-bearing quartz schists ( $X_{Jd}$  0.08-0.37) than those of garnet-aegirine augite-alkali amphibole-quartz schist ( $X_{Jd}$  0.30) in the Bizan area (Iwasaki, 1963) and Asemigawa ( $X_{Jd}$  0.15-0.19), Besshi ( $X_{Jd}$  0.14-0.23) and the Sarutagawa area ( $X_{Jd}$  0.17-0.30) in the central Shikoku (Enami *et al.*, 1994). This higher jadeite content in sodic pyroxenes suggests metamorphic conditions in the Bizan sodic pyroxene-bearing quartz schists might be higher in pressure than those of the metamorphic zonation in the albite-biotite zone of the Sambagawa belt central Shikoku by Enami *et al.* (1994).

#### References

Enami *et al.* (1994) *Contrib Mineral Petrol*, 116, 182-198. Faure M. (1983) *J Geol Soci Japan* 89, 319-329. Iwasaki, M. (1963) *J Faculty of Science, Univ Tokyo, Section II*, 15, 1-90.

キーワード: Sambagawa (Sanbagawa) metamorphic belt, Bizan area, quartz schist, omphacite, aegirine-augite  
Keywords: Sambagawa (Sanbagawa) metamorphic belt, Bizan area, quartz schist, omphacite, aegirine-augite

## 関東山地秩父-三波川帯への炭質物ラマン温度計の適用 Application of the Raman carbonaceous material thermometer to the Chichibu-Sanbagawa belt in the Kanto Mountains, Japan

瀨瀬 佑衣<sup>1\*</sup>; 清水 以知子<sup>2</sup>

KOUKETSU, Yui<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Ichiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 理学系研究科 地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

中部日本から西南日本に分布する秩父帯と三波川帯の地質構造や形成過程などについては、岩相層序、放散虫年代、放射年代、変形微細構造解析、炭質物の X 線回折など様々な手法を用いて議論されている。秩父-三波川帯において、いくつかの構造不連続（ナップ境界）が報告されているが、両地質帯の位置関係や形態についてはいくつかの議論がある（Shimizu 1988, *J. Geol. Soc. Japan*; 磯崎&丸山 1991, *地学雑誌*; 平島ほか 1992, *地質学雑誌*）。また、両地質帯の温度領域をまたいで適用できる地質温度計が乏しいため、温度構造についてもまだ十分明らかになっていない。近年、岩石の最高被熱温度を炭質物のラマンスペクトルから推定する研究が活発に行われている。Kouketsu *et al.* (2014, *Island Arc*) は、岩石中に含まれる非晶質の石炭から結晶質な石墨まで、幅広い結晶化度の炭質物をラマン分光分析し、そのラマンスペクトルからピーク温度を見積もる手法を開発した。本研究では、この手法を用いて、関東山地の秩父帯と三波川帯の岩石を分析し、温度構造について議論する。

分析した試料は、関東山地の神流川・三波川・鮎川地域に分布する泥岩、砂岩、泥質片岩である。調査地域は南に秩父帯の付加コンプレックス、北に三波川帯の結晶片岩が分布しており、間に御荷鉾緑色岩類が露出している。秩父帯は構造的上位から下位に向かって、上吉田、万場、柏木ユニットの順に区分される（Shimizu & Yoshida 2004, *Island Arc*）。三波川帯は変成度の順に、緑泥石帯、ザクロ石帯、黒雲母帯に区分される（矢野&田切 1998, *地質学雑誌*）。地層は緩やかに南に傾き、変成度は構造的下位に向かって上昇する。

秩父帯で採取された泥岩、砂岩中の炭質物のラマンスペクトルは、非晶質な石炭に特徴的ないくつかのブロードなピークを含んでいた。D1-band の半値幅を用いて見積もられたピーク温度は 260-300 °C 程度であった。西御荷鉾山に近いいくつかの試料中の炭質物は 300 °C 以上の温度を示した。

三波川結晶片岩中の炭質物のラマンスペクトル強度は、秩父帯で採取された試料中の炭質物のものよりも一桁程度弱かった。非晶質な炭質物に特徴的な D4-band は観察されず、代わりに、結晶質な炭質物に特徴的な G-band が、変成度が高くなるにしたがい、他のピークよりも相対的に強くなった。変成温度は D1-band, D2-band の半値幅、及び面積比 (R2) を用いて見積もった。緑泥石帯、ザクロ石帯中、黒雲母帯中の試料はそれぞれ、360-400 °C, 420-450 °C, 460-510 °C の変成温度を示した。

炭質物を用いて見積もった温度では、秩父帯と三波川帯の間で数十°C 以上の温度ギャップが示唆される。今後はさらなる試料採取とその分析を進める予定である。

キーワード: ラマン分光法, 炭質物, 地質温度計, 秩父帯, 三波川帯, 関東山地

Keywords: Raman spectroscopy, Carbonaceous material, Geothermometer, Chichibu belt, Sanbagawa belt, Kanto Mountains



## 北海道神居古潭帯春志内ユニットに分布する砂質岩のジルコン FT 年代と U-Pb 年代 Fission track and U-Pb zircon ages of psammitic rocks from the Harushinai unit of the Kamuikotan belt, Hokkaido

岡本 あゆみ<sup>1\*</sup>; 竹下 徹<sup>1</sup>; 岩野 英樹<sup>2</sup>; 檀原 徹<sup>2</sup>; 平田 岳史<sup>3</sup>; 西戸 裕嗣<sup>4</sup>

OKAMOTO, Ayumi S.<sup>1\*</sup>; TAKESHITA, Toru<sup>1</sup>; IWANO, Hideki<sup>2</sup>; DANHARA, Tohru<sup>2</sup>; HIRATA, Takafumi<sup>3</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北海道大学, <sup>2</sup>(株) 京都フィッション・トラック, <sup>3</sup>京都大学, <sup>4</sup>岡山理科大学

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>Kyoto Fission-Track Co., Ltd., <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>Okayama University of Science

高圧型変成岩の上昇過程とメカニズムを議論するためには、その堆積から最大深度への沈み込み、上昇までの圧力-温度-時間履歴の正しい情報を得ることが必要である。我々は北海道神居古潭帯の春志内ユニットから砂質岩 2 試料を採取し、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法 (LA-ICPMS 法) を用いて試料中の碎屑性ジルコンのフィッション・トラック (FT) 年代と U-Pb 年代を見積もった。その結果、concordant ジルコン U-Pb 年代が 1980-90 Ma の間で広く変化することが明らかとなった。これらのうち最も若い U-Pb 年代集団 (約 110-90 Ma) が優勢であり、その加重平均年代は両試料ともアルビアン年代 ( $100.8 \pm 1.1$ ,  $99.3 \pm 1.0$  Ma,  $2\sigma$ ) を示した。分析されたジルコンは全く過成長によって形成されたリムのない火成起源の oscillatory zoning のみを示しているため、ジルコン U-Pb 年代は高圧型変成作用によってリセットされていないことが示唆される。そのため、もっとも若い U-Pb 年代年代は堆積年代の上限を示す。一方、ジルコン FT データは 100-90 Ma の単一ピーク年代を持つスペクトラを示し、これはもっとも若い U-Pb 年代集団と比較できる。この事実は、ジルコン FT 年代が激しい火成活動によって約 100 Ma に一度リセットされたものの、堆積作用以降は基本的にリセットされていないことを意味する。この筋書きは、砂質岩を構成している変形した碎屑性石英粒子中の微細構造から見積もられた、石英の脆性塑性転移 (約 300 °C, ジルコン FT の閉鎖温度) よりもわずかに低い温度条件によっても支持される。以前に報告された白雲母 K-Ar 年代と組み合わせると、春志内ユニットは 100 Ma 以降に堆積し、最大深度まで引きずり込まれた後、上昇時 (約 58 Ma) に局所的な熱イベントの影響を受けたことが推測される。

キーワード: 神居古潭変成岩, ジルコン, U-Pb 年代, フィッション・トラック年代, 変形微細構造

Keywords: Kamuikotan metamorphic rocks, zircon, U-Pb ages, Fission track ages, deformation microstructure

## 幌満かんらん岩のスピネルの形態変化について Shape evolution of spinel grains in the Horoman Peridotite Complex, Hokkaido

小出 聡子<sup>1\*</sup>; 柴田 有毅<sup>2</sup>; 道林 克禎<sup>1</sup>  
KOIDE, Satoko<sup>1\*</sup>; SHIBATA, Tomoki<sup>2</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科地球科学専攻, <sup>2</sup> 静岡大学理学部地球科学科

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University

We present the evolution of spinel grains in the Horoman Peridotite Complex, Hokkaido. For deformation under differential stresses at high temperature conditions, both diffusion processes including diffusion creep and annealing process and dislocation creep will affect shape change of a crystal inclusion (Okamoto and Michibayashi, 2005 JGR). Grain size and grain shape are related to the shape change of the crystal with respect to given temperature and differential stress conditions. We applied this theory to spinel grains in the Horoman Peridotite Complex, Hokkaido. As a result, grain shapes of coarser spinel grains more than 100 micron are dominantly controlled by dislocation creep, whereas those of smaller spinel grains less than 100 micron are influenced by both diffusion processes and dislocation creep. Moreover, we found that grain shapes of the smaller spinel grains can be only explained by post-tectonic annealing process after their intense deformation. Our result will provide a new insight to understand the deformation processes in mantle.

Keywords: spinel, grain shape, diffusion process, dislocation creep, Horoman

## 天然で変形したオリビンの微細組織観察から探る超低歪速度効果の検証 Verification of ultra-low strain rate effect from microstructural observation on naturally deformed olivine

山本 貴史<sup>1\*</sup>; 安東 淳一<sup>1</sup>; 大藤 弘明<sup>2</sup>; 森下 知晃<sup>3</sup>; 富岡 尚敬<sup>4</sup>

YAMAMOTO, Takafumi<sup>1\*</sup>; ANDO, Jun-ichi<sup>1</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>2</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>3</sup>; TOMIOKA, Naotaka<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>3</sup> 金沢大学理工学域自然システム学類, <sup>4</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University,

<sup>3</sup>School of Natural System, College of Science and Technology, Kanazawa University, <sup>4</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

今後上部マントルのダイナミクスを理解する上で重要になると考えられる事は、オリビン ( $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ ) の変形特性に与える超低歪速度の効果の評価と解明である。金属学では超低歪速度は、コットレル雰囲気を通じて材料強度に強い影響を与える事が知られている。Kitamura et al. (1986) と Ando et al. (2001) は、マントル起源の変形したオリビンを観察し、転位線に沿って濃集する Fe の存在を報告している。彼らは、この Fe の濃集の成因をコットレル雰囲気と解釈しているが、転位線に沿う特定元素の濃集は、変形が終了した後のパイプ拡散によっても形成され得る。従って、上部マントルにおいてコットレル雰囲気が発現しているかどうかを明らかにする為には、より詳細でかつ系統的な微細組織観察が必要となる。そこで本研究では、マントル起源の変形したオリビン中に発達する転位を観察し、1) Fe の濃集が普遍的に認められるか。そして Fe の濃集が認められた場合、2) その濃集はどのような変形条件でどのようなメカニズムで形成されたのか、という事の解明を目的に研究をすすめた。観察に用いた試料は、ゼノリスタイプ (佐賀県高島、福岡県黒瀬、秋田県目潟、ハワイオアフ島ソルトレイク) とアルパインタイプ (幌満、ウエンザル) のカンラン岩である。これらを対象として、主に電子顕微鏡を用いた微細組織観察と化学組成分析を行った。観察及び分析結果の概要を以下にまとめる。

ゼノリスタイプのカンラン岩は、等粒状組織もしくは非等粒状組織を示す。オリビンは比較的粗粒 (数百  $\mu\text{m}$  ~ 数  $\text{mm}$ ) で、粒界は直線的かつ三重重点も一般的に観察される。粒内にはキंकバンド様の亜結晶粒界が発達しており、波動消光はほとんど認められない。一方、アルパインタイプのカンラン岩は、比較的細粒 (数十 ~ 数百  $\mu\text{m}$ ) なオリビンから構成されるポーフィロクラスティック組織を呈しており、粒界は房状もしくはアメーバ状である。また波動消光が顕著に認められる。この様な微細組織の特徴と、転位のすべり系及び各種地質差応力計 (転位密度、亜結晶粒径、結晶粒径) の結果から、各カンラン岩が経た変形履歴を以下の様に示唆された。ゼノリスタイプのカンラン岩は、約 10MPa の差応力による定常クリープを経験した後に、静的回復作用を受け、更にその後、約 50MPa のパルス的な付加応力を受けた可能性が高い。一方アルパインタイプのカンラン岩の、ホロマンに関しては、低差応力場 (約 30MPa) から高差応力場 (約 100MPa) への変化が起こった事が示される。ウエンザルに関しては、亜結晶回転による動的再結晶の起こるような高温状態から、バルジ再結晶の起こる低温状態への変化があったと考えられる。

ATEM を用いた転位線近傍における化学組成分析の結果からは、全ての試料において Fe の濃集が生じている事が明らかとなった (図 1)。この Fe の濃集は、以下の理由によりコットレル雰囲気に起因すると結論付けた。パイプ拡散によるオリビン中の転位線への元素の濃集では、拡散起源流体の化学組成に依存して Fe だけでなく Mn や Ni といった複数の元素の濃集も同時に報告されている (例えば Plumper et al., 2012)。更に流体の経路である粒界に沿って Fe が濃集する可能性も考えられるが、本研究で用いた試料中にはこのような元素の濃集は全く認められなかった。

得られた結果の考察を以下にまとめる。ゼノリスタイプの試料の変形履歴は、マグマに取り込まれる際のアニーリングを受けた後、地表付近で短期間の付加応力を受けた可能性を示している。しかしこの付加応力は亜結晶粒界の生成が起こるよりもさらに短期間のパルス的な応力である。化学組成分析から、両試料において亜結晶粒界に Fe が濃集している事が確認できており、ゼノリスタイプの試料中の Fe の濃集が付加的な応力下で形成された可能性は否定できる。一方アルパインタイプの試料の変形履歴は、マントルからの上昇過程における流動変形の情報を有している。以上の理由から、今回認められた Fe の濃集は、両タイプともマントルにおける流動条件下において形成されたと考えられる。従って、コットレル雰囲気に起因したオリビン粒子中の転位への Fe の濃集は上部マントルにおいて普遍的な現象であると結論付けた。本研究結果は現在行われている変形実験においても、低歪速度環境でのコットレル雰囲気の形成に伴うオリビンの変形特性の変化を考慮する必要がある事を強く示唆している。

Ando et al. (2001) Nature, 414, 893; Kitamura et al. (1986) Proc. Japan Acad., 62, 149; Plumper et al. (2012) Contrib. Mineral. Petrol., 163, 701.

Keywords: Olivine, Cottrell atmosphere, Dislocation creep

南アフリカカーブバールクラトンリソスフェア起源粗粒かんらん岩の微細構造とメ  
タゾマティズムの関係  
The relationship between microstructures and metasomatism preserved within coarse gran-  
ular peridotites derived from Kaap

富田 大貴<sup>1\*</sup>; 道林 克禎<sup>1</sup>; 片山 郁夫<sup>2</sup>; 小宮 剛<sup>3</sup>  
TOMITA, Daiki<sup>1\*</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>1</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>2</sup>; KOMIYA, Tsuyoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科地球科学専攻, <sup>2</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>3</sup> 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

<sup>1</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University,

<sup>3</sup>Department of Earth Science & Astronomy Graduate School of Arts and Sciences The University of Tokyo

Kimberlite was generated in deep upper mantle (70-250km) beneath craton and subsequently ascended to surface rapidly. Peridotite xenoliths, which were entrained by kimberlite, record composition and texture formed in upper mantle beneath the craton. We studied coarse granular peridotites obtained from Kimberley pipe, South Africa, as they have a few studies in terms of microstructural development, presumably because of very coarser grains. We performed mineral crystal-fabric analyses of the coarse granular peridotites in order to understand the structure of the cratonic lithosphere. The peridotites consist mostly of olivine and orthopyroxene with clinopyroxene, garnet and a minor amount of spinel and phlogopite. The crystallization of clinopyroxene appears to be associated with melt metasomatism, whereas that of phlogopite could be associated with hydration metasomatism. Garnet grains occur commonly with kelyphite consisting of fine-grained orthopyroxene, clinopyroxene and spinel, indicating that these peridotites could have been uplifted above the phase boundary between garnet peridotite and spinel peridotite stability fields. Although both foliation and lineation are not commonly identified because of coarse granular texture, olivine crystal fabrics are characterized by a single maximum of [010] with single maxima or weak girdles of [100] and [001]. We found that the intensities of olivine and orthopyroxene crystal-fabrics are correlated to the modal composition of clinopyroxene and phlogopite. It suggests that the melt metasomatism weakened crystal-fabrics, whereas the hydration metasomatism intensified crystal-fabrics. As a consequence, the metasomatism could result in the development of different types of microstructures in the peridotites and may weaken the craton lithosphere.

Keywords: kimberlite, peridotite, garnet, olivine, craton, crystal-fabrics



## 東南極リュツォ・ホルム岩体オングル島に産するコロナの形成反応 Corona-forming reaction in the Lutzow-Holm Complex, East Antarctica at Ongul Island

島田 麻美<sup>1\*</sup>; 池田 剛<sup>1</sup>  
SHIMADA, Asami<sup>1\*</sup>; IKEDA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学

<sup>1</sup>Kyushu University

### 【はじめに】

コロナとは、ある鉱物の周囲を1種類あるいは複数種の鉱物の集合体が環状に取り囲む構造のことである。これは中心の鉱物とマトリクスの鉱物の反応によって形成されたと考えられている (Passchier and Trouw 1996)。この反応を特定することによって、コロナ形成時に岩石にどのような成分が出入りしたか、どのように温度圧力が変化したかを知ることができる。そこで本研究では、東南極リュツォ・ホルム岩体に産するコロナを対象とし、微細組織、構成鉱物の化学組成からコロナの形成反応を推定した。

### 【地質概説】

この岩体では、北東から南西に向かって、変成相が角閃岩相からグラニュライト相へと移り変わっている (Hiroi et al., 2006)。その中の東オングル島にはグラニュライト相の変成岩類が広く分布する。主要な岩石はザクロ石片麻岩と角閃石片麻岩である (Ishikawa et al., 1994)。ザクロ石片麻岩の中には、ザクロ石斑状変晶を含む角閃石主体の超塩基性岩が薄層として産する。このザクロ石斑状変晶の周囲にコロナが形成されている。

### 【微細構造】

この超塩基性岩の薄層には角閃石の多い領域と斜長石の多い領域が存在し、どちらの領域も角閃石、斜長石、褐色の黒雲母、斜方輝石から成る。ザクロ石の周囲には幅 8-15mm のコロナが発達し、主に斜長石、緑色の黒雲母から成る。マトリクスとコロナの斜長石は双晶、組成累帯構造を持つ。ザクロ石は直径約 15mm のほぼ円形で、0.5mm 程度の凹凸が発達する。ザクロ石の凹部には、界面に直交する長軸を持つ黒雲母が産する傾向がみられる。

### 【化学組成】

ザクロ石；コアと比べてリムで Fe が減少し、Mg が増加する。Fe+Mg,Ca 値はほぼ一定である。

斜長石；斜長石の多い領域、角閃石の多い領域、コロナ内部の順に Ca/(Ca+Na) が増加する。どの領域もコアからリムにかけて Ca/(Ca+Na) が増加する。

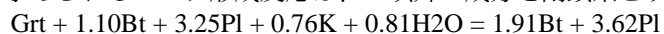
黒雲母；角閃石の多い領域、斜長石の多い領域、コロナ内部の順に Mg/(Fe+Mg) が減少し、どの領域もリムでコアよりも Al に乏しい傾向がある。

角閃石；角閃石の多い領域の方が斜長石の多い領域に比べて Al、Mg/(Fe+Mg) が高く、どちらの領域もリムでコアよりも Al に富む傾向がある。

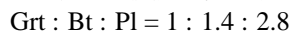
斜方輝石；領域、コア、リムによらず、組成は一定である。

### 【議論】

マトリクスの各鉱物のコア、リムでの組成差は成長累帯構造であるとして、それぞれの領域ごとに、リムの組成の平均値を反応式に用いた。ザクロ石とコロナ中の斜長石、黒雲母は全分析値の平均を用いた。角閃石の多い領域の平均値から求められるコロナ形成反応は、K 以外の成分を閉鎖系とする次の式で書くことができる。



一方、斜長石の多い領域の平均値を用いて反応式を求めると、ザクロ石が生成物となってしまう、これは組織と矛盾する。よって、コロナ形成には角閃石の多い領域の黒雲母と斜長石がザクロ石と反応し、その際 K の供給が必要なことがわかった。また、この反応式の左辺の鉱物のモル比を体積比に直すと



となり、ザクロ石の反応量が最も少ない。それにもかかわらずザクロ石の周囲にコロナが形成されていることから、ザクロ石からの成分の拡散が律速していたことがわかった。

キーワード: コロナ, 東南極, リュツォ・ホルム岩体  
Keywords: corona, East Antarctica, Lutzow-Holm Complex

東南極セールロンダーネ山地における正断層センスを示すマイロナイト形成時およびその前後のテクトニクス  
Possible tectonic models before, during and after mylonitization in the Sor Rondane Mountains, East Antarctica

豊島 剛志<sup>1\*</sup>; 金谷 亮子<sup>1</sup>; 小山内 康人<sup>2</sup>; 馬場 壮太郎<sup>3</sup>; 外田 智千<sup>4</sup>; 中野 伸彦<sup>2</sup>; 足立 達朗<sup>2</sup>  
TOYOSHIMA, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>; KANEYA, Akiko<sup>1</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>2</sup>; BABA, Sotaro<sup>3</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>4</sup>; NAKANO, Nobuhiko<sup>2</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新潟大学, <sup>2</sup>九州大学, <sup>3</sup>琉球大学, <sup>4</sup>国立極地研究所

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Kyusyu University, <sup>3</sup>University of the Ryukyus, <sup>4</sup>National Institute of Polar Research

The deformational history in the Sor Rondane Mountains (SRMs), eastern Dronning Maud Land (DML), East Antarctica, is divided into 13 stages (D1?D13). The tectonic regime varied frequently from extension (D3?D4) to layer-normal compression and layer-parallel extension (D5), to compression (D6), top-to-the S shearing (D7), top-to-the SE shearing and sinistral strike-slip (D8), compression (D9?D11), and ?nally extension related to dextral shearing (D12?D13). In this paper we discuss change in deformation and P-T conditions before, during and after the D7-D8 mylonitization, using mineral textures, assemblage, compositions and microstructures of D7 and D8 mylonites.

Garnet porphyroclasts of the D7-D8 mylonites include high-Ca mantles and crenulation microfolds defined by sillimanite fibrolites. The high-Ca mantles of garnets and their plagioclase inclusions in the mylonites imply an increase in pressure before the D7-D8 mylonitization. S-tectonites having a dominant planar fabric were formed before the D7-D8 mylonites and after the high-Ca mantles of the garnets. The planar fabric (foliation) of the S-tectonites is produced by fan-shaped arrangement of sillimanite and biotite grains. The sillimanite and biotite grains were formed by breakdown of garnet. Most of the sillimanite and biotite grains have been rotated and folded by the D7-D8 mylonitization. The D7-D8 mylonite foliations are parallel to the planar fabric of the S-tectonites. The S-tectonites indicate a flattening type of strain and resulted from the layer-normal shortening after the increase in pressure and before the D7-D8 mylonitization. kyanite-quartz porphyroblasts and randomly oriented crystals of sillimanite/kyanite and biotite were formed after the D7-D8 mylonitization. The randomly oriented crystals of sillimanite/kyanite and biotite resulted from the breakdown of garnet porphyroclasts of the D7-D8 mylonites. The kyanite-quartz porphyroblasts accompany leucogranite veins cutting the D7-D8 mylonite foliations. The randomly oriented crystals and porphyroblasts imply non-deformational conditions after the D7-D8 mylonitization and D9 folding.

Three possible tectonic models for D7 and D8 mylonite-forming events before the D9 deformation can be considered as follows: extensional tectonic model, positive flower structure model and rotated mylonite model. In the former model, D7 and D8 indicate major extensional tectonic activity in the southern part of the East African and Antarctic Orogen (EAAO) before the Pan-African compressional event, and after the 650-600 Ma peak of metamorphism. In the latter two models, D7 and D8 mylonites may have resulted from the compressional events. In the positive flower structure model, the SRMs are the southern half of the E-trending positive flower structure. The flower structure model needs top-to-the N shear zones to the north of the SRMs. In the rotated mylonite model, the present S-dip of the D7 and D8 mylonites results from the rotation and folding of originally N-dipping reverse (top-to-the S-SE, normal-sinistral shear, present day coordinates) mylonites. The Pan-African compressional event resulted in the formation of upright folds with horizontal axes that curve along the coastline in central to eastern DML during the D9 deformation that took place between 600 and 560 Ma. The coastline-parallel fold axes and subvertical axial-planes correspond to the X-axes and the XY-planes, respectively, of strain ellipsoids that were progressively rotated counterclockwise toward the central parts of a sinistral shear zone. Therefore, the curved fold axes and axial-planes suggest the EAAO acted as a zone of sinistral transpression during the collision of parts of East and West Gondwana.

キーワード: S-テクトナイト, 押しつぶし, マイロナイト化作用, セールロンダーネ山地, ゴンドワナ, 東南極  
Keywords: S-tectonite, flattening, mylonitization, Sor Rondane Mountains, Gondwana, East Antarctica

## 複数段階の塩素に富む流体活動の意義—東南極セール・ロンダーネ山地の例 Significance of multi-stage chloride brine activity- An example from Sor Rondane Mountains, East Antarctica

東野 文子<sup>1\*</sup>; 河上 哲生<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>2</sup>; Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>3</sup>; 石川 正弘<sup>4</sup>; Grantham Geoffrey H.<sup>5</sup>  
HIGASHINO, Fumiko<sup>1\*</sup>; KAWAKAMI, Tetsuo<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>2</sup>; MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>3</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>4</sup>; GRANTHAM, Geoffrey H.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> 新潟大学, <sup>4</sup> 横浜国立大学, <sup>5</sup> 南アフリカ地質調査所

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Niigata University, <sup>4</sup>Yokohama National University, <sup>5</sup>Council for Geoscience, South Africa

It has been gradually recognized chloride brine potentially plays an important role in large-scale mass transfer during high-grade metamorphism without partial melting. This is because brine is a powerful solvent, can coexist with CO<sub>2</sub>-rich fluid under the granulite facies conditions and has low-H<sub>2</sub>O activity (Newton & Manning, 2010; Heinrich et al., 2004). In natural observation, evidence for the presence of brine is often found as fluid inclusions. In metamorphic rocks under granulite facies conditions, however, brine inclusions are only rarely found (Markl & Bucher, 1998). This is partly because brines have a high mobility due to their low viscosity and low wetting angle (Watson & Brenan, 1987; Holness, 1997).

On the other hand, hydrous minerals such as biotite (Bt), hornblende (Hb) and apatite can record the  $f_{H_2O}/f_{HCl}$  of the last equilibrated Cl-rich fluid as their mineral compositions. In order to understand the metamorphic fluid activity using these minerals, *P-T* condition under which these minerals equilibrated with a fluid as well as the crystallographic requirements for these minerals to record the fluid composition should be known (e.g., Makino, 2000). However, there still are a lot of unsolved issues about brines, for example, cations transported in the fluid, *P-T* condition and areal scale of brine activity, and its origin (Newton et al., 1998).

In order to understand the multiple brine activities and the cation composition in brines, two meta-mafic gneisses are studied in detail in Brattnipene, Sør Rondane Mountains (SRM), East Antarctica.

In a Grt-Bt-Hb gneiss, Cl-rich Bt is exclusively included in garnet (Grt). Bt, Hb, and cummingtonite (Cum) in the matrix are Cl-poor. These compositional differences imply that Bt included in the Grt formed under the presence of chloride brine and Cl-poor fluid infiltrated after Grt formation. Grt is enveloped by the gneissosity defined by the arrangement of Cum overgrown by Hb, and Bt. Therefore, chloride brine activity predated or was simultaneous with the penetrative gneissosity formation in this area. After considering the effect of Mg-Cl avoidance rule and compositional change during retrogression, the geothermobarometry (Holdaway, 2000; Wu et al., 2004) gave  $650 < T < 800$  °C and 0.96 GPa for the peak *P-T* condition of this sample. The Cl-rich Bt entrapment was probably predated or simultaneous with the attainment of this *P-T* condition.

In a Grt-Opx-Hb gneiss, ca. 1cm-thick Grt-Hb vein cut the penetrative gneissosity in this area. Cl-content of Hb and Bt, and K-content of Hb decrease with the distance from the vein center and become constant at ca. 1.6 cm from the vein center. Plagioclase present next to the vein has a core (An<sub>55</sub>) and mantle (An<sub>68</sub>) which is sharply overgrown by Na-richer rim (An<sub>51</sub>). Plagioclase in the vein is An<sub>51</sub> without zoning, and development of Na-richer rim gets thinner with a distance from the vein. Therefore, the Grt-Hb vein was probably formed by NaCl-KCl brine infiltration. This is also supported by the isocon analysis of whole-rock chemistry determined for wall rock of the vein. *P-T* condition of the vein formation is estimated as 720 °C and 0.70 GPa (Holdaway, 2000; Wu et al., 2004).

*P-T* conditions of multi-stage chloride brine activity, cation composition of the brine, and outcrop-scale pathways of the brine are constrained in SRM from these two gneisses. From the pelitic gneisses in SRM, Cl-rich fluid or melt activity with a linear distribution over 200 km has been reported (Higashino et al., 2013). Additionally, this study revealed that the brine activity in SRM is not controlled by the lithology or specific deformational stages. It is clear that chloride brine in SRM was not a result of *in situ* fractionation through the selective consumption of H<sub>2</sub>O in the fluid (Kullerud, 1995), but substantial amount of brine was actually moving, and was playing an important role in mass transfer.

キーワード: NaCl-KCl brine, 流体流入, 大陸衝突帯, セール・ロンダーネ山地

Keywords: NaCl-KCl brine, fluid infiltration, continental collision zone, Sor Rondane Mountains

## ガーネット形成反応の律速過程と非平衡度 Rate-limiting process and degree of disequilibrium of garnet-forming reaction

宮崎 一博<sup>1\*</sup>  
MIYAZAKI, Kazuhiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研 地質情報研究部門  
<sup>1</sup>GSJ AIST

変成岩中の脱水反応により生じた水は岩石のレオロジーや流体を介した物質移動、反応の進行そのものに大きな影響を及ぼす。そのような脱水反応の進行律速過程は、界面反応、拡散、及び熱流の3つに分類される。ガーネットは変成岩の脱水反応により生じる代表的な生成鉱物の1つである。その律速過程は、拡散律速を仮定する 경우가多いが、実際には、ガーネットが拡散律速成長を行った直接的な証拠が提示されるケースはほとんど存在しない。さらに、拡散律速成長における非平衡度が見積もられた例もほとんど存在しない。以下では、筑波変成岩に見いだされた拡散律速成長を示唆するガーネットを記載し、成長時の非平衡度を見積もったので報告する。

今回見いだした変成岩中のガーネット生成反応は黒雲母 + 珪線石 + 石英 = ガーネット + 堇青石 + カリ長石 + 水の反応である。ガーネットの周囲には、黒雲母枯渇領域が認められる。拡散律速反応で期待される反応物の枯渇領域が凍結されたものと予想される。一方、この変成岩中のガーネットは、界面が著しく凸凹に富む特異な形態でも特徴づけられる。このような構造は、拡散律速成長時の成長界面の不安定化 (Mullins & Sekerka, 1963) で生じると期待される。このように、記載したガーネットは、拡散律速成長で期待される組織構造を有している。

拡散律速成長の界面の形態は、拡散勾配の強さか来る不安定化を起こす強さと、界面エネルギーによる不安定化の抑制とのせめぎ合いで決まる。界面エネルギーを仮定することで、球面調和関数を用いた解析から、系の過飽和度に応じた成長界面の卓越波長を見積もることができる。筑波変成岩中のガーネットの画像解析から求めた卓越波長より系の過飽和度を求めると、0.1以下となった。ガーネット形成反応から反応のエントロピー変化を見積もり、過飽和度を非平衡温度  $\Delta T$  に換算すると、 $\Delta T=5$  °C以下である。今回の見積もりは、非平衡の度合いの大きな拡散律速成長が普遍的におこっていることに対し、疑問を投げかける。一般に変成岩中で観察されるガーネットの形態は、今回取り上げた筑波変成岩のガーネットに比べ界面の凹凸は遙かに少なく球形に近い、あるいは自形に近いものが多い。今回の結果は、そのようなガーネットが、平衡に非常に近い状態でのゆっくりした拡散律速成長か、もしくは流体の流入を伴う界面律速型の成長で形成された可能性を示唆している。

キーワード: ガーネット, 脱水反応, 非平衡, 変成作用, 変成岩, 変成反応

Keywords: garnet, dehydration reaction, disequilibrium, metamorphism, metamorphic rock, metamorphic reaction



## 領家変成岩中に見られる流体起源の珪線石脈について FLUID RELATED ORIGIN OF SILLIMANITE VEINS IN POLYMETAMORPHIC ROCKS FROM THE RYOKE BELT, JAPAN

天野 早織<sup>1\*</sup>; 河上 哲生<sup>1</sup>  
AMANO, Saori<sup>1\*</sup>; KAWAKAMI, Tetsuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

複変成地域の熱構造の発達過程を理解するためには、それぞれの変成作用を識別することが必要不可欠である。こうした研究には、例えば広域変成作用とその後の花崗岩の貫入による接触変成作用を識別する研究が存在するが(たとえば、Miyake et al., 1992; Kawakami and Suzuki, 2011) 複変成時の流体の挙動に注目した研究は多くはない。Johnson et al. (2003) は、接触変成帯の変成岩中に存在する針状の珪線石(フィブロライト)から成る脈を報告し、それが流体起源であると議論している。

京都府笠置地域には、砂岩泥岩起源の片岩や片麻岩などの領家変成岩が広く露出している。新期領家花崗岩が変成岩に非調和的に貫入しているため、変成岩には広域変成作用と新期領家花崗岩による熱的影響(Ozaki et al., 2000)や花崗岩起源の流体活動による影響が重複して記録されている。泥質な変成岩中に珪線石が存在することによって定義される珪線石帯も複変成の影響を受けているが(Ozaki et al., 2000)、珪線石の成因については細かく考察されていない。

笠置地域では、フィブロライトの集合体が広域変成作用によって生じた片麻状構造を切る産状がよく見られ、こうした珪線石が広域変成作用起源であると考えるのは難しいように思われる。本研究では、砂質片麻岩中に貫入した花崗岩から派生している珪線石脈の産状を紹介し、流体起源の珪線石について議論する。

珪線石脈を含む砂質片麻岩の試料は、珪線石帯中に貫入する領家花崗岩との接触部付近から採取した。当該試料中では、花崗岩が片麻面に非調和的に貫入し、片麻状構造にほぼ平行な珪線石脈が生じている。珪線石脈はフィブロライトとそれを置換する後退変成作用で生じた白雲母から成る。脈直近の石英は、脈から離れたマトリクス中の石英よりも粗粒であり、フィブロライト結晶を包有する。石英中に包有されるフィブロライト結晶量は珪線石脈から離れるほど少なくなる。フィブロライトは主に脈か石英中に存在している。また、斜長石は砂質マトリクス中には多数存在するが、珪線石脈中は周辺にはほとんど存在しない。後退変成作用によって珪線石を置換した細粒な白雲母(元・珪線石)がマトリクスの結晶粒界に沿って存在する。カリ長石は試料中には存在しないが、片麻状構造を切っている後退変成作用起源の白雲母がマトリクス中に豊富に存在する。

カソードルミネッセンス(CL)像による微細構造の観察から、石英の発光強度が珪線石脈からの距離に応じて変化することが明らかになった。特に、石英単結晶中であっても、より多くのフィブロライトを包有している部分の方がCL像では暗い。これは、フィブロライトを包有するCL像が暗い石英部分は、フィブロライトを包有せずCL像で明るく見える部分と起源が異なる可能性を示唆する。CL像が暗い部分は、フィブロライト形成時に同時に成長した部分であると考えられる。こうした微細構造の観察から、珪線石脈は領家花崗岩から放出された流体によって形成されたと考えられる。

岩石中の既存鉱物と流入流体中の水素イオンとの反応によるフィブロライトの形成についてはVernon(1979)が議論している。さらに、ケイ酸塩鉱物と酸性水溶液との反応により、 $Al_2SiO_5$  鉱物と白雲母が生成することが実験的に示されている(Burnham, 1967)。

本研究で紹介した試料中では、フィブロライトが脈や石英結晶中に存在し、石英に包有されているフィブロライトや斜長石の量が脈からの距離に応じて変化している。こうした観察事実から、花崗岩からの流体が脈状に流入して砂質マトリクスと反応し、斜長石を溶解しつつ、より粗粒な石英とそれに包有されているフィブロライトを同時に形成した可能性がある。このような斜長石の溶解と珪線石の形成は、石英共存下の3kbar、600℃程度の温度圧力条件で、アルカリ元素濃度に比して水素イオン濃度の高い流体が流入したと考えると可能であることがSUPCRT92(Johnson et al. 1992)を用いた熱力学計算によりわかった。したがって、本研究で紹介した珪線石脈を形成しているフィブロライトは広域変成起源ではなく、領家花崗岩による接触変成作用時の流体起源であると考えられる。

キーワード: 珪線石(フィブロライト), 領家帯, 流体起源, 複変成作用

Keywords: fibrous sillimanite, Ryoike belt, fluid-related origin, polymetamorphism

## 肥後変成岩および西彼杵変成岩に産する超高压クロミタイトの比較 Comparison of UHP chromitites from the Higo and Nishisonogi Metamorphic Rocks, Kyushu, Japan.

潮崎 大<sup>1\*</sup>; 森部 陽介<sup>1</sup>; 恵口 響<sup>1</sup>; 西山 忠男<sup>1</sup>  
SHIOSAKI, Dai<sup>1\*</sup>; MORIBE, Yosuke<sup>1</sup>; EGUCHI, Hibiki<sup>1</sup>; NISHIYAMA, Tadao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻地球環境科学コース

<sup>1</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, School of Science and Technology Kumamoto University

We have found microdiamond - bearing ultrahigh-pressure (UHP) chromitites from two metamorphic terranes in Kyushu: the Higo (HMR)<sup>1</sup> and Nishisonogi (NMR)<sup>2</sup> Metamorphic Rocks. This paper describes the similarity and difference between the two UHP chromitites. The HMR are located in west-central Kyushu with an E-W trend. They have undergone low P /T metamorphism, however, precursor HP or UHP metamorphism of ca. 250 Ma has been inferred<sup>3</sup>. The protoliths have affinity to continental shelf deposits<sup>4</sup>, consisting mainly of pelitic gneisses and meta-carbonates with minor metabasites and metaperidotites (partly serpentinite). Chromitite occurs very rarely as a nodular form in serpentinitized metaperidotites which shows spinifex-texture. The NMR is located in western Kyushu with a N-S trend. They have undergone high P /T metamorphism of epidote-blueschist subfacies. They consists mainly of pelitic and psammitic schists with minor basic schists and serpentinites, some of which show a character of serpentinite melange<sup>5</sup>. Detrital zircon from the pelitic schists show the age of 89-86 Ma<sup>6</sup>, whereas zircon from jadeitites in a serpentinite melange does 136 -126 Ma in the core and 84 - 80 Ma in the rim<sup>7,8</sup>. Chromitite occurs as a deformed schlieren-like layer in serpentinite with no relic minerals. The P-T condition of the HMR has been estimated to be 200 - 600 MPa and 600 - 800 °C<sup>3,9,10,11,12,13</sup>. Higher pressure and temperature conditions are reported from the following two samples: a sapphirine-bearing granulite<sup>3,10</sup> as a tectonic block in the spinifex-textured metaperidotite (900 MPa and 950 °C) and a calc-silicate granulite<sup>13</sup> (900 MPa and 820 °C) intercalating with garnet - biotite gneiss. We newly estimated the peak P-T condition of Al-spinel and chlorite -bearing metaperidotite as 2.0 GPa and 780 - 990 °C. In the case of the NMR, the peak metamorphic condition of the crystalline schists is 1.4 GPa and 520 °C for a garnet galucophanite<sup>14</sup>. Jadeitites<sup>15</sup> as tectonic blocks in the serpentinite melange shows the peak condition of 1.5 GPa and 500 °C. Chromite from the HMR has the composition  $(\text{Mg}_{0.34}\text{Fe}^{2+}_{0.75}\text{Mn}_{0.02})(\text{Cr}_{0.81}\text{Al}_{0.06}\text{Fe}^{3+}_{0.04}\text{Si}_{0.05})_2\text{O}_4$ , whereas that from the NMR has similar composition  $(\text{Mg}_{0.33}\text{Fe}^{2+}_{0.65}\text{Mn}_{0.03})(\text{Cr}_{0.84}\text{Al}_{0.12}\text{Fe}^{3+}_{0.04})_2\text{O}_4$  in the core and Fe-rich composition  $(\text{Mg}_{0.06}\text{Fe}^{2+}_{0.89}\text{Zn}_{0.02}\text{Mn}_{0.03})(\text{Cr}_{0.85}\text{Al}_{0.12}\text{Fe}^{3+}_{0.04})_2\text{O}_4$  in the rim. Microdiamonds occur as *in situ* inclusions in chromite in both chromitites. They are 1 to 10  $\mu\text{m}$  in size in HMR chromite, and those in NMR chromite is much smaller, mostly  $<1 \mu\text{m}$  with small number of larger grains. In both chromitites microdiamonds occur in some cases as numerous aligned grains, making diamond - rich zones. Both microdiamonds are identified with Raman spectra. HMR microdiamonds show a broad peak at  $1333 \text{ cm}^{-1}$ . NMR microdiamond, also shows a broad peak at  $1331 \text{ cm}^{-1}$  with graphite peak at around  $1600 \text{ cm}^{-1}$ , suggesting partial graphitization. Both UHP chromitites will be deep subduction origin. HMR can be an eastern extension of the Dabie-Sulu UHP terrane in China, however, NMR is more problematic. No corresponding UHP terrane of ca. 80Ma is found around Kyushu. Our findings of UHP chromitites require reexamination of micro-tectonics in Kyushu, a peculiar location of an arc-arc junction at the continental margin.

References 1:Nishiyama et al., JpGU Meeting, S-MP46, 2014; 2: Nishiyama et al., JpGU Meeting, S-CG08, 2014; 3: Osanai, et al., Gondwana Res., 9, 152-166, 2006; 4: Omori and Isozaki, J.Geogr., 120, 40-51, 2011; 5: Nishiyama, Mem. Geol. Soc. Japan, 33, 237-257, 1989; 6: Kouchi, Y., J. Geogr., 120, 30-39, 2011; 7: Mori, et al., JMG, 29, 673-684, 2011; 8: Yui, et al., EJM., 24, 263-275, 2011; 9: Obata et al., Lithos, 32, 135-147, 1994; 10: Osanai et al., JMG., 16, 53-66, 1998; 11: Maki et al., JMPS, 99, 1-18, 2004; 12: Miyazaki, JMG., 22, 793-809, 2004; 13: Maki et al., JMG., 27, 107-124, 2009; 14: Moribe, Mc thesis, Kumamoto U.; 15: Shigeno et al., EJM, 24, 289-311, 2012

キーワード: マイクロダイヤモンド, クロミタイト, 超高压, 肥後変成岩, 西彼杵変成岩, 沈み込み

Keywords: microdiamond, chromitite, UHP, Higo metamorphic rocks, Nishisonogi metamorphic rocks, subduction

三波川変成帯別子地域より見いだされたザクロ石 Mn カルデラ型累帯構造の立体的  
記載とその成因  
3D imaging of the Mn-caldera shaped zoning of the garnet found from the Sanbagawa  
metamorphic belt and its origin.

吉田 健太<sup>1\*</sup>; 平島 崇男<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Kenta<sup>1\*</sup>; HIRAJIMA, Takao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

Garnets with a complex compositional zoning were found from the northern proximal area of the Western Iratsu body of the Sanbagawa metamorphic belt of the Besshi district, southwest Japan. The studied garnet shows incipient Mn-reverse (increasing) zoning part (defined as core) and subsequent Mn-bell shape (decreasing) zoning part (defined as mantle), which is almost identical to the “Mn-caldera shaped zoning” described by Banno et al. (2004) in the Asemigawa region of the central Shikoku. In order to describe the chemical characteristic sterically, X-ray chemical mapping were performed by each 0.2-0.3 mm depth step, for one very-coarse-grained garnet with ca. 11 mm in diameter. The result clearly shows that the core/mantle boundary has the highest Mn content with euhedral shape, and that the chemical composition continuously changes through the grain. Internal schistosity defined by sigmoidal inclusion arrays cross-cuts the core/mantle boundary. This fact also suggests the continuous growth of garnet from the central part to the outer part. In the same sample, garnets with Mn-bell shape type zoning are also observed, which are relatively fine-grained up to 5 mm. Raman barometry and thermodynamic modeling suggest the climax *P-T* conditions of the studied sample did not reach the eclogite facies, which are consistent with the conditions of the oligoclase-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic belt (610 °C and 1.0 GPa, Enami, 1994).

Contrary to the simple Mn-bell shape type zoning which grown up with progressive regional metamorphism, “Mn-caldera shaped zoning” could be generated from the crystal nucleation under oversaturated environment (Matsumoto and Kitamura, 2004). Such oversaturation is expected in a rapid increase of temperature. Recently, Aoya et al. (2013) proposed the eclogite nappe covering the large part of the Besshi district. However, the exact boundary between the eclogite nappe and lower grade surrounding rocks is still under the debate. The conjunction of the eclogite nappe and the lower-grade surrounding rocks are thought to have taken place near the peak metamorphic stage of the surrounding rocks (500-600 °C and ca. 1 GPa, Aoya et al., 2013). Mn-caldera shaped zoning garnet found in the Besshi district (this study; Xu et al., 1994) are both found from the northern proximal of the hypothesized eclogite nappe. Those Mn-caldera shaped zonings are possibly originated from the conjunction of the eclogite nappe and surrounding crystalline schist, and corresponding rapid heating. Such features of garnet can help to determine the boundary of the eclogite nappe in the Besshi district.

キーワード: ザクロ石, 三波川変成帯, 組成累帯構造, 非平衡結晶成長

Keywords: garnet, Sanbagawa metamorphic belt, compositional zoning, disequilibrium crystal growth

## モンゴル・アルタイ地域の温度・圧力経路と変成年代の広域的解析 Widespread analyses of pressure-temperature trajectory and timing in the Altai Range, Mongolia

中野 伸彦<sup>1\*</sup>; 小山内 康人<sup>1</sup>; 大和田 正明<sup>2</sup>; Satish-Kumar M.<sup>3</sup>; 足立 達朗<sup>1</sup>; Jargalan Sereenen<sup>4</sup>; 吉本 紋<sup>1</sup>; Kundyz Syeryekhan<sup>4</sup>; Boldbaatar Chimedtseie<sup>5</sup>  
NAKANO, Nobuhiko<sup>1\*</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>1</sup>; OWADA, Masaaki<sup>2</sup>; SATISH-KUMAR, M.<sup>3</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>1</sup>; JARGALAN, Sereenen<sup>4</sup>; YOSHIMOTO, Aya<sup>1</sup>; KUNDYZ, Syeryekhan<sup>4</sup>; BOLDBAATAR, Chimedtseie<sup>5</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>山口大学, <sup>3</sup>新潟大学, <sup>4</sup>モンゴル科学技術大学, <sup>5</sup>Mongolian Exploration Partners, LLC  
<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>Yamaguchi University, <sup>3</sup>Niigata University, <sup>4</sup>Mongolian University of Science and Technology, <sup>5</sup>Mongolian Exploration Partners, LLC

This study performed large-scale petrographical and geochronological investigation in the Altai Range, Mongolia distributed in the Central Asian Orogenic Belt, which is the typical subduction-accretion-collision orogeny on the Earth. Based on the petrographical observation, clockwise and anti-clockwise pressure-temperature trajectories were identified in whole of the studied area (400 km long). U-Th-Pb monazite dating yields c. 350 Ma and c. 260 Ma. Samples with clockwise pressure-temperature path, containing kyanite in garnet and sillimanite in the matrix, commonly have c. 350 Ma monazite in garnet and c. 260 Ma monazite in the matrix. In contrast, samples with anti-clockwise pressure-temperature path containing sillimanite in garnet and kyanite in the matrix have monazites showing (i) c. 350 Ma both in garnet and the matrix, (ii) c. 260 Ma both in garnet and the matrix, and (iii) c. 350 Ma in garnet and c. 260 Ma in the matrix. Ca zoning pattern in garnet shows either continuous or discontinuous zoning. Samples containing single monazite age cluster (either c. 350 Ma or c. 260 Ma) have continuously zoned garnet, in which samples with anti-clockwise pressure-temperature trajectory at both periods show Ca zoning increasing from core to rim or mantle, whereas some samples with unknown pressure-temperature path at both periods show opposite zoning. These features strongly suggest both clockwise and anti-clockwise evolutions occurred at both periods. Discontinuous Ca zoning in garnet is observed in samples that contain c. 350 Ma monazite inclusions in garnet and c. 260 Ma monazite grains in the matrix, and the zoning patterns show a decrease in Ca at the rim for samples with clockwise paths and an increase in Ca at the rim for those with counterclockwise paths. In some cases, c. 350 Ma monazite grains are included in the large garnet cores but c. 260 Ma monazite grains are found in the garnet rims as well as in the matrix. These rocks might be metamorphosed at c. 350 Ma, whereas they did not exhumate to the surface and have remained deep crustal level. Subsequent compression and decompression event formed garnet rim and monazite at c. 260 Ma, which should be caused by same tectonic regime to clockwise and anti-clockwise pressure-temperature path at the period. The presence of the regional-scale clockwise and anti-clockwise trajectories and their repetition during less than 100 My have never reported from any other orogenic belts in the world. Further studies may allow to realize the complex tectonic evolution of the Altai Range.

キーワード: 温度・圧力履歴, モナザイト U-Th-Pb 年代, アルタイ山脈, モンゴル, 中央アジア造山帯  
Keywords: P-T trajectory, U-Th-Pb monazite age, Altai Mountains, Mongolia, Central Asian Orogenic Belt



## スリランカの arrested チャーノックイト形成時のモード組成の時間変化 Temporal change of modal abundance of minerals during formation of arrested charnockite from Sri Lanka

山崎 由貴子<sup>1\*</sup>; 池田 剛<sup>1</sup>; 本吉 洋一<sup>2</sup>; 廣井 美邦<sup>3</sup>; プレーム バーナード<sup>4</sup>  
YAMASAKI, Yukiko<sup>1\*</sup>; IKEDA, Takeshi<sup>1</sup>; MOTOYOSHI, Yoichi<sup>2</sup>; HIROI, Yoshikuni<sup>3</sup>; PRAME, Bernard<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>国立極地研究所, <sup>3</sup>千葉大学, <sup>4</sup>スリランカ地質調査所

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Chiba University, <sup>4</sup>Geological Survey of Sri Lanka

スリランカ中央部には、普通角閃石-黒雲母片麻岩中に数十 cm スケールで局所的にチャーノックイトが産している。このようなタイプのチャーノックイトは arrested チャーノックイトと言われる。このタイプのチャーノックイトの成因としては、局所的な H<sub>2</sub>O 濃度の減少や酸素フュガシティーの減少が提案されている。これらはいずれも外部からの流体の流入や部分熔融によって引き起こされると考えられている (例えば Newton et al., 1980; Hiroi et al., 1990; Burton and O' Nions, 1990; Ravindra Kumar, 2004; Endo et al., 2012)。しかしチャーノックイト化に伴う鉱物の変化の時間的、空間的な発展については未だよくわかっていない。本研究では鉱物のモード変化を記載することにより、それらについて議論した。

片麻岩とチャーノックイトは、いずれも優白質部と優黒質部の層状構造を示し、両岩石の層状構造はほぼ連続する。優黒質部には片麻岩中では主に普通角閃石と黒雲母が存在し、チャーノックイト中にはそれらの鉱物と斜方輝石が存在する。優白質部には主に黒雲母と無色鉱物が産する。ただしチャーノックイト中の優白質部では黒雲母はほとんど存在しない。優黒質部のモードは、片麻岩中では系統的な変化は見られない。チャーノックイトに入ると普通角閃石は激減し、黒雲母は漸減、斜方輝石は緩やかに増加する。優白質部の黒雲母のモードは、片麻岩中でチャーノックイトへ向かって減少する。

斜方輝石は優黒質部の黒雲母と普通角閃石の分解が始める場所から出現し、優白質部の黒雲母の分解はそこよりも片麻岩側から生じている。従って優白質部の黒雲母の分解によって放出された元素は、優黒質部の黒雲母と普通角閃石が分解した場所まで移動し、そこで斜方輝石を生成したと考えられる。このことから普通角閃石の分解が先行し、それによって核形成した斜方輝石を成長させるよう、優白質部で分解した黒雲母の元素が移動した可能性が示唆される。同一鉱物間でありながら黒雲母の分解の場所が違うのは、優白質部の方が優黒質部よりも鉄に富んだ黒雲母が存在していることに起因すると考えられる。

### Reference

- Burton K. W. and O' Nions R. K., The timescale and mechanism of granulite formation at Kurunegala, Sri Lanka, *Contrib. Mineral. Petrol.* 106, 66-89 (1990)
- Endo et al., Phase equilibrium modeling of incipient charnockite formation in NKCFMASHTO and MnNCKFMASHTO systems: A case study from Rajapalayam, Madurai Block, southern India, *Geoscience Frontiers* 3, 801-811 (2012)
- Hiroi Y. et al., Arrested charnockite formation in Sri Lanka: Field and petrographical evidence for low-pressure conditions, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.* 4, 213-230 (1990)
- Newton R. C. et al., Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth, *Nature* 288, 45-50 (1980)
- Ravindra Kumar G. R., Mechanism of arrested charnockite formation at Nemmara, Palghat region, southern India, *Lithos* 75, 331-358 (2004)

キーワード: スリランカ, チャーノックイト, 普通角閃石-黒雲母片麻岩, 鉱物モード組成

Keywords: Sri Lanka, Charnockite, Hornblende-biotite gneiss, modal abundance

## 沈み込み帯の温度構造と水の循環—東北日本と西南日本の比較 Thermal structure and water transportation in subduction zones: a comparison between NE and SW Japan

石井 和彦<sup>1\*</sup>; 奥野 将史<sup>1</sup>  
ISHII, Kazuhiko<sup>1\*</sup>; OKUNO, Masashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪府立大学大学院理学系研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Sciences, Osaka Prefecture University

東北日本では古い太平洋プレートが高速で沈み込み、西南日本では若いフィリピン海プレートが低速で沈み込んでい  
る。この沈み込み条件の違いは、東北日本の方が西南日本より島弧火山活動が活発でプレート境界地震の下限が深いこ  
と、さらに西南日本のプレート境界で深部低周波微動が観測されていることなどに表れている。このような特徴から、東  
北日本と西南日本は、しばしば暖かい沈み込み帯と冷たい沈み込み帯の典型的な例として比較検討されている。本研究  
では、この2つの沈み込み帯の温度構造のほか、流体移動など沈み込み帯での物理的・化学的過程について、数値モデル  
を用いて検討した。この数値モデルでは、スラブの脱水、マントルウェッジの加水・脱水、マントルウェッジの部分溶  
融、メルトと H<sub>2</sub>O 流体の移動、温度・含水量・部分溶融度に依存したかんらん岩の流動則を考慮しており、スラブ年齢  
や速度などの沈み込み条件が、諸過程とくに水の輸送を通してどのように両地域の地震・火山活動に影響するのにか  
について議論する。

キーワード: 沈み込み帯, 東北日本と西南日本  
Keywords: subduction zones, NE Japan nad SW Japan

花崗岩体貫入時のマイクロブーディン構造形成中の応力一歪の関係：東ピルバラ、Mt.Edger 花崗岩複合岩体の場合  
Stress and strain history during the microboudinage for granite intrusion: Mt. Edger granite complex, East Pilbara

松村 太郎次郎<sup>1\*</sup>; 木村 希生<sup>2</sup>; 岡本 敦<sup>3</sup>; 増田 俊明<sup>2</sup>  
MATUMURA, Taroujirou<sup>1\*</sup>; KIMURA, Nozomi<sup>2</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>3</sup>; MASUDA, Toshiaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学創造科学技術大学院, <sup>2</sup> 静岡大学理学部, <sup>3</sup> 東北大学大学院環境科学研究科  
<sup>1</sup>Graduate school of science and Technology, Shizuoka University, <sup>2</sup>Institute of Geoscience, Shizuoka University, <sup>3</sup>Graduate school of Environmental studies, Tohoku University

Stress and strain analysis is essential to improving the understanding of deformation process. Microboudinaged columnar minerals can be used as an indicator of stress and strain during the microboudinage for quartzose and calcareous metamorphic tectonites. In this presentation, we discuss the stress and strain history during the microboudinage deduced by the microboudin method with a collaboration of the strain reversal method.

We collected samples of metachert from the Archean Warrawoona greenstone belt around Mt. Edger granite complex, East Pilbara, Western Australia, and identified microboudinaged tourmaline grains embedded within quartz matrix in 10 samples. The result revealed that the samples experienced extensional strain at least -0.56 and differential stress in the range from 3.9 to 11.9 MPa. We obtained stress-strain curves which show increase in differential stress with increasing inverse natural strain ( $\epsilon_{inv}$ ). The frequency distribution of interboudine gaps between separated grains with respect to  $\epsilon_{inv}$  for boudinaged tourmaline grains shows that end of microboudinage occurred immediately after the peak frequency of fracturing. This occurrence commonly appeared in all the 10 samples. These results provided us with keys to discuss a stress-strain history during the microboudinage in relation to evolution of the granite complex. The spectacular implication would be a drop or relaxation in increased differential stress at the end of the microboudinage.

キーワード: マイクロブーディン構造, 応力, 歪, 花崗岩複合岩体, 始生代  
Keywords: microboudin structure, stress, strain, granite complex, Archean

## 鉱物分解反応による拡散累帯構造形成の時間スケール Time scale for formation of diffusion zoning in response to breakdown reaction

池田 剛<sup>1\*</sup>  
IKEDA, Takeshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>九州大学  
<sup>1</sup>Kyushu University

高変成度の変成岩中のザクロ石は Mn や Fe が周縁部で増加する累帯構造を示すことが多い。この累帯構造は後退変成作用時のザクロ石分解反応に伴う拡散によってできたと考えられている。この累帯構造の幅は、結晶内部への拡散距離と、分解による界面移動距離によって記述される。本研究では、予察的にこれらの距離を時間と界面移動速度の関数として表現した。この式を用いると、いくつかの変成帯にみられる幅 0.04?0.1mm の累帯構造の形成時間が 1?数百万年と見積もられた。累帯構造形成中に界面が局所平衡を保った試料に適用すれば、冷却速度を見積もることができる可能性がある。

キーワード: 拡散累帯構造, 継続時間, 冷却速度  
Keywords: diffusion zoning, duration time, cooling rate



## 四国における始新統および中新統中の結晶片岩礫の統合的な放射年代測定 Integrated radiometric dating of schist clasts from the Eocene and Miocene conglomerates in Shikoku

飯塚 亮太<sup>1\*</sup>; 高木 秀雄<sup>1</sup>; 本田 恵美<sup>1</sup>; 岩野 英樹<sup>2</sup>; 石田 章純<sup>3</sup>; 佐野 有司<sup>3</sup>  
IIZUKA, Ryota<sup>1\*</sup>; TAKAGI, Hideo<sup>1</sup>; HONDA, Emi<sup>1</sup>; IWANO, Hideki<sup>2</sup>; ISHIDA, Akizumi<sup>3</sup>; SANO, Yuji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 早稲田大学, <sup>2</sup> ㈱京都フィッション・トラック, <sup>3</sup> 東京大学大気海洋研究所  
<sup>1</sup>Waseda University, <sup>2</sup>Kyoto Fission-Track Co. Ltd., <sup>3</sup>AORI, the University of Tokyo

三波川変成帯が削剥レベルに達した年代, すなわち三波川変成岩礫を含む地層の年代は, 礫そのものの放射年代とともに, 三波川変成岩の上昇履歴を考察する上で重要な制約条件を与える. 筆者らは, 四国の古第三系と新第三系に含まれる三波川帯由来と考えられている結晶片岩礫を対象とし, その統合的な放射年代測定を実施してきた. その地層は, 中新世 (17Ma 前後) であることが明らかにされている久万層群の基底部の古岩屋層と, 始新世の渦鞭毛藻化石が報告されているひわだ峠層 (成田ほか, 1999) である. さらに, 山崎ほか (1995) により始新世の放散虫化石が報告されている, 四国四万十帯大山岬層も対象とした. すでに, 筆者らはひわだ峠層と古岩屋層の結晶片岩礫について, K-Ar 年代およびフィッション・トラック年代 (以下, FT 年代) を報告した (高木・向坂, 2012; 高木ほか, 2013).

そこで, 今回新たに K-Ar 年代および FT 年代測定に用いたひわだ峠層と古岩屋層の礫を対象として, 東大大気海洋研の NanoSIMS 50 を用いてジルコンの U-Pb 年代を測定した. 今回分析したジルコンは砕屑性ジルコンと考えられることから, 最も若いジルコンの U-Pb 年代は, 結晶片岩の原岩の堆積年代に近似できる. 未だ予察的段階であることから, 最も若いピークの年代値を用いると, 3 試料とも 110 Ma 前後という結果となった. 年代値の詳細は, 発表時に報告する予定である.

大山岬層中の砂質片岩礫 2 試料から得られたジルコンの FT 年代は,  $67.3 \pm 9.0$  Ma,  $68.4 \pm 8.2$  Ma という値が得られた. 今回得られた値は, 吉倉ほか (1991) により報告されているフェンジャイトの K-Ar 年代 (78.2~71.4Ma) に比べ, やや若いものの誤差範囲で一致した. また, 大山岬層中に白亜紀後期を示す放散虫の報告 (平ほか, 1980) もあったが, ジルコンの FT 年代を見る限り, 古第三紀である可能性が高く, 山崎ほか (1995) に示された放散虫年代と調和的である.

これらの結果 (Table 1) より, ひわだ峠層と大山岬層中のフェンジャイトの K-Ar 年代とジルコンの FT 年代は誤差範囲で一致しているため, 両者の年代差が明瞭な中新世久万層群中の礫に比べて, それらの上昇速度は速かったものと想定される.

### 文献

- 成田ほか, 1999, 地質雑, 105, 305-308.  
平ほか, 1980, 四万十帯の地質学と古生物学, 249-264.  
高木・向坂, 2012, 日本地質学会第 119 年学術大会演旨, p.93  
高木ほか, 2013, 日本地質学会第 120 年学術大会演旨, p.49.  
山崎ほか, 1995, 愛媛大学教育学部紀要, 15, 31-36.  
吉倉ほか, 1991, 日本地質学会第 98 年学術大会, p.434.

キーワード: 三波川帯, 結晶片岩, 放射年代測定  
Keywords: Sanbagawa belt, schist, radiometric dating

SMP46-P08

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 28 日 18:15-19:30

Table1. Phengite K-Ar and zircon fission track ages of schist clasts from the Miocene and Eocene strata in Shikoku.

Series	Formation Name	Sample	Phengite K-Ar age (Ma)	Zircon FT age (Ma)
Miocene	Kuma Group Furuiwaya Formation	32204-2 psamm.sch.	81.5 ± 1.3	68.7 ± 6.0
		112101-2 pel.sch.	83.5 ± 1.3	64.9 ± 5.8
Eocene	Hiwadatoge Formation	2003-8 psamm.sch.	86.8 ± 1.3	85.2 ± 7.7
	Oyamamisaki Formation	1-B psamm.sch.	78.2 - 71.4	67.3 ± 9.0
		1-F psamm.sch.	(Yoshikura et al., 1991)	68.4 ± 8.2

黒瀬川帯に産するペルム紀後期の冷たい沈み込みシステムにおける PrP 相-LBS 相への  
の変成過程  
The metamorphic evolution from PrP to LBS facies in a late Paleozoic cold subduction  
system in Kurosegawa belt

佐藤 永太郎<sup>1\*</sup>; 平島 崇男<sup>1</sup>  
SATO, Eitaro<sup>1\*</sup>; HIRAJIMA, Takao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

**Introduction:** Recent progress of thermal modeling and thermodynamic calculation can help the general understanding of the thermal structure of subducting plate and the total movement of H<sub>2</sub>O stored in high-pressure type metamorphic rocks from the trench to the upper mantle depth in various subduction settings (e.g., Peacock & Wang, 1999; Hacker et al., 2003). For example, Peacock (2009) indicated that the oceanic plate in the Philippine Sea plate subducting below the Kii Peninsula would suffer the cold HP/LT type metamorphism represented by zeolite facies, prehnite-pumpellyite facies, pumpellyite-actinolite facies, lawsonite-blueschist facies to jadeite-lawsonite-blueschist to 2GPa. However, the natural example recording abovementioned progressive metamorphic evolution has not been recognized yet.

Recently prehnite-pumpellyite facies and lawsonite-blueschist facies units have been recognized in the Otao unit of Kurosegawa belt in Yatsushiro area, Kyushu, Japan (Kamimura et al., 2012). However, the relationship of two metamorphic units has not been verified yet.

In this paper, we propose the progressive change of metamorphic grade from the prehnite-pumpellyite facies to lawsonite-blueschist facies based on petrography and thermodynamic phase analysis in metabasite system.

**Petrography and Mineralogy:** We confirmed that the prehnite-pumpellyite facies assemblage is predominant in the Tobiishi subunit of (Kamimura et al., 2012), but we newly found pumpellyite-actinolite facies from the western end of this subunit.

In the lawsonite-blueschist facies unit, Hakoishi-subunit of (Kamimura et al., 2012), located to the west of the Tobiishi-subunit, following mineral assemblage with excess chlorite, quartz, albite and phengite are systematically distributed from the east to the west in the subunit:

lawsonite + pumpellyite + aegirine-augite, pumpellyite + Na-amphibole, lawsonite + pumpellyite + Na-amphibole, lawsonite + Na-amphibole + aegirine-augite.

The compositions of sodic pyroxene, pumpellyite and Na-amphibole also show the following systematic trend westwards in the subunit; jadeite component of sodic pyroxene generally increases from X<sub>Jd</sub>=0.12 to X<sub>Jd</sub>=0.50 with X<sub>Aeg</sub>= up to 0.5. Al content of pumpellyite increases from 3.7 to 4.6 p.f.u. for O=24.5 Fe<sub>3+</sub>/(Al+Fe<sub>3+</sub>) in Na-amphibole decreases from 0.8 (riebeckite) to 0.15 (glaucophane).

**Thermodynamic phase analysis:** To evaluate stability relationship among abovementioned mineral assemblages, the phase diagram was constructed in the NCFMASH system with PERPLE\_X software package (Connolly, 2005) for 1-10 kbar and 100-400 °C. The considered minerals are stilbite, laumontite, prehnite, pumpellyite, ferro pumpellyite, tremolite, ferro tremolite, diopside, hednbergite, clinocllore, daphnite, lawsonite, glaucophane, ferro glaucophane, clinzoisite and albite with excess, quartz and water. As the first order approximation, solid solution in each mineral was ignored. The newly constructed phase diagram predicts following representative mineral assemblages appear with the increase of the pressure along the high HP/LT path.

lawsonite + pumpellyite + clinopyroxene, pumpellyite + glaucophane, lawsonite + pumpellyite + glaucophane, lawsonite + glaucophane + clinopyroxene.

This metamorphic evolution in the model system is coincident well with the natural observation in the Hakoishi subunits.

**Conclusion:** Mineral assemblages observed in metabasites of the Tobiishi and Hakoishi subunits and the newly constructed petrogenetic grid suggest the metamorphic grade increases from prehnite-pumpellyite facies to lawsonite-blueschist facies westward ca. 20km in the Otao unit of Kurosegawa belt. The westward increase of Al content in pumpellyite, Na-amphibole, and Na-clinopyroxene also suggest the metamorphic grade increases westward. Thus, this area would become a type locality of a cold subduction system as proposed by the Peacock (2009)'s thermal modeling.

キーワード: ローソン石, 青色片岩, 低温高压変成岩, 黒瀬川帯, 岩石成因論的グリッド, 冷たい沈み込みシステム

---

SMP46-P09

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 28 日 18:15-19:30

Keywords: lawsonite, blueschist, HP/LT type metamorphic rocks, Kurosegawa belt, petrogenetic grid, cold subduction system



## 高温変成作用によるジルコンの形態変化 - 高温低圧型領家変成帯木曾地域を例に - Morphological change of zircon under high temperature metamorphism: Example of the Kiso Ryoke metamorphic rocks

猪川 千晶<sup>1\*</sup>; 本吉 洋一<sup>2</sup>; 外田 智千<sup>2</sup>; 堀江 憲治<sup>2</sup>  
IKAWA, Chiaki<sup>1\*</sup>; MOTOYOSHI, Yoichi<sup>2</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>2</sup>; HORIE, Kenji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学極域科学専攻, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>Department of Polar Science, the Graduate University for Advanced Studies, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

ジルコンは岩石の年代を求める上での重要な鉱物である。しかし、ジルコンは変成作用の様々なステージで成長、あるいは再結晶し、それぞれのタイミングの U-Pb 年代を記録している筈である。変成作用の各ステージでどのようにジルコンが成長するのか、まだ十分には分かっていない。Williams (2001) は、オーストラリア Cooma 岩体において、変成度の違いによるジルコンの形態変化について検討し、変成度の低い岩石中では碎屑性ジルコンが保持され、変成度の高い岩石で新しくジルコンが形成あるいはオーバーグロースしていることを示した。Kawakami et al (2013) では、片岩からミグマタイトに遷移する領家帯青山地域の上部角閃岩相からグラニュライト相でのジルコンの形態変化を調べた。そこで、ジルコンの再結晶にはメルトが関与しているとしている。このように、ジルコンは変成度により形態が異なる。そのため、ジルコンの年代値を解釈する上で、変成作用によるジルコンの形態変化を調べることは重要である。

そこで、本研究では、非変成（美濃帯）からミグマタイト帯までほぼ連続的に変成度の変化が見られる中部地方領家帯木曾地域において、変成度ごとのジルコンの形態変化を調べた。領家帯木曾地域は中央アルプス木曾駒ヶ岳の北東に位置する、南北約 43km、東西約 22km の地域である。この地域は、広域変成岩（変成堆積岩・石英片岩・塩基性片岩・炭酸塩岩など）と非変成岩が広く出現し、白亜紀中期に変成作用を受けたとされている。Morikiyo (1984) は、鉱物組み合わせにより 9 つのゾーン（I から VII）に分類した。

本研究では、ゾーン I からゾーン VII までの全域から合計 46 のサンプルを採取した。顕微鏡観察を行った結果、鉱物組み合わせは以下ようになっていた：ゾーン II で黒雲母出現、ゾーン IIIa でアルバイト消滅、ゾーン IIIb で緑泥石消滅、ゾーン VIa で珪線石出現。

SEM と光学顕微鏡でのジルコン観察に基づき、ジルコンの形態をゾーン I-II、ゾーン IIIa-V、ゾーン VIa-VII の 3 つのグループに分類した。

ゾーン I-II: 光学顕微鏡下では様々な色（紫、淡いピンク、無色）や大きさ（40-220 μm）のものが認められ、またそれらは明瞭な自形面を示す。また、SEM による観察では結晶表面に摩耗の跡やひびが観察される。このような特徴から、おそらく広い範囲から供給された碎屑性由来のジルコンであると考えられる。

ゾーン IIIa-V: このゾーンのジルコン結晶表面は溶けたような穴があき、ざらざらしているものが多い。ゾーン I-II とは異なり、面全体がざらざらしており、ひびは見られない。これは、変成作用を受けて溶解あるいは再結晶したためと考えられる。しかし、1 つの粒子において、すべての表面が溶けているとは限らず、溶けていない結晶面を保持する部分も存在する。この溶けていない面は、ゾーン I-II と同じ碎屑性の結晶面かゾーン VIa-VII と同様にさらに変成作用を受けて再結晶がすすんでなめらかになったものと考えられる。また、BSE 観察では新しいジルコン結晶の成長はほとんど見られないが、一部に例外的に新しい成長がみられるものもある。新しく成長したジルコンは比較的小さく約 30 μm である。

ゾーン VIa-VII: ゾーン IIIa-V と異なり、溶けているようなざらざらはなく、表面はなめらかである。しかし、表面にはゆるやかな凹凸があり、IIIa-V のでこぼこの面がなめらかに固まったようである。変成作用によってジルコン結晶の成長に伴って、ゾーン IIIa-V で見られるようなでこぼこの面の外側に結晶がオーバーグロースしたものではないかと考えられる。一番温度の高いゾーン VII では、表面の凹凸がほとんど見られず、なめらかなジルコン結晶が発達する。

このように、木曾地域領家帯変成岩中のジルコンは、低変成ゾーンに卓越する碎屑性ジルコンから、変成度の上昇に伴って表面がざらざらとした外形を持つジルコンとなり、さらに高成度になるとざらざらの面がなめらかな面になっていくという変化がみられた。また、新しいジルコンの成長も観察できる、という結果が得られた。

キーワード: ジルコン形態, 広域変成作用, 領家帯

Keywords: zircon morphology, regional metamorphism, Ryoke belt

## 東南極セール・ロンダーネ山地、メーフィエル地域に産する泥質変成岩のザクロ石の正累帯構造 P-T estimates of a metapelite containing garnet zoning from Mefjell, Sr Rondane Mountain, East Antarctica

坪川 祐美子<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>1</sup>; 市来 孝志<sup>1</sup>; 河上 哲生<sup>2</sup>; M. サティシュ・クマール<sup>3</sup>; 土屋 範芳<sup>4</sup>; ジェフ グランサム<sup>5</sup>  
TSUBOKAWA, Yumiko<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>1</sup>; ICHIKI, Takashi<sup>1</sup>; KAWAKAMI, Tetsuo<sup>2</sup>; MADHUSOODHAN, Satishkumar<sup>3</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>4</sup>; GEOFF, Grantham<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学 (環境情報), <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 新潟大学, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 南アフリカ地質調査所

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Niigata University, <sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>Council for geoscience, South Africa

東南極セール・ロンダーネ山地は東西 Gondwana 大陸の衝突帯内部に位置していたと考えられ (Jacobs et al., 2003), Gondwana 超大陸の集合過程を解析するための鍵となる地域として注目されてきた。同地域は角閃岩相~グラニュライト相の高度変成岩類およびそれらに貫入する火成岩類から構成され (Osanai et al., 2013), 約 640-600Ma と約 550-500Ma において主な変成作用を被っている (e.g. Shiraiishi et al., 2008)。近年, 各地域での詳細な変成温度-圧力-時間履歴の再検討が行われると, バルヒェン山やアウストカンパーネ北部からは時計回りの経路が報告される一方で (e.g. Nakano et al., 2011), ブラットニーパネやメニーパ東部からは反時計回りの経路が見つかり (e.g. Adachi et al., 2013), 地域ごとに異なる変成経路を経ていることが明らかになった。しかしながら, メーフィエル地域を含む山地南西部においては, ピーク変成条件に達する以前の温度-圧力経路についてこれまで十分な証拠が得られていない。

この度, 同山地メーフィエル北西部に産する泥質変成岩から, 正の組成累帯構造を保持するザクロ石が見つかったので報告する。本研究では, この十字石を含むザクロ石-珪線石-黒雲母片麻岩を記載し, ザクロ石中の包有物鉱物を用いて地質温度圧力計を適用しザクロ石の変成条件を見積もった。用いた地質温度圧力計はザクロ石-イルメナイト地質温度計 (Pownceby et al., 1987), ザクロ石-十字石地質温度計 (Fed'kin & Yakovleva, 1993) およびザクロ石-アルミノ珪酸塩鉱物-石英-斜長石圧力計 (Spear et al., 1993) である。

この泥質変成岩は主としてザクロ石, 黒雲母, 珪線石, 石英, 斜長石で構成され, 少量のカリ長石, 十字石, 燐灰石, モナズ石, イルメナイト, 磁鉄鉱を含む。正の累帯構造を示すザクロ石は直径約 12mm の巨大な斑状変晶として存在し, 肉眼では中心部は赤桃色, 縁部は淡桃色を示す。ザクロ石の化学組成は典型的な Alm 成分に富む組成を示し, Fe, Mg, Mn, Ca による組成累帯構造が見られた。このうち累帯構造が最も顕著に認められた Sps 成分は, 肉眼で赤桃色を示す中心部で高く, 淡桃色の周辺部で低い。したがってこの部分をコア部とリム部の境界とした。この区分に従うと, ザクロ石はコア部 (Alm<sub>67</sub>Sps<sub>15</sub>Prp<sub>12</sub>Grs<sub>6</sub>) からリム部 (Alm<sub>74</sub>Sps<sub>2</sub>Prp<sub>20</sub>Grs<sub>4</sub>) にかけて, Alm 成分と Prp 成分の増加および Sps 成分の減少が見られ, Grs 成分は全体として一様に低い。リム部では最外縁部 (Alm<sub>73</sub>Sps<sub>11</sub>Prp<sub>20</sub>Grs<sub>6</sub>) に向かって再び Sps 成分が増加する。ザクロ石の包有物には十字石, 珪線石, 黒雲母, 緑泥石, 斜長石, カリ長石, 石英, 燐灰石, イルメナイト, およびそれらの複数鉱物からなる集合体が見られる。ただし, コア部の珪線石は極微細な複数集合体になっており, 周囲のザクロ石には弱い放射状クラックが発達している。こうした珪線石は藍晶石から転移したものかもしれない。

ザクロ石のコア部からリム部にかけて包有されるイルメナイトの組成を用いて見積もった変成温度条件は, コア部において約 350-400 °C, リム部において約 650-700 °C であった。コア部における見積もりの結果は, Pownceby et al. (1991) の地質温度計作成時の実験条件 (温度 600-1000 °C) より低く単純に比較することはできないが, 温度計の誤差 ±50 °C を考慮してもザクロ石のコア部からリム部に向かって温度が増加する傾向が保存されている。また, リム部に包有される十字石の組成から見積もった変成温度条件は約 630-700 °C を示し, 同じくリム部に包有される斜長石の組成を用いて見積もった変成圧力条件は温度 650 °C のときに約 7.2kbar であった。温度計の誤差から推定される圧力計の誤差は ±0.9kbar である。したがって本試料中のザクロ石は, コア部からリム部にかけて約 350-400 °C から約 630-700 °C, 約 7.2±0.9kbar への温度上昇に伴い成長したことが示唆される。

キーワード: 東南極, セール・ロンダーネ山地, 温度圧力条件

Keywords: East Antarctica, Sør Rondane Mountain, pressure and temperature conditions

## 東ネパール MCT ゾーンにおける変成同時の流体流入と優白質花崗岩の成因論 Syn-metamorphic fluid infiltration and petrogenesis of leucogranites in the MCT zone in Eastern Nepal

河上 哲生<sup>1\*</sup>; 酒井 治孝<sup>1</sup>; 佐藤 活志<sup>1</sup>  
KAWAKAMI, Tetsuo<sup>1\*</sup>; SAKAI, Harutaka<sup>1</sup>; SATO, Katsushi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

大陸衝突帯における変成作用同時の流体活動は、優白質花崗岩の成因や流体・メルトを介した物質移動の観点から非常に重要である。電気石は大陸地殻に普通に産出する、広い安定領域を持つ副成分鉱物であり [1]、泥質変成岩中の重要なホウ素の貯蔵庫鉱物である [2, 3, 4]。貯蔵庫鉱物の存在しない環境下では、ホウ素はインコンパティブルに振る舞い、流体に入って移動する。しかし温度-圧力-組成条件が整うと、電気石や他のホウ珪酸塩鉱物として岩石-流体相互作用の場で固定される。従って、電気石はホウ素を含む流体のトレーサーに適している [4]。電気石は極性結晶であるので、それぞれの極が異なる陽イオン濃度をもち、その極性は 650 °C 程度まで存在する。従って、電気石の異なる極間の元素分配は地質温度計として用いることが出来る [2, 5]。

私たちは、ネパール東部ダンクッタ周辺の MCT ゾーンにおける石英脈と電気石脈の産状を調査した。本地域には泥質片岩が広く分布し、ドロマイト岩やコーツァイト、マフィック岩が挟在する。変成度は藍晶石帯から十字石帯、ザクロ石帯へと、南に向かって MCT からの距離が増加するほど低くなる。泥質片岩には石英脈が多産するが、MCT の活動に伴う南フェルゲンツの延性変形を受けてレンズ状の形状を示す。藍晶石帯では石英脈中に mm から cm サイズの藍晶石が、少量の斜長石とともに含まれる。ザクロ石と藍晶石は石英脈の直近でのみ粗粒であり、藍晶石は石英脈の周囲にのみ産する傾向がある。このことは、石英脈を形成した流体の活動が、藍晶石帯の変成ピーク前後に起き、Si、Al、Na、Ca が流体中に含まれ運搬されていたことを示す。この流体活動の温度圧力条件は Grt-Ky-Pl-Bt-Qtz 組み合わせを用い、約 8kbar、600 °C と暫定的に見積もられた。十字石帯やザクロ石帯においても同様に、石英脈の直近でザクロ石が粗粒化する。従って、このような石英脈は、変成作用の昇温期ならびにピーク変成時に、各変成分帯に対し、系外から流入した流体の証拠である。

MCT ゾーンの泥質片岩中には、局所的に非常に大量の電気石が産することがある。こうした電気石は、白雲母に富むアルミナスな層に選択的に産するが、これは外部からのホウ素の流入に伴い、電気石の形成に適した全岩組成の層に電気石が形成されたものと考えられる。昇温変成を示す組成累帯構造をもつザクロ石中に大量の電気石が包有されることから、このような含ホウ素流体の流入は昇温変成期から起きていたと考えられる。さらに、片理面を切って貫入する電気石脈が存在することから、ピーク変成以降も含ホウ素流体の流入は続いた。電気石の極間の Ca/Na 分配 [5] から、電気石脈の形成温度は約 530-590 °C と推定される。このような流体の起源は、各変成分帯の構造的な下位に存在する、より低変成度の変堆積岩類かもしれない。なぜなら、こうした変堆積岩中での脱水反応により、水だけでなくホウ素も供給可能だからである。

MCT ゾーンにおける、昇温変成期から変成ピーク直後までにおよぶ含ホウ素流体の流入は、形成場や成因論に関する議論が続くハイヒマラヤやテチスヒマラヤの優白質花崗岩の成因 [6] にとって重要であり、本研究の観察は流体存在下での溶融 [7] を支持する。MCT 直上のハイヒマラヤのミグマタイト中に産する含電気石優白質花崗岩脈は、こうした含ホウ素流体流入に伴う、MCT 近辺での溶融の産物かもしれない。

引用文献： [1] van Hinsberg et al, 2011, *Can Min*, 49, 1-16. [2] Henry & Dutrow, 1996, *Rev Min*, 33, 503-557. [3] Sperlich et al, 1996, *Am Min*, 81, 1222-1236. [4] Kawakami, 2004, *TRSE*, 95, 111-123. [5] van Hinsberg & Schumacher, 2007, *CMP*, 153, 289-301. [6] Guo & Wilson, 2012, *GR*, 22, 360-376. [7] Le Fort, 1981, *JGR*, 86, 10545-10568.

キーワード: 流体, 電気石, ホウ素, 逆転変成作用, 部分溶融, 大陸衝突帯

Keywords: fluid, tourmaline, boron, inverted metamorphism, partial melting, continental collision zone



## マダガスカル共和国中央東部マサラ岩体, アンタナナリボ岩体, ベツィミサラカ岩体に産する変成岩の年代学的特徴 Geochronology of the metamorphic rocks from the Masora, Antananarivo and Betsimisaraka domains, east-central Madagascar

市来 孝志<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>1</sup>; 小山内 康人<sup>2</sup>; 中野 伸彦<sup>2</sup>; 足立 達朗<sup>2</sup>  
ICHIKI, Takashi<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>1</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>2</sup>; NAKANO, Nobuhiko<sup>2</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学 環境情報, <sup>2</sup> 九州大学 比較社会文化  
<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>Kyushu University

マダガスカル共和国は Gondwana 超大陸の復元図においてその中央部に位置する (e.g. Jacobs and Thomas, 2004). そのため Gondwana 超大陸の形成プロセスを理解する上で重要な地域の一つである. しかしながら, マダガスカル共和国の位置する Gondwana 超大陸中央部が, 北部と同様に若い島弧地殻の衝突縫合によって形成したのか (Stern, 1994), あるいは古い大陸地殻の再変動を被ったのか議論の余地がある (e.g. Collins and Pisarevsky, 2005; Collins, 2006; Tucker et al., 2012). そこで本研究では, マダガスカル共和国中央東部を構成する地質体の年代学的特徴を明らかにするために, 変成火成岩についてジルコンの LA-ICP-MS U-Pb 法を用いて原岩の形成年代を推定し, 変成堆積岩についてモナズ石の EPMA U-Th-Pb 法を用いて変成年代を推定した.

マダガスカル共和国中央東部は地質と年代に基づき, 東からマサラ岩体, ベツィミサラカ岩体およびアンタナナリボ岩体に区分される (Collins, 2006; Tucker et al., 2011). マサラ岩体は主に珪長質変成岩から構成され, 少量の変成堆積岩を含む. 2 種類の変成堆積岩中のモナズ石から約 5.2-5.1 億年前の年代が得られる. この年代は U-Pb ジルコン法により変成花崗岩質岩から得られている約 5.3-5.1 億年前の変成年代 (Smith et al., 2008) と珪岩について得られている約 5.4-5.2 億年前の変成年代 (De Waele et al., 2011) とほぼ一致する. また珪長質変成岩は約 33 億年前の火成活動年代を示す. これはミグマタイト化した珪長質片麻岩から U-Pb ジルコン法により得られている約 33 億年前の年代 (Tucker et al., 2011b) と一致する.

アンタナナリボ岩体は主に珪長質変成岩から構成され, 少量の変成堆積岩を含む. アンタナナリボ岩体は変成温度圧力条件と地質構造により東部と西部に区分される. 岩体東部は西部と変成度の勾配に沿って, 低角の正断層センスを示す塑性剪断帯によって境される. 岩体東部に産する変成堆積岩中のモナズ石からは約 5.0-4.8 億年前の年代が得られる. また西部に産する 2 種類の変成堆積岩中のモナズ石からは約 5.4-5.0 億年前 (Martelat et al., 2000) と約 6.3-5.4 億年前 (Jöns and Schenk, 2011) の変成年代が報告されており, また変成花崗岩中のモナズ石からは約 5.6-5.4 億年前 (Grégoire et al., 2009) の変成年代が報告されている. したがって, 岩体東部の変成年代は西部よりもやや若い年代である. 珪長質変成岩は地球化学的に 2 種類の異なる特徴を示す. 岩体東部に産するものからは約 27 億年前の年代が, 岩体西部に産するものからは約 7.6 億年前の火成活動年代を示すものが得られる. 中性変成岩は岩体西部に産しており, U-Pb ジルコン法に基づき約 5.5 億年前の火成活動年代を示す.

ベツィミサラカ岩体は主に変成堆積岩で構成される. 変成堆積岩中のモナズ石から約 5.0 億年前の年代が得られる. これは U-Pb ジルコン法に基づき珪岩より報告されている約 5.5-5.2 億年前の変成年代 (Tucker et al., 2011) と, 変成堆積岩中のジルコン粒子のリムより報告されている約 5.5 億年前の変成年代 (Collins et al., 2003) よりも若い年代である.

これらの結果から, マダガスカル共和国中央東部は約 5.5-5.0 億年前に変成作用を被っている. その中でアンタナナリボ岩体東部とベツィミサラカ岩体はこれらの中で最も若い約 5.0 億年前の変成作用を被っている. またアンタナナリボ岩体ではこれまで最も古い火成活動年代は約 25 億年前と考えられてきた (e.g. Kröner et al., 2000). 岩体東部にて見いだされた約 27 億年前の火成活動年代は同岩体中における新しい報告であり, 報告されている中で最も古い火成活動年代である. これらのことからアンタナナリボ岩体東部は西部よりも古い年代を示す地域であり, さらにアンタナナリボ岩体の中でも特に古い地質体であると考えられる. したがって, マサラ岩体, ベツィミサラカ岩体とアンタナナリボ岩体西部との間に, 年代の遷移する地質体が存在する可能性が高い. このような地質体の関係は, 近年インド南部太古代クラトンにより報告されており (Peucat et al., 2013), 太古代からのインドとマダガスカル連続性を検討する上で重要な証拠となると考えられる.

キーワード: Gondwana 超大陸, マダガスカル中央東部, LA-ICP-MS U-Pb ジルコン年代, EPMA モナズ石年代

Keywords: Gondwana supercontinent, east-central Madagascar, LA-ICP-MS U-Pb zircon dating, EPMA monazite dating



## カミラ角閃岩マイロナイトの変形微細構造とその形成温度 Deformation microstructures of a Kamila amphibolite mylonite and their formative temperatures

新井 智之<sup>1\*</sup>; 金川 久一<sup>1</sup>; 芳野 極<sup>2</sup>  
ARAI, Tomoyuki<sup>1\*</sup>; KANAGAWA, Kyuichi<sup>1</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>2</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

パキスタン北部に分布するコヒスタン複合岩体は白亜紀の島弧地殻起源と考えられており、カミラ角閃岩体はその下部地殻を構成していたと考えられている。ここでは、カミラ角閃岩起源のマイロナイト試料の変形微細構造とその形成温度について報告する。

解析したカミラ角閃岩マイロナイト試料は、層厚 100  $\mu\text{m}$ ~1 mm の、ホルンブレンド+輝石層、斜長石層、およびホルンブレンド+斜長石+石英層の組成層構造を示し、層厚約 3 mm のざくろ石+石英+斜長石層が挟在している。この試料には、組成層構造により規定される C 面構造、C 面に時計回りに斜交したレンズ状斜長石粒子集合体により規定される S 面構造、および C 面に反時計回りに低角に斜交する C' 面構造の、複合面構造が発達しており、これらの複合面構造は上盤南方移動の剪断センスを示す。

ホルンブレンド+輝石層は主として粒径 30  $\mu\text{m}$  程度のホルンブレンドから成り、輝石は粒径 200  $\mu\text{m}$  程度のポーフィロクラストとして散在している。ホルンブレンドには、(100) が面構造に平行で [001] が線構造に平行に配列する、結晶方位配列が発達している。斜方輝石ポーフィロクラストは面構造に平行な方向へ伸長し、上盤南方移動の剪断センスを示す、主として細粒ホルンブレンドから成る非対称のテイルを伴っている。また、輝石ポーフィロクラスト周囲には粒径 10  $\mu\text{m}$  程度の細粒なホルンブレンドと石英が分布しており、輝石の分解反応 (斜方輝石+単斜輝石+ $\text{H}_2\text{O}$ =ホルンブレンド+石英) を示唆している。この反応はグラニュライト相から角閃岩相への後退変成反応を意味する。

斜長石層は粒径 100  $\mu\text{m}$  程度の動的再結晶斜長石粒子 ( $\text{An}_{47-54}$ ) から成る。レンズ状に伸長した領域は、元は斜長石ポーフィロクラストであったと考えられる。斜長石粒子は多角形状の粒子が多いが、やや伸長した粒子が面構造に対して時計回りに斜交する、弱い斜交面構造を呈している。この斜交面構造も上盤南方移動の剪断センスを示す。また斜長石には、{131} と <1-12> がそれぞれ面構造と線構造に対して時計回りに約 20° 斜交する、結晶方位配列が発達している。斜長石の {131} および <1-12> の配列方向は S 面構造とほぼ平行になっており、動的再結晶時のすべり系 {131}<1-12> の卓越を示唆している。

斜方輝石と単斜輝石のポーフィロクラストの化学組成に輝石温度計を適用したところ、850 °C 前後の温度が得られた。また、圧力 800 MPa を仮定してホルンブレンド+斜長石+石英層中のホルンブレンドと斜長石の化学組成にホルンブレンド-斜長石温度計を適用したところ、約 610 °C の温度が得られた。従って、本研究で解析したカミラ角閃岩マイロナイトは、850 °C 前後のグラニュライト相の変成作用後に、約 610 °C の温度で角閃岩相の後退変成作用を受けると同時に、上盤南方移動センスの剪断変形を受けたと考えられる。

## 黒瀬川帯に分布する蛇紋岩中の変成岩および火成岩ブロックの形成テクトニクス The tectonics evolution of metamorphic and igneous rocks embedded in the serpentinite melange from the Kurosegawa Tecton

吉本 紋<sup>1\*</sup>; 小山内 康人<sup>1</sup>; 中野 伸彦<sup>1</sup>; 足立 達朗<sup>1</sup>; 北野 一平<sup>1</sup>; 米村 和紘<sup>2</sup>; 石塚 英男<sup>3</sup>  
YOSHIMOTO, Aya<sup>1\*</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>1</sup>; NAKANO, Nobuhiko<sup>1</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>1</sup>; KITANO, Ippei<sup>1</sup>; YONEMURA, Kazuhiro<sup>2</sup>; ISHIZUKA, Hideo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大・比文, <sup>2</sup>JOGMEC, <sup>3</sup>高知大  
<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>JOGMEC, <sup>3</sup>Kochi Univ.

黒瀬川帯の蛇紋岩メランジ中に産する多様な岩石ブロックについて、産状観察、岩石記載、全岩化学組成分析、ジルコン U-Pb 同位体年代測定を実施し、黒瀬川帯の岩石学的特徴を統括した。また、これらの解析結果を基に、黒瀬川帯の形成プロセスについて考察を行った。

### 高圧変成岩

高圧変成岩は、藍閃石とローソン石の鉱物組み合わせで特徴づけられ、極細粒な藍閃石が片理を形成する青色片岩と粗粒な普通角閃石や斜長石の周囲に藍閃石が形成される高圧型変ハンレイ岩に分類される。また、青色片岩は海洋地殻上に存在した様々な OIB や MORB などの玄武岩が原岩であり、高圧型変ハンレイ岩は、海洋地殻下部のハンレイ岩が原岩であることが推定されたことから、いずれも海洋地殻を起源とすることが明らかになった。高圧型変ハンレイ岩中に含まれるジルコンの U-Pb 同位体年代結果から、約 500 Ma の原岩形成年代が得られたため、この海洋地殻の形成時期は遅くとも 500 Ma であると考えられる。また、九州?紀伊半島の広域に分布する青色片岩および高圧型変ハンレイ岩から、270~300 Ma の Rb-Sr 全岩アイソクロン年代が得られた。これら高圧変成岩は、いずれも藍閃石やローソン石を含むことから、得られた年代は、黒瀬川帯の広域的な沈み込み帯における青色片岩相の変成年代であることが示唆される。

### 変成堆積岩

今回分析を行った変成堆積岩は、泥質片岩および珪岩であり、特に泥質片岩は藍閃石やローソン石を含み、青色片岩とともに産出することが特徴である。変成堆積岩中の碎屑性ジルコン年代の頻度分布は、420-3330 Ma の幅広い年代をしめし、420 Ma より若い年代をしめさないこと、450-500 Ma, 600 Ma, 1200 Ma の年代ピークが類似すること、2400 Ma よりも古いジルコンを含む特徴が広域に共通する。従って、堆積物の起源となった碎屑物の供給源が同一であることが推察された。加えて、泥質片岩は、藍閃石やローソン石を含むことから青色片岩とともにペルム紀に高圧変成作用を受けたことが示唆される。

### 高温変成岩

高温変成岩は、火成岩起源の粗粒な斜長石や普通角閃石、残存単斜輝石を含むことが特徴であり、角閃岩相からグラニュライト相の変成作用を受けている。これら高温変成岩は、火山弧に関連するハンレイ岩マグマを起源としており、高圧変成岩とは形成過程が異なる。また、高温変成岩中のジルコンの U-Pb 同位体年代結果から、火成活動年代は約 450 Ma であると考えられる。

### 花崗岩類

花崗岩は、一般に黒雲母白雲母花崗岩であるが、ザクロ石や普通角閃石を含むことがある。また、花崗岩は、岩石化学組成およびジルコン U-Pb 年代の検討から、高温型変ハンレイ岩と同様に、約 450 Ma の火山弧に関連する火成活動の年代が得られた。

### まとめ

黒瀬川帯の蛇紋岩メランジ中の岩石ブロックである高圧変成岩、変成堆積岩、高温変成岩、花崗岩における地質学的、岩石学的、年代学的特徴について検討した結果、岩相ごとに形成年代およびその形成場が共通することが明らかになった。そのため、黒瀬川帯の形成プロセスは、南北中国地塊間に存在した海洋プレートの形成・成長・沈み込みにおいて説明される。また、黒瀬川帯を日本の他の地質体と比較すると、南部北上帯に分布する変成岩および火成岩の形成年代やその形成場が共通することから、南部北上帯と黒瀬川帯との関連性が示唆される。当日は、各時代におけるテクトニクスについて、推定されるモデルを用いて議論を行う。

キーワード: 黒瀬川帯, ジルコン U-Pb 年代  
Keywords: Kurosegawa Tectonic Zone, U-Pb zircon age

## Metamorphism of the NE side of the Seba eclogitic basic schist in the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan Metamorphism of the NE side of the Seba eclogitic basic schist in the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan

KISHIRA, Naohito<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>  
KISHIRA, Naohito<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan

The Sebadani area belongs to the albite-biotite zone and is located in the central part of the Besshi district. The Sebadani area is composed of the Sebadani metagabbro mass and surrounding Seba basic schists, pelitic and siliceous schists occur as intercalation within the Seba basic schists (Takasu and Makino, 1980; Takasu, 1984). Eclogitic mineral assemblages are sporadically preserved in both the Sebadani metagabbro and the Seba basic schists (Seba eclogitic basic schists) (e.g. Takasu, 1984; Naohara and Aoya, 1997; Aoya, 2001). The Onodani eclogites preserved within the Seba basic schists have a complex metamorphic history, undergoing three different metamorphic episodes (Kabir and Takasu, 2010). The first and second eclogite facies metamorphism is estimated as 530-590 °C and 19-21 kbar and 630-680 °C and 20-22 kbar, respectively. The second metamorphic event is similar to that of the Seba eclogitic basic schist of Aoya (2001) (610-640 °C and 12-24 kbar). The pelitic schists intercalated within the Seba eclogitic basic schists also underwent eclogite facies metamorphism of 520-550 °C and c. 18 kbar (Zaw Win Ko *et al.*, 2005; Kouketsu *et al.*, 2010).

The eclogite in the northeastern part of the Seba eclogitic basic schists consist mainly of garnet, epidote, amphibole (glauco-phane, barrosite, taramite, Mg-taramite, Mg-katophorite, edenite), omphacite ( $X_{Jd}$  0.27-0.41), phengite (Si 6.5-6.9 pfu). Minor amounts of albite, dolomite, rutile, titanite, biotite, chlorite and quartz. The schistosity is defined by preferred orientation of phengite, amphibole and epidote. Garnets are almandine-rich in composition, increasing almandine ( $X_{Alm}$  0.54-0.60), pyrope ( $X_{Prp}$  0.07-0.13) and decreasing spessartine ( $X_{Sprs}$  0.10-0.03) from core to the rim and contain inclusions of epidote, omphacite ( $X_{Jd}$  0.27-0.41), dolomite, quartz and titanite. They also contain inclusions of barrosite/Mg-katophorite and albite symplectite. Amphibole in the matrix are zoned, barrosite/Mg-katophorite cores to edenite rims. Some other amphiboles in the matrix are parallel to the schistosity and occasionally occur as randomly oriented. The cores of these amphiboles are resorbed barrosite, glaucophane in the mantle and barrosite/edenite in the rim.

Based on the mineral paragenesis of the eclogites the metamorphism is divided into three events. The first eclogitic metamorphic event is deduced from symplectites of barrosite/ Mg-katophorite and albite after omphacite inclusions in garnet. The prograde stage of the second eclogitic metamorphic event is represented by the inclusions minerals within the mantle and rim of garnets consisting of epidote, barrosite and dolomite. The peak eclogite facies stage is defined by garnet rim and omphacite inclusions within the garnets with schistosity forming minerals of barrosite, omphacite and phengite. Garnet and omphacite rim-rim pairs yielded 530-570 °C and >11-14 kbar, and garnet and omphacite inclusion within garnet yields 520-560 °C, >11-12 kbar (Ellis & Green, 1979; Banno, 1986). THEMOCALC (Holland & Powell, 1998) average *P-T* calculation for garnet + omphacite + barrosite + phengite assemblage obtained 590-610 °C and 19-20 kbar. The retrograde stage is defined by symplectite of barrosite and albite after omphacite. The third metamorphic event is defined by zoned amphibole in the matrix.

The estimated metamorphic temperatures of the eclogites are lower than that of the second high-pressure metamorphic event of the Onodani eclogite and similar to that of the omphacite-bearing metapelites from the NW part of the Seba eclogitic basic schists (Kouketsu *et al.*, 2010). This suggests a metamorphic thermal gradient existed within the Seba eclogitic basic schists.

キーワード: Sambagawa (Sanbagawa) metamorphic belt, Seba basic schist, eclogite, glaucophane, P-T path, thermal gradient  
Keywords: Sambagawa (Sanbagawa) metamorphic belt, Seba basic schist, eclogite, glaucophane, P-T path, thermal gradient

## Metamorphic history of garnet amphibolite from the Neldy Formation, Makbal district in the Kyrgyz Northern Tien-Shan Metamorphic history of garnet amphibolite from the Neldy Formation, Makbal district in the Kyrgyz Northern Tien-Shan

KASYMBEKOV, Adil<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>; BAKIROV, Apas<sup>2</sup>; SAKIEV, Kadyrbek<sup>2</sup>  
KASYMBEKOV, Adil<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>; BAKIROV, Apas<sup>2</sup>; SAKIEV, Kadyrbek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan, <sup>2</sup>Institute of Geology, Academy of Science, Kyrgyz Republic

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan, <sup>2</sup>Institute of Geology, Academy of Science, Kyrgyz Republic

The Kyrgyz Tien-Shan Mountains extend from east to west, separating the Kazakhstan plate to the north and the Tarim plate to the south. They are divided into three tectonic units; the Northern Tien-Shan, the Central (or Middle) Tien-Shan and the Southern Tien-Shan. In the Northern Tien-Shan there are two HP and UHP metamorphic complexes, Makbal HP and UHP in the western part, and Aktyuz HP in the eastern part of the complexes. The Makbal complex in the Kyrgyz Northern Tien-Shan is located in the western segment of the CAO. B.

The metamorphic rocks exposed in the Makbal district are divided into the Akdzhon and the Scharkyrak Groups based on their metamorphic conditions. The Akdzhon Group contains rocks of the HP and UHP metamorphic conditions, whereas the Scharkyrak Group underwent greenschists facies metamorphism. The Akdzhon Group is divided into two contrasting metamorphic formations, the structurally lower Makbal Formation and the upper Neldy Formation.

The Neldy Formation is mainly composed of garnet-phengite schists and chlorite-carbonate rocks, along with minor metaquartzites and marbles. Amphibolites and garnet amphibolites occur in the garnet-phengite schists as lenses or blocks up to 50 m across. Eclogites preserved in the cores of the garnet amphibolite bodies. Garnet amphibolite consists mainly of amphibole (magnesian hornblende, ferropargasite, ferrotschermakite, tschermakite, barroisite, actinolite), garnet and chlorite, with minor amounts of quartz, epidote and albite. Accessory minerals are paragonite, titanite and calcite. A schistosity is defined by preferred orientation of amphibole.

Garnets in the garnet amphibolite are rich in almandine ( $X_{Alm}$  0.35-0.64), with variable amounts of spessartine ( $X_{Spss}$  0.00-0.20), grossular ( $X_{Grs}$  0.27-0.61) and pyrope ( $X_{Prp}$  0.01-0.07) compositions. Garnet displays a compositional zoning, in which decrease  $X_{Spss}$  (0.20-0.04), increases  $X_{Alm}$  (0.35-0.60),  $X_{Grs}$  (0.31-0.62) and slightly increase  $X_{Prp}$  (0.01-0.03) from the core to the rim and contain inclusion of paragonite, titanite, chlorite, epidote and amphibole (actinolite, magnesian hornblende). The garnets are partly replaced by chlorite and aggregates of amphibole (ferrotschermakite, barroisite), chlorite and quartz along the cracks. Amphiboles in the matrix are zoned with magnesian hornblende and barroisite cores to ferrotschermakite and tschermakite rims and contain inclusions of titanite and quartz.

Based on the texture and mineral composition, we consider that the prograde stage probably stable in the epidote-amphibolite facies condition due to the existing of barroisitic amphibole and epidote along with garnet, paragonite, albite and chlorite. The tschermakitic rim of matrix amphibole suggests that the peak stage probably stable in the amphibolite facies conditions. The expecting metamorphic condition of the garnet amphibolite from the Neldy Formation corresponding with peak  $P-T$  conditions of 610-620 °C and 14-16 kbar for the garnet amphibolite from the Makbal complex (Rojas-Agramonte *et al.*, 2013).

### References:

Rojas-Agramonte Y., Herwartz D., Garcia-Gasco A. *et al.*, (2013) *Contrib Mineral Petrol*, 166, 525-543.

キーワード: Garnet amphibolite, metamorphic history, amphibolite facies, Makbal complex, Neldy Formation, Kyrgyz Tien-Shan

Keywords: Garnet amphibolite, metamorphic history, amphibolite facies, Makbal complex, Neldy Formation, Kyrgyz Tien-Shan



## metamorphic sole で変成した岩石が受けた応力-歪履歴の比較 The stress-strain history of metamorphic sole: the case study of Greece, Turkey, Oman and Andaman islands

星野 健太<sup>1\*</sup>  
HOSHINO, Kenta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Shizuoka University, Graduate School of Science

本研究ではマイクロブーディン構造を持つ柱状鉱物を対象としており、このような鉱物をマイクロブーディン法によって解析することで応力や歪を定量的に解析することができる。

本研究ではトルコ・Kaynarca 地方、オマーン・Saih Hatat 地方、ギリシャ・Vourinos 地方およびアンダマン島で採取されたメタチャートをサンプルとして用いた。これらの地域は Tethys 海が閉海した際に生じた一連のオフィオライト帯だと考えられている。採取されたメタチャート中に紅簾石・電気石のマイクロブーディン構造が確認できたため、マイクロブーディン法によって解析を行った。その結果古差応力の値は 3.3 – 24.8MPa であり、strain reversal method を用いて応力-歪曲線を作成した。この曲線を地域ごとに比較すると、応力の上がり方に差はあるものの応力が上昇から下降へ変化したものはなかった。このことから、岩石が受けた温度圧力のピークと差応力のピークは同時期でなく、温度圧力が上昇したのちに差応力が上昇したと考えられる。

キーワード: マイクロブーディン, メタモルフィックソール, 古差応力, テチス, 応力 - 歪履歴  
Keywords: microboudin, metamorphic sole, palaeodifferential stress, Tethys, stress-strain history

## 跡倉ナップからみた西南日本前弧域における白亜紀後期—古第三紀のテクトニクス Late Cretaceous and Paleogene nappe tectonics in the forearc regions of Southwest Japan

小野 晃<sup>1\*</sup>  
 ONO, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> なし  
<sup>1</sup> none

白亜紀後期や古第三紀の西南日本では、前弧域で起きた複数回のナップテクトニクスによって、地殻表層部が海溝の方向に移動している（添付図 A, B）。その一例が関東山地北縁部の跡倉ナップや領家ナップである。侵食されずに残存しているナップやナップ由来の礫などの研究によると、ナップテクトニクスを受けた地質体は前弧域の堆積物である跡倉層や寄居層、110Ma 頃の花崗岩や変成岩、ペルム紀の花崗岩、白亜紀後期の領家花崗岩や変成岩などである。これらの地質体の弧 - 海溝系における分布状況が地質断面図として添付図 B に模式的に描かれている。前弧域の地質は地質時代によって変化しているので、複数の地質時代の復元図が提示されている [1]。なお、添付図 B の肥後 - 阿武隈帯とは、110Ma 頃に形成された花崗岩や変成岩の分布地帯で、金勝山 - 南部北上帯とは、ペルム紀や石炭紀の花崗岩が分布していた地帯である。

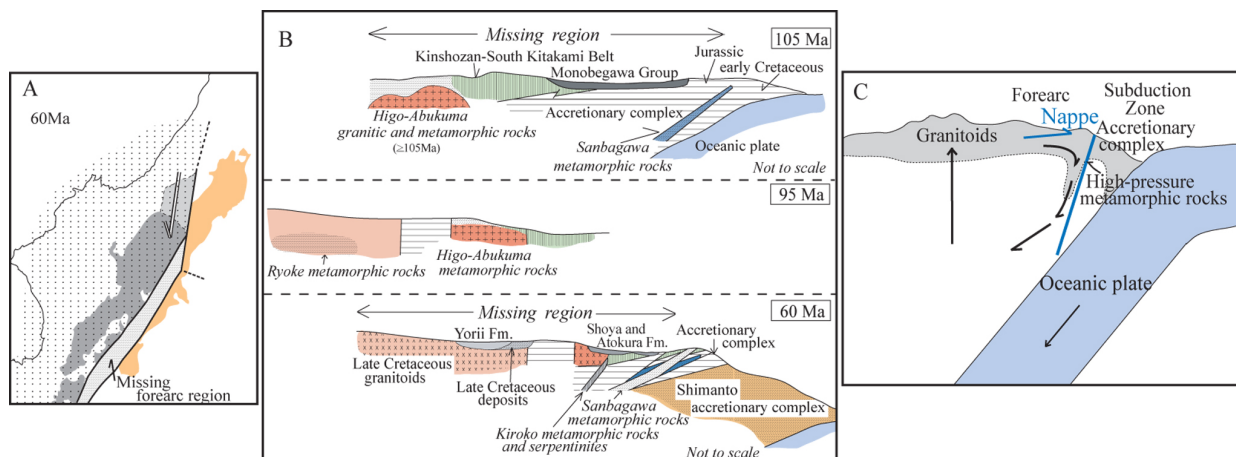
ここで問題になるのは、厚さ 5 km ほどの地殻表層部がナップとして移動した時期に、地殻の中～下層部はどうであったのか、という点である。ほとんど移動しなかったという可能性がある。その一方で、マントルの方に向かって移動した可能性もある。後者の場合、地殻のかなり深部にデコルマがあって、地殻表層部はナップとして地表に向かって移動し、地殻中～深部はマントルの方に向かって流動したことが想定される（添付図 C）。このテクトニクスが 100Ma から 60Ma ごろの花崗岩マグマの活動が著しかった時期に起きた可能性は高い。また、このようなテクトニクスが繰り返されると肥後 - 阿武隈帯や金勝山 - 南部北上帯の古い地質体などは、表層部だけではなく中・深部さえも消失してしまう。そのため、中央構造線近傍では、地表付近でも地下深部でも領家帯中～深部の変成岩や花崗岩は四万十帯の延長部の岩石と直接接することになる。

この問題に関連して、紀伊山地中央部では四万十帯が領家帯と直接接していて、110Ma 以前の古期岩体は中央構造線近傍に確認されていない。また、放射法地震探査に基づく西南日本の地殻断面 [2] においても、ナップテクトニクスで消失した前弧域の地質体の構造的下位に想定される地質体を、中央構造線近傍に見出すことは困難である。

以上の様な地質とテクトニクスを考えると、ナップが形成されていた時期について、前弧域の地殻中～深部やマントルにおける地質体の移動方向や流動方向は、添付図 C に示すようであったと推定される。

- [1] 小野, 2011, 日本地質学会第 118 年学術大会, p. 196.
- [2] 伊藤・佐藤, 2010, 地学雑誌, 119, p 235.

キーワード: 西南日本, 前弧域, 白亜紀後期と古第三紀, ナップテクトニクス, 地殻中～深部  
 Keywords: Southwest Japan, Forearc, Late Cretaceous and Paleogene, Nappe tectonics, Lower crust



## MgSiO<sub>3</sub> メルトの構造とそれらの温度圧力依存の第一原理計算 First-principles calculations of the structure of MgSiO<sub>3</sub> melt at high temperature and high pressure

松井 正典<sup>1\*</sup>  
MATSUI, Masanori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 兵庫県立大学理学部  
<sup>1</sup> School of Sci., Univ. of Hyogo

MgSiO<sub>3</sub> 組成の結晶及びメルトは地殻下部及びマントルの最重要構成物である。故にそれらの、地球内部を想定した高温高圧下における構造と物性を求めることは、地球科学的に極めて重要である。MgSiO<sub>3</sub> 各種多形の高温高圧構造と物性については、これまで数多くの実験・計算両面からの研究結果が報告されている。一方、MgSiO<sub>3</sub> メルトの構造については、高温高圧実験技術における種々の困難により、Mg イオンのメルト中での配位様式など多くの未解決な問題が存在する。我々は今回、第一原理計算を用いて、MgSiO<sub>3</sub> メルトの構造とそれらの温度圧力依存を求めたので、その結果を報告する。

計算は密度汎関数法に基づく第一原理バンド計算ソフト VASP (Kresse and Furthmuller, 1996) を使用し、電子構造計算は PAW 法 (Blochl, 1994; Kresse and Joubert, 1999) を、また電子の交換相関項については LDA 法を用いた。MD 計算は、カノニカル ensemble (原子数 N, 体積 V, 温度 T 一定) を用い、N = 160 (32MgSiO<sub>3</sub>) とし、基本セルの形状は立方体に固定した。まず一辺が 12.8 Å (V = 39.47 cm<sup>3</sup>/mol) の基本セルを用い、T = 4000 K、続いて T = 3000 K で系を充分アニールした。更に、MgSiO<sub>3</sub> メルトの常圧下、1900 K での体積の推定値 [38.9(2) cm<sup>3</sup>/mol, Lange and Carmichael, 1990] を考慮して、基本セルの一辺を 12.7 Å (V = 38.55 cm<sup>3</sup>/mol) に保持し、T = 2000 K で MD 計算を行った。

T = 2000 K, V = 38.55 cm<sup>3</sup>/mol で求められた MD 構造についての干渉関数 S(Q) (Q は散乱ベクトルの大きさ) は、1973 K, 0 GPa での X 線回折による実測値 (Waseda and Toguri, 1990) とほぼ良く対応していることを確認した。更に Si-O, Mg-O 原子間についての動径分布関数を求めた結果、平均原子間距離 r、配位数として、Si-O 結合について r = 1.63 Å, 4 配位、Mg-O 結合について r = 1.97 Å, 5.1 配位 (カットオフ距離: 2.90 Å) を得た。これらのうち、Si-O についての値は、上記 Waseda and Toguri (1990) によるもの (r = 1.62 Å, 3.9 配位) と良く一致するが、一方 Mg-O については Waseda and Toguri (1990) [r = 2.12(1) Å, 4.3 配位] とはかなり異なることが明らかになった。Taniguchi et al. (1997) は常温常圧 X 線回折データに基づいて、MgSiO<sub>3</sub> ガラスにおいて、Si-O について、r = 1.62 Å, 4.1 配位、Mg-O について r = 2.04 Å (配位数は記載なし) と報告している。我々は以前、経験的有効原子間ポテンシャルモデルを用いた古典 MD 計算により (Matsui, 1996)、1900 K, 0 GPa での MgSiO<sub>3</sub> メルトにおいて、Si-O について、r = 1.63 Å, 4 配位、Mg-O について r = 1.99 Å, 5.2 配位を得たが、これらの値は、今回の第一原理 MD 計算による結果と非常に良く合っている。続いて、温度圧力条件を変えて、MgSiO<sub>3</sub> メルトについて今回の MD 計算を繰り返し、得られた干渉関数と Mg-O, Si-O, O-O 動径分布関数の温度圧力依存を、Funamori et al. (2004) による高温高圧 X 線回折による実測データと詳細に比較した。

キーワード: MgSiO<sub>3</sub> メルト, 高温, 高圧, 第一原理計算

Keywords: MgSiO<sub>3</sub> melt, high temperature, high pressure, first-principles calculation

## 分子動力学法によるフォルステライト-MgSiO<sub>3</sub> 液体界面の研究 Forsterite-MgSiO<sub>3</sub> liquid interface : molecular dynamics perspective

則竹 史哉<sup>1\*</sup>; 河村 雄行<sup>1</sup>  
NORITAKE, Fumiya<sup>1\*</sup>; KAWAMURA, Katsuyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学

<sup>1</sup> Okayama University

Knowledge about the viscosity and permeability of partial molten rocks is important to understand the thermal history of the Earth and volcanisms. For understanding those obtained by experiments and estimating the physical properties at extreme conditions those are difficult to reproduce in laboratory experiments, the knowledge about structure and properties of silicate crystal-liquid interfaces is necessary. The properties of melt as sandwiched thin films are considered as being different with ones in bulk melts by the effect of crystal surface. For instance, lateral self-diffusivity of water to crystal surfaces shows different from bulk one in the case of water-brucite surface (Sakuma et al. 2003), water-muscovite mica surface (Sakuma and Kawamura, 2009). The dynamic property anomalies on solid - liquid surfaces affect properties of bulk rock such as permeability (Ichikawa et al. 2001).

In this study, structure and properties of the forsterite-MgSiO<sub>3</sub> liquid interfaces are investigated by using molecular dynamics simulations. It is essential to know the structure and physical properties of forsterite-MgSiO<sub>3</sub> liquid interfaces since forsterite is the liquidus mineral of primordial magmas.

Molecular dynamics simulations were performed with NPT ensemble using MXDORTO code (Sakuma and Kawamura, 2009). The initial structure is a 21440 atom system in which a sheet of MgSiO<sub>3</sub> liquid consist of 8000 atoms (~5 nm) is sandwiched between (010) surfaces of forsterite(Pbnm) and 43440 atom system in which a sheet of MgSiO<sub>3</sub> liquid consist of 30000 atoms (~20 nm) is sandwiched between (010) surfaces of forsterite. Firstly we calculated equilibrated MgSiO<sub>3</sub> liquid film in vacuum starting with a randomly generated structure and randomly generated velocities of atoms through 0.5 ns (1,000,000 steps) at 1973 K and quench to 300 K. Secondly we calculated a bulk forsterite crystal with 13440 atoms (11\*5\*8 unit cells of forsterite(Pbnm)) starting with a given experimental crystal structure which was obtained by the experiment [5] and with randomly generated velocities of atoms and then cut along (010) surface. Finally we combined forsterite cut along (010) surface and MgSiO<sub>3</sub> liquid film. Under maintaining isobaric and isothermal conditions, we performed the relaxation of 0.5~1.5 ns. Then the statistical averages of the structure and physical properties were obtained from the velocities and coordinates of each atom in the simulations through 500 ps. The function of inter-atomic potential model was same as used in our previous work (Noritake et al. 2012).

By these simulations, characteristic structures in the forsterite-MgSiO<sub>3</sub> liquid interface are observed. The layered structure of alternated crystal surface, Si-rich and Mg-rich layers in the crystal-liquid interface was observed. The layered structure was formed by energy difference between Si-O semi-covalent bonds and Mg-O ionic bonds. Si-O-Si bridging and free oxygen atoms are excessively formed and in the near surface since the energy of Si-O bonding is much lower than that of Mg-O bonding. The difference of layered structure by thickness of MgSiO<sub>3</sub> liquid film might be caused by the difference of the degree of freedom of configuration in liquid film. The two-dimensional diffusivity of oxygen atoms is controlled by two factors. The one is the thickness of liquid film that decreases oxygen diffusivity with decreasing the film thickness because of decrease of degree of freedom of configuration in liquid film. The other is composition of sliced layer where oxygen diffusivity increases with increasing the Mg/Si ratio since Si-O bonding is much stronger than Mg-O ones.

キーワード: 界面, 高温, 珪酸塩, 分子動力学法

Keywords: Interface, High-Temperature, Silicates, Molecular dynamics simulation



## Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> の相転移：第一原理計算による研究 Phase transitions in Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>: first-principles study

神崎 正美<sup>1\*</sup>  
KANZAKI, Masami<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター  
<sup>1</sup> Inst. Study Earth's Interior, Okayama University

Zn と Mg はほぼ同じイオン半径を持つが、その化合物は異なる構造を持つ。例えば Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> の常圧相は willemite であり、Zn の配位数は 4 である。相関係はかなり以前に調べられており、少なくとも 4 つの高圧相 (II, III, IV, V) が知られている。II 相と V 相については構造は既に知られており、V 相は変形スピネル構造を取るが、オリビンやスピネル相は見つかっていない。III, IV 相の構造については最近解明された (Liu ら, PCM,40,467,2013)。しかし得られた III, IV 相の常圧での密度は低圧相の II 相よりも低く、III 相に至っては常圧相よりも低い。そのため、これらの 2 相が高温高圧状態では別の構造であって、回収時に相転移したのではないかという疑いが生じてくる。本研究ではその点を調べるために第一原理計算を行った。

第一原理計算は擬ポテンシャルを使う Quantum-Espresso の pwscf コードを使った。既に知られている構造、予想される相を含め、12 の相を扱った。25 GPa まで 1 GPa 刻みで構造最適化計算を行った。その結果から 0 K でのエンタルピーを計算して、各相の安定性を調べた。

圧縮率を比較すると III 相が顕著に圧縮されやすいことが分かった。1 気圧では密度が最低であったが、I, II, IV 相を抜いて、21 GPa ではオリビン相とほぼ同じ密度となった。III 相の構造はオリビン構造から M 席の陽イオンを空いている 4 配位席に移動させたことと見なせるため、圧縮における両相の比較は興味深い、圧力による構造変化について調べたところ、III 相の M1, M2 席に対応する空席は常圧下では体積が大きい、圧力とともに急激に減少し、21 GPa ではオリビン構造の M1, M2 席の体積とほぼ同じとなった。したがって、III 相の大きな圧縮率は空席の M1, M2 の圧縮によると考えられる。

III 相は 22 GPa で構造最適化中に「相転移」を起こして、Si の配位数 6、Zn 配位数 5 の未知高圧構造となった。一方、IV 相は 12 GPa で相転移を起こして、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> III 構造 (Cmcm) になった。この構造では Zn は 4 と 6 配位両方の席を占める。なお、AlPO<sub>4</sub> 等で同じ空間群の CrVO<sub>4</sub> 相があるが、この構造とは深い関係があり、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> III 相から 4 配位 Zn を取り除くとこの構造が得られる。II 相では Zn は 4 配位であるが、I 相よりはコンパクトな構造であり、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> や C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 高圧相のモデル (w-II) としても知られている。II 相は 26 GPa において相転移を示し、スピネル構造が得られた。実は Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> などのシミュレーションから、w-II からスピネル構造への転移は既に知られており、II 相で見られた相転移も同じメカニズム (酸素の BCC から FCC) であることが分かった。Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> のスピネル相は高圧実験では得られていないが、II 相を DAC で圧縮することで準安定に得られる可能性が示された。

0 K でのエンタルピーを比較したところ、約 4 GPa までは willemite が安定で、4 GPa で II 相が安定となる。これは実験と一致する。III, IV 相についてはエンタルピーは常に高く、全ての圧力領域で安定相にはなり得ない。またオリビン相についても同様で、Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> でこの相が実験的に得られないことを説明する。約 11 GPa で II 相から Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> II 相が安定となる。Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> II 相では Zn は 4 と 6 配位両方の席を占める。約 13 GPa で V 相 (変形スピネル) が安定となる。V 相は実験的にもこの辺の圧力で安定である。約 16 GPa で III-HP 相が安定となる。実験的には V 相が高圧側で ZnO(B1) と ilmenite-ZnSiO<sub>3</sub> に分解するので、実験的には III-HP 相は安定化しないと考えられる。

今回の計算では、III, IV 相が高圧下で安定ではないことが明らかとなったが、一方で高圧下で安定な相については明確な結論は得られなかった。エンタルピー的には Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> II 相が安定と示されたが、この相は III, IV 相から直接の転移では得られていない。Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> III 相は IV 相の圧縮で得られるが、エンタルピー的には Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> II 相より下がる。しかしこれらの関係は、現在取り入れられていない振動の寄与などで変わる可能性は残っている。今後、QHA 計算や実物実験で解明していく予定である。

キーワード: Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, 相転移, 高圧相, 第一原理, 転移メカニズム

Keywords: Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, phase transition, high pressure phase, first-principles, transition mechanism

## Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> スピネル相 (Ringwoodite 端成分) の新高圧と構造と 高圧下での電子スピン状態変化 A new high pressure phase of Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> and the relationship between spin and structural transitions

山中 高光<sup>1\*</sup>; 興野 純<sup>2</sup>; 中本 有紀<sup>3</sup>; カーラモヴァーラモヴァ スベタラーナ<sup>1</sup>; ストラスキン ヴィクター<sup>1</sup>; マオ ホークァン<sup>1</sup>; ヘンリー ラッセル<sup>1</sup>

YAMANAKA, Takamitsu<sup>1\*</sup>; KYONO, Atsushi<sup>2</sup>; NAKAMOTO, Yuki<sup>3</sup>; KHARLAMOVA, Svetlana<sup>1</sup>; STRUZKIN, Viktor<sup>1</sup>; MAO, Ho-kwang<sup>1</sup>; HEMLY, Russell<sup>1</sup>

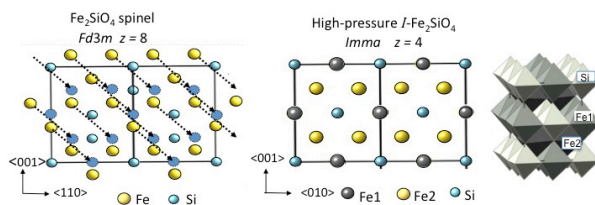
<sup>1</sup> カーネギー地球物理学研究所, <sup>2</sup> 筑波大学大学院大学地球環境学, <sup>3</sup> 大阪大学極限量子科学センター

<sup>1</sup>Carnegie Institution of Washington Geophysical Laboratory, <sup>2</sup>Division of Earth Evolution Sciences, Life and Environment Sciences, University of Tsukuba, <sup>3</sup>Center for Quantum Science and Technology Under Extreme Conditions, Osaka University

A structural change in Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> spinel (ringwoodite) has been found by synchrotron powder diffraction study and the structure of a new high-pressure phase was determined by Monte-Carlo simulation method and Rietveld profile fitting of x-ray diffraction data up to 64 GPa at ambient temperature. A transition from the cubic spinel structure to a body centered orthorhombic phase (I-Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) with space group *Imma* and *Z*=4 was observed at approximately 34 GPa. The structure of I-Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> has two crystallographically independent FeO<sub>6</sub> octahedra. Iron resides in two different sites of six-fold coordination: Fe1 and Fe2, which are arranged in layers parallel to (101) and (011), and very similar to the layers of FeO<sub>6</sub> octahedra in the spinel structure. Silicon is located in the six-fold coordination in I-Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. The transformation to the new high-pressure phase is reversible under decompression at ambient temperature. A martensitic transformation of each slab of the spinel structure with transition vector  $\langle 1/8 \ 1/8 \ 1/8 \rangle$  generates the I-Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> structure. Laser heating of I-Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> at 1500 K results in a decomposition of the material to rhombohedral FeO and SiO<sub>2</sub> stishovite.

Fe K beta x-ray emission measurements at high pressure up to 65GPa show that the transition from a high spin (HS) to an intermediate spin (IS) state begins at 17 GPa in the spinel phase. The IS electron spin state is gradually enhanced with pressure. The Fe<sup>2+</sup> ion at the octahedral site changes the iron radius under compression from 0.78 Å at the high-spin state to 0.61 Å at the low spin, which results in the changes of the lattice parameter and the deformation of the octahedra of the spinel structure. The compression curve of the lattice parameter of the spinel is discontinuous at approximately 20 GPa. The spin transition induces an isostructural change.

キーワード: Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> スピネル, 新高圧体心斜方晶構造, スピン転移, X線エミッション, マルテンサイト転移  
Keywords: Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> spinel, new high-pressure phase, spin transition, X-ray emission, martensitic transition



## Fe<sub>3</sub>S, FeO, 天然アルマンデインの放射光メスバウア測定 Synchrotron Mössbauer spectroscopy on Fe<sub>3</sub>S, FeO and natural almandine

鎌田 誠司<sup>1\*</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>; 浜田 麻希<sup>3</sup>; 鈴木 那奈美<sup>1</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>; 増田 亮<sup>4</sup>; 三井 隆也<sup>5</sup>  
KAMADA, Seiji<sup>1\*</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>; HAMADA, Maki<sup>3</sup>; SUZUKI, Nanami<sup>1</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>; MA-  
SUDA, Ryo<sup>4</sup>; MITSUI, Takaya<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>3</sup> 金沢大学工学研究域自然システム学系, <sup>4</sup> 京都大学原子炉実験所, <sup>5</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Tohoku Univ., <sup>2</sup>JASRI, <sup>3</sup>School of Nature system, College of Science and Engineering, Kanazawa University, <sup>4</sup>Research Reactor Institute, Kyoto Univ., <sup>5</sup>JAEA

The Earth's core is considered to be composed of an iron alloy with light elements since its density is smaller than that of pure iron under core conditions (e.g., Birch, 1964; Dubrovinsky et al., 2000). Although there are many candidates for these elements, such as H, C, O, Si, and S, sulfur in particular has been considered as one of the most plausible candidates. This is because it is depleted in the mantle, suggesting that it exists in the Earth's core (Murthy and Hall, 1970), and iron sulfides are found universally in iron meteorites, i.e., analogues of the Earth's core. Although the content of sulfur in the Earth's core is not known precisely, the sulfur content in the core is estimated to be at least a few wt% based on cosmic element abundances (McDonough, 2003) and high pressure partitioning experiments (e.g., Hillgren et al., 2000).

Since sulfur is one of the most plausible light elements, a compressibility and phase diagram in the Fe-FeS system has been studied (e.g., Campbell et al., 2007; Chen et al., 2007; Fei et al., 2000; Kamada et al., 2010; Li et al., 2001; Seagle et al., 2006). According to previous studies, Fe<sub>3</sub>S is stable from 21 GPa and at least up to 200 GPa. Therefore, Fe<sub>3</sub>S can be one of a candidate of the inner core materials. In addition, a synchrotron Mössbauer spectroscopy (SMS) and X-ray emission spectroscopic studies on Fe<sub>3</sub>S revealed a spin transition and magnetic transition between 20 and 25 GPa (Lin et al., 2004; Shen et al., 2003). It also showed an abnormal evolution of a and c axes with increasing pressure (Chen et al., 2007).

Synchrotron Mössbauer spectroscopy is a good probe of a small sample under high pressure to investigate magnetic properties and electronic states of Fe of core and mantle minerals. An energy domain Mössbauer spectroscopic system has been recently developed at the BL10XU, SPring-8. We have measured Mössbauer spectra from Fe<sub>3</sub>S and FeO under high pressure and a natural almandine at ambient pressure.

A powder mixture was made from <sup>57</sup>Fe (96.63%, ISOFLEX) and FeS (99.9%, RAREMETALLIC co., LTD.) with a ratio of Fe:S=75.0:25.0 (in at%). A foil was made from the mixture by a cold compression using a diamond anvil cell (DAC) and loaded into a sample chamber. <sup>57</sup>Fe enriched Fe<sub>3</sub>S was synthesized from the powder mixture in a DAC at 30 GPa and 1350 K. The synthesis of Fe<sub>3</sub>S was confirmed by X-ray diffraction patterns at BL10XU, SPring-8. <sup>57</sup>FeO was made by reducing from <sup>57</sup>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ISOFLEX) at ambient pressure and high temperature. A pellet was made from <sup>57</sup>FeO powder and loaded into a sample chamber of a DAC. We also measured Mössbauer spectra of a natural almandine (Py<sub>15.7</sub>Alm<sub>78.6</sub>Gros<sub>4.4</sub>Sp<sub>1.3</sub>, Idaho, USA). The energy of used X-ray for Mössbauer spectroscopy was 14.4125 keV.

We have measured Mössbauer spectra of Fe<sub>3</sub>S during decompression at 5, 15, 20, 25, and 30 GPa and room temperature at BL10XU and BL11XU. At BL10XU, those of FeO and the almandine were obtained at 200 GPa and ambient pressure, respectively. The magnetic transition in Fe<sub>3</sub>S was observed between 20 and 25 GPa, which is consistent with Lin et al. (2004). We observed doublet peaks from FeO. An evidence of Fe<sup>3+</sup> in the almandine was not detected in this study. We will report the results of the Mössbauer spectra based on the newly developed system at BL10XU, SPring-8.

キーワード: 地球核, マントル, メスバウア, Fe<sub>3</sub>S, FeO  
Keywords: Earth's core, Mantle, Mössbauer, Fe<sub>3</sub>S, FeO

## 合成Ca輝石におけるFe<sup>3+</sup>, Al, Ga分布の温度依存性と局所構造 Temperature dependence of Fe<sup>3+</sup>, Al and Ga distributions and local domain structure in synthetic Ca-clinopyroxene

赤坂 正秀<sup>1\*</sup>; 濱田 麻希<sup>2</sup>; 永島 真理子<sup>3</sup>; 江島 輝美<sup>4</sup>  
AKASAKA, Masahide<sup>1\*</sup>; HAMADA, Maki<sup>2</sup>; NAGASHIMA, Mariko<sup>3</sup>; EJIMA, Terumi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 島根大学総合理工学研究科, <sup>2</sup> 金沢大学理工研究域, <sup>3</sup> 山口大学理工学研究科, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup>Dep. Geoscience, Shimane Univ., <sup>2</sup>School of Nature system, Kanazawa Univ., <sup>3</sup>Dept. Earth Sci., Yamaguchi Univ., <sup>4</sup>AIST

Distribution of Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> and Ga<sup>3+</sup> among octahedral and tetrahedral sites in synthetic esseneite (CaFeAlSiO<sub>6</sub>)- and (CaFe<sup>3+</sup>GaSiO<sub>6</sub>)<sub>90</sub>(CaGa<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub>)<sub>10</sub>-clinopyroxenes at 800 and 1200 °C were investigated using <sup>57</sup>Fe Mössbauer and X-ray Rietveld methods to find a relation between site occupancies of trivalent cations at the octahedral and tetrahedral sites and ionic sizes of trivalent cations. The esseneite was synthesized from oxide mixture using sintering technique at 1200 °C in air. The FeGaTs<sub>90</sub>GaTs<sub>10</sub>-Cpx was crystallized from glass starting material at 1200 °C in air. The Cpxs synthesized and those annealed at 800 °C were analyzed using <sup>57</sup>Fe Mössbauer spectroscopic and X-ray Rietveld methods. In the synthetic esseneite, <sup>V</sup>Fe<sup>3+</sup>:<sup>IV</sup>Fe<sup>3+</sup>-ratio at 800 °C was determined as 82(1):18(1) by Mössbauer method and 78.2(5):21.8(5) by Rietveld method, whereas, at 1200 °C, 79(1):21(1) by Mössbauer method and 77(1):23(1) by Rietveld analysis. The resulting Fe<sup>3+</sup> populations at octahedral M1 and tetrahedral T sites in the synthetic esseneite are Fe<sup>3+</sup>0.782(5)-0.82(1) apfu and 0.218(5)-0.18(1) apfu, respectively. In the synthetic Fe<sup>3+</sup>-Ga-Cpx, <sup>V</sup>Fe<sup>3+</sup>:<sup>IV</sup>Fe<sup>3+</sup>-ratio at 800 °C was 74(3):26(2) (Mössbauer analysis data) and 78(1):22(1) (Rietveld analysis data), while, at 1200 °C, 71(3):29(1) (Mössbauer analysis data) and 67(1):33(1) (Rietveld analysis), which results in populations at the octahedral M1 and tetrahedral T sites of [Fe<sup>3+</sup><sub>0.67(1)-0.70(1)</sub>Ga<sub>0.33-0.30</sub>]<sup>M1</sup>[Si<sub>1.0</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.23-0.20</sub>Ga<sub>0.77-0.80</sub>]<sup>T</sup> (O = 6) at 800 °C, and [Fe<sup>3+</sup><sub>0.64(1)-0.60(1)</sub>Ga<sub>0.36-0.40</sub>]<sup>M1</sup>[Si<sub>1.0</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.26-0.30</sub>Ga<sub>0.74-0.70</sub>]<sup>T</sup> at 1200 °C. This result indicates the temperature dependence of Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> and Ga<sup>3+</sup> distributions between M1 and T sites. However, it is evident that, even at different temperatures, distributions of Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> and Ga<sup>3+</sup> between M1 and T sites are well correlated with the ratio of ionic radius of larger Fe<sup>3+</sup>-cation against smaller Al<sup>3+</sup> and Ga<sup>3+</sup>, as Akasaka et al. (1997) indicated. Another finding in this study is the splitting of a <sup>57</sup>Fe Mössbauer doublet by Fe<sup>3+</sup> at M1 site into two doublets. This indicates existence of short-range domain structure by two kinds of M1 sites with slightly different distortions, which cannot be detected by X-ray diffraction.

キーワード: 単斜輝石, メスバウアー, X線結晶構造解析, 結晶化学, イオン分布, 温度依存性

Keywords: clinopyroxene, Mossbauer analysis, X-ray structural refinement, Crystal chemistry, ionic distributions, temperature dependence



## 高温高圧条件下でのジルコニウムの構造相転移境界の再評価 Phase Transformation of Zirconium under High P-T Conditions

小野 重明<sup>1\*</sup>  
ONO, Shigeaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> JAMSTEC

The behavior of zirconium metal under high pressures is important in the community of the high-pressure study, because changes in resistivity due to the phase transformations of zirconium (Zr) are used as pressure calibration points in the high-pressure experiments. Zirconium metal, which shows the hcp structure at ambient conditions, is known to transform to the bcc structure (beta phase) above 1135 K at ambient pressure. With increasing pressure, phase transformations to a hexagonal structure (omega phase), at the pressure around 5 GPa and to a bcc structure around 30 GPa have been observed at room temperature. The formation of the high-pressure phases is concerned with changes in the electronic structure. Recent investigations for the phase transformation from the hexagonal to the bcc structures at high temperatures (Zhang et al. 2005 and 2007) were inconsistent with previous study at temperatures around the room-T (Xia et al. 1991). Therefore, we reinvestigated the transformation pressure in zirconium metal.

The starting material used in this study was polycrystalline Zr. High-pressure X-ray diffraction experiments were carried out in an external heated diamond anvil cell. The small sample sandwiched between pellets of NaCl powder was loaded into a hole that had predrilled into a rhenium gasket. The heating temperature was up to 800 K, and was recorded using the R-type of thermocouples. The sample was probed using angle-dispersive X-ray diffraction, located on the synchrotron beam lines, at NE1A of the Photon Factory. Details of the synchrotron X-ray experiments have been described elsewhere (e.g., Ono et al. 2005). The angle-dispersive X-ray diffraction patterns were obtained on the imaging plate of an X-ray data collection system (Rigaku, RAXIS). The pressure was calculated from the NaCl unit cell volume using the equation of state (EOS) for NaCl, as developed by Ono (2010).

The boundary from the omega phase to the bcc phase was determined at high temperatures (300 - 800 K). Our results were in good agreement with those reported in previous room-temperature study. The gradient of  $dP/dT$  of the boundary was negative. However, the gradient observed in our experiments was 2-3 times more negative than that reported by previous high-temperature experiments (Zhang et al. 2005 and 2007). Our new data indicated that the difference in the stress conditions of the sample led to the discrepancy of the gradient of  $dP/dT$  slope in previous studies.

キーワード: ジルコニウム, 相転移, 高温高圧

Keywords: Zirconium, Phase transition, High pressure and high temperature

## 新規高压ストロンチウム珪酸塩の結晶構造解析 Crystal structure analysis of a new high-pressure strontium silicate

関根 溪介<sup>1</sup>; 石井 貴之<sup>1</sup>; 糞谷 浩<sup>1\*</sup>; 赤荻 正樹<sup>1</sup>  
SEKINE, Keisuke<sup>1</sup>; ISHII, Takayuki<sup>1</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1\*</sup>; AKAOGI, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大学理学部化学科

<sup>1</sup>Dept. of Chemistry, Gakushuin University

SrSiO<sub>3</sub> は、地球の地殻やマントルを構成している鉱物の重要な成分の一つである CaSiO<sub>3</sub> のアナログ物質である。SrSiO<sub>3</sub> 系の高压相関係において、約 10 GPa までは δ'-SrSiO<sub>3</sub> 相が、14 GPa 以上では BaGe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-III 型 SrSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + larnite 型 Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> が安定であり、さらに約 20 GPa 以上では六方晶ペロプスカイトが安定となる (Kojitani et al. 2005, Yusa et al. 2005)。一方、10~14 GPa において、larnite 型 Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 以外に出現する相については不明であった。本研究でその未知相の一つの結晶構造および組成を決定したので報告する。

目的の試料は、pseudowollastonite 型 SrSiO<sub>3</sub> と SiO<sub>2</sub> cristobalite の混合物 (モル比 1:1) に少量の水を添加し、川井型マルチアンビル高压発生装置を用いて 12 GPa, 1200 °C で 90 分加熱することにより得られた。回収試料の中から、結晶サイズが 120x80x60 μm の単結晶を選び出し、Bruker AXS APEX II (Mo Kα, 50 kV, 20 mA) を用いて単結晶 X 線回折測定を行った。SHELX-97 ソフトウェアを用いることにより、得られた 953 個の反射データについて解析がなされた。また、組成分析には SEM-EDS を使用した。

組成分析の結果、新規高压相は Sr<sub>4</sub>Si<sub>9</sub>O<sub>22</sub> の組成を持つことが判明した。単結晶構造解析により、単斜晶系で空間群が C2/m、格子定数が a = 13.3765(4) Å, b = 5.2321(2) Å, c = 11.6193(6) Å, β = 113.976(4)deg. と決定された。R 因子は 1.25 % であった。求められた結晶構造は、SiO<sub>6</sub> 八面体または SiO<sub>5</sub> 斜方錐面体 (ピラミッド型) の稜共有による一重鎖が頂点を共有することにより繋がってできる層と、SiO<sub>4</sub> 四面体と SiO<sub>6</sub> 八面体が頂点を共有することにより繋がってできる層から成るフレームワークを持っている。特筆すべきは、珪酸塩物質では珍しいピラミッド型 SiO<sub>5</sub> 多面体が存在することである。また、Sr<sup>2+</sup> はそれらの 2 つの層の間に配列されており、酸素 7 配位である。δ'-SrSiO<sub>3</sub> は、SiO<sub>4</sub> 四面体の 4 員環からなるフレームワークを持ち、Sr<sup>2+</sup> は 7 配位である。一方、BaGe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-III 型 SrSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> は SiO<sub>6</sub> 八面体と SiO<sub>4</sub> 四面体の頂点共有によるフレームワークを持ち、Sr<sup>2+</sup> の配位数は 12 である。したがって、本研究で新たに見出された結晶構造は、それらの低压相と高压相の中間的な密度を持つという事実と調和的である。

キーワード: ストロンチウム珪酸塩, 高压, 単結晶構造解析, SiO<sub>5</sub> 多面体

Keywords: strontium silicate, high-pressure, single-crystal structure analysis, SiO<sub>5</sub> polyhedron

## 微量高圧相のPPMS装置による熱容量、エントロピーの測定：TiO<sub>2</sub>及びMnSiO<sub>3</sub> 高圧相 Heat capacity and entropy measurements by PPMS for high-pressure phases in TiO<sub>2</sub> and MnSiO<sub>3</sub>

赤荻 正樹<sup>1\*</sup>; 小島 芽子<sup>1</sup>; 深井 安矢<sup>1</sup>; 糺谷 浩<sup>1</sup>  
AKAOGI, Masaki<sup>1\*</sup>; KOJIMA, Meiko<sup>1</sup>; FUKAI, Aya<sup>1</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大・理

<sup>1</sup>Dept. of Chemistry, Gakushuin University

高圧鉱物の熱力学特性はその鉱物の基本的な物性量であり、その実測データは高圧高温下の安定関係を計算するために広く使われている。それらの実験データは、第一原理計算の結果を検討するためにも重要である。高圧鉱物の標準エントロピー (S<sub>298.15</sub>) は、極低温から室温までの温度範囲で測定された定圧熱容量 (C<sub>p</sub>) に基づき、C<sub>p</sub>/T を絶対零度から 298.15K まで積分することによって求められる。従来の低温熱容量測定には、断熱型熱量計を用いた方法が最も精度が高い実験法として使われてきた。しかしこの断熱法は数 g 以上の試料を必要とするため、高圧相試料については極めて限られた物質しか測定されて来なかった。最近開発された熱緩和法に基づく物理特性測定装置 (PPMS) を使用した低温熱容量測定では、十数 mg の高圧鉱物でも断熱型熱量計と同程度の精度で熱容量を測定できる。この方法では、液体ヘリウムで冷却し 2K から室温付近までの温度範囲で、試料を接着する台に取り付けられたヒーターによって試料に一定の熱的パルスを与え、試料温度の緩和過程を解析して、1~2K 間隔で C<sub>p</sub> を測定する。筆者らは、東京工業大学阿竹・川路研究室との共同研究として、Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> wadsleyite、ringwoodite、MgSiO<sub>3</sub> akimotoite、perovskite、SiO<sub>2</sub> stishovite など低温熱容量をこの方法で測定し、これらの S<sub>298.15</sub> を決定してきた (Akaogi et al., 2007, 2008, 2011)。今回、学習院大学理学部に設置された PPMS 装置を用いて、TiO<sub>2</sub> 及び MnSiO<sub>3</sub> の高圧相の低温熱容量測定を行い、それらの S<sub>298.15</sub> を決定した結果について報告する。

マルチアンビル装置を用い、rutile 型 TiO<sub>2</sub> の焼結体を 3 GPa、700 °C で、α-PbO<sub>2</sub> 型 TiO<sub>2</sub> を 8GPa、600 °C で合成した。C<sub>p</sub> 測定に用いた試料は、10~21mg の焼結体 (α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は単結晶) である。また MnSiO<sub>3</sub> garnet の焼結体を 15GPa、1000 °C で合成した。それぞれの円柱状焼結体試料の一面を研磨し、グリースで PPMS 装置の試料台に接着し、C<sub>p</sub> 測定を行った。C<sub>p</sub> 測定の温度範囲は 2~308K であり、最初に α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 単結晶 (NBS 標準リファレンス物質 720) の C<sub>p</sub> 測定を行い、断熱型熱量計による Dittmar et al. (1982) の測定結果と良好一致を示すことを確認した。

今回測定された rutile 型 TiO<sub>2</sub> の C<sub>p</sub> は断熱型熱量計による従来のデータと良く一致し、本研究による S<sub>298.15</sub> は 50.10J/molK であった。今回の α-PbO<sub>2</sub> 型 TiO<sub>2</sub> の C<sub>p</sub> を、今までに測定された 2 例 (Yong et al., 2014, Manon, 2008) と 220~308K の温度で比較すると、PPMS による Yong et al. (2014) の結果にほぼ一致し、DSC による Manon (2008) の結果とは大きく異なっていた。これは、この温度範囲での PPMS 測定の精度の高さを示していると考えられる。本研究による α-PbO<sub>2</sub> 型 TiO<sub>2</sub> の S<sub>298.15</sub> は 46.50J/molK であった。MnSiO<sub>3</sub> garnet の C<sub>p</sub> 測定データには、15K に磁気転移と考えられるピークが見られ、S<sub>298.15</sub> は 90.92 J/molK であった。これらの測定結果を使って計算される高圧相平衡関係も合わせて報告する。

キーワード: 熱容量, エントロピー, 高圧相, PPMS 装置

Keywords: heat capacity, entropy, high-pressure phase, PPMS apparatus

## メタンハイドレートの高圧相への転移のメカニズム Mechanisms of phase transitions of methane hydrate under high pressure

門林 宏和<sup>1\*</sup>; 平井 寿子<sup>1</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>; 大竹 道香<sup>3</sup>; 山本 佳孝<sup>3</sup>; 小島 洋平<sup>1</sup>  
KADOBAYASHI, Hirokazu<sup>1\*</sup>; HIRAI, Hisako<sup>1</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>; OHTAKE, Michika<sup>3</sup>; YAMAMOTO,  
Yoshitaka<sup>3</sup>; KOJIMA, Yohei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Japan Association of Synchrotron Radiation Institute, <sup>3</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Methane hydrate (MH), called as “ burning ice ”, is expected to be a fruitful natural resource, at the same time, methane is rather effective greenhouse gas than carbon dioxide. It is also thought to be a major constituent of icy bodies in and outside the solar system. MH is composed of hydrogen-bonded host water molecules forming cages or frameworks that include guest methane molecules. Three phases of MH have been known so far. The low-pressure phase, sI, is stable below 0.8 GPa and it transforms into a hexagonal structure, sH, at 0.8 GPa and further transforms to a filled ice Ih (FIIhS) at 1.8 GPa at room temperature. At these phase transitions, release of water content is accompanied. As described above, the existence of phase transitions and the structures of transformed high-pressure phases have been clarified by the previous studies. However, transition mechanisms from the lower-pressure phase to individual high-pressure phases have been unresolved issue. In this study, high-pressure experiments were performed to investigate mechanisms of the phase transitions of MH at high pressures.

Clamp type and lever-spring type diamond anvil cells were used in this study. The pressure and temperature conditions were from 0.2 to 3.0 GPa and 300 K, respectively. Pressure measurements were made via a ruby fluorescence method. The initial samples of MH were prepared by ice-gas interface method. The samples were characterized via time-resolved X-ray diffractometry using synchrotron radiation at BL-10XU, SPring-8, and time-resolved Raman spectroscopy at GRC, Ehime University.

As for sI-sH phase transition, Raman spectroscopy revealed that  $5^{12}$  cages of sI survived during the transition and that the  $5^{12}$  cages remained as same  $5^{12}$  cages of sH structure. And,  $5^{12}6^2$  cages of sI changed to  $4^35^66^3$  and  $5^{12}6^8$  cages of sH. The results suggested that the sI-sH transition may follow a martensitic-like mechanism because of being maintaining  $5^{12}$  cages unchanged in sH structure. On the other hand, at sH-FIIhS transitions, Raman spectroscopy detected abrupt collapse of all constituent cages in sH and release of fluid or solid methane molecules. And then, the framework of FIIhS was gradually reconstructed, absorbing the released methane molecules into the FIIhS structure. The results indicated that the sH-FIIhS transition follows reconstructive mechanism. The explanations may be reasonable, because the former transition is from a cage to another cage structure, and the latter one is from a cage structure to different framework of a filled ice structure.

キーワード: メタンハイドレート, 相転移メカニズム, 高圧, X線回折, ラマン分光

Keywords: methane hydrate, mechanisms of phase transitions, high-pressure, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy



## 高圧氷VI及びVIIへのNaCl固溶の可能性 Incorporation of NaCl into ice VI and ice VII under high pressure.

平井 寿子<sup>1\*</sup>; 山下 福憲<sup>1</sup>; 香川 慎伍<sup>1</sup>; 門林 宏和<sup>1</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>; 山本 佳孝<sup>3</sup>

HIRAI, Hisako<sup>1\*</sup>; YAMASHITA, Fukunori<sup>1</sup>; KAGAWA, Shingo<sup>1</sup>; KADOBAYASHI, Hirokazu<sup>1</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Yoshitaka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 高輝度科学研究所, <sup>3</sup> 産業総合技術研究所メタンハイドレート研究センター

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>JASRI, <sup>3</sup>AIST

Icy satellites have been thought to contain a large amount of salts besides water ices. Ice exhibits a wide variety of forms consisting of hydrogen-bonded water molecules. More than sixteen stable and metastable forms have been reported so far. Liquid water can dissolve various kinds of solutes. Whereas, in the previous idea, when water crystallizes, the dissolved solutes are excluded, which results in formation of pure water ices. Recently, Frank et al. [1] and Komatsu et al. [2] reported that NaCl or other salts was incorporated into ice VI and/or ice VII. In these studies, however, it has been still unclear which ice can incorporate NaCl, and amount of salts incorporated and states of the salt in the ice structure have not yet been clarified. In this study, in order to understand possible incorporation of salts in to ice VI and VII structures, high-pressure experiments were performed with a system of H<sub>2</sub>O-NaCl, a typical salt, at room temperature.

Lever-and-spring type diamond anvil cell was used. Pressure range examined was from 0.2 to 10 GPa. NaCl aqueous solutions with three concentrations, 1.5, 2.5, and 5.0 w%, were prepared as starting samples. Characterization was made by optical microscopy, X-ray diffractometry (XRD), and Raman spectroscopy.

Similar phase changes were observed for the samples with three different concentrations. The NaCl aqueous solutions finally crystallized to form ice VI above 1.6 GPa, although in case of pure water ice VI is formed at 1.0 GPa at room temperature. At the pressure range from 2.1 to 3.2 GPa, a new high-pressure phase, of which diffraction pattern was not explained by ice VI, ice VII, and solid NaCl, was observed. Above 3.2 GPa, ice VII and solid NaCl appeared. The high-pressure phase observed may correspond to a phase having a modified structure of NaCl-dihydrate reported by Nakayama et al. [3]. Unit cell volumes of ice VII calculated expanded larger than those of pure ice VII. The result was opposite sense to those by Frank et al, where the volumes decreased smaller than those of pure ice VII. The amounts of the volume expansion for 2.5 and 5.0 w% samples were larger than those of 1.5 w% samples. The volume expansions of the former two samples were almost similar. The results suggested that limitation of incorporation into ice VII is less than 2.5 w%. The O-H vibrational modes shifted to higher frequencies by 10 to 20 cm<sup>-1</sup> and 5 to 10 cm<sup>-1</sup> from those of pure ices for ice VI and ice VII, respectively.

All experimental results indicated that NaCl is incorporated both into ice VI and ice VII at room temperature. The amounts of incorporation were estimated to be up to 2.5 w%. Such large amount of incorporation of salt is expected to effect on physical properties of ices, which is important in inferring the interiors of icy bodies.

1. M. R. Frank et al., PEPI 155 (2006) 152; M. R. Frank et al., PEPI 170 (2008) 107; M. R. Frank et al., PEPI 215 (2013) 12.
2. K. Komatsu et al., Abstract of Annual meeting of Jpn. Society High Pressure Tech. (2010).
3. K. Nakayama master thesis (2012).

キーワード: 高圧氷, NaCl, 固溶, 氷衛星

Keywords: high-pressure ice, NaCl, incorporation, icy satellite

## Legrandite と Paradamite の構造精密化 : 結晶化学と水素結合の詳細 Structure refinement of legrandite and paradamite : crystal chemistry and hydrogen bonds

陣内 聡<sup>1\*</sup>; 吉朝 朗<sup>1</sup>; 杉山 和正<sup>2</sup>; 有馬 寛<sup>2</sup>; 志村 玲子<sup>2</sup>; 宮脇 律郎<sup>3</sup>  
JINNOUCHI, Satoshi<sup>1\*</sup>; YOSHIASA, Akira<sup>1</sup>; SUGIYAMA, Kazumasa<sup>2</sup>; ARIMA, Hiroshi<sup>2</sup>; SHIMURA, Reiko<sup>2</sup>; MIYAWAKI, Riturou<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学自然科学研究科, <sup>2</sup> 東北大学金属材料研究所, <sup>3</sup> 国立科学博物館

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University., <sup>2</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University,

<sup>3</sup>National Science Museum

Legrandite と paradamite は淡黄色から黄褐色の亜鉛ヒ酸塩鉱物で、adamite に代表される亜鉛ヒ酸塩鉱物やヒ素と化学的性質の近いリンを含んだリン酸塩鉱物など、関連鉱物は多数にわたるが、それぞれ構造は大きく異なっている。McLean et al. (1971) によって legrandite の構造解析が行われており、paradamite は Bennett T J. (1980) により構造解析が行われているが、水素結合や配位席の歪量、関連鉱物との共通性等不明であった。今回、Oujela Mine, Mapimi, Durango, Mexico 産 legrandite (化学組成  $Zn_2AsO_4(OH)H_2O$ ) 及び、同産地の paradamite (化学組成  $Zn_2AsO_4(OH)$ ) の結晶構造精密化をリガク社製単結晶構造解析システム (RAPID) により行った。これまで不明であった水素位置を差フーリエ法により確定し、座標位置を決定するとともに Bond-valence 法によって電荷バランスと水素結合関係を明らかにした。構造の詳細、水素結合と結晶構造の関係性を議論する。

Legrandite の構造は、2 種類の  $AsO_4$  四面体と 1 種類の  $Zn \phi_6$  八面体 ( $Zn1$  席)、3 種類の大きく歪んだ  $Zn \phi_5$  複三角錐面体 ( $Zn2 \sim Zn4$  席) ( $\phi = O, OH, H_2O$ ) によって構成されている。 $Zn$  多面体は頂点と稜を共有した独特の構造単位を形成し、 $AsO_4$  四面体がこの構造単位を繋げる形でフレームワークを構成している。5 配位席はイオン半径から予測される距離を有しているが、 $Zn(3)-O(1)$  の原子間距離は異常な値を示している。6 席の水素原子は、強弱様々な 13 の水素結合を形成しており、これにより過剰の原子価を供給される酸素原子には配位数の低下が見られる。 $Zn(3)-O(1)$  の原子間距離の異常性も、水素結合による原子価の供給が原因であると推測する。また水素席は、c 軸にのみ平行なトンネル構造を有している。この方向にプロトン導電の経路があり、伝導性に大きな一次元異方性があると推測する。

Paradamite の構造は、 $AsO_4$  四面体と  $ZnO_3(OH)_2$  複三角錐面体 ( $Zn1$  席)、 $ZnO_4(OH)$  複三角錐面体 ( $Zn2$  席) により構成されている。 $ZnO_3(OH)_2$  複三角錐面体は、 $O(3) - O(3)$  と  $O(5) - O(5)$  の稜共有によって a 軸上に波状の鎖を形成し、 $AsO_4$  四面体と  $Zn2$  席の  $ZnO_4(OH)$  複三角錐面体が  $ZnO_3(OH)_2$  複三角錐面体と頂点を共有することで、paradamite のフレームワークは構成されている。水素原子は、過剰配位型水素結合を形成しており、a 軸にのみ平行に連続なトンネル構造を有している。Legrandite と同様に、アクセプター原子の配位数の低下、及び a 軸方向にプロトン導電の経路があり、伝導性に大きな 1 次元異方性があることが推測される。

キーワード: 構造精密化, レグランダイト, パラダマイト, 結晶化学, 水素結合

Keywords: structure refinement, legrandite, paradamite, crystal chemistry, hydrogen bonds

## 3GPaまでの圧力におけるブルーサイトのパルス中性子精密粉末回折と水素配置解析 Structure analysis of deuterated brucite at pressures to 3 GPa by pulsed neutron powder diffraction

奥地 拓生<sup>1\*</sup>; 富岡 尚敬<sup>1</sup>; Purevjav Narangoo<sup>1</sup>; Harjo Stefanus<sup>2</sup>; 阿部 淳<sup>3</sup>; Wu Gong<sup>2</sup>  
OKUCHI, Takuo<sup>1\*</sup>; TOMIOKA, Naotaka<sup>1</sup>; PUREVJAV, Narangoo<sup>1</sup>; HARJO, Stefanus<sup>2</sup>; ABE, Jun<sup>3</sup>; WU, Gong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>3</sup> 総合科学研究機構東海事業センター  
<sup>1</sup>Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>3</sup>CROSS Tokai

Atomic-scale structures around hydrogen atoms in hydrous minerals may significantly change with increasing pressure, which affect thermodynamic stability, optical properties (Raman, IR, etc.), and transport phenomena of the relevant minerals. To directly observe such structure change around hydrogen atoms, we have conducted neutron diffraction experiments of deuterated brucite at high pressures to 2.8 GPa, using a high-resolution neutron powder diffractometer recently installed at J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility. To discriminate subtle structure change of deuterium site positions with increasing pressure, the quality of observed diffraction patterns has been considerably improved from the corresponding previous studies by adopting a new-type experimental apparatus and facility. A newly-designed opposed anvil cell apparatus optimized for the pulsed neutron beam (Okuchi et al., *High Pressure Research*, 33, 777, 2013) was effectively coupled with the time of flight diffractometer TAKUMI, which was designed to have the resolution of  $\Delta d/d \sim 0.3\%$  along with moderately-intense beam and low background (Harjo et al., *Materials Science Forum*, 524, 199). We used single crystal diamond anvils with culet diameter of 2 mm for sample compression along with deuterated glycerine pressure medium. The combination gives very high neutron transparency as well as high resolution to enable accurate structure refinements of tiny sample volume of the order of less than 1 mm<sup>3</sup>. Through Rietveld refinements of the observed patterns, tilting of all OD dipoles in the compressed brucite toward one the three nearest-neighbor oxygen anions in the brucite structure was confirmed to be substantial at the observed pressure regime, suggesting the formation of pressure-induced hydrogen bonding. Therefore, at lower crust and mantle wedge conditions, this pressure-induced bonding may play an important role to constrain hydrogen into the relevant hydrous minerals.

キーワード: 水素, ブルーサイト, 高圧力, 中性子回折  
Keywords: hydrogen, brucite, high pressure, neutron diffraction

## セレン酸・亜セレン酸のバライトへの取り込みを支配する要因の解明 Factors controlling barite-water distribution of selenium oxyanion

徳永 紘平<sup>1\*</sup>; 横山 由佳<sup>1</sup>; 高橋 嘉夫<sup>1</sup>  
TOKUNAGA, Kouhei<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Yuka<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Yoshio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduated School of Science, Hiroshima University

Geochemical behavior of trace elements is controlled by their interaction with major minerals through ion exchange, sorption/desorption, and coprecipitation/dissolution processes, which govern the concentrations of trace elements in natural water. Especially, the coprecipitation process with mineral is potentially important because trace elements can be incorporated and immobilized in the crystal lattice at least until the minerals are dissolved. Previous studies showed that the partitioning behaviors of trace elements to minerals were controlled by many complex factors, such as crystal constraints of ion substitution, effects of complexation in the aqueous phase, rate of crystallization, and changes in temperature or pressure. For instance, Yokoyama [2011, 2012] demonstrated that, in the case of arsenic (As) and selenium (Se) incorporation into calcite, arsenate rather than arsenite is selectively incorporated into calcite, whereas selenite (Se(IV)) rather than selenate (Se(VI)) into calcite because of the high stabilities of calcium arsenate and calcium selenate complexes compared with those for arsenite and selenite. In this study, we focused on the distribution behavior of Se into barite to determine the factors controlling the partitioning behaviors of the trace elements to minerals at the molecular scale by X-ray absorption fine structure (XAFS). Our previous results suggested that the distribution behavior of Se into barite was controlled by two factors: the stability of the surface complex between barite and Se species (=chemical affinity) at the initial process and the stability of the ion substitution in the crystal structure (=structural affinity) for the subsequent process. In this presentation, the barite-water distributions of Se controlled by the structural affinity are highlighted.

The coprecipitation experiments were conducted to examine the influence of ion substitution structure on the distribution behavior of Se into barite as a function of the reaction time in term of the variation of barite morphology, total concentration, oxidation states, and coordination structure of Se in barite. The results showed that both total Se concentration and the Se(VI)/Se(IV) ratio in barite increased abruptly within first 24 hour and almost reached equilibrium after 24 hours. EXAFS analysis for the initial and aged samples showed that the coordination number of Se-Ba in the aged sample is larger than that in the initial stage. The results indicate that a larger amount of Se(VI) than Se(IV) was incorporated from adsorption site on the surface into the barite crystal by substituting sulfate site because of their high crystallinity that can exclude Se(IV) to a larger degree than Se(VI) due to the similar structure of sulfate ion and sulfate. Based on these results, it is considered that the Se(VI) was preferentially incorporated into barite due to its high structural affinity than Se(IV), thus, the Se(VI)/Se(IV) ratios in barite relatively increased through crystallization. These results suggest that structural affinity is an important factor for controlling the distribution behavior of Se between barite and water.

キーワード: バライト, セレン酸, 亜セレン酸, X線吸収端微細構造法, 分配挙動, 構造規制  
Keywords: barite, selenite, selenate, XAFS, distribution behavior, structural affinity



## Li-Al-Mg 系雲母の中・遠赤外吸収スペクトル Mid- and far-infrared spectroscopy for Li-Al-Mg micas

槇尾 雅人<sup>1\*</sup>; 石田 清隆<sup>1</sup>  
MAKIO, Masato<sup>1\*</sup>; ISHIDA, Kiyotaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院比較社会文化学府

<sup>1</sup>Graduate School of Social and Cultural Studies

<はじめに>

雲母族鉱物は主要造岩鉱物の1つであり、地殻の多様な岩石に普遍的に産する。その中にはイオン置換により多くの鉱物種が属している。雲母は True- mica、Brittle- mica、Interlayer- deficient- mica に大別され、それぞれ2八面体型、3八面体型に分類される。それらの結晶化学的な研究は多く行われてきた。そのうち、Liを含むLi-Al-Mg系雲母の産出は稀であり、その固溶領域や結晶化学的性質は十分に解明されていない。特に雲母の中赤外吸収スペクトルについてはほとんど報告例がない。遠赤外領域では Tateyama et al. (1977) は  $\langle \text{K-O}_{inner} \rangle$  平均結合距離が減少するにつれて  $\text{K-O}_{inner}$  赤外伸縮振動バンドの波数が増加することを報告している。また、Ishida and Hawthorne (2011) は四面体を  $\text{Al} \leftrightarrow \text{Ga}^{3+}$ 、 $\text{Si} \leftrightarrow \text{Ge}$  に置換した Kinoshitalite について  $90\text{cm}^{-1}$  付近のピークを  $\text{K-O}_{outer}$ 、 $120\text{cm}^{-1}$  付近のピークを  $\text{K-O}_{inner}$  伸縮振動バンド、 $150\text{cm}^{-1}$  付近のピークを T-O の torsional バンドと帰属している。今回、Li-Al-Mg 系含フッ素3八面体型 True-mica を水熱合成法により合成し、X線 Rietveld 解析および中・遠赤外分光分析を用いて赤外吸収スペクトルにおける結合距離と波数の相関を求め、その帰属を試みた。

<実験方法>

水熱合成において端成分組成を各固溶体組成に秤量して出発物質とした。今回は (a)Trilithionite:  $\text{K}(\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{1.5})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}\text{F}_2$ -Phlogopite:  $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}\text{F}_2$ 、(b)Polyolithionite:  $\text{K}(\text{Li}_2\text{Al})\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$ -Tainiolite:  $\text{K}(\text{LiMg}_2)\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$ 、(c)Polyolithionite-Eas-tonite:  $\text{K}(\text{Mg}_2\text{Al})(\text{Al}_2\text{Si}_2)\text{O}_{10}\text{F}_2$  系の3つの系を対象とする。また、 $(\text{OD})^- \leftrightarrow \text{F}^-$  置換の結晶生成率や結晶度を調べるため、Mg-OD Masutomilite:  $\text{K}(\text{LiAlMg})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OD})_2$  について調べた。水熱合成法では秤量した混合物を Pt/Au パイプに少量の重水 (99.9%) とともに溶接封入し、 $600\text{--}650^\circ\text{C}$ 、 $150\text{--}200\text{MPa}$  の条件で合成を行った。結晶構造の精密化は X線回折装置 (Rigaku Rint-2100V) により回折データを収集し、Rietan2000 (Izumi and Ikeda 2000) を用いて X線 Rietveld 解析により求めた。中・遠赤外吸収スペクトルについては赤外分光装置 (Jasco FTIR-620) を用いて積算回数 256 回で測定し、その帰属を試みた。合成試料 1-4mg に対しポリエチレン 70mg を秤量し、加圧して錠剤に成形し測定試料とした。

<結果・考察>

X線回折測定により得られたデータは単斜晶系  $C2/m$ 、ポリタイプ 1M で精密化できたので、天然に比べて disorder している。SEM 像観察では、どの端成分でも雲母特有の板状結晶を観察できた。Polyolithionite において、六角板状な最大約  $20\mu\text{m}$  の結晶を観察することができ、X線回折ピークがシャープであることとともに、結晶度のよいことがわかる。遠赤外吸収領域 ( $250\text{--}50\text{cm}^{-1}$ ) では、 $150\text{--}170\text{cm}^{-1}$  の T-O torsional バンド、 $120\text{--}140\text{cm}^{-1}$  の  $\text{K-O}_{inner}$  伸縮振動バンドと  $90\text{--}100\text{cm}^{-1}$  の  $\text{K-O}_{outer}$  伸縮振動バンドが確認された。 $\langle \text{K-O}_{inner} \rangle$  の減少にともない、 $\text{K-O}_{inner}$  バンドは高波数側にシフトする。 $\text{K-O}_{outer}$  バンドは  $\langle \text{K-O}_{outer} \rangle$  の増加にともなって高波数側にシフトする。中赤外吸収領域 ( $650\text{--}250\text{cm}^{-1}$ ) では、T-O 変角振動バンドと推定される  $600\text{--}400\text{cm}^{-1}$ 、 $400\text{--}200\text{cm}^{-1}$  の2つの吸収帯が存在する。 $600\text{--}400\text{cm}^{-1}$  のバンド帯は Mg 量が増加するにつれ、複数の吸収成分が合わさり、全体としてブロードなバンドとなった。 $400\text{--}200\text{cm}^{-1}$  の吸収帯では Mg 量が増加するに従い、 $280\text{cm}^{-1}$  に新たな吸収バンドが観測された。

キーワード: Li-Al-Mg 雲母, 水熱合成, 中赤外, 遠赤外, リートベルト解析

Keywords: Li-Al-Mg mica, hydrothermal synthesis, mid-infrared, far-infrared, Rietveld analysis

## 福島風化黒雲母へのCs吸着実験 Cesium (Cs) Sorption Experiments into Weathered Biotite in Fukushima

菊池 亮佑<sup>1\*</sup>; 小暮 敏博<sup>1</sup>  
KIKUCHI, Ryosuke<sup>1\*</sup>; KOGURE, Toshihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大院地惑

<sup>1</sup>Earth and Planetary Sci., Univ. Tokyo

After the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, radioactive contamination of the soil around the plant has become an urgent problem in Japan. Previous studies proposed that weathered micaceous minerals present favorable sorption environments for Cs<sup>+</sup>. Because the contaminated areas in Fukushima are mainly covered with weathered granite soil, weathered biotite with hydrated (vermiculite) interlayers is abundant. Hence basic understanding of Cs<sup>+</sup> sorption process into the biotite is important to find the recipe for decontamination of radiation. Some of previous studies reported that Cs<sup>+</sup> is adsorbed mainly at the frayed-edge sites of such micaceous crystals. However, other studies indicated that Cs<sup>+</sup> penetrates deeply inside the crystals, along the interlayer regions by ion-exchange. In this study, we performed Cs<sup>+</sup> sorption experiments using single-crystals of Fukushima weathered biotite with well-regulated edge surfaces, and considered the relationship between the weathering state of biotite and Cs<sup>+</sup> sorption property.

Fresh and two kinds of weathered biotite were collected from granodiolite of Abukuma granite body in Fukushima prefecture. For each sample, cross sections of <1 mm thick perpendicular to the basal planes were prepared. Surface damage formed by the mechanical grinding/polishing was removed by Ar<sup>+</sup> ion sputtering. These sections were immersed in 30 mL of CsCl aqueous solution of 2000 / 200 / 20 / 0 ppm for 24 hours at room temperature to incorporate Cs<sup>+</sup>.

After the reaction, the surfaces of the sections were investigated using scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). SEM-EDS with various acceleration voltage indicated that the concentration of the sorbed Cs<sup>+</sup> does not change in the depth direction of ~several microns range. Cs<sup>+</sup> was apparently sorbed at 2000 ppm but not at 200 ppm for fresh biotite, whereas Cs<sup>+</sup> was sorbed at both concentrations in the weathered biotite. Back-scattered electron (BSE) images and EDS analysis showed preferred sorption of Cs<sup>+</sup> at the regions probably with dense vermiculite interlayers in the weathered biotite. Moreover, some specimens were processed into thin foils using focused ion beam (FIB) and examined using scanning transmission electron microscopy (STEM). High-angle annular dark field (HAADF) imaging in STEM has visualized Cs<sup>+</sup>-incorporated interlayer regions individually in the weathered biotite.

Keywords: Biotite, Vermiculite, Cesium, SEM-EDS, FIB, HAADF-STEM

## 炭酸カルシウムの準安定相ファーテライトの圧力誘起相転移 Pressure-induced phase transitions of vaterite, a metastable phase of calcium carbonate

丸山 浩司<sup>1\*</sup>; 小松 一生<sup>1</sup>; 鍵 裕之<sup>1</sup>; 吉野 徹<sup>2</sup>; 中野 智志<sup>3</sup>

MARUYAMA, Koji<sup>1\*</sup>; KOMATSU, Kazuki<sup>1</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>1</sup>; YOSHINO, Toru<sup>2</sup>; NAKANO, Satoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 東京都立産業技術研究センター, <sup>3</sup> 物質・材料研究機構

<sup>1</sup>Geochemical Research Center, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>TIRI, <sup>3</sup>National Institute for Materials Science

### 1. はじめに

炭酸カルシウムは地球表層にありふれた鉱物の一つであり、また炭素循環において重要な物質である。カルサイトおよびアラゴナイトに関しては、高圧下の挙動について多くの研究が報告されている。カルサイトは 1.5 GPa 以上でカルサイト II、2.0 GPa 以上でカルサイト III へと相転移し、アラゴナイトは約 40 GPa まで安定に存在することが知られている。炭酸カルシウムの準安定相であるファーテライトは、炭酸カルシウム結晶の形成初期に発生し、より安定なカルサイトおよびアラゴナイトに相転移することが知られている。ファーテライトの高圧下での挙動は未解明であり、準安定相の圧力応答は安定相とは異なる挙動を示すことが期待される。そこで本研究では、ファーテライトの高圧下 X 線その場観察を行った。

### 2. 実験方法

実験には合成したファーテライトを用いた。60 mM CaCl<sub>2</sub> 水溶液および 60 mM NaHCO<sub>3</sub> 水溶液を 30 °C に保った状態で混合し、10 分間攪拌した。その後、吸引濾過、純水による洗浄の後に乾燥させることで白色の粉末試料を得た。得られた試料は粉末 X 線回折 (XRD) により、ファーテライト単相であることを確認した。

高圧発生にはダイヤモンドアンビルセルを用いた。静水圧性を保つために、圧媒体としてヘリウムまたはメタノール・エタノール混合溶液を、試料とともに封入した。圧力測定にはルビー蛍光法を用いた。室温下で、0~14 GPa の圧力範囲で段階的に圧力を変化させ、各圧力において XRD 測定を行った。XRD 測定には、KEK の PF BL18C にて放射光 X 線を用いた。

### 3. 結果と考察

得られた XRD パターンから、ファーテライトは 4.7 GPa 以上の圧力で、ピークの分裂およびカルサイト III へ相転移することが確認された。Le Bail et al. (2011) のファーテライトの結晶構造モデルを用いて格子定数を計算すると、ピークの分裂とともに格子定数の飛びが見られ、対称性の崩れたファーテライト (ファーテライト II と呼ぶ) へ相転移したと考えられる。さらに加圧すると、ファーテライト II が減少するに伴いカルサイト III が増加することから、カルサイト III はファーテライト II から相転移していると考えられる。また、12.9 GPa 以上の圧力で、既存の炭酸カルシウム多形では説明できないスポット状の回折が確認できた。このことから、ファーテライト II の一部はカルサイト III に相転移せず、12.9 GPa で粗粒の結晶 (ファーテライト III と呼ぶ) へ相転移したと考えられる。また、常圧へ圧力を下げると、ファーテライトおよびカルサイトが見られたことから、ファーテライトからファーテライト II およびファーテライト II からファーテライト III は可逆の相転移、ファーテライト II からカルサイト III へは不可逆の相転移であると考えられる。本研究により、ファーテライトの常温での加圧において、これまで知られていなかった炭酸カルシウムの高圧相 (ファーテライト II およびファーテライト III) が初めて見出された。

キーワード: ファーテライト, 相転移, 高圧

Keywords: vaterite, phase transition, high-pressure

## 室温における SiO<sub>2</sub> ガラスの巨大塑性変形 Huge plastic deformation of SiO<sub>2</sub> glass at room temperature

若林 大佑<sup>1\*</sup>; 船守 展正<sup>1</sup>; 佐藤 友子<sup>2</sup>  
WAKABAYASHI, Daisuke<sup>1\*</sup>; FUNAMORI, Nobumasa<sup>1</sup>; SATO, Tomoko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 広島大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

共有結合性の固体は、硬い反面、壊れやすい性質を持つことが知られている。また、ガラスは長距離秩序を持たないために、結晶の場合のような転位を介した塑性変形を起こすことができない。しかし、高い共有結合性を持つ SiO<sub>2</sub> ガラスが、加圧処理により最大 20%程度まで高密度化されることは古くから知られており（永久高密度化）、これは広義の塑性変形と言える。この永久高密度化は、SiO<sub>4</sub> 四面体の構成するネットワーク構造の繋ぎ換えによる相転移現象として解釈できる [e.g., Wakabayashi et al., 2011]。最近、加圧軸に垂直な方向（動径方向）からの X 線回折により、一軸圧縮下における SiO<sub>2</sub> ガラスの第一ピークに対応する中距離構造の偏差歪みが測定された [Sato et al., 2013]。その結果、SiO<sub>2</sub> ガラスの中距離構造には、極めて大きな偏差歪みが観察され、減圧後も大きな偏差歪みが、ネットワーク構造の異方的な繋ぎ換えによって残留することが明らかになった。

本研究では、SiO<sub>2</sub> ガラスが密度変化を伴わない狭義の塑性変形を起こすかどうかを明らかにするために、一軸圧縮下における SiO<sub>2</sub> ガラスのバルク試料の形状の変化を測定した。さらに、偏差歪みが中距離構造のみに残留するのか、あるいは短距離構造にも残留するのかどうかを明らかにするため、回収試料に対して、50 keV の単色 X 線を動径方向から入射して、広い Q 領域で回折測定を行った。加圧にはダイヤモンドアンビル装置を用いた。適当な圧力で試料が上下のアンビルに挟まれて一軸圧縮状態になるように、円盤状の出発試料の厚みを調整した。Ar ガスを圧力媒体として、20 GPa (Run 1)、12 GPa (Run 2)、6 GPa (Run 3) までの圧力領域で、3 回の実験を実施した。試料の形状の変化は、光学顕微鏡を用いて測定した。X 線回折測定には、PF AR-NE1A の設備を利用した。なお、実験は全て室温で行われた。

Run 1 および Run 2 では、6-8 GPa 程度の圧力で一軸圧縮状態となった後、割れることなく試料の径が著しく拡大し、20 GPa において 10%程度もの径の拡大が観察された。測定された試料の巨視的な偏差歪みは、先行研究 [Sato et al., 2013] による微視的な偏差歪みに対して一桁程度大きく、SiO<sub>2</sub> ガラスが室温において塑性変形を起こしたことが示唆される。また、X 線回折の結果から、回収試料は、いずれも最大に高密度化された状態にあること（=約 20%の高密度化）、中距離のネットワーク構造のみに偏差歪みを持っており、その大きさは先行研究 [Sato et al., 2013] と整合的であることが明らかになった。一方、Run 3 では、2-3 GPa 程度の圧力で一軸圧縮状態となったが、6 GPa から回収された試料は塑性変形を起こしておらず、測定された回折パターンも通常のガラスと同じであった。静水圧条件では、高密度化は 9 GPa 程度から起きることが知られており [e.g., Wakabayashi et al., 2011]、高密度化されると塑性変形を起こし易くなるものと考えられる。

D. Wakabayashi et al., *Phys. Rev. B* **84**, 144103 (2011).

T. Sato et al., *J. Appl. Phys.* **114**, 103509 (2013).

キーワード: SiO<sub>2</sub> ガラス, 塑性変形, 永久高密度化, ネットワーク構造

Keywords: SiO<sub>2</sub> glass, plastic deformation, permanent densification, network structure



## 彗星核モデルとしての合成アミノ酸-シリカゲル複合体の衝撃圧縮 Shock compression of synthetic amino acid - silica gel complex modeling for comet nucleus

村井 拓朗<sup>1</sup>; 奥野 正幸<sup>2\*</sup>; 奥寺 浩樹<sup>2</sup>; 荒砂 茜<sup>1</sup>; 真下 茂<sup>3</sup>; Chen Liliang<sup>3</sup>; 水上 知行<sup>2</sup>; 荒井 章司<sup>2</sup>  
MURAI, Takuro<sup>1</sup>; OKUNO, Masayuki<sup>2\*</sup>; OKUDERA, Hiroki<sup>2</sup>; ARASUNA, Akane<sup>1</sup>; MASHIMO, Tsutomu<sup>3</sup>; CHEN, Liliang<sup>3</sup>; MIZUKAMI, Tomoyuki<sup>2</sup>; ARAI, Shoji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>3</sup> 熊本大学パルスパワー科学研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Kanazawa University, <sup>2</sup>Kanazawa University, <sup>3</sup>Kumamoto University

数種のアミノ酸などの有機物が、彗星のコマを形成する粒子やマーチソン隕石などから、見つまっている [1, 2]。これらの報告は、初期地球上の原始生物を形成した基本物質が宇宙空間で形成され、彗星や隕石によって地球上にもたらされた可能性を示唆するものである。

Greenberg et al. (1997)[3] は、多くの彗星が有機物、珪酸塩物質ならびに水で形成されていると報告している。他方、シリカゲルは非晶質の  $\text{SiO}_{4-n}(\text{OH})_n$  の骨格を持ち水分子を含んでいる。それゆえ、シリカゲルは彗星の適当なモデル物質である。本研究では、彗星核中のアミノ酸 (Lセリン) の衝撃圧縮に対する安定性を解明するために、合成Lセリン-シリカゲル複合体を衝撃圧縮し、回収した試料の構造変化を X 線回折測定、赤外及びラマン分光法により調べた。衝撃圧縮実験は、8.2、10.9、19.7、26.9 GPa の条件で実施した。

ラマン分光分析の結果から、合成複合体は結晶性と水和性の2種類のLセリンを含んでいることが明らかにされた。衝撃サンプルのラマンスペクトルは、19.7 GPa の衝撃圧縮で結晶性のLセリンは消失し、水和性のLセリンが残ることを示している。それゆえ、19.7 GPa のサンプルはアミノ酸として水和性のLセリンのみを含んでいる。このことは、Lセリンの分子間の水素結合は水分子の存在の下で、分解されるものと考えられる。

この19.6 GPa の衝撃圧力は、Blank et al. (1999) によって推定されている、地球に衝突する19%の彗星の推定圧力と矛盾しない。このことは、原始地球上の生命原料物質が、宇宙空間で生成され、彗星等によって地球上にもたらされた可能性を指示する。

### 引用文献

- [1] Elisila J.E., Glavin D.P., Dworkin J.P. (2009) Cometary glycine in samples returned by stardust. *Meteoritics & Planetary Science* 44, 1323-1330
- [2] Cronin J.R. and Pizzarello S. (1983) Amino acid in meteorites. *Advances in space research* 3, 5-18
- [3] Greenberg J.M., Aigen Li (1997) Silicate core-organic refractory mantle particles as interstellar dust and as aggregates in comets and stellar disks. *Advances in space research* 19, 981-990
- [4] Blank J.G., Millar G.H., Michael J.A., Winas R.E. (1999) Experimental shock chemistry of aqueous amino acid solution and cometary delivery of periodic compounds. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere* 31, 15-51

キーワード: 彗星, アミノ酸, シリカゲル, 衝撃圧縮

Keywords: comet, amino acid, silica gel, shock compression

## Popigai クレーター産インパクトダイヤモンドの微細組織と形成メカニズム Microtexture and formation mechanism of impact diamonds from the Popigai crater, Russia

大藤 弘明<sup>1\*</sup>; 山下 智晴<sup>1</sup>; Konstantin Litasov<sup>2</sup>; Valentin Afanasiev<sup>2</sup>; Nikolai Pokhilenko<sup>2</sup>  
OHFUJI, Hiroaki<sup>1\*</sup>; YAMASHITA, Tomoharu<sup>1</sup>; LITASOV, Konstantin<sup>2</sup>; AFANASIEV, Valentin<sup>2</sup>; POKHILENKO, Nikolai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> ロシア科学アカデミー

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Large meteoritic impact occasionally produces an extensive amount of diamond on the surface of the Earth [1, 2]. Popigai crater located in the north central Siberia is a typical example of such diamond-forming shock events and has recently been brought back into the spotlight due to its vast estimated reserves of the impact diamonds [2-4]. Authigenic impact diamonds occur in shocked graphite-bearing garnet-biotite gneisses that are found as inclusions in impact melt rocks, so-called tagamites and suevites. Popigai diamonds occur as irregular to tabular grains of 0.5-2 mm size (up to 10 mm) and usually show yellow, gray or black colors [3]. Electron microscopic (SEM and TEM) observations in previous studies described that they are polycrystalline aggregates of 0.1-1  $\mu\text{m}$  grains and show a distinct preferred orientation along the [111], which is in a coaxial relation to the [001] of the original graphite source [2-4]. This crystallographic feature as well as the occasional coexistence of lonsdaleite, a metastable carbon polymorph, suggest the Martensitic phase transformation for the potential formation process of the impact diamonds from Popigai crater. However, the textural feature of the impact diamonds and its variation has not fully been examined. Here, we present the result of detailed microtextural observations of impact diamonds from the Popigai crater by transmission electron microscopy (TEM) and discuss the formation mechanism and condition in comparison with those of synthetic diamonds obtained by high pressure and high temperature experiments.

In total 10 diamond grains (7 transparent yellowish and 3 black samples) from the Popigai crater were studied. Each sample was first analyzed by a micro-focus XRD equipped with a Mo target and an IP detector. The results showed that transparent samples consist mostly of diamond and occasionally contain lonsdaleite, while black ones are a mixture of graphite, lonsdaleite and diamond, which are all in a coaxial relation as shown by 2D diffraction patterns collected in transmission geometry. Each sample was then transferred to a focused ion beam (FIB) system to cut out TEM foil sections perpendicular to the surface (of the tabular grains). TEM observation revealed that although all the samples commonly possess layered structures and preferred orientation (mostly along [111] of diamond), there are varieties in crystallite (grain) size (down to 10-20 nm) and degree of preferred orientation. Taking into account the similarity in texture and preferred orientation feature between the Popigai diamonds and synthetic diamond, the variation is likely derived from the small difference in crystallinity of the starting graphite sources and perhaps more significantly from the difference in shock temperature.

According to the shock features recorded in the silicate minerals of the diamond-bearing impactites, the threshold pressure for the onset of the graphite-diamond transformation is estimated to be 34-36 GPa [3]. However, our recent experimental synthesis [5] demonstrated that a similar phase assembly (mostly diamond + traces of lonsdaleite) and microtexture can be produced at much lower pressures of 15-25 GPa at  $>2000$  °C. The shock pressure as well as shock- and post-shock temperature accompanied with the formation of the Popigai crater might be needed to be reevaluated carefully to understand the real nature of the giant impact.

- [1] Masaitis V.L. (1998) *Meteoritics & Planetary Science*. 33. 349-359.
- [2] Langenhorst F., Shafranovsky G.I., et al. (1999) *Geology*. 27. 747-750.
- [3] Deutsch A., Masaitis V.L., et al. (2000) *Episodes*. 23. 3-11.
- [4] Koeberl C., Masaitis V.L., et al. (1997) *Geology*. 25. 967-970.
- [5] Isobe F., Ohfuji H., et al. (2013) *Journal of Nanomaterials*. 2013. 380165.

## かんらん石微粒子急加熱・冷却による溶融／結晶成長組織 Melting and crystal growth textures developed in rapid heating and cooling of olivine fine particles

磯部 博志<sup>1\*</sup>; 榎藤 貴明<sup>1</sup>  
ISOBE, Hiroshi<sup>1\*</sup>; GONDO, Takaaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻  
<sup>1</sup> Grad. Sch. Sci. Tech., Kumamoto Univ.

かんらん石は、普遍的に存在する鉱物の一つである。固体地球だけではなく、コンドライト隕石を特徴付けるコンドリュールにおいても、かんらん石は最も普遍的に存在する鉱物である。コンドリュール中のかんらん石は、前駆物質の加熱過程とメルト粒子の冷却過程に依存した多様な組織を示すことが知られている。本研究では、高温炉中で微粒子を自由落下させる実験系 (Isobe and Gondo, 2013) を用いて、かんらん石混合微粒子の急加熱／急冷却実験を行った。実験生成物には、かんらん石の相関係と拡散、核形成、結晶成長挙動によって規定されていると考えられる特徴的な溶融／結晶成長組織が得られた。

実験に用いた試料は、天然の Fo90 および Fayalite 組成のかんらん石、および中心組成 Fo55 の人工かんらん石結晶から調製した。これらを約 100  $\mu$  m 径となるよう粉碎し、混合粉末とした。混合操作により、異なる組成のかんらん石粒子を含む粒子が形成した。加熱・急冷実験は、酸素分圧及び総ガス流量を制御したケラマックス縦型小型管状炉を用いた。試料粒子は、2 秒以内に 1400° C に達し、約 1 秒間 1400° C 以上の高温を経験した後、1 秒以内で急冷される。試料粒子の炉心管内落下速度は粒径と正の相関を持つため、粒子の最高温度、冷却速度も粒径に依存する。相対的に大きな粒子は、最高到達温度が相対的に低く、冷却速度は大きいと推定される。実験生成物は、メルト生成比が大きな粒子は球形微粒子として、溶融しなかった粒子は出発物質と同じかんらん石結晶片として回収される。回収した粒子は、走査電子顕微鏡による外形の観察を行った後、同一試料を樹脂に包埋し、粒子内部組織の観察および組成分析を行った。

かんらん石の相関係図から推定される通り、Fayalite 組成のかんらん石粒子は完全に溶融し、Fo90 組成の結晶はそれ自身では溶融していない。Fo55 組成の結晶は、ソリダス温度に達したと思われる粒子では粒子内部で急速な部分溶融が生じたと思われる組織を示す。複数組成かんらん石の混合粒子では、Fayalite 組成かんらん石の融解によって生じた鉄に富むメルトに Fo90 および Fo55 組成の結晶が溶け込む現象が起こる。このため、結晶／メルト界面には大きな濃度勾配が生じる。

冷却過程においては、ほぼ全体が融けた粒子では、極めて大きな冷却速度により特徴的に形成される棒状かんらん石コンドリュールや溶融微小隕石に相当する組織が形成した。融け残りの Fo90 および Fo55 組成の結晶を含む粒子では、融け残り結晶表面からの成長組織が観察される。また、溶融メルト部では樹枝状結晶の成長が見られ、粒子表面の形状にもその影響が現れる場合がある。また、実験時の酸素分圧条件が磁鉄鉱安定領域であった場合、かんらん石結晶粒間に一定方位の磁鉄鉱樹枝状結晶が形成する場合も見られる。これら組織から、数秒以内の時間スケールにおけるかんらん石結晶の溶融／融解／核形成／結晶化過程について議論する。

キーワード: かんらん石, コンドリュール, 核形成, 結晶成長, 樹枝状結晶, 急冷組織  
Keywords: Olivine, chondrule, nucleation, crystal growth, dendrites, quench texture

## アルミニウムを含まないケイ酸塩メルトおよびホウケイ酸塩メルトにおける熱膨張特性の温度依存性 Temperature-dependent thermal expansivities of aluminum-free silicate melts and borosilicate melts

菅原 透<sup>1\*</sup>; 勝木 準貴<sup>2</sup>; 吉田 智<sup>2</sup>; 松岡 純<sup>2</sup>; 南 和宏<sup>3</sup>; 越智 英治<sup>3</sup>  
SUGAWARA, Toru<sup>1\*</sup>; KATSUKI, Junki<sup>2</sup>; YOSHIDA, Satoshi<sup>2</sup>; MATSUOKA, Jun<sup>2</sup>; MINAMI, Kazuhiro<sup>3</sup>; OCHI, Eiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学大学院, <sup>2</sup> 滋賀県立大学, <sup>3</sup> 日本原燃

<sup>1</sup>Akita University, <sup>2</sup>The University of Shiga Prefecture, <sup>3</sup>Japan Nuclear Fuel Limited

常圧におけるシリケートメルトの熱膨張特性は、高圧相平衡の基礎となるギブスエネルギーの温度・圧力依存性の計算やガラス溶融炉の熱対流のシミュレーションなどに不可欠な物性である。これまでに、アルミノシリケートメルト (Lange, 1996; Potuzak et al., 2006) やマグマ組成のメルト (Lange, 1997; Ghiorso and Kress, 2004) では熱膨張 ( $dV/dT$ ) は組成のみの関数であり、温度に寄らないことが報告されてきた。一方、 $SiO_2$ - $TiO_2$ - $Na_2O$  系メルト (Liu and Lange, 2001) と  $50SiO_2$ - $25MgO$ - $25CaO$  (Gottsmann and Dingwell, 2000) メルトについては  $dV/dT$  が温度の増加で減少するとされているが、後者の原因については解明されていない。最近我々は、主成分がアルカリホウケイ酸塩メルトからなる模擬放射性廃棄物メルトもまた、 $dV/dT$  が顕著な負の温度依存性を示すことを明らかにした (Sugawara et al., 2013)。本研究では  $SiO_2$ - $Na_2O$  系のガラス、工業用ソーダ石灰ガラスおよびホウケイ酸塩ガラスを用いて密度測定を行い、メルトの  $dV/dT$  の温度依存性の一般的性質について考察した。

測定を行ったガラスの組成は  $(100-x)SiO_2$ - $xNa_2O$  ( $x=23, 32.2$ ),  $71SiO_2$ - $6MgO$ - $9CaO$ - $14Na_2O$ ,  $66.6SiO_2$ - $yB_2O_3$ - $(33.3-y)Na_2O$  ( $y=8.3, 16.6, 25$ ), および  $66.6SiO_2$ - $(12.5+z)B_2O_3$ - $(4.2-z)Al_2O_3$ - $zCaO$ - $(16.7-z)Na_2O$  ( $z=0, 4.2$ ) (mol%) である。メルトの密度はアルキメデス二球法により測定した。また密度測定後のガラス試料をガラス転移領域でアニールした後、室温でのガラスの密度測定と TMA による熱膨張測定を行った。室温密度と熱膨張係数を組み合わせることでガラス転移領域における過冷却メルトの密度を求めた。この値と高温密度を組み合わせることで、メルトの密度およびモル体積の温度依存性を明らかにし、 $dV/dT$  を決定した。 $SiO_2$ - $Na_2O$  系メルトについては文献値とも合わせて解析を行った。

本研究で測定したいずれのメルトについても  $dV/dT$  は負の温度依存性を示した。 $SiO_2$ - $Na_2O$  系メルトの  $dV/dT$  は  $SiO_2=50$  から  $67mol\%$  にかけて温度依存性が増加した後、さらに  $SiO_2$  が増加すると  $dV/dT$  そのものがゼロに近づいて温度依存性も減少することがわかった。本研究における  $71SiO_2$ - $6MgO$ - $9CaO$ - $14Na_2O$  の  $dV/dT$  の負の温度依存性は  $67.8SiO_2$ - $32.2Na_2O$  メルト、diopside メルト (Gottsmann and Dingwell, 2000) および wollastonite メルト (Potuzak et al., 2006) の  $dV/dT$  値の加減性を仮定した計算値と定量的に一致した。高温ラマン分光測定によれば、 $SiO_2$ - $Na_2O$  系メルトおよび  $SiO_2$ - $Na_2O$ - $MgO$  系メルトにおいて、 $SiO_2$  と  $MgO$  の増加および温度の増加とともに Q4 種が顕著に増加することが知られている (Maehara et al., 2004, 2005)。従って、 $SiO_2$ - $Na_2O$  系メルトおよび  $MgO$  含有メルトにおいて観察される  $dV/dT$  の温度依存性は、強固な構造である Q4 ユニット量の温度および組成変化に関連していると考えられる。

本研究で測定したホウケイ酸塩メルトにおいては  $66.6SiO_2$ - $8.3B_2O_3$ - $25Na_2O$  が最も  $dV/dT$  の負の温度依存性が顕著であり、 $Na_2O$  を  $B_2O_3$  または  $CaO$  で置換、 $B_2O_3$  を  $Al_2O_3$  で置換することにより、 $dV/dT$  の温度変化は小さくなった。これらのことは、 $BO_4$  ユニットよりも  $BO_3$  ユニットのモル体積が大きいこと、ならびに 4 配位から 3 配位へのホウ素配位数の変化が温度に対して非線形的に生じている (Wu and Stebbins, 2010) ことに由来するものと思われる。

謝辞：本研究は経済産業省「使用済燃料再処理事業高度化補助金」の交付を受け、日本原燃(株)が実施している補助事業の成果の一部である。

キーワード: シリケートメルト, 熱膨張, 密度測定

Keywords: silicate melt, thermal expansivity, densitometry



Thermodynamic properties of Mg-postperovskite with  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$  dopant: an internally consistent LSDA+U study  
Thermodynamic properties of Mg-postperovskite with  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$  dopant: an internally consistent LSDA+U study

WANG, Xianlong<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>  
WANG, Xianlong<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology  
<sup>1</sup>GRC, Ehime University and ELSI, Tokyo Institute of Technology

Thermodynamic properties of  $\text{MgSiO}_3$  perovskite (Pv) and postperovskite (PPv) with Fe and Al incorporation at high pressure and high temperature are important to understand the Earth's lower mantle (LM). The thermodynamic properties of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , and  $\text{Al}^{3+}$ -bearing Pv[1,2,3] and  $\text{Fe}^{2+}$ -bearing PPv[4] have been investigated in our previous works uniformly based on first-principles method combined with the internally consistent LSDA+U method and quasi-harmonic approximation (QHA). However, to date, effects of trivalent ions,  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Al}^{3+}$ , on the thermodynamic properties of PPv are still unclear. In this work, by using the same methods with previous works, the structural, electronic, magnetic, and thermodynamic properties of  $(\text{Mg},\text{Fe}^{3+})(\text{Si},\text{Fe}^{3+})\text{O}_3$  and  $(\text{Mg},\text{Fe}^{3+})(\text{Si},\text{Al}^{3+})\text{O}_3$  PPv at several pressures, from 0 GPa to 180 GPa, are investigated. Our results show that for  $(\text{Mg},\text{Fe}^{3+})(\text{Si},\text{Fe}^{3+})\text{O}_3$  PPv,  $\text{Fe}^{3+}$  ions substituted at Mg and Si site respectively have the high and low spin state within the deep LM pressure range, while  $\text{Fe}^{3+}$  in  $(\text{Mg},\text{Fe}^{3+})(\text{Si},\text{Al}^{3+})\text{O}_3$  PPv remains in the high spin state. Furthermore, separated phase between  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in PPv is found unfavorable.

References:

- [1] Metsue, A. and Tsuchiya, T. (2012) *Geophys. J. Int.* **190**, 310.
- [2] Tsuchiya, T. and Wang, X. (2013) *J. Geophys.* **118**, 83.
- [3] Wang, X. and Tsuchiya, T. To be submitted.
- [4] Metsue, A. and Tsuchiya, T. (2011) *J. Geophys. Res.* **116**, B08207.

キーワード: First-principles method, Internally consistent LSDA+U, Thermodynamic properties, Postperovskite  
Keywords: First-principles method, Internally consistent LSDA+U, Thermodynamic properties, Postperovskite

## Ca(OD)<sub>2</sub> の高圧下での熱膨張 Thermal expansion of Ca(OD)<sub>2</sub> at high pressure

永井 隆哉<sup>1\*</sup>; 佐野 亜沙美<sup>2</sup>; 飯塚 理子<sup>3</sup>; 鍵 裕之<sup>3</sup>; 服部 高典<sup>4</sup>  
NAGAI, Takaya<sup>1\*</sup>; SANO, Asami<sup>2</sup>; IIZUKA, Riko<sup>3</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>3</sup>; HATTORI, Takanori<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>4</sup> J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

<sup>1</sup> Faculty of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup> Japan Atomic Energy Agency, <sup>3</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>4</sup> Materials and Life Science Division, J-PARC Center

Ca(OH)<sub>2</sub> is one of the important hydrous minerals to understand structural behavior at high pressure and high temperature, because this type of structure is a building unit in more complex hydrous phases such as chondrodite. It is surprising that only a few previous researches can be found on crystallography of Ca(OH)<sub>2</sub> in the conditions of simultaneously high pressure and high temperature. We gave an oral presentation about some preliminary results in this conference last year. We have continued to analyze the data carefully and will add some new information.

Deuterated samples were prepared via hydrothermal treatment with CaO fine powders and excess D<sub>2</sub>O water in a Teflon lined stainless steel autoclave at 493 K for 4 days. After the hydrothermal treatment was completed, precipitates were filtered out, washed with D<sub>2</sub>O water, and then dried at 383 K under vacuum for 3 hours. The products were confirmed to have the CdI<sub>2</sub>-type structure by conventional powder X-ray diffraction measurements and were checked to be deuterated by IR absorption spectra. Synchrotron X-ray diffraction experiments were performed at the beamline AR-NE5C, KEK, Japan in order to obtain cell parameters of Ca(OD)<sub>2</sub> at various P-T conditions from 2-4 GPa and 300-800 K. TOF neutron powder diffraction measurements of Ca(OD)<sub>2</sub> were carried out from 300 to 773 K at high pressure at the PLANET beamline in J-PARC, Japan. Pressure was estimated by comparing unit cell parameters with those obtained by synchrotron experiments.

All our TOF data obtained include only Ca(OD)<sub>2</sub> peaks and no peaks from sample surrounding materials such as ZrO<sub>2</sub> pressure medium, graphite furnace and WC anvils could be detected owing to radial collimators equipped with the 6-ram pressure apparatus (Atsuhime). The detailed structure parameters such as lattice parameters and atomic coordinates could be reasonably refined by the Rietveld method by using a program GSAS. It is an interesting result that thermal expansion along the *c*-axis seems to be suppressed at high pressure comparing to that at ambient pressure. Mechanism of the thermal expansion of Ca(OD)<sub>2</sub> at high pressure will be discussed.

キーワード: ポートランドト, 熱膨張, 高圧, 放射光X線回折, TOF 中性子回折

Keywords: portlandite, thermal expansion, high pressure, synchrotron X-ray diffraction, TOF neutron diffraction

## SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-RO (R=Mg, Ca, Sr, Ba) 系メルトの高温熱容量 High-temperature heat capacity of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-RO (R=Mg, Ca, Sr, Ba) melts

菅原 透<sup>1\*</sup>  
SUGAWARA, Toru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学大学院  
<sup>1</sup> Akita University

シリケートメルトの熱容量はマグマの相関係の熱力学的考察や工業用ガラスの溶融プロセスでの熱流動シミュレーションにおける重要な物性のうちのひとつである。これまでの研究によれば、アルミニウムを含まないシリケートメルトの熱容量は温度に依存せず、また組成変化に対して線形的に変化するが、アルミノシリケートメルトの熱容量は正の温度依存性を有し、加えて複雑な組成依存性を示すことが知られている (Richet and Bottinga, 1985; Richet and Mysen, 2005)。しかしながら、ガラス転移領域からリキダス以上の広い温度範囲に渡る測定データが少ないために、その温度・組成依存性の詳細については不明な部分が多い。本研究では Ca, Sr, Ba を含むアルミノシリケートメルトについて新たな熱量測定を行った。

測定は 50SiO<sub>2</sub>-25Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-25CaO (An), 36.5SiO<sub>2</sub>-27Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-36.5CaO (Ca36.5), 8SiO<sub>2</sub>-30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-62CaO (Ca62), 75SiO<sub>2</sub>-12.5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-12.5SrO or 12.5BaO (Sr12.5, Ba12.5) 組成 (mol%) について行った。落下型熱量計を用いて 873K から 1889K の温度のメルトと 273K のガラスの間の相対エンタルピーを測定した。得られた相対エンタルピーを温度の関数として近似し、その微分から比熱を求めた。比熱は An について 1.356+0.0001151T(K) (J/K-g) と求まり、Richet and Bottinga (1985) による測定値とよく一致した。Ca36.5, Ca62, Sr12.5, Ba12.5 については、それぞれ 1.532, 1.508, 1.313, 1.160 (J/g-K) と求まり、温度によらず一定であった。

本研究による測定結果を既報の落下熱量測定による高温熱容量データ (n=11, Richet and Bottinga, 1984; Courtial and Richet, 1993; Neuville and Richet, 1991; Richet and Neuville, 1992) および示差走査熱測定による T<sub>g</sub> よりやや上の熱容量データ (n=22, Webb, 2008; 2011) と組み合わせ、SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-RO (R=Mg, Ca, Sr, Ba) 系メルトの熱容量の温度・組成依存性を考察した。Courtial and Richet (1993) が報告したように、SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 系メルトにおいては熱容量に正の温度依存性が観察される。一方、SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO 系で正の温度依存性を示すのは An 組成のみに限定される。熱容量の組成変化は symmetric solution モデルを用いておおよそ近似することができた。メルトの混合熱容量はいずれも負の非理想性を示し、負の程度は Ba>Sr>Ca>Mg の順に大きくなった。このことは Field strength の小さなアルカリ土類金属イオンほど Al の電荷補償イオンと成りやすく、原子配置の自由度が制約されることに起因するものと考えられる。Sr および Ba 含有メルトの熱容量の温度依存性の有無については、さらに組成範囲を広げて検証する必要がある。

キーワード: シリケートメルト, 比熱, 熱容量, 熱測定  
Keywords: Silicate melt, Heat capacity, Calorimetry

## チタンを含むマグマの高圧下での粘度 Viscosity of titanium-bearing silicate melts at high pressure

鈴木 昭夫<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Akio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻  
<sup>1</sup>Tohoku University

TiO<sub>2</sub> は一般に地球のマグマでは副成分だが、月のマグマでは主成分である。特に高チタンマグマでは 10wt% を超える含有量であり、Apollo 14 black glass では 16wt% に達するものもある。マグマは惑星内部で岩石が溶けて生ずるため、噴出の過程を考える上で高圧高温下での物性を知ることは重要である。さて、マグマ中での Si は、地表付近の圧力において一般に 4 配位となることが知られており、SiO<sub>4</sub> 四面体がマグマ中ではネットワークを形成している。ネットワークを構成する陽イオン (T イオン) には Al などがあり、この TO<sub>4</sub> ネットワークの構造が粘度に大きな影響を与えている。Ti はマグマの組成、温度、圧力に依存して配位数が変わるため、Ti を含むマグマ (珪酸塩メルト) の粘度は複雑な挙動を示す。

そこで我々は、Ti を含む珪酸塩メルトの高圧下での粘度の変化を知るため、放射光を用いた X 線影像落球法で粘度測定を行っている。今回は K<sub>2</sub>TiSi<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 組成のメルトについて報告する。実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光実験施設である PF-AR の NE7A ステーションにおいて行った。試料容器中に K<sub>2</sub>TiSi<sub>4</sub>O<sub>11</sub> 組成の粉末と白金球を入れておき、高圧高温下においてメルト中を落下する白金球の速度を調べた。その後、落下速度とストークスの式から粘度を求めた。実験の結果、3GPa 付近で粘度が極小となることがわかった。3GPa 以上での粘度の増加は、メルト中の Ti の配位数や Ti を含むネットワーク構造が変化していることを示唆している。ところで、高い TiO<sub>2</sub> 含有量である Apollo 14 black glass 組成メルトの密度は Sakamaki et al. (2009) によって調べられ、地球のマグマと比べて圧縮率が大きいことが分かっている。このため、圧力の増加と共に急激に周囲のマントルとの密度差が小さくなり、やがて密度逆転を起こす。Apollo 14 black glass は本研究で用いた K<sub>2</sub>TiSi<sub>4</sub>O<sub>11</sub> と近い TiO<sub>2</sub> 量であるので、同様に高圧下で粘度が増加することが期待される。さらに、マントルとマグマの密度差の減少および粘度の増加によって、月深部では高チタンマグマが移動しにくくなると予想される。月深部の月震波高減衰域は、マントルの部分熔融が原因となった可能性がある。

キーワード: マグマ, 粘度, 月, マントル  
Keywords: magma, viscosity, moon, mantle



## 放射光メスバウア分光法を用いた高圧下における Fe-Si 合金の物性研究 Study of physical properties of Fe-Si alloy at high pressure using using synchrotron radiation Mossbauer spectroscopy

鈴木 那奈美<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 浜田 麻希<sup>3</sup>; 坂巻 竜也<sup>1</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>; 増田 亮<sup>4</sup>; 三井 隆也<sup>5</sup>  
SUZUKI, Nanami<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; HAMADA, Maki<sup>3</sup>; SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>; MASUDA, Ryo<sup>4</sup>; MITSUI, Takaya<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>3</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>4</sup> 京都大学原子炉実験所, <sup>5</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Earth and planetary materials science, Graduate School of Science, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Hyogo, 679-5198, Japan, <sup>3</sup>School of Natural System, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, 920-119, <sup>4</sup>Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka, 590-0494, Japan, <sup>5</sup>Japan Atomic Energy Agency, Hyogo, 679-5148, Japan

The Earth's core is divided into the liquid outer core and solid inner core based on seismological observations. The Earth's core has been geochemically and cosmochemically thought to be mainly composed of Fe. The density of the core is smaller than that of pure iron under the core conditions. Therefore, the core has been considered to contain light elements, such as H, S, Si, C, and O. Si is one of the most important light elements in the core. Although the phase relations and compression behaviors in the Fe-Si alloy have been studied at high pressure and temperature in order to investigate properties of the inner core, magnetic properties of the alloys have not been studied well. In order to clarify the relationship between the magnetic transition and the structural transition of the Fe-Si alloy, we made simultaneous measurements of X-ray diffraction and synchrotron Mössbauer spectroscopy of the Fe-Si alloy up to 40 GPa at room temperature.

The Fe-Si alloy used for the measurements has a composition of  $\text{Fe}_{0.95}\text{Si}_{0.05}$  enriched with  $^{57}\text{Fe}$ . The starting material was synthesized by melting the mixture of  $^{57}\text{Fe}$  and Fe-Si alloys under the Ar- $\text{H}_2$  atmosphere by laser heating. Mössbauer spectra and XRD patterns were obtained at the beamlines, BL10XU and BL11XU of SPring-8 up to 40 GPa at room temperature. Our Mössbauer data together with X-ray diffraction data revealed that the magnetic transition from magnetic to non-magnetic phase occurs at 18 GPa simultaneously with the bcc to hcp transition. The change in the sound velocity and compression behavior of the Fe-Si alloy has been reported associated with the structural transformation of the alloy from bcc to hcp. The present results imply that the change in these physical properties is caused not only by the structural change but also by the magnetic transition.

## Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> のポストスピネル転移相境界線の決定 Experimental determination of post-spinel transition boundary in Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

松澤 太亮<sup>1\*</sup>; 糞谷 浩<sup>1</sup>; 赤荻 正樹<sup>1</sup>  
MATSUZAWA, Taisuke<sup>1\*</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1</sup>; AKAOGI, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大学理学部

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Gakushuin University

(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> カンラン石は、上部マントルで最も豊富な鉱物である。そのカンラン石は、マントル遷移層中で変形スピネル型を経て、スピネル型 (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> に相転移する。Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> スピネルはその端成分であるため、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> スピネルの相転移は多くの研究者によって研究されてきた (Kawada 1977, Ohtani 1979, Morooka 1992, Katsura et al. 1998)。これらの研究によって、スピネル型 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> が約 18GPa で 2Fe<sub>x</sub>O+SiO<sub>2</sub>+2(1-x)Fe に分解することが明らかにされたが、2価鉄を含むために高温高压下での酸素分圧によって相境界線が変化し得ることから、その相境界線は十分には確定されていなかった。本研究では、Fe-FeO バッファーにより酸素分圧をコントロールし、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> のポストスピネル転移の相境界線を決定した。

出発物質は Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>(fayalite)、Fe<sub>x</sub>O 及び Fe の混合物 (モル比 10 : 2 : 1) であり、Fe カプセルに詰められた。高温高压下で試料の酸素分圧は Fe-FeO バッファーでコントロールされた。川井型 6-8 マルチアンビル高压発生装置を用いて、出発試料を 16~19.5GPa、1000~1400 °C の条件下で 3~6 時間保持し、急冷し回収した。回収した試料について、微小領域及び粉末 X 線回折装置と SEM-EDS を用いて、相の同定と Fe<sub>x</sub>O の格子定数の決定を行った。McCammon(1993) による Fe<sub>x</sub>O の組成と格子定数の関係を用いて x の値を求めた。

Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> のポストスピネル転移相境界線は 1000~1400 °C の温度領域において、 $P \text{ (GPa)} = -0.0021T \text{ (}^\circ\text{C)} + 19.85$  と決定され、小さな負の傾きを持つことが分かった。P - T 相図上での本研究の相境界線の位置は、Ohtani (1979) や Katsura et al. (1998) とほぼ調和的である。Katsura et al. (1998) では、従来の研究による Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ポストスピネル転移相境界線の負勾配の原因が Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> の分解反応の遅さにあると解釈された。本研究では、1000 °C で 3 時間の実験で Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> スピネルの分解反応が完全に進行し、1000 °C で 3 時間及び 6 時間保持された高压回収試料中の Fe<sub>x</sub>O の x 値が誤差範囲で等しい値を示した。これらのことより、1000 °C において少なくとも 3 時間加熱を行えば平衡に達したと考えられる。今回は、1000 °C で 6 時間、1200 °C で 3 時間、1400 °C で 3 時間保持した実験結果に基づき、小さな負の勾配を持つ相境界線を決めており、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> のポストスピネル転移相境界線の負勾配は、速度論による見かけのものではなく本質的なものと考えられる。

キーワード: Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, ポストスピネル, スピネル, 高压  
Keywords: Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, post-spinel, spinel, high-pressure

## ラマンスペクトルと堇青石の結晶方位依存性 Relationship between Raman spectral pattern and crystal orientation of cordierite

阿部 都<sup>1\*</sup>; Madhusoodhan Satish-Kumar<sup>1</sup>; 鍵 裕之<sup>2</sup>  
ABE, Miyako<sup>1\*</sup>; MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>1</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新潟大学, <sup>2</sup>東京大学

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Tokyo University

In the crystal structure of cordierite, six-membered rings of (Al, Si) O<sub>4</sub> are stacked along the *c*-axis and form a channel structure. This channel structure can trap volatiles such as H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>, and makes cordierite an important mineral for preserving the information of past fluid conditions during metamorphism. Earlier studies have shown that the intensity of CO<sub>2</sub> Raman band represents the contents of CO<sub>2</sub> inside the channel (e.g. Kaindl et al., 2006). Carbon dioxide is aligned linearly along the *a*-axis in the channel (Aines and Rossman, 1984), and therefore the peak intensity of CO<sub>2</sub> at 1383cm<sup>-1</sup> in the Raman spectra varies considerably depending on the crystal orientation of cordierite (Kolesov and Geiger, 2000). Thus, it is necessary to correct the effect of crystal orientation for the determination of true contents of CO<sub>2</sub> in randomly oriented cordierite grains in metamorphic rocks. As a first step to accurately quantify the CO<sub>2</sub> content in cordierite using Raman spectroscopy, we analyzed euhedral crystals of cordierite for revealing the relationship between Raman spectral patterns and crystal orientation.

In this study, euhedral cordierite crystals collected from the volcanic ash deposit in the Takiga swamp, Gunma Prefecture, Japan were examined in detail using micro-Raman spectroscopy. Raman spectra were observed with different conditions for each analytical point to check the effect of polarization and crystal orientation. Mineral chemical analyses of cordierite crystals indicate homogeneity in its composition ( $X_{Mg} = 0.735 \pm 0.14$ ). However, different Raman spectral patterns were obtained for (001) plane and (100) plane; the (001) plane show only one pattern, but the (100) plane showed three different patterns. Peak splitting between 554 and 575 cm<sup>-1</sup>, the peaks of 970 cm<sup>-1</sup> and 1180 cm<sup>-1</sup> changed its intensity drastically, whereas the peak at 670 cm<sup>-1</sup> remained constant. We selected five Raman peaks at 554 cm<sup>-1</sup>, 575 cm<sup>-1</sup>, 670 cm<sup>-1</sup>, 970 cm<sup>-1</sup>, and 1180 cm<sup>-1</sup> attributable to the cordierite (Al, Si)O<sub>4</sub> structure and analyzed the intensity ratio of these five peaks in different orientations. A parameter of  $\Delta$ intensity was defined, where the intensity ratios of (001) plane were concentrated around 0, and those of (100) plane deviates from 0. This parameter can be used to identify the crystal orientation of cordierite. The spectral variations observed in cordierite and its relationship with crystal orientation are interpreted based on the stretching and/or bending vibrations of cordierite unit cell structure

Keywords: Cordierite, Raman spectroscopy, Crystal orientation

### References

Aines, R. D. and Rossman, G. R. (1984) The high temperature behavior of water and carbon dioxide in cordierite and beryl. *American Mineralogist*, 69, 319-327

Kaindl, R., Tropper, P. and Deibl, I. (2006) A semi-quantitative technique for determination of CO<sub>2</sub> in cordierite by Raman spectroscopy in thin sections. *European Journal of Mineralogy*, 18, 331-335

Kolesov, B. A. and Geiger, C. A. (2000) Cordierite II: The role of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. *American Mineralogist*, 85, 1265-1274

キーワード: 堇青石, ラマン分光法, 結晶方位

Keywords: Cordierite, Raman spectroscopy, Crystal orientation

## 岡山県新見市大佐山産緑簾石の低温メスbauer分光 The low-temperature Moessbauer spectroscopy of an M3' epidote from Osayama, Okayama prefecture, Japan

山川 純次<sup>1\*</sup>; 川瀬 雅也<sup>2</sup>; 黒葛 真行<sup>3</sup>; 森本 正太郎<sup>4</sup>; 斎藤 直<sup>5</sup>

YAMAKAWA, Junji<sup>1\*</sup>; KAWASE, Masaya<sup>2</sup>; KUROKUZU, Masayuki<sup>3</sup>; MORIMOTO, Shotaro<sup>4</sup>; SAITO, Tadashi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 長浜バイオ大学, <sup>3</sup> 京都大学原子炉実験所, <sup>4</sup> 大阪大谷大学・薬学部, <sup>5</sup> 大阪大学・RIセンター

<sup>1</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, <sup>2</sup>Nagahama Institute of Bio-Science and Technology, <sup>3</sup>Research Reactor Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Faculty of Pharmacy, Osaka Ohtani University, <sup>5</sup>Radioisotope Center, Osaka University

緑簾石は低変性度の変成岩等に普通に見られる鉱物である。化学組成は  $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe}^{3+},\text{Fe}^{2+})\text{Al}_2\text{SiO}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{O},\text{OH})$  で、生成条件に対応してゾーニング組織を形成する。結晶格子中の  $\text{Fe}^{2+}$  と  $\text{Fe}^{3+}$  の M1 および M3 サイトへの分配比率はメスbauer分光法で検出可能であり、緑簾石の安定/準安定に関する情報を得ることが出来る。

さらにいくつかの緑簾石ではメスbauer分光法のみで同定可能なサイトである M3' サイトに Fe が分配されている。Fe の M3' サイトへの分配率は X 線結晶構造解析法では推定できないため、微小な秩序構造を形成すると同時に結晶中で均質に分散していると考えられている。また Fe の M1/M3/M3' サイトへの分配率は緑簾石の生成温度を反映していると考えられている。今回、M3' サイトを持つ緑簾石サンプルについて低温でメスbauerスペクトルと磁化率を測定し、M3' サイトの性質について検討を行った。

本研究で用いた緑簾石サンプルは岡山県産 (Ep1) および岩手県産 (Ep2) である。化学組成は EPMA と CHNS/O アナライザで決定した。結晶構造は単結晶法を用いて決定した。メスbauerスペクトルは Rh マトリックスを使用し  $^{57}\text{Co}$  を線源とした測定システムにより 0K-300K で測定した。また磁気物性を検討するために、同様の温度範囲で磁化測定を行った。

解析の結果、低温では Ep1 の磁気物性が Ep2 と異なることが判明した。そこで各サンプルの M1 および M3 サイトの磁気緩和時間を低温メスbauerスペクトルから求め、温度依存性を検討した。その結果、比較的低温で形成された岩体由来である Ep1 の M3 サイトと比較的高温で形成された岩体由来である Ep2 の M3 サイトで磁気緩和挙動が異なっていた。これは Ep1 の M3 サイトにおいて、岩体の形成温度に応じた X 線回折法では検出できない構造変形が発生して磁気環境が変化したため、メスbauerスペクトルのみで検出可能な M3' サイトに変化していることを示唆している。

キーワード: 緑簾石, メスbauer分光, M3' サイト, 磁気緩和

Keywords: Epidote, Moessbauer spectroscopy, M3' site, Magnetic susceptibility



## 氷点近傍でのイカ石 ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) の結晶構造変化 Structural change in ikaite ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) near the freezing point temperature of water

舘野 夏紀<sup>1</sup>; 興野 純<sup>1\*</sup>

TATENO, Natsuki<sup>1</sup>; KYONO, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系地球進化科学専攻

<sup>1</sup> Div of Earth Evolution Sciences, Grad Sch of Life & Environmental Sciences, Univ of Tsukuba

炭酸カルシウムのひとつであるイカ石 (ikaite) は、氷点下から氷点付近で熱力学的に安定であり、常温になると急速に脱水し方解石やバテライトへと相転移する。奇岩として知られるグレンドン石や玄能石岩は、結晶外形のみを残して方解石に相転移したイカ石の仮像であると考えられている。本研究は、合成イカ石 ( $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) の単結晶 X 線回折実験によって、イカ石の温度変化に伴う脱水分解メカニズムを解明することを目的として行った。イカ石の結晶構造は、 $-50^\circ\text{C}$  で、単斜晶系、空間群  $C2/c$ ,  $a = 8.8134(1)$ ,  $b = 8.3108(1)$ ,  $c = 11.0183(1) \text{ \AA}$ ,  $\beta = 110.418(1)^\circ$  であり、単位格子中に存在する 4 個の  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  分子が互いを水素結合のネットワークで支え合うことで構造を形成している。低温単結晶 XRD 測定の結果、単位格子体積は  $-50^\circ\text{C}$  から  $-10^\circ\text{C}$  までは連続的に増加し、その増加率は  $-50^\circ\text{C}$  から  $-20^\circ\text{C}$  までは  $756.3$  から  $758.0 \text{ \AA}^3$  と非常に僅かであった。しかし、単位格子体積は、 $-10^\circ\text{C}$  で  $771.0 \text{ \AA}^3$  に著しく膨張し、その後  $0^\circ\text{C}$  で回折点が消失し、イカ石の結晶性は失われた。単位格子は、温度上昇に伴って異方的に膨張し、 $c$  軸が最も大きな伸長を示し、 $a$  軸も大きく伸長したが、 $b$  軸はほぼ一定であった。分子内結合の変化は、 $-10^\circ\text{C}$  で  $\text{Ca-O}(5)$  結合距離が著しく伸長し、これは、イカ石の脱水プロセスの最初が  $\text{Ca}$  原子と  $\text{O}(5)$  原子との結合の解離であることを示唆している。また、分子間距離は、 $\text{O}(2)\text{-O}(3)$ ,  $\text{O}(2)\text{-O}(5)$ ,  $\text{O}(4)\text{-O}(5)$  間距離が伸長し、 $\text{O}(4)\text{-O}(5)$  間距離は収縮した。分子間の  $\text{O}(2)\text{-O}(5)$  距離の増加は、温度上昇に伴う単位格子の  $a$  軸方向への伸長の直接的な原因である。さらに、分子間の原子間角度は、 $\text{Ca-O}(3)\text{-O}(2)$  間角が、温度上昇に伴って単調に増加した。これは、温度増加により  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  分子が  $b$  軸に平行に回転運動していることを意味し、この運動が単位格子の  $c$  軸方向への大きな伸長の原因となっている。

キーワード: イカ石, バテライト, 炭酸カルシウム, 仮像, 低温単結晶 X 線回折

Keywords: ikaite, vaterite, calcium carbonate, pseudomorph, low-temperature X-ray diffraction study

## 放射光 X 線粉末回折によるハイドログロッシュラー構造中の水素原子の挙動の解明 Synchrotron powder X-ray diffraction study of the structural thermal properties on hydrogrossular

加藤 正人<sup>1\*</sup>; 興野 純<sup>2</sup>

KATO, Masato<sup>1\*</sup>; KYONO, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境科学研究科, <sup>2</sup> 筑波大学生命環境系

<sup>1</sup>Graduate School of Life and Environmental Science, <sup>2</sup>Graduate School of Life and Environmental Science

合成 hydrogrossular, katoite  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{O}_4\text{H}_4)_3$ , の 10 K から 300 K までの低温放射光 X 線粉末回折測定を行い, リートベルト解析によって結晶構造精密化を行った. 低温下での katoite の構造相転移の可能性を検証するために, 10 K で測定した X 線回折パターンに対して, 常温での空間群  $Ia-3d$ , 高压相の空間群  $I-43d$ , majorite の空間群  $I4_1/acd$  の 3 つの構造モデルを用いて結晶構造解析を行った. 解析の結果, 残差の  $R_w$  値は  $Ia-3d$  のとき最小 ( $R_w=9.4\%$ ) となり, したがって低温下では構造相転移をせず常温常圧の結晶構造を維持していることがわかった. これは, katoite の高压相転移の単位格子の収縮率と比較した場合に低温下では単位格子の収縮率が 1/8 倍と非常に小さいため, 構造相転移に至らなかったと推測される. しかし, 温度低下に伴う格子定数の変化は, 100 K を境に体積変化率が急激に変化して不連続となった. Katoite の単位格子体積は温度低下の過程で 100 K から単調に減少し 10 K で最小値を示したが,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体内の O-H 結合距離は 40 K から 10 K まで連続的に増加した. さらに,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体体積は 100 K から 20 K まで連続的に減少したが, 10 K で著しい増加に転じた. このとき, 40 K 以下での O-H 結合距離の増加は, katoite の単位格子の収縮に伴って生じる原子同士の反発によるものと考えられる. 一方,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体体積の変化は,  $\text{AlO}_6$  八面体体積の変化と常に逆相関の関係を示した. したがって, katoite が極低温下でも構造相転移せずにその構造を維持できる理由は,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体と  $\text{AlO}_6$  八面体が katoite に相転移を及ぼすような収縮を打ち消しあうためだと考えられる. 極低温下での水素原子の挙動は, katoite の結晶構造の大きな変化を与えるには及ばないが,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体内の OH 基の結合の対称性に関しては変化が生じていると推察される.

キーワード: katoite, 放射光 X 線粉末回折, リートベルト解析,  $\text{O}_4\text{H}_4$  四面体

Keywords: katoite, synchrotron powder X-ray diffraction, Rietveld analysis,  $\text{O}_4\text{H}_4$  tetrahedron

## スコレス沸石における加熱脱水に伴う相変化に関する研究 Structural study on the phase transformation of natural scolecite with increasing temperature

内田 貴大<sup>1\*</sup>; 栗林 貴弘<sup>1</sup>; 長瀬 敏郎<sup>2</sup>

UCHIDA, Takahiro<sup>1\*</sup>; KURIBAYASHI, Takahiro<sup>1</sup>; NAGASE, Toshiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東北大学 総合学術博物館

<sup>1</sup>Department of Earth Science, graduate school of science, Tohoku University, <sup>2</sup>The Tohoku University Museum, Tohoku University

Scolecite,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  is classified to fibrous zeolite group. The sequence of general phase transformation with increasing temperature has been reported for natural scolecite: scolecite  $\rightarrow$  meta-scolecite  $\rightarrow$  amorphous phase and decomposes to An + Qtz (Rykl *et al.* 1986; Gottardi and Galli 1985).

In this study, the high-T evolution of the structure of natural scolecite from Poona, India were studied up to 573 K to reevaluate the dehydration process of scolecite using TG-DTA and in situ single crystal X-ray diffraction experiments.

As the results from structural refinement at room temperature, the lattice constants of the sample are determined as follows:  $a = 18.504(3)\text{Å}$ ,  $b = 18.971(2)\text{Å}$ ,  $c = 6.5262(9)\text{Å}$  and  $\beta = 90.558(5)^\circ$ . The crystal structure of scolecite,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , was refined with the space group  $F1d1$  from 3567 reflections with  $I_o > 2\sigma(I)$ , yielding  $R = 4.62\%$ ,  $wR = 11.41\%$ . At  $\sim 423\text{K}$ , the space group was changed to  $Fd11$  from  $F1d1$ , and scolecite underwent a phase transformation to meta-scolecite phase.

As the results from structural refinement at 523 K, the lattice constants of the sample are determined as follows:  $a = 18.122(3)\text{Å}$ ,  $b = 18.847(3)\text{Å}$ ,  $c = 6.5408(11)\text{Å}$  and  $\alpha = 88.948(7)^\circ$ . The crystal structure of scolecite,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , was refined with the space group  $Fd11$  from 2782 reflections with  $I_o > 2\sigma(I)$ , yielding  $R = 10.72\%$ ,  $wR = 28.85\%$ . When phase transformation occurs, OW2 in scolecite is expelled and then the half of Ca ions move by  $\sim 1/2c$ . At 573 K, the number of observed reflections was decreased dramatically.

Under high-T experiments from 423 to 523 K, two reciprocal lattices were observed, each lattice is corresponding to twin component with the [00-1] twin law. The [00-1] twinning could be associated with the dehydration mechanism. The X-ray diffraction data suggest the possibility of exist of a new  $\text{H}_2\text{O}$  site in meta-scolecite phase. This may be a key to solve the dehydration process of scolecite.

キーワード: スコレス沸石, 脱水, 相変化, 単結晶X線回折実験, 双晶, 高温実験

Keywords: scolecite, dehydration, phase transformation, single crystal X-ray diffraction, twin, high temperature

## 氷 VII 相の高温高圧下でのプロトンネリングーホッピング転移の可能性について Near-infrared spectra of ice under high pressure and high temperature

野口 直樹<sup>1\*</sup>; 小松 一生<sup>2</sup>; 篠崎 彩子<sup>2</sup>; 篠田 圭司<sup>3</sup>; 鍵 裕之<sup>2</sup>  
NOGUCHI, Naoki<sup>1\*</sup>; KOMATSU, Kazuki<sup>2</sup>; SHINOZAKI, Ayako<sup>2</sup>; SHINODA, Keiji<sup>3</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科付属地殻化学実験施設, <sup>3</sup> 大阪市立大学理学部地球学科  
<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Hiroshima University, <sup>2</sup>Geochemical Laboratory, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University

The physical properties of ice VII under high pressure and high temperature (HP-HT) conditions are important to planetary science. Ice VII is considered a primary constituent of the interior of giant icy satellites and planets (e.g., Podolak et al. 1998). Thus, understanding the physical properties of ice VII will contribute to better knowledge about the structure and dynamics of other satellite and planetary interiors. In particular, the ionic conductivity of ice VII, which affects the magnetic fields of these bodies (Stevenson 2003), is controlled by ionic and rotational defects in the ices (Jaccard 1959); moreover, ionic defects have two types: OH<sup>-</sup> and H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. The probability of forming defects in ice VII under the HP - HT conditions that typify the interiors of icy satellites and planets is surely increased by thermal activation.

In the near-infrared (NIR) region, the spectrum of ice VII shows absorption bands of the bending-stretching combination ( $\nu_2 + \nu_3$ ) and stretching overtone ( $2\nu_3$ ) modes of the normal vibration of water molecules (Larsen and Williams 1998). These modes correspond to the high vibrational energy level of the potential well, and provide information regarding the potential barrier along the O...O axis. To determine the probability of forming ionic defects in the ice VII structure at elevated temperatures, the NIR spectra of ice VII must be measured. The aim of this study is to investigate the state of protons in ice VII under HP-HT conditions. Thus, we measured the NIR absorption spectra of water at pressures up to 16 GPa and temperatures up to 368 °C using an external heating diamond anvil cell and synchrotron NIR radiation of BL43IR at SPring-8.

The absorption band of the first OH stretching overtone mode divided into doublet peaks above 5 GPa at room temperature, suggesting that proton tunneling occurs at the overtone level. As the temperature increased, the doublet peaks gradually reduced to a singlet. This result implies that thermally activated protons hop between the two potential minima along the oxygen-oxygen axis. A P-T diagram for the proton state was constructed from the changing band shape of the overtone mode.

キーワード: 氷, プロトン, 氷衛星, 近赤外分光, 高温高圧

Keywords: ice, proton, icy satellite, near-infrared spectroscopy, high pressure and high temperature



## ゲスト分子の配向秩序化による Filled Ice Ih 構造メタンハイドレートの相変化 Phase changes of filled ice Ih methane hydrate induced by the orientational ordering of the guest molecules

田中 岳彦<sup>1\*</sup>; 平井 寿子<sup>1</sup>; 松岡 岳洋<sup>2</sup>; 大石 泰生<sup>3</sup>; 八木 健彦<sup>1</sup>; 大竹 道香<sup>4</sup>; 山本 佳孝<sup>4</sup>; 中野 智志<sup>5</sup>  
TANAKA, Takehiko<sup>1\*</sup>; HIRAI, Hisako<sup>1</sup>; MATSUOKA, Takahiro<sup>2</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>3</sup>; YAGI, Takehiko<sup>1</sup>; OHTAKE, Michika<sup>4</sup>  
; YAMAMOTO, Yoshitaka<sup>4</sup>; NAKANO, Satoshi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>2</sup> 岐阜大学, <sup>3</sup> 高輝度光科学研究センター, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所, <sup>5</sup> 物質・材料研究機構

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>2</sup>Gifu University, <sup>3</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute, <sup>4</sup>The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>5</sup>National Institute for Materials Science

Oriental ordering of guest methane molecules in a filled ice Ih structure of methane hydrate (MH) was observed above 15 to 20 GPa at room temperature in a previous Raman study. However, the change in the fundamental structure was not observed at the pressure region by X-ray diffractometry. In this study, low-temperature and high-pressure experiments were performed with filled ice Ih structure of methane hydrate under pressure and temperature conditions of 2.0 to 77.0 GPa and 30 to 300 K, respectively, using diamond anvil cells and a helium-refrigeration cryostat. Distinct changes in the axial ratios of the host framework were revealed by In-situ X-ray diffractometry. Splitting in the CH vibration modes of the guest methane molecules, which was previously explained by the orientational ordering of the guest molecules, was observed by Raman spectroscopy. The pressure and temperature conditions at the split of the vibration modes agreed well with those of the axial ratio changes. The results indicated that orientational ordering of the guest methane molecules from orientational disordered-state occurred at high pressures and low temperatures, and that this guest ordering led to the axial ratio changes in the host framework. Existing regions of the guest disordered-phase and the guest ordered-phase were roughly estimated by the X-ray data. In addition, above the pressure of the guest-ordered phase, another high pressure phase was developed at a low-temperature region.

キーワード: メタンハイドレート, X 線回折, 高圧, ラマン分光

Keywords: Methane Hydrate, X ray diffraction, high pressure, Raman spectroscopy

## テクトタイトと衝撃関連性自然ガラス中のZr局所構造のXAFS法による解析 Zirconium local structure in tektite and impact-related natural glasses probed by XAFS

鳥羽瀬 翼<sup>1\*</sup>; 吉朝 朗<sup>1</sup>; 王 玲<sup>1</sup>; 平床 竜矢<sup>1</sup>

TOBASE, Tsubasa<sup>1\*</sup>; YOSHIASA, Akira<sup>1</sup>; WANG, Ring<sup>1</sup>; HIRATOKO, Tatsuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学自然科学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学応用セラミックス研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kumamoto University, <sup>2</sup>Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology

テクトタイトと自然ガラスの局所構造はZr k 端 XANES と EXAFS を研究することで配位数と原子間距離の量的データを得ることが出来る。XAFS 法は KEK の (筑波, 日本)PF-AR の BL-NW10A ビームラインで行われた。テクトタイト中のZr<sup>4+</sup>イオンは形成するガラスごとに異なる配位環境を持つ。様々な自然ガラスは異なる物理環境下で形成されている。衝撃関連性ガラス、火山ガラス、閃電ガラスは典型的な自然ガラスである。ガラスを構成するときと急冷過程でガラス構造は温度と圧力条件の影響を受ける。本研究では自然ガラスの異なる形成過程が異なるジルコニウムの局所構造を作り出すと示している。

テクトタイトのZr k 端 XANES スペクトルは異なる二つ高さのピークエッジを持つ。全てのテクトタイトは同じタイプに分類される。テクトタイトにおけるZr-O 距離は2.198-2.215 Å でテクトタイトのXANES スペクトルも似たようなスペクトルを持つ。火山ガラスは同じタイプに分類される。衝撃関連性ガラスのKofelsite, Suevite と LDG, Darwin glass は異なるタイプに分類されている。衝撃関連性ガラスは隕石衝突イベントにおける異なる地学的過程で形成されて、異なる物理的環境を経ている。

キーワード: XAFS, Zr 局所構造, テクトタイト, 自然ガラス, XANES, EXAFS

Keywords: XAFS, Local structure of Zr, Tektite, Natural glass, XANES, EXAFS

## Os 蒸着膜を用いたマイクロプローブ法による軽元素定量 Light element quantification using electron microprobe and Os surface coating

大藤 弘明<sup>1\*</sup>; 山本 昌志<sup>1</sup>; 小島 洋平<sup>1</sup>  
OHFUJI, Hiroaki<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Masashi<sup>1</sup>; KOJIMA, Yohei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

<sup>1</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

Electron microprobe analysis is a non-destructive method widely used for determining the chemical composition of solid materials such as not only minerals and rocks but also industrial and biological materials. Recent advances of solid-state detectors for energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis allow us to readily collect precise quantitative data. For SEM and EDS analysis of non-conductive (insulating) materials such as minerals and rocks, surface coating of a thin conductive layer is a prerequisite for sample preparation. For this purpose, carbon and gold are most commonly used; the former with low atomic (*Z*) number is suitable for microprobe chemical analysis, while the latter is preferable for textural observation of samples with rough, uneven surfaces and/or with high porosity. Recently, osmium coating prepared by chemical vapor deposition (CVD) has been a focus of attention and found to be effective for high-resolution SEM observation of samples with uneven surfaces. In the present study, we applied the sample preparation technique using very thin osmium surface coating for chemical quantification of various mineral samples by EDS.

The SEM-EDS analysis was performed by using FE-SEM (JEOL, JSM-7000F) equipped with a silicon-drift-type EDS detector (Oxford Instruments, X-Max 20). Accelerating voltage and probe current were 15 kV and 1 nA, respectively. Osmium coating of 5 nm thick was carefully made by using a Neoc-ST osmium coater (Meiwafosis). Quantification analyses were conducted on a variety of mineral samples, silicate (including hydrous silicates), carbonate and oxide minerals.

The results showed that the quantification data obtained from samples with osmium coating are as accurate as those from samples with conventional carbon coating for principle elements such as Na, Mg, Al, Si, K, Ca and Fe. With respect to the quantification of light elements such as C, N and O, the results from osmium-coated samples are found to be closer to their stoichiometric values than those from carbon-coated samples. This is likely caused by the absorption correction of the X-rays passing through each coating layer. The thickness of the surface coating layer can be precisely controlled in the case of osmium coating prepared by the CVD technique, but not readily adjusted in carbon coating. As the result, the deviation of the estimated thickness of the coating layer from the actual thickness over/underestimates the effect of X-ray absorption correction, in which low-energy X-rays from light elements are more significantly influenced by the correction. We found that the precise quantification of oxygen as a separate element (not as oxide forms of cations) using osmium surface coating might be helpful and effective in estimation of the valence state of iron in iron-bearing minerals and water (hydrogen) content in hydrous minerals. We also confirmed that the present technique is also useful for precise quantification of carbonate minerals such as CaCO<sub>3</sub>.

## 地球試料および隕石試料に見出されるアルカリ塩化物鉱物のカソードルミネセンス Cathodoluminescence characterization of terrestrial and extraterrestrial alkali-halide minerals

吉田 英祐<sup>1\*</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; 蜷川 清隆<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Eisuke<sup>1\*</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; NINAGAWA, Kiyotaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学

<sup>1</sup> Okayama University of Science

Luminescence of natural alkali halides such as halite and sylvite is characterized by structural defects related to F-center (+p) and V-center (+e). On their CL (cathodoluminescence), however, scarcely has been reported so far. Since asteroidal water was discovered as fluid inclusion in halite from H5 chondrite, Monahans (1998), alkali halides in meteorites have been extensively investigated for understandings of aqueous alteration and thermal metamorphism on the parent body. Therefore, luminescence features of halides can provide valuable information on such issues. In this study we have measured CL spectra of terrestrial and extraterrestrial halite samples to clarify luminescence centers in various types of halite.

Halite crystals of terrestrial origin and small halite particles in ureilite meteorites were selected for CL measurements. All samples were prepared using oil while cutting and polishing without water. Also cleavage fragments of terrestrial samples were used for CL spectral measurements after carbon coating.

All samples exhibit weak blue to greenish blue CL with broad band emissions from 350 to 650 nm. CL spectra corrected for total instrumental response were converted into energy units for spectral deconvolution using a Gaussian curve fitting, because Gaussian curve in energy units can be assigned to one specific type of emission center (Stevens-Kalceff, 2009). The deconvoluted components can be assigned to the emission centers related to  $V_k$  (+e), F (+p),  $V_F$  (+e),  $Mn^{2+}$  ( $Na^+$ ) and  $Mn^{2+}$  (interstitial) by referring to Gorobets and Rogojine (2002).

The CL spectra of terrestrial halite at room temperature are consisted of five components at 3.34 eV, 3.05 eV, 2.46 eV, and 2.28 eV and at 2.00 eV. At low temperature the emission of  $Mn^{2+}$  impurity center is enhanced due to an increase in the probability of radiation transition. In the case of high-energy emission, a decrease in sample temperature reduces the intensity of F-center emission, but sensitizes the intensity of  $V_k$ -center emission, suggesting the energy transfer from F-center to  $V_k$ -center. The CL spectral analysis of terrestrial sylvite at room temperature confirms four emission components at 3.32 eV, 2.97 eV, 2.53 eV and 1.89 eV.

Halite in the meteorite of polymict ureilite (Dar al Gani 319) gives a broad emission band in blue region, which is deconvoluted into two components at 2.70 eV for unknown center and at 3.11 eV for F-center. However, no emission in red region associated with Mn impurity center has not recognized in ureilite halite. It implies that high-energy radiation in cosmic space might break up the crystal fields around Mn ions.



## Mn アクチベータおよび分配率がドロマイトのカソードルミネッセンスに及ぼす効果 Effects of Mn activator and site occupancy on cathodoluminescence of dolomite

草野 展弘<sup>1\*</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; 蜷川 清隆<sup>1</sup>

KUSANO, Nobuhiro<sup>1\*</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; NINAGAWA, Kiyotaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学

<sup>1</sup> Okayama University of Science

Cathodoluminescence (CL) has been widely applied in mineralogical and petrological investigations, especially for carbonates. Dolomite commonly red CL emission related to an impurity center of divalent Mn in Ca-site and Mg-site (Sommer, 1972; Walker et al, 1989). Furthermore, temperature effect on CL efficiency has not been discussed in spite of potentially important function to control CL emission mechanism. In this study we have clarified luminescent mechanism of dolomite in a wide range of temperature using a SEM-CL, and confirmed a temperature quenching of its emissions. The quenching process has been quantitatively evaluated by CL spectral deconvolution method assuming the Mott-Seitz model.

Five dolomite samples from Hase, Japan (D01), Nakase, Japan (D02), Raura, Peru (D03), Binntal, Switzerland (D04), Arizona, USA (D05) were selected for CL measurements after carbon-coating on their polished surfaces. SEM-CL analysis was conducted using an SEM (JEOL:JSM-5410) combined with a grating monochromator (Oxford: Mono CL2) to measure CL spectra ranging from 300 to 800 nm in 1 nm steps with a temperature controlled stage from -190 to 250 °C. The dispersed CL was collected by a photon counting method using a photomultiplier tube (R2228) and converted to digital data. All CL spectra were corrected for the total instrumental response.

CL spectra of all samples at room temperature exhibit almost similar pattern with a broad band at 525-800 nm in a red region. The spectral peaks are sharpened and enhanced at lower temperature due to reduction of thermal lattice vibration and an increase in luminescent efficiency, suggesting high spectral resolution of the emission bands at low temperature. Therefore, a Gaussian fitting was conducted to quantitatively deconvolute spectral data obtained at low temperature in an energy unit. The results confirmed that CL of all samples consist of two emission components at around 1.84 eV (Mg-site) and 2.15 eV (Ca-site) in red region, of which variation might be attributable to crystal field (Mn-ligands distance). In general, luminescence efficiency of the material decreases with a rise in temperature due to an increase in non-radiative transitions. This phenomenon has been recognized in several minerals such as quartz, cristobalite and tridymite as temperature quenching. Furthermore, an increasing temperature makes a shift of the emission peak to a higher wavelength side. The emission intensity varies depending on the samples with different concentrations of activator ( $Mn^{2+}$ ) and quencher ( $Fe^{2+}$ ), and site occupancy of the  $Mn^{2+}$  ion between two cation sites in dolomite structure. The facts suggest that the behavior of the emission intensity with changes in temperature is not explained on the basis of a temperature quenching theory based on an increase in the probability of non-radiative transition with the rise of temperature (Mott-Seitz model). Probably activator ( $Mn^{2+}$ ) concentration affects temperature quenching effect on CL of dolomite considerably.

## 高温スカルン中のドロマイト起源カルサイトのカソードルミネッセンス Cathodoluminescence of calcite decomposed from dolomite in high-temperature skarn

草野 展弘<sup>1\*</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; 井上 紘一<sup>1</sup>  
KUSANO, Nobuhiro<sup>1\*</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; INOUE, Koichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学

<sup>1</sup> Okayama University of Science

Purple luminescent calcite associated with periclase has been found from the high-temperature skarn in Kanehira mine located in the eastern part of Hiroshima Prefecture. Calcite usually emits red to orange in cathodoluminescence (CL), but scarcely purple to blue. In this study we have conducted to clarify the emission center related to purple luminescence by using CL spectral analysis and the origin of the calcite during skarn mineralization.

The specimens collected from the skarn zone in the limestone contacted with intrusive granodiorite in the outcrop of the pit-tunnel. The polished thin sections of the selected samples were employed for optical observation and CL measurements. Color CL images were obtained using a cold-cathode type Luminoscope with a cooled-CCD camera. CL spectroscopy was made by a SEM-CL system, which is comprised of SEM (JEOL: JSM-5410LV) combined with a grating monochromator (OXFORD: Mono CL2). The CL emitted from the samples was dispersed by a grating monochromator (1200 grooves/mm), and recorded by a photon counting method using a photomultiplier tube. All CL spectra were corrected for total instrumental response, which was determined using a calibrated standard lamp.

Color CL imaging reveals two types of CL emission, red and purple, in calcite closely associated with spotted periclase. The CL spectra of both calcite show a broad emission band at 620 nm in a red region, which is assigned to an impurity center derived from an activator of divalent Mn ion substituted for Ca, where the intensity of red CL is higher than that of purple CL. Furthermore, the calcite with purple calcite exhibits a broad emission band at 400-500 nm in a blue region, which might be related to a defect center such as "back-ground blue" found in low-Mn activated calcite.

The calcite with purple CL is accompanied by spotted periclase grains, which is usually found as a component of metamorphosed dolomitic limestone. If the hydrate condition would be presumed during its formation, periclase could easily hydrate and alter to brucite and other magnesium minerals by action of the humidity. According to the results of heating experiments of dolomite, dolomite decomposes to calcite and periclase at around 750 °C, whereas calcite causes its decarbonation above around 850 °C. It implies that the calcite with purple CL might be persisting after the decomposition of dolomite under a dry condition at relatively high-temperature near 800 °C, and leave the defects in the calcite structure during thermal decomposition of dolomite, which can be assigned to the component of an emission band in a blue region.

## 地球試料および隕石試料に見出されるエンスタタイトのカソードルミネッセンス Cathodoluminescence characterization of terrestrial and extraterrestrial enstatite

大郷 周平<sup>1\*</sup>; 三嶋 麻絹<sup>1</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; 蜷川 清隆<sup>1</sup>  
OHGO, Syuhei<sup>1\*</sup>; MISHIMA, Maki<sup>1</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; NINAGAWA, Kiyotaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学

<sup>1</sup> Okayama University of Science

Enstatite occurred in meteorite shows various cathodoluminescence (CL) emissions, whereas CL emission in terrestrial enstatite has not been reported so far. We have confirmed several luminescent enstatite in terrestrial samples. In this study, we have conducted to clarify the luminescence centers of terrestrial enstatite and comparatively discuss the CL of terrestrial enstatite and extraterrestrial ones in enstatite chondrite (E-chondrite).

Three enstatite with CL emission from Morogoro, Tanzania and Chandrika, Sri Lanka were selected for CL measurements. The samples were fixed on a brass disk with low-luminescent epoxy resin, and polished with a diamond paste. The polished thin sections of E-chondrite (Dar al Gani 734 and Y-86004) and Aubrite (Al Haggounia 001) were employed for CL examination. Color CL images were obtained using a cold-cathode type Luminoscope with a cooled-CCD camera. CL spectroscopy was made by a SEM-CL system, which is comprised of SEM (JEOL: JSM-5410LV) combined with a grating monochromator (OXFORD: Mono CL2). The CL emitted from the samples was dispersed by a grating (1200 grooves/mm), and recorded by a photon counting method using a photomultiplier tube. All CL spectra were corrected for total instrumental response, which was determined using a calibrated standard lamp.

Color CL imaging reveals various types of CL emissions, red, blue and purple in the both of terrestrial and extraterrestrial samples. The CL spectra of these enstatite show a broad emission band at 670 nm in a red region, which is assigned to an impurity center derived from activated divalent Mn ion substituted for Mg, and a broad emission band at around 400 nm in a blue region, which might be related to a defect center such as "intrinsic defect center" possibly raised during crystal growth.

CL spectra corrected for total instrumental response were converted into energy units for spectral deconvolution using a Gaussian curve fitting, because Gaussian curve in energy units can be assigned to one specific type of emission center (Stevens-Kalceff, 2009). The deconvoluted components can be assigned to the emission centers related to impurity centers of trivalent Cr ion (1.71 eV) and divalent Mn ion (1.87 eV) and to defect centers (3.18 eV). Furthermore, enstatite in Y-86004 E-chondrite gives additional emission component (3.87 eV) in a blue to UV region, which might be characteristic of the enstatite formed under the condition of low-oxygen partial pressure.

## 愛媛県岩城島のエジリン閃長岩に伴う長石のカソードルミネッセンス Cathodoluminescence study of metasomatic feldspar in aegirine syenite from Iwaki Is- land, Ehime Prefecture

眞木 誠也<sup>1\*</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; 鹿山 雅裕<sup>2</sup>  
MAKI, Seiya<sup>1\*</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; KAYAMA, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学, <sup>2</sup> 広島大学

<sup>1</sup>Okayama University of Science, <sup>2</sup>Hiroshima University

In Iwaki Island, aegirine syenite was emplaced in the Ryoke granite during late Cretaceous time by alkali-rich hydrothermal metasomatism. The syenite and related rocks show various types of petrographic textures in response to the process of hydrothermal alteration, e.g. feldspar minerals. Feldspar exhibits a variety of cathodoluminescence (CL) colors depending on kinds of impurity elements and their concentrations, and defect densities related to Si-Al ordering and other structural disorder. Recently, the deconvolution method of CL spectra enables to assign the luminescence centers characteristic of the feldspar with satisfactory reliability (Kayama et al., 2010). In this study, we have conducted to clarify the metasomatic process through granite to syenite by CL spectral analyses for various types of feldspar.

Polished thin sections of the rock samples collected from granite, altered granite and syenite were employed for petrographic observations under a polarizing light microscope, CL measurements, and electron microprobe analyses (EPMA). Color CL images were obtained using a cold-cathode type Luminoscope with a cooled-CCD camera. CL spectroscopy was made by a SEM-CL system, which is comprised of SEM (JEOL: JSM-5410LV) combined with a grating (OXFORD: Mono CL2). The CL emitted from the samples was dispersed by a grating monochromator (1200 grooves/mm), and recorded by a photon counting method using a photomultiplier tube. All CL spectra were corrected for total instrumental response, which was determined using a calibrated standard lamp.

The feldspar in the unaltered granite shows apple green and blue CL emissions. The former is identified to plagioclase (Ab<sub>80</sub>, An<sub>20</sub>) characterized by divalent Mn activator at 556 nm, and the latter to alkali feldspar (Or<sub>90</sub>, Ab<sub>10</sub>) by defect center at 417 nm related to Al-O-Al. Altered granite has albite with red CL emission at around 750 nm, and alkali feldspar with inhomogeneous color of red to violet-blue emissions at around 400 nm and 720 nm. These CL emissions in a red region can be assigned to trivalent Fe activator in tetrahedral sites. The feldspar in syenite are mostly altered to albite with enhanced red emission at 748 nm, but minor alkali feldspar as residual after hydrothermal alteration exhibits dull red emission at 722 nm. The results of the spectral deconvolution reveals oxygen defect centers associated with Al-O-Al and Al-O-Ti bridges and impurity centers of trivalent Fe ions substituted for tetrahedral Al sites according to Kayama et al. (2010). Kayama et al. (2010) investigated the peak changes of a blue emission peak at 420 nm in alkali feldspar and they found that the elimination of Al-O-Al defect center was affected by hydrothermal metasomatism possibly at 250 °C. Therefore, the disappearance of blue emission in alkali feldspar in syenite implies that alkali-rich (sodium-rich) hydrothermal metasomatism for the formation of syenite could act at relatively high temperature above 250 °C successively after granitic magmatism.



## 石英のカソードルミネッセンスを用いた砂漠風成層の起源地推定 Provenance study of quartz grains in aeolian desert sediments using cathodoluminescence method

増田 理沙<sup>1\*</sup>; 実吉 玄貴<sup>1</sup>; 西戸 裕嗣<sup>1</sup>; Tsogtbaatar K.<sup>2</sup>; Chinzorig T.<sup>2</sup>; Mainbayar B.<sup>2</sup>  
MASUDA, Risa<sup>1\*</sup>; SANEYOSHI, Mototaka<sup>1</sup>; NISHIDO, Hirotsugu<sup>1</sup>; TSOGTBAATAR, K.<sup>2</sup>; CHINZORIG, T.<sup>2</sup>; MAINBAYAR, B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学, <sup>2</sup> モンゴル科学アカデミー

<sup>1</sup>Okayama University of Science, <sup>2</sup>Mongolian Academy of Sciences, Mongolia

Cathodoluminescence (CL), the emission of light caused by electron irradiation, has been widely applied in earth science, most extensively used in sedimentology. In such studies CL has the advantage that it can reveal characteristics which are invisible using transmitted light, e.g. growth zones of the crystals such as silica and carbonate minerals. In the case of quartz, its CL spectral feature is so complicated to be simply used for the identification of the provenance due to many emission centers related to various types of structural defects. In this study, we have conducted to clarify the luminescence centers in quartz selected from desert sediments using SEM-CL and evaluate quantitative ratios of the emission components of the CL spectra by the deconvolution method.

The quartz grains (#60-80 mesh size) in the aeolian sediments collected from Djadokhta formation (upper Cretaceous) in the Gobi desert were fixed on the slide glass with low-luminescent epoxy resin, of which surfaces were polished with 1 micron diamond paste. Color CL images were obtained using a cold-cathode type Luminoscope with a cooled-CCD camera. CL spectroscopy was made by a SEM-CL system, which is comprised of SEM (JEOL: JSM-5410LV) combined with a grating monochromator (OXFORD: Mono CL2). The CL emitted from the samples was dispersed by a grating monochromator (1200 grooves/mm), and recorded by a photon counting method using a photomultiplier tube. All CL spectra were corrected for total instrumental response, which was determined using a calibrated standard lamp.

All samples show dark blue CL emission, and exhibit two broad bands at 400 nm in a blue region and at 600-650 nm in a red region. CL spectra corrected for total instrumental response were converted into energy units for spectral deconvolution using a Gaussian curve fitting, because Gaussian curve in energy units can be assigned to one specific type of emission center (Stevens-Kalceff, 2009). The deconvoluted components can be assigned to the emission centers related to trivalent Fe at 1.65 eV, NBOHC at 1.89 eV, tetravalent Ti at 2.75 eV and trivalent Al at 3.19 eV by referring to Stevens-Kalceff (2009). We employed 10 grains randomly selected from collected 80 grains for each sample, and determined quantitative ratios of the emission components for these quartz grains using their integral intensities. We discuss variations of characteristic components among the sediments based on the results by a statistical analysis.

## 地殻エネルギーフロンティアの科学と技術 Science and Technology for Geothermal Frontier

土屋 範芳<sup>1\*</sup>  
TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

This project should cover multidisciplinary scientific fields such as geology, geochemistry, geophysics, water-rock interactions, rock mechanics, seismology, drilling technology, well logging technologies, reservoir engineering, and environmental science.

### (a) Characterization of rock mass in BDT

Preliminary work by the Japanese researchers has revealed some of the behavior of the rock mass in the BDT, such as hydrothermal brecciation and presence of hydrothermally derived fracturing (HDF) (Hirano et al., 2003). However, fundamental understandings of key parameters such as the stress state, lithological structure, mechanical and compositional homogeneity, and thermal characteristics require much additional work. Laboratory tests would be the most effective means to obtain fundamental knowledge on the ductile rock mass in the initial stages of the project combined with analysis of core samples and pore water collected from an experimental borehole. This combination of laboratory and borehole data will generate, new knowledge on the rock mass and provide constraints on, and validation of the laboratory tests.

### (b) Creation and control of the reservoirs

The HDF would create a brittle fracture network consisting of very fine fractures at grain boundaries, is created by cooling and depressurization from the borehole in the BDT. If a similar process operates during drilling then cooling of the ductile rock by the drill fluid may be expected to induce a grain-scale fracture network in the near field of the borehole during the drilling phase.

### (c) Numerical simulation

To achieve sustainable energy production from EGSs in the BDT, it is essential to design the area of heat exchange between water and rock, and the risk of shortcut flow paths must be carefully evaluated. Simulators with capability to handle T-H-M-C behavior of the rock mass are expected.

キーワード: 地熱

Keywords: Geothermal

## 地熱地域の深部反射法地震探査: 白沢・七ヶ宿カルデラを例として Deep seismic reflection profiling in geothermal area: case study of Shirasawa and Shichigashuku calderas

佐藤 比呂志<sup>1\*</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 上嶋 誠<sup>1</sup>  
SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> (株) 地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, <sup>2</sup>Japex Geoscience Institute, Inc.

はじめに:

東北日本においては、後期中新世から鮮新世にかけて多数のカルデラが形成された。この中で後期中新世のカルデラ群に伴う深部高温流体が、地熱発電の資源として期待されている。このような数 km という地下をターゲットとするには、流体の存否や断裂の状況などについて、地球物理学的な探査で把握することが、重要な課題となる。反射法地震探査は、地殻構造を断層や褶曲という分解能で描き出す手法である。とくに活断層の深部形状を描き出す目的で、90年代後半から深部反射法地震探査が実施されるようになった。東北日本においても、活断層の多くがカルデラの東側に位置することが多く、その深部延長を描き出す目的で、しばしばカルデラを横断して反射法地震探査が実施された (Sato et al., 2002a Tectonophys.; Sato et al., 2002b EPS)。ここでは、これらのカルデラ群を横切って実施された深部反射法地震探査の実例を示すとともに、地殻流体の検出に有効な手法である MT 法について紹介する。

白沢カルデラ: 白沢カルデラはピストンシリンダー型のカルデラで、溶結凝灰岩・湖成層のカルデラ充填堆積物が分布する。小規模な貫入岩は存在するが大規模なリサージェントはない。パイロサイスによる反射法地震探査によって、とくにカルデラの中央部の地下 3-5 km の深さに周波数の低い反射強度の大きい領域が、直交する測線の断面のいずれでも得られており、カルデラを生み出した冷却したマグマ溜まり中の流体の存在を示唆している可能性がある。これらは、自然地震によるトモグラフィ解析の結果 (Nakajima et al., 2006 EPS) とも調和的である。

七ヶ宿カルデラ: 宮城県南部の奥羽山脈東縁に位置するピストンシリンダー型のカルデラである。このカルデラを横切って、深部反射法地震探査相馬-米沢測線 (佐藤ほか, 2013 連合大会) と、ひずみ集中帯重点調査の一環として MT 探査が実施された。屈折トモグラフィによる P 波速度は、カルデラ充填堆積物に相当する速度低下領域を示すが、反射法地震探査ではとくに過去のマグマ溜まりに相当するような特異なパターンは認められない。MT 法によれば、スラブ上面から低比抵抗領域がスラブから火山フロントにほぼ垂直に伸びる他、カルデラ下の地殻上部で孤立した低比抵抗域が位置しており、流体の存在を示唆する可能性がある。

総合的なサイトサーベイ

解析方法やデータ取得についても、物理探査技術は進歩を続けており、自然地震や制御震源・電磁気的な手法など、総合したサイトサーベイが重要である。カルデラ下などの成層構造を示さないような岩体については、本来、反射法地震探査の成果は限定的であるが、断裂の発達状況の指数としての可能性を有している。地熱地域の深部微細構造、流体・断裂の存在状況は、物理探査の点からも先端的な課題である。

キーワード: 地熱地域, カルデラ, 反射法地震探査, MT 法, 白沢カルデラ, 七ヶ宿カルデラ

Keywords: geothermal area, caldera, seismic reflection profiling, magnetotelluric inversion, Shirasawa caldera, Shichigashuku caldera

## 水の減圧沸騰環境下における岩石の破壊現象 Occurrence of rock/mineral fracture under the rapid decompression boiling condition of water

平野 伸夫<sup>1\*</sup>; 青島 聡<sup>1</sup>; 笠原 尚也<sup>1</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 渡邊 則昭<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>

HIRANO, Nobuo<sup>1\*</sup>; AOSHIMA, Satoshi<sup>1</sup>; KASAHARA, Naoya<sup>1</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; WATANABE, Noriaki<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Environmental Studies, Tohoku University

In our previous water-rock interaction experiments under the various hydrothermal conditions using granite or artificial quartz samples, clear cracks or fractures in the samples were observed under the specific hydrothermal condition. We have named this phenomenon as "Hydrothermally Derived Fracture (HDF)". Understanding of this fracturing phenomenon may be useful for technological development of geothermal reservoir usage or clarification of vein formation mechanism in the Earth crust. In our previous experimental results, HDF were progressed under the high temperature and low-pressure condition. The result of detailed observation, it was thought that the thermal stress occurred with rapid cooling of rock/mineral sample surface by condensed vapor dew. Similarly, rapid decompression from the high-temperature/pressure state causes, the temperature drop by latent/sensible heat effect. Therefore, when the such rapid decompression was occurred around the rock/mineral samples, HDF may occur under the hydrothermal condition. And so, we attempted rapid decompression experiment from the over 20 MPa / 400°C hydrothermal condition. As a result, the fracturing in the samples was progressed clearly. Therefore, decompression fracturing is possible and the same phenomenon may arise subsurface of near the volcano or hotter and deeper crust with water.

キーワード: 熱水誘起割れ (HDF), 岩石熱水相互作用, 急減圧, 花崗岩, 岩石破碎

Keywords: Hydrothermally Derived Fracture, Water-Rock Interaction, rapid decompression, granite, fracturing



## 間隙水圧下での花崗岩の破壊と浸透率変化 Fracturing of granite under pore pressure and evolution of permeability

濱崎 翔平<sup>1\*</sup>; 片山 郁夫<sup>1</sup>  
HAMASAKI, Shohei<sup>1\*</sup>; KATAYAMA, Ikuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

高温岩体発電 (HDR) を始めとする涵養地熱システム (EGS) による地熱発電は従来の地熱発電と比べて、人工的に地熱貯留層を造成するという点で異なる。このシステムは天然の熱水や蒸気を使用しないため、従来の地熱発電の課題であった温泉の枯渇という問題が存在しない。また地熱貯留層の造成は水圧破碎とよばれ、地下深部の基盤岩に対する高圧水の注入に伴う破壊によって行われる。この破壊による基盤岩の流体の通りやすさを示す浸透率の変化は地熱貯留層の定量的な評価につながる重要な要素となる。本研究では間隙水圧下での花崗岩の三軸圧縮破壊において、浸透率に対する間隙水圧の効果を検証した。

実験試料は大陸を構成する花崗岩から緻密で細粒な庵治花崗岩を選定し、三軸圧縮試験による破壊実験を行った。破壊前後の試料の浸透率測定及び三軸圧縮破壊は広島大学設置の容器内変形透水試験機を用いた。花崗岩試料は予め水で飽和させた後、実験を行った。封圧を 20 MPa、三軸圧縮中に添加する間隙水圧を 0 MPa (非排水条件下で三軸圧縮破壊を行う) から 15 MPa の 5 MPa おきに設定し、三軸圧縮変形を行った。破壊した試料は樹脂に固定し、偏光顕微鏡及び走査型電子顕微鏡下で組織観察を行った。また三軸圧縮破壊実験と浸透率測定結果から間隙水圧と浸透率及び破壊強度の関係を議論した。

三軸圧縮破壊前の封圧 20 MPa における花崗岩試料の浸透率は  $2.0 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  となった。三軸圧縮破壊後の花崗岩試料の浸透率は破壊前と比べて増加し、封圧 20 MPa、間隙水圧 0 MPa における浸透率は  $2.5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  と得られた。また破壊後の試料の浸透率は間隙水圧の増加に伴い増加し、間隙水圧 15 MPa では浸透率は  $7.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  に増加した。加えて、浸透率と三軸圧縮中に添加する間隙水圧には比例関係があることが明らかになった。また三軸圧縮破壊強度は間隙水圧の増加に伴い減少し、間隙水圧 0 MPa においては 400 MPa であったが、間隙水圧 15 MPa では 350 MPa と減少した。破壊した試料には巨視的な破断面と小さなクラックを確認することが出来た。

三軸圧縮破壊中に添加する間隙水圧の増加により浸透率が比例的に変化する原因としては、間隙水圧が大きいほど生じるクラックの開口幅が増加し、またはクラックの連結・伝播の様子が著しく変化することに起因すると考えられる。またこのクラックの形態の変化が三軸圧縮破壊強度の減少にも影響しているとみられ、浸透率を議論する上ではこのクラックの分布や形態は一つのパラメータとなりうる。今後はより現実的な水圧破碎の再現を目指し、差応力下での水圧上昇による破壊実験や高温下での破壊実験における空隙率・浸透率測定を行う予定である。

キーワード: 花崗岩, 間隙水圧, 浸透率

Keywords: granite, pore pressure, permeability

## 低温水流入に伴うき裂開口幅変化の数値解析 The numerical study for behavior of fracture aperture associated with cold fluid flow

金田 浩輔<sup>1\*</sup>; 椋平 祐輔<sup>1</sup>; Swenson Daniel<sup>2</sup>; 伊藤 高敏<sup>1</sup>  
KANETA, Kousuke<sup>1\*</sup>; MUKUHIRA, Yusuke<sup>1</sup>; SWENSON, Daniel<sup>2</sup>; ITO, Takatoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学流体科学研究所, <sup>2</sup> カンザス州立大学機械工学科

<sup>1</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan, <sup>2</sup>Mechanical and Nuclear Engineering Department, Kansas State University, USA

Power generation of geothermal power plant sometimes decreases due to reduction of reservoir pressure. ReInjection of used geothermal fluid/cold fluid into the reservoir is conducted in several geothermal power plant to keep/recover the reservoir pressure. It is required for recharge of reservoir pressure that appropriate condition of reinjection in terms of injection pressure, amount of injected fluid, and heat balance. On the other hand, it is empirically observed at some of the geothermal field that amount of injected fluid increases when lower temperature fluid is injected. In this research, we investigated relationship between temperatures of cold fluid and fracture aperture, using numerical simulation.

We conducted numerical simulation for the change in fracture aperture when cold fluid flows into the fracture, using 2D FEM code " GEOCRACK2D " (Swenson et al., 1995). We set the condition that cold fluid was injected into a single fracture within high temperature rock mass. In this simulation, cold fluid flowed from center of fracture to edge of fracture. Fluid pressure was 1 MPa at center of fracture and 0 MPa at edge of fracture. This given pressure condition made fluid flow from center of fracture to edge of fracture. Initial temperature of rock mass was 300 °C and that of cold fluid was 100 °C. Initial stress condition was 20 MPa in x direction and y direction.

As a result of simulation, the fracture aperture increased with time although 20 MPa of normal stress worked on the rock mass and fluid pressure was at most 1 MPa. It was also simulated that the rock mass around the fracture was cooled down by cold fluid and cooled area extended with time. Normal stress on the fracture decreased. The area where normal stress decreased extended over time.

These results can be interpreted that cooling of rock mass by cold fluid caused thermal shrinkage of rock mass, which decreased normal stress on the fracture surface. Finally, the fracture aperture became large, suggesting increasing in permeability.

We also conducted the simulation for the effect of difference in initial temperature between rock mass and cold fluid. We compared the change in fracture aperture about four temperature difference conditions. Fluid flow, fluid pressure, temperature of rock mass and initial stress condition were same with first simulation. Temperature of cold fluid was 100 °C, 150 °C, 200 °C and 250 °C.

As a result of simulation, the fracture aperture increased drastically when the temperature difference between rock mass and cold fluid was bigger than 150 °C. The fracture aperture slightly increased when the temperature difference is smaller than 100 °C. The bigger temperature difference was, the earlier fracture aperture opened. The results of simulation suggested that there was the critical value in temperature difference between 100 °C and 150 °C. It was summarized that the fracture aperture increased and that the fracture permeability became large when the temperature difference was bigger than the critical temperature difference.

キーワード: 地熱貯留層, き裂, き裂開口幅, 熱弾性, 熱収縮, 熱水還元・涵養

Keywords: Geothermal reservoir, Fracture, Aperture, Thermal elasticity, Thermal shrinkage, ReInjection

## 水圧刺激時の微小地震データに基づく破壊可能な断層面積 ” Slip-able area ” 評価の 試み Slip-able area: New index to evaluate the fault area under critical state based on micro- seismic data at stimulation

椋平 祐輔<sup>1\*</sup>; 浅沼 宏<sup>2</sup>; Haring Markus<sup>3</sup>; 伊藤 高敏<sup>1</sup>  
MUKUHIRA, Yusuke<sup>1\*</sup>; ASANUMA, Hiroshi<sup>2</sup>; HARING, Markus<sup>3</sup>; ITO, Takatoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 流体科学研究所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所・再生可能エネルギー研究センター, <sup>3</sup> Geo Explorer Ltd.  
<sup>1</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, <sup>2</sup>AIST, <sup>3</sup>Geo Explorer Ltd.

Unexpected occurrence of felt earthquake has been big issue as critical environmental burden associated with geothermal development and other energy extraction. The magnitude of seismic events induced by fluid stimulation is generally small enough to be perceived on the ground. However, at the Basel, Switzerland, some of the events had large magnitude, resulting in the shutdown of engineered geothermal system (EGS) project. Our previous study has revealed the fundamental characteristics and the trigger mechanisms of the large event at Basel. However, we have not reached full understanding of physics of the large events, which enable us to control or manage the magnitude of induced events.

### Concept of Slip-able area

Our previous study suggested that the dynamic behavior of pore pressure especially propagation of pressure at the shut-in correlate the event magnitude because many of large events occurred at the shut-in phase in Basel. The pore pressure gradient should exist from the well head to the pressure front during the stimulation. At the shut-in when pumping is stopped, the pressure source despairs and subsequently the pressure gradient may become small with time. Finally, the pore pressure in the reservoir will go back hydrostatic state uniformly. In the relaxation process of the pore pressure gradient, it can be expected that the pore pressure at the far field from the well might slightly increase to average pore pressure increase in whole reservoir. Pore pressure increase at the front of the stimulated zone may put large part of the fault plane into near critical state. In contrast, only some part of the fault plane may become critical state, when the pore pressure increases with the pressure gradient. This is the expected scenario for occurrence of the large event at the shut-in.

So, in this study, we originally defined new concept of Slip-able area, which describes the summation of fault areas in study area, under critical state during/after the stimulation. The informations used in estimating Slip-able are given by the detailed analysis of microseismic events and stress information. Slip-able area can provide the information of the potential fault area which can have shear slip at semi real time. Slip-able area can be directly converted into the event magnitude, suggesting it is also available to the risk assessment of the large event.

### Methodology of estimation for Slip-able area

We propose the methodology to estimate Slip-able area as follows.

1. Determine the number of the potential fracture within a given rock volume from microseismic data at the first stage of the stimulation.
2. Characterize the size of the fractures from source parameter of microseismic events and their critical pore pressure for shear slip.
3. Divide the reservoir area into a number of the block with the same size of step 1.
4. Determine the stimulated volume in three dimensions by the divided block and information on occurrence of microseismic events.
5. Infer the number of the fracture in a stimulated volume determined in step 4.
6. Estimate maximum increase in pore pressure at given time in each block of stimulated volume.
7. Identify the fault area of the fracture under critical state using the information assumed in step 2.
8. Integrate all fault area of the fractures identified in step 7.

We have to note that the methodology shown above includes some steps with much difficulty or impossible because determination of critical pore pressure is based on the information on orientation of fracture plane and stress information in study area. These informations are not available in many of the geothermal field. Estimation of fault area also required high quality data set of microseismic events. In these cases, it can be valid for simplification to use appropriate constant values like b value as a substitute for characterizing of fault size.

SMP48-06

会場:313

時間:5月2日 15:45-16:00

キーワード: 微小地震, 誘発有感地震, マグニチュード, 断層面積, リスクアセスメント, Basel  
Keywords: Microseismicity, Felt earthquake, Magnitude, Fault area, Risk assessment, Basel



## 脆性破壊による地殻の含水化：東南極セールロンダーネ山地の例 Hydration of crust through brittle fractures: Example from Sor Rondane Mountains, East Antarctica

宇野 正起<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
UNO, Masaaki<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

島弧下部地殻はその地震波速度から主に角閃岩から構成されていると考えられており、含水鉱物に富んでいることが示唆される。しかしながら、そのような島弧地殻への H<sub>2</sub>O 流体供給の量とその供給様式は明らかになっていない。地殻内に置ける流体移動様式としては、浸透流とチャネリングフローの2通りが上げられる。島弧地殻下の条件では粒界が閉じていることから、脆性破壊を伴うチャネリングフローが卓越することが予想される。本研究では、地殻への流体供給に対する脆性破壊の役割を明らかにする為に、東南極セールロンダーネ山地南東の、地殻-メルト吸水反応帯を調査した。

調査地域では、黒雲母-角閃石-かんらん岩に花崗岩質岩脈が脆性的に貫入しており、その間に反応帯が形成されている (Fig. 1)。その生成条件は鉱物組み合わせから大まかに下部地殻条件下と推察され、下部地殻条件下におけるメルト-岩石の力学・化学的相互作用を観察するのに適している。母岩に対する花崗岩質岩脈の体積割合は 10-20% 程度であり、境界部に厚さ約 5-10 cm の反応帯が形成されている。花崗岩脈から母岩までは大きく以下の4つの反応帯に分けられ、その鉱物組み合わせは下記の通りである：

i) 花崗岩脈

[quartz + plagioclase + K-feldspar + biotite + rutile + zircon ± muscovite]

ii) ホルンブレンド-トレモライト帯

[hornblende + tremolite ± quartz ± apatite ± biotite]

iii) トレモライト-黒雲母帯

[tremolite + biotite + spinel ± hornblende ± pyroxene]

iv) 黒雲母-角閃石かんらん岩

[olivine + orthopyroxene + biotite + hornblende + Cr-spinel ± magnetite ± apatite]

これらの反応帯は、花崗岩質メルトから放出された H<sub>2</sub>O と母岩との吸水反応として理解される。花崗岩脈の斜長石とそれに接するホルンブレンドに地質温度計<sup>[1]</sup>を適用した結果、この吸水反応の温度は約 700 °C と見積もられる。

本講演では、反応帯で形成された含水鉱物の量から、花崗岩質メルトから放出された H<sub>2</sub>O 量を見積り、含水メルトを通して島弧下に供給される流体量とその輸送、地殻への H<sub>2</sub>O 付加メカニズムを議論する。

引用：

[1] Holland and Blundy, 1994, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**, 433-447.

キーワード: 地殻流体, 脆性破壊, メルト, 吸水反応, 水-岩石相互作用, 南極

Keywords: geofluid, brittle fractures, melt, hydration reaction, fluid-rock interaction, Antarctica



Fig. 1 Biotite-hornblende-peridotite (brown) intruded by granitic dykes (white), Sor Rondane Mountains, East Antarctica. Note that reaction zones occur at the boundary: green or black layers are hornblende-tremolite zone and grey to reddish brown layers are tremolite-biotite zone.

## 宮城県岩沼市に見られる玄武岩質安山岩複合溶岩流の内部分化過程：分結脈から柱状節理へ

### Composite basaltic andesite lava in Iwanuma (Miyagi, Japan): Differentiation along segregation veins and columnar joints

木本 和希<sup>2</sup>; 石渡 明<sup>1\*</sup>

KIMOTO, Kazuki<sup>2</sup>; ISHIWATARI, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大学東北アジア研究センター, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Center for NE Asian Studies, Tohoku Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth Sci., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

複合溶岩流は、中央部に斑晶質の層を持つ3-5mの薄いものがKuno (1950; 地質雑, 56, 167-172) などによって報告されていたが、我々は、よく発達した柱状節理が全体を貫く単一の冷却ユニットをなし、化学組成の異なる層の境界に分結脈が発達した、非常に厚い複合溶岩流を発見したので、ここに報告する。

中期中新世 (15-13Ma) の玄武岩質安山岩の厚さ 110 m 以上の溶岩が宮城県岩沼市の採石場に露出する。1-2m 間隔の柱状節理が露頭全体によく発達する。これは複合溶岩流であり、下部 (0-42m) はやや SiO<sub>2</sub> に富み (55 wt.%)、上部 (45-110 m) はやや SiO<sub>2</sub> に乏しい (52-54%)。露頭では下部と上部の間にシャープな境界は確認できないが、鏡下では完晶質に近い石基の斜長石が、下部はやや細粒 (0.3mm)、上部はやや粗粒 (0.5mm) である。溶岩流の底部には赤いクリンカーが確認できるが、上端は侵食されている。この溶岩流には、底から 6-14m, 45-64m, 80-95m の 3 層準にほぼ水平な分結脈が多数発達する。底から 6-14m のものは厚さ 1mm 程度で 1-10cm 間隔であり、ガラス質で斜長石と普通輝石の微晶を含む。45m 付近のものは厚さ 5-15mm で 10-15cm 間隔、52-64m のものは厚さ 3-5mm で 5-15cm 間隔であり、結晶質で斜長石、ピジョン輝石、Ca に乏しい普通輝石を含む。80-95m のものは厚さ 3-5mm で 5-7cm 間隔であり、中部と同様の組織・鉱物組み合わせを示す。組成から計算すると、中部の分結メルトはホストのメルトが約 70% 結晶化した後の残液である。これらの分結脈は、剪断応力や冷却収縮によって生じたほぼ水平な割れ目 (板状節理) に残液が浸み出して形成されたものと考えられ、それらは溶岩の底部付近と化学組成が苦鉄質な層準によく発達する。稀に見られる雁行状の分結脈は剪断変形の証拠である。

柱状節理はほぼ水平な溶岩を垂直に貫き、分結脈を完全に切っている。柱状節理の節理面に接する岩石は柱の中央部の岩石よりも密度が低く、鏡下では気泡が見られるが、柱の中央部の岩石は高密度でほとんど発泡していない。このことは、柱状節理は分結脈 (板状節理) よりも後に、より低温の状態で形成されたが、その時点でも多少メルトが残っており、割れ目の形成に伴ってその直近のメルトが減圧発泡したことを示唆する。

キーワード: 複合溶岩流, 分結脈, 板状節理, 柱状節理, 玄武岩質安山岩, 結晶分化作用

Keywords: composite lava flow, segregation vein, platy joint, columnar joint, basaltic andesite, crystallization differentiation

## シリカ鉱物析出による地殻の透水-不透水境界の形成 The formation of the permeable-impermeable boundary within the Earth's crust revealed by silica precipitation

最首 花恵<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>

SAISHU, Hanae<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup>AIST, <sup>2</sup>Tohoku University

Silica is one of the dominant constituents of the Earth's crust. The permeable-impermeable boundary corresponds to the brittle plastic transition at 300-450 C [1]. Ubiquitous occurrence of quartz vein is one of the evidences that the spatial and temporal variations in permeability within the Earth's crust are affected by silica precipitation in aqueous fluids. However, the role of silica-water interaction on fracture permeability is still unclear.

The Kakkonda geothermal field, Japan, has the well WD-1a that penetrated the boundary between the hydrothermal convection zone and the heat conduction zone [2]. Calculation of quartz solubility along the well WD-1a revealed that (1) the depth of a local maximum of quartz solubility correlates with that of the strong reflector in seismic data at 350 C isotherm [3], and that of a maximum of fracture numbers revealed by the logs of FMI [4], and (2) the depth of a local minimum of quartz solubility correlates with that of the permeable-impermeable boundary, in either case of hydrostatic or lithostatic conditions [5]. These results indicate that (1) the preservation of open fractures at the margin of the Kakkonda granite is controlled by dissolution of quartz, and (2) the quartz precipitation could occur from both downwards- and upwards-moving fluids, which could divide the hydrothermal convection zone and the heat conduction zone.

The hydrothermal experiments of temperature dependence of silica precipitation were conducted at 24 and 31 MPa and 170-430 C, by using the solution made by dissolution of granite. The large amount of silica precipitation occurred only in the supercritical conditions of water (>390 C). Strong temperature dependence can be explained by the homogeneous nucleation of quartz in the surface energy of quartz of 130 mJ/m<sup>2</sup> [5].

The results of the calculation of silica solubility at the Kakkonda geothermal field and the hydrothermal experiments of silica precipitation suggest that rapid quartz precipitation via nucleation could occur when fluids are brought to the depth in the supercritical conditions of water. The forming and sustaining the permeable-impermeable boundary within the Earth's crust could be controlled by precipitation of silica minerals.

### References

- [1] Scholz (2002).
- [2] Doi et al. (1998) *Geothermics*, **27**, 663-690.
- [3] Matsushima et al. (2003) *Geothermics*, **32**, 79-99.
- [4] Muraoka et al. (1998) *Geothermics*, **27**, 507-534.
- [5] Saishu et al. (in press) *Terra Nova*.

キーワード: シリカ鉱物析出反応, 石英溶解度, 透水-不透水境界, 熱水実験

Keywords: Silica precipitation, Quartz solubility, Permeable-impermeable boundary, Hydrothermal experiment

## ナノから解き明かす地球惑星物質の性状と起源の趣旨説明 Introduction of NANO-EPS

鈴木 庸平<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Yohey<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>Department of Earth & Planetary Science, The University of Tokyo

固体のナノ領域は、地球惑星科学全体に広がるフロンティアである。固体の元素濃度は、電子線マイクロアナライザ (EPMA) に代表されるマイクロの分析 (ppm) からナノ分の1の濃度 (ppb) の分析が可能になり、またX線回折装置 (XRD) に代表されるバルクからナノ固体 (>200 nm から <5 nm) の鉱物解析へと進化している。従来サブミクロンと呼ばれるナノスケール内での元素・同位体組成の不均質性や変動パターンの解析やナノ粒子自体のバルクとは異なる特性は、地球惑星科学に新たな知見をもたらす可能性を秘める。本セッションは惑星・生命の誕生から現在の地球表層環境に至る広大な時空間スケールを対象とし、特にナノ領域に研究の重要性について論じる。

キーワード: ナノ  
Keywords: nano



## 表層水圏環境で生成するサブミクロンスケールのマンガン酸化物の特性・環境 Properties and depositional process of sub-micron scale manganese oxide minerals in the aqueous surface environment

白井 朗<sup>1\*</sup>  
USUI, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 白井朗  
<sup>1</sup> Akira Usui

表層水圏環境においては、主に表層水（海洋、河川、土壌、地下水、温泉水、生体など）を媒体として、様々な鉱物が生成している。重金属元素の中では特に、鉄とマンガンは、表層環境で移動しやすい元素であり、陸域から深海底にいたる多様な環境において酸化物の沈殿現象あるいは溶解・再沈殿などが認められる。また、沈殿に伴って多くの種類の副成分を取り込むことが知られており、マクロには非常に効率的な沈殿形成と副成分の吸着という結果として認められる。

一般には ppm 未満のオーダーの溶液から、サブミクロンサイズの粒子が形成されると予想されるが、単体の粒子は光学、低解像度 SEM で観察することは困難なため、その鉱物学的、化学的な特徴付けが充分になされていない。海洋含んだ表層環境での物質循環、鉱物資源形成、環境解読の考察にあたって、その特徴づけが求められている。

ここでは、海底マンガン酸化物の生成に深く関わる、元素の供給源、生成する鉱物の性状、特徴などに関して、レビュー及び筆者らの予察的研究を紹介する。

キーワード: マンガン酸化物, マンガンクラスト, マンガン団塊, 層状マンガン鉱物, 低温熱水活動, 酸化還元環境  
Keywords: manganese oxide mineral, manganese crust, manganese nodule, low-temperature hydrothermal activity, phyllo-manganate, redox condition

## PF-STXM (走査型透過X線顕微鏡)の開発と環境地球化学研究への応用 Development of PF-STXM and its application to environmental geochemistry

高橋 嘉夫<sup>1\*</sup>; 武市 泰男<sup>2</sup>; 菅 大暉<sup>1</sup>; 井波 暢人<sup>2</sup>; 小野 寛太<sup>2</sup>  
TAKAHASHI, Yoshio<sup>1\*</sup>; TAKEICHI, Yasuo<sup>2</sup>; SUGA, Hiroki<sup>1</sup>; INAMI, Nobuhito<sup>2</sup>; ONO, Kanta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>Photon Factory, KEK

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Photon Factory, KEK

Scanning transmission X-ray microscopy (STXM) has been applied to various fields in earth and environmental sciences such as aerosol chemistry, geomicrobiology, soil science, and nanomineral sciences. In particular, the technique has been used in the world because of its great importance in imaging distribution of carbon, or in particular carbon functional group, with about 50 nm spatial resolution. However, STXM that can be used to measure NEXAFS at carbon K-edge has not been in use in Japan. We have constructed STXM in Photon Factory (PF-STXM) from 2012 and started to use it for various topics in earth and environmental sciences.

In the PF-STXM, soft X-rays from the undulator are monochromatized by the grating and focused at the four-way aperture slit. The FZP with the outermost zone width of 30 nm is placed at 1 m distant from the aperture slit. First order diffraction selected through an order sorting aperture (OSA) is focused onto the sample with the focal distance of 0.7-5 mm, and then the transmitted X-rays are detected. The PF-STXM at present is mainly operated at BL-13A in Photon Factor, where the energy range available is from 250 eV to 1600 eV, which covers K-edges of carbon, nitrogen, oxygen, potassium, and aluminum. The beam size of the STXM was around 50 nm focused with Fresnel zone plates (FZP). The intensity of focused X-rays at the sample was expected to be up to  $10^7$  photons/s. Instead of a photomultiplier tube (PMT) which is commonly used in STXM, a silicon avalanche photodiode (APD) is utilized to detect the transmitted X-rays in PF-STXM. Compared with other STXM system in the world, our STXM is made so compact and light that it is easily connected to and removed from the multi-purpose beamlines. The experiments reported below are performed at BL-13A and BL-16A of Photon Factory.

The PF-STXM has been used for various applications. Among them, we would like to present recent results on (i) speciation of calcium in mineral dust with 50 nm spatial resolution, (ii) characterization of carbon adsorbed on particulate matter in river water, and (iii) spatial distribution of rare earth elements in bacterial cell.

キーワード: STXM, PF, エアロゾル, 懸濁粒子, バクテリア

Keywords: STXM, PF, Aerosol, Particulate matter, Bacteria

## 走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) の微生物-鉱物相互作用解明への応用 Nano-scale investigation of the microbe-mineral interaction by scanning transmission X-ray microscopy

光延 聖<sup>1\*</sup>; 朱 鳴<sup>1</sup>; 高橋 嘉夫<sup>2</sup>; 武市 泰男<sup>3</sup>; 小野 寛太<sup>3</sup>  
MITSUNOBU, Satoshi<sup>1\*</sup>; SHU, Mei<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Yoshio<sup>2</sup>; TAKEICHI, Yasuo<sup>3</sup>; ONO, Kanta<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 静岡県立大学, <sup>2</sup> 広島大学, <sup>3</sup> 高エネルギー加速器研究機構  
<sup>1</sup>University of Shizuoka, <sup>2</sup>Hiroshima University, <sup>3</sup>KEK-PF

Microorganisms in the environment critically impact global geochemical cycles and redox reactions of various elements. Many geochemically important redox reactions (e.g., sulfate reduction, Fe(II) oxidation) are largely associated with microbial activity. In addition, microbes can mediate both mineral formation (biomineralization) and mineral dissolution (bioleaching). Recent studies suggest a significant relationship between Fe(II)-oxidizing bacteria and ancient Banded Iron Formation, one of the large geochemical events in Earth's history. The general ecological importance of environmental microbial reaction has been well recognized; however, the specific mechanisms of the reactions in the environments such as the reaction rate and spatial dynamics are poorly understood. In the environment such as sediments, microbial reactions and habitability vary locally and form complicated geochemical networks, which makes it difficult to characterize the specific biogenic reactions in detail.

Scanning transmission X-ray microscopy (STXM), which uses near-edge X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS) is a powerful new tool that can be applied to hydrated biological materials with high spatial resolution. The STXM provides spatial resolution of better than 50 nm, which is suitable for imaging bacteria and bacterial biofilms.

In the present study, we applied the STXM into the bioleaching of sulfide mineral (pyrite) to determine carbon, oxygen, and iron species in nano-scale. Both metal and biogenic organic materials in pyrite-microbe interface were investigated in the single cell level. Our study shows that the STXM could be a potential technique to provide direct information on specific biogenic reaction microorganism.

キーワード: 走査型透過 X 線顕微鏡, パイライト, バイオリーチング  
Keywords: STXM, pyrite, bioleaching

## レーザーアブレーションICP質量分析計を用いた局所微量元素組成分析 In-situ trace element quantification of geological samples using LA-ICPM

昆慶明<sup>1\*</sup>; 江島輝美<sup>1</sup>; 鈴木正哉<sup>1</sup>; 平田岳史<sup>2</sup>; 高木哲一<sup>1</sup>

KON, Yoshiaki<sup>1\*</sup>; EJIMA, Terumi<sup>1</sup>; SUZUKI, Masaya<sup>1</sup>; HIRATA, Takafumi<sup>2</sup>; TAKAGI, Tetsuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所、地質調査総合センター, <sup>2</sup> 京大院理、地球惑星

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Division of Earth and Planet. Sci., Kyoto Univ.

Laser-Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICPMS) is a type of mass spectrometry which is capable of in-situ trace element quantification of a solid sample. We introduce an typical application to characterize sub-micron scale particles based on the variation of their geochemical compositions.

キーワード: LA-ICPMS, フェムト秒レーザー, 局所分析, 微量元素組成分析

Keywords: LA-ICPMS, femtosecond laser, in-situ analyses, trace-element quantification



## pH 2-3 における鉄コロイドの生成速度 Formation rate of iron colloids at pH 2-3

長崎 性邦<sup>1\*</sup>; 横山 正<sup>2</sup>; 久富 修<sup>2</sup>; 中嶋 悟<sup>2</sup>

NAGASAKI, Sagakuni<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Tadashi<sup>2</sup>; HISATOMI, Osamu<sup>2</sup>; NAKASHIMA, Satoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学 理学部 物理学科, <sup>2</sup> 大阪大学 大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

<sup>1</sup>Department of physics, Osaka University, <sup>2</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

地球表層環境中には、様々な種類の鉄コロイドが広く分布しており、その生成過程や吸着特性、鉄コロイドを介した物質移動等が注目されている。鉄コロイドは、岩石鉱物中の Fe<sup>2+</sup> や Fe<sup>3+</sup> の溶出、酸化 (Fe<sup>2+</sup> → Fe<sup>3+</sup>)、水和、結晶化等の過程を経て生成することが多い。本研究では、特に溶存 Fe<sup>3+</sup> から鉄コロイドが生成する過程に着目して、反応速度を調べた。

FeCl<sub>3</sub> を純水に溶解させ、Fe<sup>3+</sup> 100 ppm の溶液を作成した。この溶液を、15, 25, 35, 45, 55 °C において反応させた。25 °C においては、作成直後の溶液の pH は 2.7 であったが、時間の経過と共に約 2.2 まで減少した。このような pH の変化は、溶存 Fe<sup>3+</sup> の水和 (H<sup>+</sup> の放出) → 溶存 Fe(OH)<sub>3</sub> → 固体 Fe(OH)<sub>3</sub> という反応が進むことにより生じる (Grundl and Delwiche, 1993)。したがって、溶液の pH の時間変化を調べることで、鉄コロイドの生成速度に関する情報が得られる。pH の時間変化傾向から、核生成に関連すると推定される溶存 Fe(OH)<sub>3</sub> 濃度の変化が小さい (固体生成が遅い) 期間を経た後、一次反応的な溶存 Fe(OH)<sub>3</sub> 濃度の減少が起こり、さらに時間が経つと一次反応的な挙動からずれていく様子が見られた。反応中期を一次反応と仮定して得られた各温度における反応速度定数は  $3.3 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  であり、アレニウスプロット上においてよい直線性が認められた。

固体の全体量の時間変化を求める上記の実験に加えて、鉄コロイドの粒径の時間変化も調べた。上記と同様に Fe<sup>3+</sup> 100 ppm の溶液を作成し、動的光散乱測定装置 (Zetasizer μ V, Malvern) を用いて、25 °C における粒径を連続的に測定した。その結果、鉄コロイドの平均直径が約 10 nm (球相当) に成長した時点で十分な散乱強度が検出されるようになり、以降粒径の増大が見られた。実験開始後約 8 時間が経過すると、ほぼ粒径の増大が止まり、その時点での直径は約 30 - 40 nm であった。また、各時点での総固体量と粒子径から粒子数を見積もると、時間の経過と共に粒子数が減少するという結果を得た。

キーワード: 鉄コロイド, 反応速度論, 動的光散乱法

## ナノサイズアルミニウムケイ酸塩による鉛吸着の表面錯体モデリング Surface complexation modeling for lead adsorption on nano-sized aluminum silicate

牛山 智樹<sup>1\*</sup>; 福土 圭介<sup>2</sup>  
USHIYAMA, Tomoki<sup>1\*</sup>; FUKUSHI, Keisuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 金沢大学環日本海域環境研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, <sup>2</sup>Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

鉛は有害元素であり、その溶存体は低濃度であっても知能症や神経症を引き起こす危険な物質である。日本にはかつて鉛を採掘した休廃止鉱山が多数存在しており、地表に投棄された鉱山廃石を起源とする自然由来水質汚染が懸念されている。自然由来汚染による鉛は比較的低濃度であると考えられるため、汚染による鉛の移動は土壌鉱物への吸着が支配されると考えられる。地球表層の物質の多くは微結晶や非晶質物質からなることが指摘されている。これまで鉄酸化物や層状ケイ酸塩のような結晶性鉱物および、フェリハイドライトに代表される低結晶性鉄酸化物に対する鉛の吸着挙動は詳細に検討されてきた。一方、地球表層に普遍的に存在すると考えられる微結晶アルミニウムケイ酸塩 (以降 NAS) における鉛の吸着挙動は現在まで検討されていない。NAS による鉛の吸着挙動を理解し、予測することは鉛の表層環境における動態を理解するうえで重要である。

NAS における吸着メカニズムは鉱物表面の表面水酸基に起因する変異電荷であることが理解されている。表面錯体モデリング (Triple Layer Model: TLM) は表面水酸基と溶存イオンとの吸着反応を定量的にモデル化する手法である。NAS による鉛の吸着反応を表面錯体モデリングによりモデル化できると、様々な環境条件における鉛の吸着挙動の予測が可能となる。本研究では様々な水質条件における NAS による鉛の吸着挙動を明らかにし、得られた実験データを用いて表面錯体モデリングにより吸着挙動をモデル化することを目的とした。

キーワード: ナノサイズアルミニウムケイ酸塩, 鉛, 吸着, 表面錯体モデリング

Keywords: nano-sized aluminum silicate, lead, adsorption, surface complexation modeling

## 熊本県八代市赤松に産する蛇紋岩の鉱物学的研究 Mineralogical study of serpentinite from Akamatsu, Yatsushiro, Kumamoto prefecture.

岩城 靖代<sup>1</sup>; 延寿 里美<sup>1\*</sup>; 上原 誠一郎<sup>1</sup>  
IWAKI, Yasuyo<sup>1</sup>; ENJU, Satomi<sup>1\*</sup>; UEHARA, Seiichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学理学部地球惑星科学科

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

### 1. はじめに

蛇紋石は蛇紋岩を構成する主要鉱物で  $\text{SiO}_4$  四面体シートと  $\text{MgO}(\text{OH})$  八面体シートからなる珪酸塩鉱物である。 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  の理想化学組成を持つリザーダイト, クリソタイル  $\text{Mg}_{48}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{62}$  の理想化学組成を持つアンチゴライトが存在する。我々は黒瀬川構造帯の蛇紋岩の広域的な研究を行った (Tanaka et al., 2012)。しかし, 地域ごとの詳細な研究は十分でないため, 西部地域に位置する熊本県八代市二見赤松町および葦北郡芦北町田ノ浦町の蛇紋岩の構成鉱物および蛇紋石組織について研究を行った。

### 2. 試料および実験方法

赤松地域の赤松太郎峠 (ATT), 田浦 (TNU) の2地点で採集した64試料のうち, 蛇紋岩と分類した52試料について X線回折実験と SEM-EDS (JEOL JSM-7001F) を用いて構成鉱物の同定を行った。また偏光顕微鏡で蛇紋岩組織の観察を行い, SEM-EDS を用いて定量化学分析を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 蛇紋石の種類

本地域の蛇紋岩はアンチゴライトに非常に富むもの (Type AA, 16 試料), 富むもの (Type A, 20 試料), 乏しいもの (Type LC, 10 試料) に分類できた。6 試料は緑泥石等の混在により蛇紋石種の同定はできなかった。赤松地域はアンチゴライトに富む蛇紋岩が多いことが分かる。

#### (2) 構成鉱物

ATT, TNU 共通で磁鉄鉱, クロム鉄鉱, 緑泥石, ブルース石, ハイドロタルク石グループが同定された。ATT のみ灰鉄柘榴石, 方解石, ヒーズルウッド鉱 ( $\text{Ni}_3\text{S}_2$ ), 針ニッケル鉱 ( $\text{NiS}$ ), TNU のみ苦土カンラン石, 水苦土石, パイロオーロ石, アワルワ鉱 ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) が同定された。TNU のみに蛇紋岩の原岩のカンラン岩の主要鉱物である苦土カンラン石が含まれていたことから, ATT と比べて蛇紋岩化作用が弱かったと思われる。また, ATT には2種類のニッケル硫化鉱物, TNU にはニッケル鉄鉱物が含まれていたことから, 蛇紋岩化作用による還元的な環境で生成し, その際に ATT のみに  $\text{H}_2\text{S}$  の供給が行われていたと思われる。

#### (3) 蛇紋石組織

赤松地域に多い塊状の蛇紋岩の蛇紋石は脈状, 短冊状, カンラン石の仮晶組織であるメッシュ組織を持っていた。メッシュ組織は Type LC の蛇紋岩により発達していたが, メッシュ組織を持たない Type AA, Type A の蛇紋石にはメッシュ組織のコアのみが存在し, 短冊状が刺さったような組織を持っていた。

Mg を置換する Al のイオン数 (apfu) は短冊状で 0.041, メッシュ組織のコアで 0.007, リムで 0.006 であり, 短冊状がより富んでおり, コア・リムがより乏しかった。また短冊状は  $\text{SiO}_2$  重量%がコア・リムより高く, アンチゴライトの理想組成に近いことが分かった。

### Reference

K. Tanaka, T. Inoo and S. Uehara (2012): Microtexture and chemical composition of serpentinite minerals from Kurosegawa belt, Kyushu, Japan. The 2nd Asian Clay Conference, Abstract Book.

キーワード: 蛇紋石, アンチゴライト, 短冊状組織, メッシュ組織, 九州黒瀬川帯, 八代市赤松

Keywords: serpentinite, antigorite, reed shape texture, mesh texture, Kyushu Kurosegawa belt, Yatsushiro

## リチウム鉱床におけるリチウム存在形態について The lithium existence form in a lithium ore deposit

鈴木 正哉<sup>1\*</sup>; 昆 慶明<sup>1</sup>; 江島 輝美<sup>1</sup>; 平林 恵理<sup>1</sup>; 佐藤 卓見<sup>1</sup>; 大和田 朗<sup>1</sup>; 高木 哲一<sup>1</sup>; 月村 勝宏<sup>1</sup>; 佐脇 貴幸<sup>1</sup>; 村上 尚義<sup>2</sup>; 本居 正幸<sup>2</sup>

SUZUKI, Masaya<sup>1\*</sup>; KON, Yoshiaki<sup>1</sup>; EJIMA, Terumi<sup>1</sup>; HIRABAYASHI, Eri<sup>1</sup>; SATOU, Takumi<sup>1</sup>; OOWADA, Akira<sup>1</sup>; TAKAGI, Tetsuichi<sup>1</sup>; TSUKIMURA, Katsuhiko<sup>1</sup>; SAWAKI, Takayuki<sup>1</sup>; MURAKAMI, Takayoshi<sup>2</sup>; MOTOORI, Masayuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(独) 産業技術総合研究所, <sup>2</sup>(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

<sup>1</sup>AIIST, <sup>2</sup>JOGMEC

リチウムを含む鉱床において、リチウム鉱物としては、リシア輝石・ペタライト・リシア雲母などが知られているが、今回検討したリチウム鉱床においては、これらの鉱物は含まれていない。そこで本研究では、X線粉末回折(XRD)およびエネルギー分散型分析装置付き操作型電子顕微鏡(SEM+EDS)を用いて分析した結果について発表する。

今回のリチウムを含む鉱床においては、大きく分けて、白色の部分と灰緑色の部分からなる。XRDの結果から、白色の部分には、主に Searlesite ( $\text{NaBSiO}_5(\text{OH})_2$ )、Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )、Orthoclase ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) からなり、リチウムを含む鉱物は見られない。一方、灰緑色の部分には、Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )、Orthoclase ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )、Illite ( $\text{K}(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}$ )、Rozenite ( $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )、Cryolite ( $\text{Li}_3\text{Na}_3\text{Al}_2\text{F}_{12}$ ) が含まれている結果が得られた。様々な鉱物のピークが現れているため、明確に Cryolite が存在すると断言できないが、リチウム含有鉱物として Cryolite が存在する可能性があることは示唆された。

次に SEM+EDS により分析を行ったところ、白色部分において、10-100  $\mu\text{m}$  程度と粒子サイズの大きいものに、Calcite と Orthoclase が見られ、それらの周囲に Searlesite が存在していた。緑灰色部分においては、10-30  $\mu\text{m}$  程度と粒子サイズの大きいものに、Orthoclase、Calcite、Illite、Rozenite が見られ、それらの周囲に、1  $\mu\text{m}$  以下の微細粒子として見られるものが存在していた。EDS の分析において Li の測定はできないが、この微細粒子の元素分析において F が含まれていることが確認された。

以上の結果から、今回検討したリチウム含有鉱物は Cryolite であると推測した。

なお発表当日は、水ひ等により微細粒子だけを集めて XRD 分析を行った結果など、Cryolite の存在に向けた検討についても紹介を行う。

キーワード: リチウム, 鉱床, 鉱物

Keywords: lithium, ore deposit, mineral



## 降下火砕堆積物の粒子サイズ分布の層序変化と噴煙時間変化の数学的関係性の導出 The mathematical link between stratigraphic grain size variation of fall deposits and its time variation at the source

入山 宙<sup>1\*</sup>; 寅丸 敦志<sup>2</sup>; 山本 哲生<sup>3</sup>  
IRIYAMA, Yu<sup>1\*</sup>; TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Tetsuo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, <sup>3</sup>神戸大学惑星科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Center for Planetary Science, Kobe University

Pyroclastic fall deposits which are produced by explosive volcanic eruption have various information on the eruption events. The areal distributions of pyroclastic fall deposits such as maximum grain size, median grain size, thickness, mass per unit area, etc. reflect the intensity in a single eruption and the wind conditions. Stratigraphic grain size variations of pyroclastic fall deposits also reflect the temporal behavior of the eruption intensity. For example, normal or reverse grading structures in the pyroclastic fall deposits have been attributed to temporal variation in the volcanic intensity (column height) and/or in the initial grain size distribution at the vent. However, no quantitative methodology has been developed to relate the temporal variation of source characteristics (column height and initial grain size distribution) to stratigraphic variation of grain size distribution at the deposits. In this study, we consider the mathematical description in 1D fall-sedimentation process, which relates the temporal variation of source grain size distribution to stratigraphic variation of grain size distribution.

The number of grains in a size bin must be conserved during sedimentation process and results in the same value at the arrival time on the deposits. The number of a specific-size grains between at the fallout time and at given times is linked by Lagrangian description. The key point is that the grain size and the departure time at the source are mutually related to the grain size and the arrival time at the deposits. As the arrival time corresponds to the stratigraphic location at the deposit, the stratigraphic variation of grain size in the deposit can be connected to the grain size characteristics and departure time at the source using the condition of grain number conservation. As a result, when the time variations of source grain size distribution and of fallout height are given, we obtain the temporal variation of grain size distribution at the sedimentation surface. It means that different sizes of grains which settle at the same arrival time are traced back to the different source time and height. The arrival time on the deposit can be related to the stratigraphic height in the deposit by the differential equation of increasing rate of the thickness, which equals to the volume flux through the sedimentation surface. By using these mathematical descriptions, we develop the mathematical method to link the temporal variation of eruption intensity to the stratigraphic variation of grain size distribution in the fall deposits.

キーワード: 降下火砕堆積物, 粒子サイズ分布, 層序変化, 噴火推移

Keywords: pyroclastic fall deposits, grain size distribution, stratigraphic variation, development of eruption

## 桜島火山昭和火口噴火における火山灰色と粒径の連続観測 Color and grainsize of ash samples collected continuously at Sakurajima volcano, Japan

嶋野 岳人<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>2</sup>; 井口 正人<sup>3</sup>; 味喜 大介<sup>3</sup>  
SHIMANO, Taketo<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>2</sup>; IGUCHI, Masato<sup>3</sup>; MIKI, Daisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 常葉大学大学院環境防災研究科, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>Graduate school of Environment and Disaster Research, Tokoha University, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

桜島火山は50年以上活動を続ける我が国有数の活火山であるだけでなく、これまでに構築・蓄積されてきた地球物理学的な連続観測網とデータから、年単位にわたるマグマ上昇から数時間単位で発生する爆発現象の素過程に至るまで、比較的理解の進んだ火山である。一方で、本火山の噴火史上では、しばしばプリニー式噴火を含む極めて大規模かつ爆発的な噴火が発生しているおり、今日の連続的活動との関係や移行過程についてはほとんど理解が進んでいない。また、いわゆる「ブルカノ式噴火」に代表される最近の活動についても、さまざまな噴火タイプの存在が比較的多くの研究者に認識されつつある一方で、これらの差異がどのような素過程に起因するのかについては、あまり良く分かっていない。これらの現象は、特に数ヶ月～数日単位の変動として特徴付けられるため、本研究では噴出物の連続採取を行って、この期間のマグマ上昇過程や噴火様式の遷移過程について明らかにすることを目指している。

これまでわれわれは自動火山灰採取装置を開発し、桜島火山昭和火口から約2kmの地点で連続採取に成功した(Shimano et al., 2013)。この間、火山灰粒子の石基ガラス組成を連続的に分析した結果、2009年秋の活動活発化に先立って、それ以前と異なる組成のマグマの出現を検出した。一方、地球物理学的観測データと比較検討するためには、リアルタイムデータの取得が久しく望まれてきた。また、近年、分光測色計の汎用化および火山灰の加熱実験により(宮城東宮, 2002; Yamanoi et al., 2008 など)、火山灰の色と温度条件などの関係が明らかになりつつある。本研究では、今後、リアルタイム観測につなげるべく、桜島において連続採取した火山灰試料の分光測色計による色測定を行った。また、火山灰については、粒径毎に色が異なることが指摘されているため(宮城ほか, 2010)、粒径毎に測色を行って色と粒径の関係について考察した。

キーワード: 火山灰, 連続観測, 色変化, 桜島火山

Keywords: volcanic ash, continuous observation, color change, Sakurajima volcano

## 2011年1月26 - 27日新燃岳噴火に伴う火山灰輸送に関する数値実験 Numerical Simulation of Volcanic Ash Transport for the Eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26-27 January 2011

橋本 明弘<sup>1\*</sup>; 鈴木 雄治郎<sup>2</sup>; 新堀 敏基<sup>1</sup>; 高木 朗充<sup>1</sup>  
HASHIMOTO, Akihiro<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Yujiro<sup>2</sup>; SHIMBORI, Toshiki<sup>1</sup>; TAKAGI, Akimichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2011年1月26-27日新燃岳噴火による火山灰輸送を、気象庁非静力学モデルをベースとする噴煙-降灰モデルを用いて再現し、衛星観測データによる検証を行っている。噴煙-降灰モデルは、火山灰の粒子サイズ・放出地点を初期条件として与えることで大気中への火山灰放出を表し、単位質量空気に含まれる火山灰粒子の質量と数を予報変数として火山灰雲の移流・拡散を再現する。計算領域は宮崎県沖から四国沖を中心として2500km × 2000kmと広域にとり、水平解像度は5kmとした。

火山灰放出は、単純な鉛直一次元噴煙柱モデル (Suzuki, 1983; Shimbori et al., 2010) に基づき、噴煙頂高度・火山灰粒子のサイズ・放出点高度の関数として与える。数値実験の結果、衛星で観測された火山灰雲の大局的な分布は再現できたものの、詳細を見ると火山灰雲の有無が観測データと異なる領域がみとめられ、仮定した火山灰放出点やサイズ分布に改善の余地があることが分かった。そこで、より現実的な火山灰放出を初期条件として与えるために、噴煙ダイナミクスを考慮した3次元直接数値計算を行った (Suzuki and Koyaguchi, 2013)。3次元直接数値計算の結果、従来の鉛直一次元噴煙柱モデルから与えられる火山灰放出の関数に比べ、数10 $\mu$ m未満の火山灰粒子の放出率のピークがより低い高度に現れることが新たに分かった。この結果から推定される火山灰放出の関数を導入して、新たな噴煙柱モデルを開発している。広域火山灰輸送に対する新しい火山灰放出の関数の効用について、数値実験の結果を示し議論する。

### 謝辞

本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけました。

### 参考文献

Shimbori, T., Y. Aikawa, K. Fukui, A. Hashimoto, N. Seino, and H. Yamasato, 2010: Quantitative tephra fall prediction with the JMA mesoscale tracer transport model for volcanic ash: A case study of the eruption at Asama volcano in 2009. *Pap. Met. Geophys.*, **61**, 13-29.

Suzuki, T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra. *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*. TERRAPUB, 95-113.

Suzuki, Y. and T. Koyaguchi, 2013: 3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoe-dake eruptions. *Earth Planets Space*, **65**, 581-589.

キーワード: 火山灰拡散, 移流拡散モデル, 新燃岳, 2011年

Keywords: volcanic-ash dispersal, Atmospheric Transport Model, Shinmoe-dake volcano, 2011

## 気象レーダによる噴煙の実態解明と火山防災 Weather Radar Investigation of Volcanic Smoke for Disaster-Prevention

真木 雅之<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 藤田 英輔<sup>3</sup>; 前坂 剛<sup>3</sup>; 出世 ゆかり<sup>4</sup>; 小園 誠史<sup>4</sup>; 桃谷 辰也<sup>5</sup>; 山路 昭彦<sup>5</sup>  
MAKI, Masayuki<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; FUJITA, Eisuke<sup>3</sup>; MAESAKA, Takeshi<sup>3</sup>; SHUSSE, Yukari<sup>4</sup>; KOZONO, Tomofumi<sup>4</sup>  
; MOMOTANI, Tatsuya<sup>5</sup>; YAMAJI, Akihiko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 日本気象協会

<sup>1</sup>Kagoshima University, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>3</sup>NIED, <sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>Japan Weather Association

桜島は、2009年2月以降、爆発的噴火が急増しており、2011年には観測史上最多の966回を記録した。噴火の急増に合わせて、鹿児島市内の降灰量も急増しており、2012年は鹿児島地方気象台における降灰量が3,500g/m<sup>2</sup>を超えた。鹿児島市街地に降る大量の火山灰（ドカ灰）は、鉄道や道路等の交通機関を麻痺させるなど大きな影響を与えるため、早期の復旧作業が必要となる。噴火後、迅速に復旧作業を進める際、降灰量や火山灰が降り積もった範囲を把握することが重要となるが、現在、リアルタイムに降灰分布を把握手段がない。そこで本研究により、通年稼働している気象レーダを用いたリアルタイム降灰量分布の推定手法の開発や降灰予測の高度化を検討する。本研究の成果は、国内外にかかわらず、気象レーダの観測範囲内に位置する活火山への適用が可能である。

キーワード: 気象レーダ, 火山灰, 定量的推定式, 桜島, 偏波レーダ

Keywords: weather radar, volcanic ash, quantitative ash estimation, Sakurajima, polarimetric radar



## 噴火のタイプは上昇するマグマの流量と揮発性成分量で決まる Eruption types determined by the mass flux and volatile component content of ascending magma flow

井田 喜明<sup>1\*</sup>; 及川 純<sup>2</sup>  
IDA, Yoshiaki<sup>1\*</sup>; OIKAWA, Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> アドバンスソフト株式会社, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Advance Soft Co., <sup>2</sup> Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

噴火にはマグマが液体状態を保って流出する非爆発的な噴火とマグマが破碎されて噴霧流などの形で噴出する爆発的な噴火がある。伝統的な区分では、爆発的な噴火はさらに定期的に噴煙を高く上げるプリニー式噴火、火砕流をふんだんに出し出すプレー式噴火、瞬発的な強い爆発を伴うブルカノ式噴火、間欠的に噴泉を上げるストロンボリ式噴火などに分類される。爆発的な噴火と非爆発的な噴火の違いが脱ガス量に支配されることはよく知られているが、爆発的な噴火のタイプがどう決まるかは必ずしも明快に説明されていない。本発表では、爆発的な噴火のタイプが深部のマグマ上昇流の性質にどう依存するのかを、定常火道モデルに基づく単純なモデルで説明する。

マグマが地表に噴出するときの状態は、噴出時のマグマの流速と発泡度で表わせるが、発泡度はそれを決める揮発性成分量で代用できる。揮発性成分量は液体マグマ（結晶も含むマグマの液体部分）に対する質量比で表す。一方、深部のマグマの状態は液体マグマの流量（質量流量）と脱ガスが始まる前の揮発性成分量で表現するのが便利である。マグマ上昇流が定常状態にあるときには、液体マグマの流量は深さによらず一定になるので、このふたつの量はマグマが上昇を開始する深さに依存せずに深部の状態を表現できる。

地表の状態と深部の状態は定常火道流モデルを用いて結びつける。この計算で、揮発性成分は鉛直方向には相対運動を無視して液体マグマと同じ速度で上昇するものとする。気泡流の状態では、気化した揮発性成分がマグマ中を浸透流によって水平方向に移動する効果を考え、それが脱ガスを律速するものとする。マグマの上昇速度は中心ほど大きいため、減圧に伴う膨張の緩和に差ができて水平方向に圧力勾配が生じ、それが浸透流を駆動すると考えるのである (Ida, JVGR, 162, 172-184, 2007)。壁からマグマが受ける摩擦抵抗は、気泡流の状態では上昇速度に、噴霧流の状態では上昇速度の2乗に比例するとし、それぞれの抵抗係数を求める。揮発性成分の溶解度には水蒸気に対する関係を用いる。

火道流の積分は地表から地下に向かって実行する。地表の圧力を1気圧とし、噴出時の流速と揮発性成分量に様々な組み合わせを与えて、対応する地下深部での液体マグマの流量と揮発性成分量を計算するのである。計算結果を整理してみると、地下深部の条件と地表の噴出状態の関係は、その特徴によっていくつかのグループに分けられた。グループの各々が噴火タイプと対応づけられて以下のように解釈できるのである。

地下深部の揮発性成分量が十分に多いときは、地表からは高速の噴霧流が激しく噴出する。これが第1のグループで、プリニー式噴火と対応づけられる。噴出時の流速や揮発性成分量は、上昇途上の脱ガスによって調整されて、地下深部の揮発性成分量に依存せずに液体マグマの流量だけで決まる。揮発性成分量の多い状態で液体マグマの流量を下げていくと、あるしきい値以下で火道流の定常解が存在しなくなる。これが第2のグループで、この条件下では噴火は非定常になり、ブルカノ式やストロンボリ式噴火になるものと解釈できる。第3に、地下の揮発性成分量が少ないときには、発泡状態の悪いマグマが遅い速度で噴出する。この状態では噴出後に流速を加速するのは難しく、噴火は噴霧流が火砕流として流下するプレー式噴火になると解釈できる。

以上の解析と解釈によれば、様々な噴火タイプは液体マグマの上昇流量と脱ガス効率の兼ね合いで生まれる。噴火タイプが特徴的な性質をもつグループに分かれるのは、発泡や脱ガスを含むマグマ上昇流が強い非線形性をもつためである。

キーワード: 噴火タイプ, マグマ上昇流, 火道流モデル, 揮発性成分量, 脱ガス, 数値シミュレーション

Keywords: volcanic eruption type, ascending magma flow, conduit flow model, volatile component content, degassing, computer simulation

## 噴出率・噴火様式とマグマ溜まり粘性との関係 Magma eruption rates, eruption styles, and preeruptive magma viscosity

東宮 昭彦<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>2</sup>; 小園 誠史<sup>3</sup>; 竹内 晋吾<sup>4</sup>  
TOMIYA, Akihiko<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>2</sup>; KOZONO, Tomofumi<sup>3</sup>; TAKEUCHI, Shingo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>産総研・地質調査総合センター, <sup>2</sup>東京大学・地震研究所, <sup>3</sup>東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻, <sup>4</sup>一般財団法人・電力中央研究所・地球工学研究所

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4</sup>Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

マグマ噴出率は、噴火ダイナミクスを理解するために最も基本的な観測量の1つである。多くの場合に地質学的・地球物理学的データから得られるこの量を、岩石学的データ、および火道内のマグマの流体力学と結びつけて議論することを試みる。

まず、さまざまな噴火様式（プリニー式、準プリニー式、玄武岩質プリニー式、溶岩流、溶岩ドーム）ごとに、噴出率・全岩化学組成・斑晶量を計100組あまりコンパイルした。そしてこれを、「マグマ溜まり粘性」(preeruptive magma viscosity; Takeuchi, 2011) に着目して整理した。マグマ溜まり粘性とは、マグマ溜まりにおけるマグマ（メルト+結晶）の粘性であり、マグマの噴火能力 (eruptibility) の重要な指標である。マグマ溜まり条件（温度・含水量）におけるメルト組成と斑晶量から計算される。ここでは、メルト組成を全岩組成と斑晶量から簡便に算出する方法（竹内, 2010）を用いた。得られたマグマ溜まり粘性と噴出率・噴火様式の間をみると、噴火様式はマグマ溜まり粘性と相関する一方、全岩化学組成とはあまり相関しなかった。

次に、爆発的噴火 (e.g., プリニー式) と溢流的噴火 (e.g., 溶岩ドーム) との間での遷移 (e.g., Kozono and Koyaguchi, 2009a,b) を理解するため、同一噴火内における爆発的フェーズと溢流的フェーズの噴出率をピックアップし、マグマ溜まり粘性との関係を調べた。その結果、マグマ溜まり粘性が高いほど、両フェーズの噴出率のギャップ（噴出率比）も大きいことが分かった。これは、爆発的噴火と溢流的噴火の遷移条件がマグマ溜まり粘性に制約されていることを示唆する。

以上の結果は、噴火様式や噴出率を、マグマ溜まり粘性（マグマ溜まり条件）が大きく支配していることを示している。特に、マグマ溜まり粘性が  $10^4$  Pa s 付近を境に、2つのタイプに分けられそうである。(1) 低粘性タイプ（玄武岩～低斑晶量安山岩）：爆発的噴火は玄武岩質プリニー式～準プリニー式、溢流的噴火は溶岩流が多く、両噴火の噴出率のギャップは小さい；伊豆大島 1986 年噴火、ヘクラ 1947・1970・1980・1991 年噴火、新燃岳 2011 年噴火、など。(2) 高粘性タイプ（高斑晶量安山岩～流紋岩）：爆発的噴火はプリニー式（あるいは準プリニー式の連発）、溢流的噴火は溶岩ドーム・潜在ドームが多く、両噴火の噴出率のギャップは大きい；全岩  $\text{SiO}_2$  と斑晶量に負の相関が見られる；ピナツボ 1991 年噴火、セントヘレンズ 1980-86 年噴火、有珠 1977-78 年噴火、など。2つのタイプは、各マグマの生成・蓄積過程 (e.g., 結晶分化、マッシュ状マグマ溜まりからのメルト分離) を反映している可能性がある。

キーワード: マグマ噴出率, 噴火様式, マグマ溜まり粘性, 爆発的噴火-溢流的噴火の遷移, 斑晶量, 全岩化学組成

Keywords: magma eruption rates, eruption styles, preeruptive magma viscosity, transition between explosive and effusive eruption, phenocryst content, bulk rock chemical composition

## 溶岩ドームから爆発的噴火への遷移条件 Conditions for transition from lava dome to explosive eruption

小園 誠史<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>2</sup>  
KOZONO, Tomofumi<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

マグマの発泡やガスの分離(脱ガス), 結晶化を伴う溶岩ドーム噴火における火道流のダイナミクスは, 爆発的噴火への遷移などの複雑な噴火プロセスをもたらす。溶岩ドームから爆発的噴火への遷移は, 急激な噴火強度の増加を伴うため, その遷移が生じる条件を明らかにすることは火山防災にとっても重要な意義がある。本研究では, 一次元火道流モデルに基づき, 溶岩ドームから爆発的噴火への遷移条件がマグマ物性や地質条件に依存してどのように変化するかを調べた。

噴火遷移条件のマグマ物性・地質条件への依存性を系統的に調べるために, 本研究では定常火道流におけるマグマ溜まり圧力( $p_{ch}$ )とマグマ噴出率( $q$ )の関係( $p_{ch}$ - $q$ カーブ)を用いた。 $p_{ch}$ - $q$ カーブの傾き( $dp_{ch}/dq$ )が正の場合, 定常流は安定になる一方で,  $dp_{ch}/dq$ が負, つまり火道流が負性抵抗をもつ場合, 定常流は不安定になる。この負性抵抗は2つの正のフィードバックメカニズムによってもたらされる, 第一に, 結晶化の遅れの効果による, マグマ噴出率の増加に伴うマグマの実効粘性の減少が, 火道壁からの粘性抵抗の減少をもたらす(フィードバック1)。第二に, 脱ガスの非効率化の効果による, 噴出率の増加に伴うマグマ発泡度の増加が, マグマの荷重による抵抗の減少をもたらす(フィードバック2)。これら二つのフィードバックの効果によって, 低噴出率と高噴出率の領域で  $dp_{ch}/dq > 0$  となり, その間の中間領域で  $dp_{ch}/dq < 0$  となり負性抵抗をもつS字型の  $p_{ch}$ - $q$ カーブがある現実的な条件で出現する。時間発展火道流モデルの解析によると, このS字型の  $p_{ch}$ - $q$ カーブのために, 深部からのマグマ供給率が低噴出率の領域から中間領域まで徐々に増加していった場合, 低噴出率から高噴出率の領域へ火道流が急激に遷移することがわかった。この噴出率の急増を伴う遷移は, 安定な溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程として捉えることができる。そこで本研究では, 低噴出率の領域と中間領域の境界における  $q$  の値を, 噴火遷移が生じる重要な臨界値 ( $q_{cr}$ ) として定義した。

解析の結果,  $q_{cr}$  は幅広いパラメータ条件のもとでフィードバック2によって支配され, 斑晶量が非常に高い場合にのみフィードバック1によって支配されることがわかった。 $q_{cr}$  がフィードバック2によって支配される場合, その値は縦方向や横方向への脱ガス浸透率などの脱ガスに関連するパラメータに依存する。本研究では, 縦方向脱ガス浸透率の範囲を噴出物の浸透率測定データから制約した場合に,  $q_{cr}$  が横方向脱ガス浸透率の減少とともに急激に減少し, その浸透率が0(横方向脱ガスなし)の極限では典型的な溶岩ドーム噴火の噴出率の観測値よりはるかに低くなることを明らかにした。このことは, 横方向脱ガスが安定な溶岩ドーム噴火の出現に本質的な役割を果たしていることを示している。さらに  $q_{cr}$  の値は, 火道径に強く依存することがわかった。これは, 火道径の変化が脱ガスの割合に大きな影響を与えるためである。火道径が減少すると, 火道壁からの粘性抵抗が増加することで液相の上昇が抑制され, その結果縦方向脱ガスが促進される。また火道径の減少は, 火道断面積/火道周の比の増加や, 横方向ガス浸透流を駆動する圧力勾配の長さスケールの減少をもたらす, これによって横方向脱ガスが促進される。これらの脱ガス促進によって溶岩ドーム噴火がより安定化し, すなわち  $q_{cr}$  が増加する。このことは, 火道径の変化が噴火の遷移過程に関連する重要なプロセスであることを示唆している。

キーワード: 火道流, 数値モデル, 噴火遷移, 溶岩ドーム, 爆発的噴火, 脱ガス

Keywords: conduit flow, numerical model, eruption transition, lava dome, explosive eruption, gas escape



## 爆発地震の解析から示唆されるフィリピン・マヨン火山の水蒸気爆発モデル A phreatic explosion model for Mayon volcano, Philippines, inferred from analyses of an explosion earthquake

前田 裕太<sup>1\*</sup>; 熊谷 博之<sup>1</sup>; Lacson Rudy<sup>2</sup>; Figueroa Melquiades<sup>2</sup>; 山品 匡史<sup>3</sup>; 大倉 敬宏<sup>4</sup>; Bornas Antonia<sup>2</sup>  
MAEDA, Yuta<sup>1\*</sup>; KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1</sup>; LACSON, Rudy<sup>2</sup>; FIGUEROA, Melquiades<sup>2</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>4</sup>; BORNAS, Antonia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup> 高知大学, <sup>4</sup> 京都大学

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup>Kochi University, <sup>4</sup>Kyoto University

マヨン火山はフィリピンで最も活発な活火山の一つであり 1616 年から 2010 年までに計 49 回の噴火を繰り返してきた。このマヨン火山において 2013 年 5 月 7 日に水蒸気爆発が発生、5 人の登山者が犠牲となった。本講演では波形インバージョンにより水蒸気爆発時の地震波を解析し、その結果をもとに同火山における水蒸気爆発の発生モデルに関して考察を行ったのでそれについて報告する。

我々は 2011 年より同火山に広帯域地震計 3 観測点を設置して連続観測を行ってきた。この観測網によって 2013 年爆発時に卓越周期 0.4 Hz の VLP イベントが記録された。同イベントの波形に 0.1-0.6 Hz のバンドパスフィルターを掛け、周波数領域で波形インバージョンを行ったところ、火口直下近傍浅部における水平な開口クラックと鉛直なシングルフォースの組合せの解が得られた。クラックとシングルフォースからの波形への寄与の振幅は同程度であった。

波形インバージョンで得られた震源時間関数はバンドパスフィルターの掛かったもの (filtered source time function; FSTF) であるので、フィルターの掛かっていない本来の震源時間関数 (deconvolved form of source time function; DSTF) とは形状が大きく異なる可能性がある。DSTF の推定のためには FSTF からバンドパスフィルターをデコンボリューションする必要があるが、数値的に安定にこれを行うのは容易ではない。そこで DSTF の候補として単純な関数形である有限な時間幅を持ったステップ型・インパルス型の関数を考え、これらにバンドパスフィルターを掛けたものを FSTF と比較したところ、インパルス型を用いた場合に FSTF に比較的近い波形が得られた。このことは DSTF がインパルス型の関数で近似できることを示している。開口クラックに対する DSTF は膨張とそれに引き続く収縮を示し、シングルフォースに対する DSTF はクラックの開口量最大となる時刻近傍での下向きの力を示す。

爆発の前兆現象探索のため、地震波の連続記録における RMS 振幅、山体を挟む GPS 基線長、山頂の高温域の地表面温度、観測点間の地震波波形相関、二酸化硫黄放出量、降雨量の時間変化を調べたが、いずれにおいても爆発前に明瞭な前兆現象は見つからなかった。

以上の結果をもとに考察を行う。解析した VLP イベントは水蒸気爆発時のものである。クラックの DSTF の前半部分に見られる膨張はクラック内の地下水の沸騰によるものと解釈できる。浅部の水平なクラック解が得られたことと合わせて考えると、透水層と不透水層の境界が弱面となってクラックが生成、そこに地下水が蓄積・沸騰して水蒸気爆発に至ったというモデルを考えることができる。一方、DSTF の後半に見られる下向きのシングルフォースは爆発の反力、クラックの収縮は爆発時の水蒸気放出によるものと理解できる。

モーメント振幅は 400 m×400 m のクラックが 0.4 m の厚さの膨張・収縮をしたと考えることで説明がつくが、これに相当する規模の山頂近傍の地形変化は観測されていない。したがって爆発の領域は限定的でクラックの大部分は爆発によって破碎されなかったものと思われる。このようなクラックにおいて繰り返し爆発が発生する可能性について検討する。爆発の直後にはクラックの一部が破碎された状態にあるために水蒸気を保持することができない。しかしながら熱水変質の進行に伴って爆発で破碎された部分の浸透率が徐々に低下すればクラックはやがて密閉構造となって次の爆発を起こしうる。マヨン火山では 2003, 2004, 2006, 2009 年に火山灰を放出する小規模な爆発が発生しており、これらが今回の爆発と同じクラックによって発生したとすると爆発の間隔は数日~数年 (多くは 1 ヶ月以上) となる。一方、マヨン火山の過去のマグマ噴火の噴出物に類似の組成を持つ玄武岩を用いた熱水変質の室内実験 (Berger et al., 1994, *Geochim. Cosmo. Acta*) から、センチメートルオーダーの隙間が熱水変質鉱物の沈殿によって閉塞されるのに要する時間は 300 °C の環境下で 2 ヶ月、150 °C の環境下で 4 年 6 ヶ月と推定でき、上記の爆発の間隔と近い値になる。

このモデルでは水蒸気爆発の発生時期は密閉構造の形成によって規定されるので、ガス・熱・地下水の定常的な供給があればその供給レートが変化しなくても水蒸気爆発を起こしうる。このことは今回の爆発前に明瞭な前兆現象が観測されなかったことと整合的である。またマヨン火山では 2011 年の観測開始以来、今回の水蒸気爆発時を除いて VLP イベントは観測されていないが、このことも爆発の直前に密閉構造が完成したと考えれば説明がつく。

キーワード: 水蒸気爆発, 波形インバージョン, 震源時間関数, 熱水変質

Keywords: Phreatic explosion, Waveform inversion, Source time function, Hydrothermal alteration



## 深部低周波地震, 山体変動, 地中 CO<sub>2</sub> 濃度変化の関連からみた伊豆大島火山の噴火準備過程の特徴 Magma accumulation process of Izu-Oshima volcano, as revealed from deep LF earthquakes, deformation and CO<sub>2</sub> out-gassing

渡辺 秀文<sup>1\*</sup>  
WATANABE, Hidefumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京都総合防災部  
<sup>1</sup> Disaster Prevention Division, Tokyo Metropolitan Government

噴火の中期予測のためには、深部からのマグマ供給・蓄積過程を把握するだけでなく、噴火に至る過程の理解（特に、マグマ溜り内の揮発成分濃度や気泡存在度の変化、噴火へ向けてのマグマ再上昇開始の条件など）が重要である。本講演では、伊豆大島火山 1986 年噴火後の長期的な山体膨張変動、深部低周波地震活動および山頂地中 CO<sub>2</sub> ガス濃度変化の関連からみた、噴火準備過程の特徴について報告する。

**1986 年噴火後の山体膨張の特徴：**1989 年後半に伊豆大島火山の山体膨張が再開したが、伊豆大島において最も高感度で長期間連続観測されている気象庁旧大島測候所の体積歪計データを再解析した結果、いくつかの注目すべき特徴が明らかになっている。(1) 経年的な山体膨張は 2006 年頃までは指数減衰曲線で非常に良く近似できるが、2007 年以降はそのトレンドから外れて大きくなっている。(2) 経年的な膨張に重畳して、1-2 年間隔で収縮-膨張変動が繰り返し発生し、1993-2011 年に収縮-膨張サイクルが 10 回発生しているが、殆どの場合に収縮から始まり、途中で急速に反転膨張するという特徴がある。(3) 変動の振幅と継続時間が 1999 年頃以降増大している（最大約 2  $\mu$  strain）。このような収縮-膨張変動は 1986 年噴火前にも観測されており、最大振幅は約 5  $\mu$  strain であった（渡辺, 2008 年連合大会）。

**深部低周波地震活動と山体変動の関連：**2001-2011 年の期間の気象庁一元化処理震源によると、大島直下深さ 30-40km の上部マントルに発生する深部低周波地震の発生回数が 2007 年以降増大しており、それに約 1.5 ヶ月遅れて山体周辺の地震回数が増加している。また、2010 年の膨張イベントに際しても同様な時間的な関連が認められる。従って、2007 年以降の山体膨張速度の増大は、上部マントルからのマグマ供給率の増大によるものと考えられる。さらに、体積歪変化と深部低周波地震の発生回数との関係を調べると、2007 年および 2010 年の両イベントとも、山体収縮が先行し、その後の反転膨張と深部低周波地震の発生回数増加がほぼ同期していることが分かった。

**山体収縮-膨張サイクルの概念モデル：**これらの観測事実を総合すると、収縮-膨張サイクルを説明する以下の概念モデルが得られる。(1) 浅部マグマ溜り上部に濃縮した CO<sub>2</sub> に富む気泡が間欠的に外部へ流出することにより減圧し、(2) その結果生じる深部マグマ溜りとの圧力差の変化により、深部から浅部へ向けて揮発性分に富むマグマの上昇が起こり、(3) 浅部マグマ溜りへ上昇したマグマの発泡により浅部マグマ溜りの増圧が起こる。

**山体変動と CO<sub>2</sub> 地中濃度の関連：**浅部マグマ溜りからのガス流出が山体収縮-膨張サイクルをトリガーするという仮説を実証するためには、山体変動と山頂火口周辺での CO<sub>2</sub> ガス放出量変化との関連を調べるのが重要である。2005 年以来、山頂火口近傍で地中 CO<sub>2</sub> ガス濃度の連続観測を継続し、山体膨張の加速に引き続いて地中 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇するのみならず、収縮時期にも CO<sub>2</sub> 濃度が増加することが分かった。このことは、山体収縮がマグマからのガス放出によることを示唆する。

**伊豆大島火山の噴火中期予測の指標：**このモデルが正しければ、1999 年以降に観測されている収縮-膨張変動の振幅増大は、浅部マグマ溜り上部の気泡に富んだ領域の体積増加を示唆し、噴火準備過程の進行を示す指標と考えられる。例えば、最近の収縮-膨張変動振幅の増加傾向をそのまま外挿すると、1986 年噴火前の最大振幅約 5  $\mu$  strain に達するのは約 10 年後となる。

キーワード: 伊豆大島火山, 噴火予測, 噴火準備過程, 山体膨張, CO<sub>2</sub> 脱ガス

Keywords: Izu Oshima volcano, eruption prediction, precursors to eruption, volcano deformation, CO<sub>2</sub> out-gassing

## 2011年霧島火山の噴火に伴って発生した火山性微動の時空間的特徴 Spatio-temporal characteristics of volcanic tremor during the 2011 Kirishima eruption by seismic wave analysis

中元 真美<sup>1\*</sup>; 松本 聡<sup>1</sup>; 山中 佳子<sup>2</sup>; 清水 洋<sup>1</sup>; 中道 治久<sup>4</sup>; 市原 美恵<sup>3</sup>; 及川 純<sup>3</sup>

NAKAMOTO, Manami<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Satoshi<sup>1</sup>; YAMANAKA, Yoshiko<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>; NAKAMICHI, Haruhisa<sup>4</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>3</sup>; OIKAWA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 九大・地震火山センター, <sup>2</sup> 名大火山研究センター, <sup>3</sup> 東大・地震研, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> SEVO, Kyushu Univ., <sup>2</sup> EVRC, Nagoya Univ., <sup>3</sup> ERI, University of Tokyo, <sup>4</sup> DPRI, Kyoto Univ.

火山性微動はマグマだまりから火口に至る浅部のマグマ供給系において発生すると考えられている震動であり, これらはマグマの存在位置や火道の状態を推定するうえで重要な情報を含んでいる. したがって, 発生源の位置, 震動特性を把握することがマグマ供給系のモデル化, 活動の状態, 推移を考える上で極めて重要である. そこで本研究ではこれらのモデル化を目指し, 地震学的な観測データを用いて微動の特性についての把握を試みた. 2011年1月から開始した霧島山・新燃岳の噴火では, 噴火活動にともない, 活発な地震・微動活動が観測された. そこで, この噴火で発生した微動の特性を明らかにして, 火山活動との関連性を探ることを目的とする.

霧島山・新燃岳は2011年1月から活発な噴火活動が始まった. 九州大学では噴火直後の1月28日に, 新燃岳火口から南西に約3km離れた新湯温泉周辺に25台の地震計(Matsumoto et al., 2013)と1台の広帯域地震計, 大浪池登山口に1台の広帯域地震計を設置し地震観測を開始した. また, 名古屋大学は2月1日に火口から北東方向に約5km離れた夷守台に16点の地震計を設置し(Nakamichi et al., 2013), 同時に2つの地震計アレイでデータを収録した. 先行研究ではそれぞれのアレイ観測点で収録されたデータを別々に解析しているが, 本研究では両方の地震計アレイのデータを用いて微動の発生位置を推定する. また, 霧島山周辺には東京大学, 気象庁, 防災科研によっても地震観測点が展開されている. これらの臨時観測点で収録された波形の振幅情報を用いて, 地震計アレイ解析の結果と比較することで微動の発生メカニズムの推定を試みた.

2011年2月2日, 3日には振幅の大きな微動が観測され, このうち2月2日20時43分から約40分間継続した微動が最も長く顕著であった. 解析ではこの40分間の微動データを扱った. 微動の周波数成分は約1.2, 3, 4Hzにピークをもち, このうち最も振幅の高かった1.5Hz-2.5Hz帯に狭帯域フィルターをかけ解析に用いた. 微動データにMUSICスペクトラム解析(Schmidt, 1986; Goldstein and Archuleta, 1991)を適用し, 微動の到来方向とスローネスの時間変化を調べた. 均質な地震波速度構造を仮定し得られた微動のスローネスから微動源の空間尤度分布を求めた. 解析の結果, 微動の到来方向から微動の大部分は新燃岳火口方向から到来していたが, 常に一定ではなく到来方向やスローネスには時間変化が見られた. スローネスが大きく表面波と思われる微動の発生源は新燃岳火口周辺に推定され, 比較的長い継続時間を持っていた. また, 火口浅部に発生源が推定された実体波と思われる微動も存在した. さらに, 短い継続時間ではあるが火口から北西に約3km離れた大浪池周辺にも微動源が推定された. この微動源はMatsumoto et al.(2013)でも指摘されており, 地殻変動から推定されている圧力源の方向に近い.

火山周辺では地震波形の振幅データを使った火山性地震や微動の震源決定が行われている(例えば, Yamasato, 1997; Battaglia and Aki, 2003など). これらの振幅データを用いた震源決定では等方放射が仮定されているが, 本研究では微動の発生源の位置に先の解析結果を利用することで微動振幅の空間分布から微動源の放射特性を推定できる点に注目した. そこで周辺の18観測点で収録された微動データを使用し解析を行った. 観測された振幅には震源の特性(規模と放射特性), サイト増幅特性, 減衰の影響が入っている. 放射特性は等方的であると仮定し, 2点間の振幅比をとることで震源の影響を除去した. サイト増幅特性はアレイ解析から火口周辺に推定された微動源が正しいとして, その時の振幅比を利用した. 地震波速度構造はアレイ解析と同じで一定としている. 微動の発生メカニズムとして1つのtensile crackを仮定し, その放射特性と比較した. 震源球上の観測点分布が不十分ではあるが, 2カ所の微動源でクラックの向きや傾斜が違い, 火道の形の変化やマグマの振る舞いの空間変化の可能性が示唆された.

本研究では, 複数アレイ観測データの解析により火山性微動の詳細な時空間変化を検出し, 広範囲に分布した周辺の観測点のデータと合わせることでマグマの存在位置や状態の変化を知ることができることを明らかにした. この手法は他の火山にも適用可能である. また, 異なる噴火段階で発生する火山性微動の解析は火山噴火機構の理解により役立つことが期待される.

キーワード: 火山性微動, 新燃岳

Keywords: volcanic tremor, Shinmoedake

## 桜島火山昭和火口の噴火に前駆するBH型地震群発と地盤変動の関係 Relationship BH-type earthquake swarms and ground deformations prior to eruptions at Showa crater at Sakurajima volcano

為栗 健<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>1</sup>  
TAMEGURI, Takeshi<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

### 1. はじめに

桜島火山では1955年から南岳山頂火口において爆発的噴火を繰り返してきた。2000年以降、山頂火口における活動が低下してきたおり、2006年6月に山頂東側斜面にある昭和火口において58年ぶりに噴火が再開した。2009年以降、昭和火口での噴火活動が活発化している。2010年から2013年まで毎年800回を超える爆発的噴火を繰り返しており、爆発回数が増加とともに噴火規模が大きくなっている。2013年には噴煙高度が3000~5000mに達する噴火も発生している。そのような活動の中、2011年頃から昭和火口の爆発的噴火や比較的火山灰放出量の多い噴火に関連して、顕著な前兆的地震活動が見られるようになってきた。前駆地震は噴火の1~2時間前から多発する(為栗・井口、2013)。噴火の前には山体膨張を示す地盤変動が観測され、噴火後には急速に収縮する現象が見られ(Iguchi et al., 2013)、前駆地震の発生は地盤変動と密接に関係がある。本講演では、噴火の前駆地震と地盤変動との関連について発表する。

### 2. 前駆地震の特徴と地盤変動の関係

前駆地震を伴う爆発は総数の6%程度であるが、昭和火口の噴火活動が低下した時期に多く発生する傾向がある。前駆地震は噴火の1~2時間前から発生し始め、時間とともに発生間隔が短くなり、振幅が増大することが多い。噴火の数分前には、発生頻度、振幅増大が加速し、連続的に発生して最後には微動のようになることもある。個々の前駆地震の継続時間は10-20秒、卓越周波数は5-6Hzで、明瞭なS波は見られない。桜島火山の火山性地震の分類ではBH型に属する地震である。

噴火前には山体膨張を示す地盤変動が観測されるが、前駆地震は山体膨張開始の30分~1時間後に発生し始めることが多い。山体膨張が進むにつれて、前駆地震の最大振幅が増大していく。山体膨張は噴火の約1時間前に停滞に入ることがあり、前駆地震が発生する噴火では、この停滞を伴う地盤変動が観測されている。山体膨張の停滞期に、前駆地震の発生頻度、振幅増大が加速する。噴火が発生して火山灰やガスが火口から放出されると地盤変動は膨張から収縮に反転する。前駆地震は噴火による収縮とともに発生しなくなる。昭和火口の噴火では膨張過程で複数回の噴火を行い、膨張→小さな収縮を繰り返すことがある。前駆地震は噴火が発生すると一時的に止まるが、再度膨張を開始し、前回の噴火の停滞期のレベルに達すると発生し始めるという特徴がある。

前駆地震の最大振幅の二乗積算カーブを見ると、どの前駆地震活動も噴火前に積算カーブは加速する。噴火により振幅積算値は大小様々であるが、爆発的噴火の前に見られる前駆地震の方が非爆発的噴火より積算レートがより加速している。また、爆発・非爆発に関わらず、噴火後に収縮が大きい(噴出物量が多い)イベントの方が積算レートは加速する傾向が見られる。前駆地震の発生パターンから噴火のタイプや規模が予測可能か検証を行う。

キーワード: 桜島火山, 前駆地震, 地盤変動

Keywords: Sakurajima volcano, precursory earthquake, ground deformation



## マグマに満たされたダイクの流れ誘起振動が引き起こす火山微動 Volcanic tremor caused by flow-induced oscillation of a magma-filled dike

櫻庭 中<sup>1\*</sup>; 山内 初希<sup>2</sup>  
SAKURABA, Ataru<sup>1\*</sup>; YAMAUCHI, Hatsuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

火山微動(トレマー)は、噴火に伴って、もしくはそれに先立って観測される、長周期で継続時間の長い地震動である。火山微動の多くは立ち上がり不明瞭で、とくに噴火にともなって観測される微動では、振動の振幅が指数関数的に増大することが多い(Konstantinou and Schlindwein 2002; McNutt and Nishimura 2008)。この性質は、火山微動が自励振動(定常な外力が系の固有振動を励起し、振幅が指数的に増大し、最終的には非線形効果によりリミットサイクルになるようなもの)によるものではないか、という考えを示唆する。火山下において、地下の定常なマグマの流れが岩盤の自励振動(流れ誘起振動)を引き起こすということは容易に想像できることであり、Julian (1994) が提示したモデルがまさにそれである。ところで流れ誘起振動が原因とされるタコマ海峡橋の崩壊の場合、振動する橋桁は、無限に広がる一様流に平行に置かれた弾性板としてモデル化できる。ここで考えるのは、ちょうどタコマ橋のケースの反対であり、無限に広がる弾性体の中の薄い流体層の流れである。この場合も、流れがじゅうぶん速ければ不安定が起き、火山微動のモデルになりうるものと考えられる。

われわれは、2つの半無限弾性媒質に挟まれた無限に広がる平板層内の流れを考える。これはダイク中のマグマの流れを模擬していて、Julian のモデルを連続体力学をつかって単純化したものに相当する(くわしくは Sakuraba and Yamauchi 2014)。この自励振動モデルで励起される固有振動は表面波である。そこでわれわれは線形化されたナビエ・ストークス方程式を、表面波がある位相速度で弾性媒質中を進行しているという境界条件のもとで、シューティング法をもちいて解き、その複素位相速度を得ることに成功した。そして位相速度の虚部が正になるという不安定条件が、比較的遅いマグマ流速で実現することがわかった。注目すべきことは、もっとも不安定な振動モードが、これまでの同様の研究(Balmforth, Craster and Rust 2005; Dunham and Ogden 2012) で議論されてこなかった、ダイクの反対称変形(屈曲変形)をともなうということである。このとき不安定化するのは、2つの相対するレイリー波で、それらはマグマの流れに逆行する。レイリー波の粒子運動がほぼ円形に近いため、シアをともなうマグマの流れの粘性摩擦によって粒子運動がつねに加速されるつづけることが、不安定の原因である。中立安定を与える臨界流速は波長に反比例するので、不安定が起これば、その波長は系でとりうる最大の長さスケールを越えることはない。ダイクの長さはせいぜい数 km であるので、そのとき励起されるレイリー波の周期は 1 秒程度である。一方、マグマの流速はせいぜい数 m/s 以下であろうから、臨界波長には下限があり、それは 0.1 秒程度の周期に相当する。これらにより、われわれのモデルでは、もし不安定が起これば発生する振動の周期が必ず 0.1-1 秒程度になることになり、これは実際に観測される火山微動の特徴的周期に一致する。また火山微動の線形成長段階の時定数も、われわれのモデルをもちいてよく説明することができる。



## 繰り返し式噴火の規模別頻度分布 Magnitude-frequency distribution of volcanic eruptions from an open conduit

西村 太志<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; Muhamad Hendrasto<sup>3</sup>; 青山 裕<sup>4</sup>  
NISHIMURA, Takeshi<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; MUHAMAD, Hendrasto<sup>3</sup>; AOYAMA, Hiroshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理, <sup>2</sup> 京大防災研, <sup>3</sup> CVGHM, インドネシア, <sup>4</sup> 北大・理  
<sup>1</sup> Science, Tohoku Univ., <sup>2</sup> DPRI, Kyoto Univ., <sup>3</sup> CVGHM, Indonesia, <sup>4</sup> Science, Hokkaido Univ.

ブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火は、短期間に繰り返し発生し多量の地球物理学的データが得られる。そのため、多項目の地球物理学的観測に基づく発生機構に関する研究が進められ、噴火発生時期や規模予測も直前のデータをもとにある程度の経験に実施できる可能性が指摘されるようになった。我々は、2012年火山学会において、これとは別の視点、つまり、ブルカノ式噴火活動の発生間隔や規模の統計的な特徴を調べ、その基本的な特性を明らかにするとともに、噴火予測との関係を調べた。今回、インドネシア国スメル山の繰り返しガス噴出活動に伴うデータを解析するとともに、他火山のデータの再解析も行い、繰り返し噴火の特徴を調べたので報告する。

スメル山の地震波データは、2007年3月中旬から4月上旬に行われた臨時地震観測によるブルカノ式噴火データ、および2010年に設置した山頂定常観測によるガス噴出のデータを用いる。どちらも火口から約500mの地点に設置された広帯域地震計記録である。噴火の発生間隔は短く、かつ、観測点が火口近傍で近いため、噴火に関係しない地震は想定的にきわめて少ない。そこで、この観測点の連続記録からある数居値を超えた振幅を噴火の発生と見なし、噴火(地震)の発生時間と最大振幅を自動的に読み取り、時系列のデータとした。桜島のデータは京都大学防災研究所火山活動研究センターによる爆発リストを用いる。諏訪之瀬島およびインドネシアのロコン山については、我々が実施した観測データをもとに爆発地震のリストを作成した。

噴火地震の最大振幅と発生数についてはべき分布をもとに、これまで多くの火山で石本-飯田式のm値が推定されてきた。本研究も、まずそれらにならない、両対数グラフで上述の火山の噴火地震の振幅と発生数を表示した。その結果、いずれの火山も雄比較的振幅の大きな範囲では直線上にのっているように見えるものの、全体的にみると上に凸となっている。また、最大振幅付近で急激な折れ曲がりがある。一方、片対数グラフで表示すると、全体的にはほぼ直線にのる。火山によっては、振幅の小さなところや、最大値付近での折れ曲がり認められるものの、べき分布と比べると指数分布との一致がよい。このように規模別の累積頻度分布が指数分布で説明できることは、ブルカノ式やガス噴出の繰り返し噴火は、ある平均的な規模をもち、ランダムに発生していることを意味する。繰り返し噴火は、既存の火口を使って噴出物を放出し、爆発地震を励起していることから、火道やマグマ供給系といったサイズを反映している可能性がある。これは異なる火山噴火の規模の評価を規模別累積積算分布をもとに行うことができることを示唆する。

キーワード: 爆発, ブルカノ式, ガス噴出, 規模別頻度分布

Keywords: Volcanic Explosion, Vulcano, Gas burst, Magnitude-frequency distribution

## 斜長石を含むマグマのレオロジー遷移：サヌカイト溶岩の高温一軸変形実験 Rheological transition of plagioclase-bearing magma: high-temperature uniaxial deformation experiments of sanukite lava

石橋 秀巳<sup>1\*</sup>  
ISHIBASHI, Hidemi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Shizuoka University

結晶を含むマグマのレオロジー的ふるまいは、結晶量の増加に伴って液体的から固体的へと変化するが、この変化は比較的狭い結晶量範囲で急激におこることが知られており、レオロジー遷移とよばれる。レオロジー遷移のおこる結晶量範囲では、わずかな結晶量の増加によっても粘性率が大幅に上昇するため、その特性を理解することは火山噴火のダイナミクスを考察する上で重要であるといえよう。レオロジー遷移のおこる結晶量範囲は、浮遊結晶の形状や配列に強く依存すると考えられる。近年、Picard et al. (2013) は、斜長石を含む高結晶量合成マグマについて変形実験を行い、結晶量 $\Phi$ が0.2~0.3の近傍においてレオロジー遷移がおこると報告した。しかし、彼らの実験試料では斜長石結晶の方位がランダムであり、比較的方位のそろっている天然のマグマに適用できるとは必ずしもいえない。斜長石の配列は、マグマのレオロジー遷移にどれ程の影響を及ぼすのだろうか？これを明らかにするため、本研究では気泡・斑晶を含まず、主にガラスと板状斜長石から構成されるサヌカイト溶岩について高温一軸変形実験および実験試料の微細組織解析を行った。

実験手法：本研究では、香川県五色台産のサヌカイト溶岩を用いた。この溶岩は、およそ60vol.%の流紋岩質ガラス、36vol.%の板状斜長石と4vol.%の輝石からなり、斜長石は平行に配列している。この溶岩を $10 \times 10 \times 20$  mmの直方体に整形し、965、915、865 °Cの温度、 $3.16 \sim 0.003$  mm / minの変形速度で一軸圧縮実験を行った。実験には、東京大学地震研究所の高温一軸圧縮試験機を用いた。粘性率は、測定した変形速度と応力の関係から、Gent(1960)の式を用いて算出した。変形実験は以下の2つの方法で行った。まず、一定温度の下でステップ状に変形速度を変化させ、粘性率と歪速度の関係を検討した。次に、915 °Cの温度、 $0.1$  mm / minの変形速度の条件で総歪み量を0.11から0.46まで変化させ、粘性率の歪依存性を検討した。変形実験終了後、実験試料を迅速に冷却・回収し、薄片を作成して光学顕微鏡およびSEMによる組織観察とEPMAによるガラス・鉱物の化学分析を行った。

結果：サヌカイト溶岩は、いずれの実験温度においても、歪速度の増加に対して粘性率が減少するshear thinningがみられた。歪速度 $10^{-4}$  s<sup>-1</sup>における粘性率は、965、915、865 °Cでそれぞれ $10^{8.7}$ 、 $10^{9.3}$ 、 $10^{9.4}$  Pa sであり、粘性率は歪速度の-0.36乗に比例する。この値は、先行研究におけるべき指数-結晶量関係の外挿に一致する。メルトの粘性率に対するマグマの粘性率で定義される相対粘度の値は3つの温度で非常によく一致し、歪速度 $10^{-4}$  s<sup>-1</sup>において約 $10^{2.4}$ であった。このことは、約40vol.%の高結晶量溶岩においても、相対粘度のコンセプトが有効に機能していることを示している。歪みの増加に伴い、正則方向に斜長石の方位のそろったマクロなドメインの発達を確認された。しかし、このドメイン構造の発達にともなう粘性率の変化は0.3桁程度と、相対粘度に比べて十分小さかった。このことは、斜長石結晶配列のマクロな構造の発達は、マグマの粘性率に大きな影響を与えないことを示唆している。相対粘度と結晶量の関係を検討したところ、先行研究(例えばIshibashi, 2009; Mader et al., 2013)でみられた関係の外挿とよく一致した。Marron-Pierce式に最小自乗回帰したところ、結晶の最大充填密度 $\Phi_m$ の値として0.43を得た。この値は、Mader et al.(2013)のモデルとよく一致する。

今回の実験結果を先行研究の結果と合わせると、板状斜長石がよく配列している場合、マグマのレオロジー遷移は $\Phi \sim 0.43$ 近傍でおこると考えられる。この値は、Picard et al.(2013)によって提唱された値より有意に大きく、また等方的形状の結晶を含むマグマのそれ( $\Phi \sim 0.6$ )よりも小さい。この結果は、斜長石の配列がレオロジー遷移に強い影響を及ぼすこと、そして斜長石結晶がよく配列している天然のマグマでは、レオロジー遷移は $\Phi \sim 0.43$ 近傍でおこることを示唆している。

キーワード: レオロジー遷移, 粘性率, マグマ, 斜長石, 非ニュートン流体, サヌカイト  
Keywords: rheological transition, viscosity, magma, plagioclase, non-Newtonian fluid, sanukite

## 火道内を上昇する珪長質マグマの流動様式：粘性流動 v s 摩擦すべり Conduit flow of silicic magma: Viscous flow or Frictional sliding?

奥村 聡<sup>1\*</sup>; 上杉 健太郎<sup>2</sup>  
OKUMURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 公益財団法人高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Outgassing rate and bulk magma viscosity that control the style of volcanic eruptions depend on flow type of magma ascending in a volcanic conduit. When magma behaves as a Newtonian fluid, magma in the conduit experiences shear strain large enough to cause effective outgassing. On the other hand, once shear starts to localize, bulk magma viscosity may decrease due to slip deformation and outgassing rate also decreases in parts other than shear-localized region (Okumura et al., 2013 EPSL). Silicic magma experiences shear-induced brittle fracturing and subsequent frictional sliding along the fracturing zone during its ascent (e.g. Gonnermann and Manga, 2003 Nature; Tuffen et al., 2003 Geology). Therefore, outgassing rate and bulk magma viscosity during the ascent are expected to change dramatically. Previous studies (Tuffen et al., 2003 Geology; Gonnermann and Manga, 2005 EPSL) also proposed that fractured magma can heal during magma ascent and that fracturing and healing processes may control the dynamics of magma ascent. In contrast to this model, some experimental studies (e.g. Okumura et al., 2010) indicated that fractured magma cannot heal as long as the deformation continues. In this study, we perform deformation experiments for fractured magma to investigate flow type of magma in the conduit, i.e. viscous flow or frictional sliding, and controlling factors of the transition from viscous flow to frictional sliding.

The deformation experiments were carried out using a custom-made torsional deformation apparatus which was installed in synchrotron radiation X-ray imaging system (BL20B2) of SPring-8. To simulate fractured silicic magma, we crushed rhyolite obsidian and sorted them into fragments of 75-250  $\mu\text{m}$  in size. The powdered sample was sandwiched by two obsidian discs and they were twisted by rotating a piston attached with a rotational motor. The torsional deformation experiments were performed at temperatures of 800 and 900  $^{\circ}\text{C}$  under 1-10 MPa pressures. The rotational rate was set to be 0.1 to 10 rpm, corresponding to strain rates of  $10^{-2}$  to  $1 \text{ s}^{-1}$  if the sample deforms homogeneously. The deformed samples were observed in situ using an X-ray radiography.

At a temperature of 900  $^{\circ}\text{C}$  and rotational rates of 0.1-1 rpm, homogeneous deformation through a sample was observed under a pressure of 10 MPa, which indicates viscous deformation. In contrast, the sliding at the interface between powdered obsidian and the disc was observed under 1 and 5 MPa pressures. At a temperature of 800  $^{\circ}\text{C}$ , the sliding was found under 1-10 MPa pressures. These results indicate that frictional sliding along fractured zone is flow type of magma in shallow parts of the conduit (<10 MPa).

We assume that flow type is determined by competition of shear stress necessary for viscous flow and frictional sliding. If magma has high viscosity and shear stress to deform a sample viscously is large, the flow type becomes frictional sliding. At a temperature of 900  $^{\circ}\text{C}$ , viscous flow and frictional sliding were found at 10 and 1-5 MPa pressures, respectively. At this condition, magma viscosity is approximately  $10^7 \text{ Pa s}$  (Hess and Dingwell, 1996) and shear stress necessary for viscous deformation is 1 MPa at a strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . Because the frictional sliding was observed at pressures of 1-5 MPa, the frictional coefficient is estimated to be ca. 0.1. When we use this value and the criterion for shear-induced brittle fracturing proposed by Okumura et al. (2010), the dynamics of magma ascent is controlled by frictional sliding at shallow parts of the conduit. In addition, silicic magma can ascend quickly due to low frictional coefficient of fractured magma.

キーワード: 珪長質マグマ, 火山噴火, 粘性流動, 摩擦すべり, 放射光 X 線

Keywords: Silicic magma, Volcanic eruption, Viscous flow, Frictional sliding, Synchrotron radiation X-ray



## 発泡マグマ模擬材料における脆性的遅れ破碎のメカニズム Mechanism of delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue

亀田 正治<sup>1\*</sup>; 志田 司<sup>1</sup>; 市原 美恵<sup>2</sup>; 津郷 光明<sup>1</sup>; 奥村 聡<sup>3</sup>; 上杉 健太郎<sup>4</sup>

KAMEDA, Masaharu<sup>1\*</sup>; SHIDA, Tsukasa<sup>1</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>2</sup>; TSUGO, Mitsuaki<sup>1</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>3</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 農工大・工・機シス, <sup>2</sup> 東大・地震研, <sup>3</sup> 東北大・理・地学, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Mech. Sys. Eng., TUAT, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Earth Sci., Tohoku Univ., <sup>4</sup>JASRI

マグマの破碎は火山爆発をつかさどるカギとなる現象である。破碎は、固体的（脆性）破碎と流体的（延性）破碎に分けることができる。脆性破碎は延性破碎に比べて危険である。なぜなら、マグマに含まれる気泡内に閉じ込められているガスが破碎によって急激に放出することで、爆発的噴火を引き起こすと考えられるからである。

マグマは Maxwell 型粘弾性体であり、現象の特性時間に応じて、固体的にも流体的にも振る舞い得る。我々は、10 年余りにわたって、ユニークなマグマ模擬材料である酸素気泡入り水あめを用いて、急減圧にともなう破碎に対する粘弾性の影響を明らかにする実験を進めてきた (Kameda et al. GRL 2008; Kameda et al. JVGR 2013)。

一連の実験を通して、我々は、「脆性的破碎」という、脆性破碎と延性膨張との中間に位置する現象があることを見出した。この現象は、マグマの粘弾性特性が流体的な性質を帯びるタイムスケールにおける固体的破碎と定義される。マグマの粘弾性緩和時間と天然の火山噴火から見積もられる減圧特性時間との比較から、実際の火山では脆性的破碎が生じていると考えられる。

可視光を用いた高速度ビデオ撮影から、脆性的破碎は、試料に生じたき裂から試料内のガスが急激に放出することをきっかけに生じていることがわかった。試料サイズを変えたさらなる観察 (Shida et al. IAVCEI 2013) から、試料サイズを小さくすると、脆性度 (Ichihara and Rubin JGR 2010) が 1 に近い (すなわち固体的にふるまう状況) であっても、破碎が起きにくくなることがわかった。我々の試料は、サイズを小さくすると、内部の気泡分布がより均一になる。この観察は、脆性的破碎を引き起こす試料内部で進展するき裂は、試料内の気泡分布が不均一な部分をきっかけに生じていることを示唆している。

次に、我々は、試料内部を X 線マイクロ CT 撮影によって観察した。高輝度光科学研究センターの放射光施設 (Spring-8, BL20B2) に実験装置を持ち込んで撮影を行った。減圧開始前の試料の初期状態を 3 次元 CT 撮影によって調べた。高速度ラジオグラフィによって急減圧にともなう試料の動的挙動をとらえた。撮影は、視野 16 mm × 5 mm、空間分解能 8 μm/pixel の条件で CCD カメラを用いて実施し、試料台を 0° から 180° まで回転させながら 1800 枚の透過像を撮影して CT 再構成を行った。ラジオグラフィ撮影は 200 frames/s で行った。以上の実験から、我々は、脆性的破碎の発生をとらえることに成功した。試料の三次元再構成像から、脆性的破壊は、大きな気泡の周りに存在する小さい気泡の連結部や切欠き部をきっかけに生じていることがわかった。

以上を踏まえると、脆性的破碎は、次のような過程を経て生じていると推察される：(1) 気泡の連結によって初期き裂が延性的に成長する。(2) き裂先端の応力集中と脆性度がある瞬間に臨界値を上回ると、脆性破壊に移行する。(3) クラックの開口によって試料内のガスが放出されそのあたりの圧力が急激に減少することで局所的に脆性度が高まり、試料の一部が破碎に至る。このような延性的なき裂の成長と部分破碎が繰り返し起こることで脆性的破碎が進行する。

キーワード: マグマ, 破碎, 粘弾性, 急減圧, X 線 CT

Keywords: Magma, Fragmentation, Viscoelasticity, Decompression, X-ray CT



## 火山現象のダイナミクス解明のための観測によるアプローチ Approach by volcanic observation for dynamics of volcanic phenomena

井口 正人<sup>1\*</sup>  
IGUCHI, Masato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

火山現象のダイナミクスを解明するためにこれまでに様々な観測手法が活動的火山において適用されてきた。最も基本的なマグマの動きは、地下深部から火口直下へのマグマの上昇と噴火に伴うマグマの放出である。マグマの蓄積、移動、上昇などの動きを最も的確に把握できる観測は地盤変動観測であるが、過去においてはキラウェアのように多量の溶岩を流出させ、マイクロラディアン以上の地盤変動を伴う噴火活動についてしか、その一連の動きを捉える事ができなかった。ナノラディアン、ナノストレインオーダーの地盤変動検出を可能としたのが、観測坑道に設置された傾斜計、伸縮計による高感度観測であり、現在は観測井の計器や火口への近接観測により同程度の微小変動を多くの火山噴火について検出することが可能となっている。このような変動のうち、噴火に前駆する変動の速度はほぼ一定の場合もあるが、加速する場合や減速する場合もあり、多様である。2009年以降頻繁に繰り返される桜島・昭和火口におけるブルカノ式噴火では変動率が小さくなるのが一般的であり、応力中心の下方への移動か、火口浅部に蓄積されるエネルギーのリークにより説明可能である。

火山爆発の力学的モデルとして、爆発的噴火に伴い発生する地震動は減圧力源とシングルフォースにより、励起されることが知られている。これは、高圧マグマを封入している蓋が取れることによって発生すると考えられた (Kanamori et al., 1984)。爆発が発生する前に検出される火山体の隆起・膨張は高圧マグマの存在を示唆し、爆発的噴火に伴い火山体の沈降・収縮が観測されることから、第1次近似として成り立つモデルである。一方、爆発地震は火口底の破裂以前に発生しているので、蓋が取れることにより爆発地震が発生するのではなく、爆発地震が発生することにより噴火が発生するとしなければならない。桜島の爆発地震は表面での噴火発生前の1~1.5秒前に等方膨張をもってはじまり (Tameguri et al., 2002)、さらにその1~2分前に緩やかな収縮が観測される。火口底における爆発の直前には白煙がリークしているのが多くの火山で目視されている。これらの一連の現象は、火道上部に形成されたガス溜りからの火山ガスのリークとそれによる減圧が過飽和状態にあるマグマの急激な発泡を引き起こし、示唆する (Iguchi et al., 2008)。このことは火山爆発が高圧マグマの減圧により発生することを意味するが、それが観測により確かめられたことになる。

キーワード: ブルカノ式噴火, 桜島  
Keywords: vulcanian eruption, Sakurajima

## 領域移流拡散モデルによる1914（大正3）年桜島噴火を想定した火山灰拡散および降灰予測 Tephra-Fall Predictions with the JMA Regional Atmospheric Transport Model for the 1914 Eruption at Sakurajima Volcano

新堀 敏基<sup>1\*</sup>; 白土 正明<sup>2</sup>; 長谷川 嘉彦<sup>3</sup>; 橋本 明弘<sup>1</sup>; 高木 朗充<sup>1</sup>; 山本 哲也<sup>1</sup>; 山本 哲<sup>1</sup>  
SHIMBORI, Toshiki<sup>1\*</sup>; SHIRATO, Shomei<sup>2</sup>; HASEGAWA, Yoshihiko<sup>3</sup>; HASHIMOTO, Akihiro<sup>1</sup>; TAKAGI, Akimichi<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Tetsuya<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Akira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 鹿児島地方気象台, <sup>3</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Kagoshima Local Meteorological Office, <sup>3</sup>Japan Meteorological Agency

気象研究所では2014年度から5年計画で、大規模噴火を想定した気象庁領域移流拡散モデル（JMA-RATM）による予測技術の研究を実施し、気象庁で運用している降灰予報の高度化に資することを計画している。今から100年前の1914（大正3）年1月12日に発生した桜島噴火（大正噴火）は、20世紀に国内で発生した最大規模の噴火であり、この噴火に伴う降灰は東北地方まで確認された（長谷川, 1914; 大森, 1916）。大規模噴火に対する現在のJMA-RATMの予測可能性を調べるため、大正噴火を想定した火山灰拡散・降灰予測を行った。初期値の噴煙柱モデルは山科（1999）、安井・他（2006）、井口（2014）などにに基づき、噴煙の高度3000~18000 m、噴火の継続時間38時間で噴出物（火山灰・礫）の総量 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ を仮定した。気象場は2013年3月28日以降の領域拡張された気象庁メソ数値予報モデルの解析値を入力値として用い、季節ごとに噴火開始から72時間先までの予測計算を実行した。この結果、火山灰の密度として軽石（ $1 \text{ g/cm}^3$ ）を仮定した場合、桜島島内では風が弱いときは1 m以上、東風の卓越する夏季では桜島西方の鹿児島市内で数10 cm、南西風が卓越する場では大阪、名古屋、東京でも1 mm~0.1 mmオーダーの降灰が予想され、火山灰は大正噴火と同様に東北地方、さらに北海道まで移流・拡散する可能性が示された。

本発表では、桜島大正噴火を想定した火山灰拡散・降灰予測の結果を踏まえ、大規模噴火に対する現在のJMA-RATMによる予測可能性とその課題について報告する。

### 参考文献

- 長谷川謙, 1914: 桜島山噴火概況報告. 気象要覧 臨時増刊, **170**, 中央気象台, 1-16.  
井口正人, 2014: 大正噴火から100年を迎えて. 桜島大正噴火「防災」100年式典講演資料.  
大森房吉, 1916: Accumulation and transportation of ashes thrown out during the Sakurajima eruptions of 1914: The Sakurajima eruptions and earthquakes II. 震災予防調査会紀要, **8**, 113-133.  
山科健一郎, 1999: 桜島火山1914年噴火の噴煙高度—目撃資料の検討. 火山, **44**, 71-82.  
安井真也・高橋正樹・石原和弘・味喜大介, 2006: 桜島火山大正噴火の記録. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **41**, 75-107.

キーワード: 移流拡散モデル, 火山灰拡散, 降灰, 降灰予報, 桜島, 1914年

Keywords: Atmospheric Transport Model, volcanic-ash dispersal, tephra fall, Volcanic Ash Fall Forecast, Sakurajima volcano, 1914

## 火山灰拡散シミュレーションのための風データの検討 Evaluation of wind data for tephra dispersion simulations

清杉 孝司<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>1</sup>; 鈴木 雄治郎<sup>1</sup>  
KIYOSUGI, Koji<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>1</sup>; SUZUKI, Yujiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, Japan

火山灰の拡散・堆積プロセスを理解することは、地表に降下した火山灰から噴火条件を再構築する上で必要な火山学的に重要な課題である。また、火山灰の拡散は科学的な問題であるだけでなく社会的・経済的にも重要な関心事である。こうした背景から、火山灰の拡散・降下過程について移流拡散モデルが開発されている(例:TEPHA2, PUFF, FALL3D)。これら移流拡散モデルのシミュレーション結果は入力される風データに影響される。例えば、PUFFを用いた霧島2011年噴火のケーススタディでは、低い時空間解像度の風データ(NCEP/NCAR再解析データ)を使った場合よりも、高い時空間解像度の風データ(気象庁メソ客観解析データとERA Interimデータ)を使ったシミュレーションの方が、東へ約900km流れた噴煙のより細かい構造を再現できた(Kiyosugi and Koyaguchi 2012)。

入手可能な風データには、気象庁のメソ客観解析データ、ヨーロッパ中期予報センターのERA Interimデータ、アメリカ海洋大気庁のNCEP/NCAR再解析データなどがある。これらのデータでは、データ同化の方法や計算モデル、時空間解像度などに違いがある。気象庁のメソ客観解析データは、同化窓6時間の静力学メソ4次元変分法でデータ同化を行って初期値を作成し、非静力学モデルで5kmグリッド、鉛直15層、3時間ごとの気象場を計算したものである。一方、ヨーロッパ中期予報センターのERA Interimデータは、同化窓12時間の4次元変分法のデータ同化によって初期値を求め、 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ グリッド、鉛直37層、6時間ごとの気象場を計算したものである。また、アメリカ海洋大気庁のNCEP/NCAR再解析データは、3次元変分法によるデータ同化を行い、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ グリッド、鉛直17層、6時間ごとの風データを計算したものである。

これらの入手可能な風データのうち、どのデータが火山灰の拡散モデルに適しているかの判断は一般に難しい。さらに、これらの風データに加え、気象予測モデル(例:the Weather Research and Forecasting model, WRF)を用いてより細かい解像度の風データを数値的に作成することも可能である。WRFモデルは、複数の研究機関が共同で開発したオイラー形式圧縮性非静力学モデルである。WRFモデルは、数mから数kmのスケールの広い範囲に応用可能である。

このような背景から、本研究では火山灰の移流拡散モデルのシミュレーションに最適な風データの作成を進めている。降灰や火山灰の拡散を再現するためには、空間解像度が火山の近傍で数100m程度、遠方で数km程度、鉛直方向には数十層程度あり、さらに大気場と噴煙との相互作用を再現できることが望ましい。こうした条件を満たすため、入手可能な風データを初期入力値として、WRFを用いた数値計算を行い、興味のある地点(火山および風下側)を中心にしたデータ同化や気象データ以外の観測データを用いたデータ同化を行うことにより、高解像度の風データの作成を行っていく。

キーワード: 火山灰拡散シミュレーション, 気象予測モデル

Keywords: Tephra dispersion simulation, Weather forecast model

## 火山噴火に伴う空振波形記録の分類と噴火映像解析 Classification of infrasound waveforms and analysis of video images at volcano eruption

佐藤 佑輔<sup>1\*</sup>; 横尾 亮彦<sup>1</sup>  
SATO, Yusuke<sup>1\*</sup>; YOKOO, Akihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

空振波形解析は、爆発的噴火の研究において近年発達しつつある手法である。本研究では、バヌアツ共和国ヤスール火山における 2011 年 9 月の噴火活動を対象とし、空振波形の相互相関による噴火イベントの分類を行い、それぞれのタイプごとに噴火映像の比較を行った。ヤスール火山の山頂クレータ内には複数の火孔が存在し、1~3 分間に 1 回程度の頻度で空振を伴う噴火を繰り返している。

ここでは山頂クレータ上に設置したある観測点で最大振幅が 50 Pa を超えたイベントを解析対象とした。21 日 15 時台の 1 時間での発生回数は 29 回を数える。最大振幅をとる時刻の 1 秒前から 5 秒間の波形について、29 例すべての波形間で相互相関解析を行った。結果、互いに 0.75 以上という高い相関係数をとるタイプ A (13 例)、B (12 例) と、他のイベントとあまり強い相関を示さないタイプ C (4 例) に分類された。タイプ A と B の波形には、増圧開始から最大振幅をとるまでの時間と、最大正圧に対する最大負圧の比に違いがあった。増圧にかかる時間の平均はそれぞれ、タイプ A が 0.15 秒、タイプ B が 0.22 秒、最大負圧に対する最大正圧の比はそれぞれ 2.4、1.6 であった。

これらの空振イベント発生時刻における、山頂クレータ内のふたつの火孔での噴火映像の解析を行った。これらの火孔ではそれぞれ、タイプ B の噴火が 13 例、タイプ C の噴火が 4 例発生していた (タイプ A の噴火は右手前の火口で 1 度だけ)。各火孔上を水平方向に横切る直線を解析領域とし噴出物がそこに達する 2 秒前から、噴火が収束するまで RGB 値と輝度を読み取った。噴火が発生し赤色マグマや噴煙などの噴出物が到達すると、RGB、輝度のいずれの値も噴火前の時間帯に比べて大きく上昇し、その後時間が経過して、水蒸気や火山灰の放出が緩やかになるとともに下降する。噴火タイプごとに R 値と輝度を比較したところ、タイプ B は他の噴火と比べて非常に大きな値をとっていた。タイプ A の噴火は、他のタイプと比べ、輝度の上昇が小さく、噴火後すぐに下降した。タイプ C は噴火ごとに異なっており共通した特徴はみられなかった。タイプ B の噴火では赤色マグマと白色噴煙の噴出が多く、タイプ A の噴火では比較的濃い、灰褐色の噴煙が多いといえる。また、空振波形との比較から、灰褐色の噴煙噴出に伴う空振波形は、赤色マグマや白色ガスのものより増圧速度が速く、正圧ピーク後にとる負圧ピークが小さいといえる。

キーワード: 空振, 火山噴火  
Keywords: infrasound, volcano eruption



## 1 次元浅水波方程式による火砕流モデリングにおける流れの先端部の数値的取り扱い Numerical treatment of dry bed problem in the model of pyroclastic flows based on the 1-D shallow-water equations

志水 宏行<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>1</sup>; 鈴木 雄治郎<sup>1</sup>  
SHIMIZU, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>1</sup>; SUZUKI, Yujiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

爆発的火山噴火において、火口から噴出する火砕物と火山ガスの混合物は、初期鉛直運動量を失う高さで大気よりも高密度の場合、火砕流となって地表を流動する。火砕流のダイナミクスは近似的に非粘性重力流として定式化が可能である。非粘性重力流は、先端部で流れの駆動圧（浮力による圧力）と周囲の流体からの抵抗圧（動圧）がほぼバランスする（先端条件）という特徴をもつ（例えば、Benjamin, 1968）。この先端条件から、非粘性重力流のダイナミクスは流れの密度（ $\rho_c$ ）と周囲の密度（ $\rho_a$ ）の比  $\rho_c/\rho_a$  によって特徴づけられることがわかっている（例えば、Ungarish, 2009）。 $\rho_c/\rho_a \sim 1$  の場合には、流れの先端部は大きな高さを持って流動する。そして、 $\rho_c/\rho_a$  が 1 から大きくなるに従って、流れの先端部の持つ高さは徐々に小さくなる。火砕流内部では  $\rho_c/\rho_a$  は幅広い時空間的なバリエーションを持つため、火砕流のダイナミクスの定量的振る舞いを単純な重力流モデルで記述することが難しい。そのため、火砕流の到達距離や時間発展を予測することは未だにできない。本研究は様々な  $\rho_c/\rho_a$  に対する非粘性重力流の統一モデルの開発を目的とする。

厚さの薄い非粘性重力流に対する単純化された基礎方程式は浅水波方程式として知られている。非粘性重力流の浅水波方程式を解く数値的モデルには、大きく見て 2 種類ある。1 つめを shock front condition model (SFC model) と呼び、もう 1 つを artificial bed-wetting model (ABW model) と呼ぶ。SFC model は、先端部に境界条件として先端条件を適用するモデルであり、先端部で常に浅水波方程式と先端条件を連立して流れの時間発展を計算する。このモデルでは、 $\rho_c/\rho_a$  を先端条件に関するパラメータとして扱う（例えば、Ungarish, 2009）。ABW model は、先端部より先の領域に高さ  $\epsilon h_0$  の仮想流体を設置し、それを先端部が受ける周囲からの抵抗（動圧を生み出すソース）の代替物とするモデルである。ここで  $h_0$  は特徴的な高さスケールである。このモデルでは、先端条件に関する唯一のパラメータはこの  $\epsilon$  である（例えば、Toro, 2001; Larrieu et al., 2006; Doyle et al., 2007）。本来ならば SFC model のように先端部に  $\rho_c/\rho_a$  の関数として先端条件を課すべきところを、ABW model ではパラメータ  $\epsilon$  を与えるということ非常に単純化し、先端部でも浅水波方程式のみを解くだけで流れの時間発展を簡単に安定して解くことを可能にしている。しかし、ABW model のパラメータ  $\epsilon$  がどれくらいの大さの  $\rho_c/\rho_a$  の先端条件に相当するのかわかっている。また、ABW model の  $\rho_c/\rho_a$  に関する適用範囲も明らかではない。従って本研究では、これらの問題を解決するために、2 つのモデルで単純な 1 次元のダム・ブレイク問題を解き、広範囲なパラメータ・スタディを行った。

本研究では、SFC model と ABW model の数値計算結果を系統的に比較することによって、 $\epsilon \sim 8.62 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho_c/\rho_a)^{-1.87}$  という  $\rho_c/\rho_a$  と  $\epsilon$  の対応関係を得た。また、ABW model は、 $15 < \rho_c/\rho_a$  の場合に適用できることもわかった。一方、 $1 < \rho_c/\rho_a < 15$  では、先端部の前の仮想流体上を非物理的な衝撃波が伝播してしまうことがわかった。このことから、ABW model には、密度比が比較的小さい重力流に対して流れのプロファイルに関する正しい解を示さないという適用限界があることがわかった。

キーワード: 火砕流, 重力流, 浅水波方程式, 数値シミュレーション, 火山防災

Keywords: pyroclastic flows, gravity currents, shallow-water equations, numerical simulation, volcanic disaster prevention

## 楕円体体積震源のモーメントテンソル Moment tensor representation of elliptical volume sources

水野 尚人<sup>1\*</sup>; 日下部 哲也<sup>2</sup>; 市原 美恵<sup>2</sup>; 亀 伸樹<sup>2</sup>  
MIZUNO, Naoto<sup>1\*</sup>; KUSAKABE, Tetsuya<sup>2</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>2</sup>; KAME, Nobuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学部, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

A moment tensor inversion is a powerful tool to extract source information from seismic and geodetic observations. However, widely-used moment tensor representation for volumetric sources has been limited to a few basic geometries such as a sphere, a flat crack, and a cylinder. These sources give particular diagonal component ratios:  $(M_1:M_2:M_3)=(1:1:1)$  for a sphere,  $(1:1:3)$  for a crack, and  $(2:2:1)$  for a cylinder. When different component ratios are obtained from the inversion analysis, they are interpreted as combination of these simple geometries without considering internal pressure balance.

Although the moment tensor representation for elliptical sources was obtained 30 years ago (Davis, 1986), the solution has been rarely applied in volcanology. We consider two disadvantages of Davis (1986). The one is that the theories to relate the actual volume change to moment tensor have been proposed but not unified, which has caused some confusion. The accompanying paper (Ichihara et al., 2014, this meeting) presents a unified explanation based on the representation theorem and makes a clear link among volume change, geometry, and moment tensor. In this context, we have confirmed the applicability of Davis (1986) to the observed moment tensor.

The other disadvantage is that researchers have to search in the numerical table to find a geometry fitting to the observed moment tensor. Here we develop a facilitative tool that diagnoses the diagonal part of observed moment tensors to given the aspect ratios and the apparent compressibility. In addition, if the density and the compressibility of the internal material are given, the tool estimates mass change inside the source, which is an important parameter in volcanology.

This tool will provide a reference model satisfying pressure balance and help improving the volumetric source modeling beyond the conventional kinematic summation of simple sources.

キーワード: モーメントテンソル, 体積震源, 火山性地震, マグマ

Keywords: moment tensor, volumetric source, volcano seismology, magma

## 体積震源モーメントテンソルの表現定理に基づく統一的な理解 Volume source representations: a possible unified explanation based on the representation theorem

市原 美恵<sup>1\*</sup>; 日下部 哲也<sup>1</sup>; 亀 伸樹<sup>1</sup>; 水野 尚人<sup>2</sup>; 熊谷 博之<sup>3</sup>

ICHIHARA, Mie<sup>1\*</sup>; KUSAKABE, Tetsuya<sup>1</sup>; KAME, Nobuki<sup>1</sup>; MIZUNO, Naoto<sup>2</sup>; KUMAGAI, Hiroyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京大学理学部, <sup>3</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>School of Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

The moment tensor inversion is a powerful tool to extract source information from seismic and geodetic observations. A moment tensor for earthquake faulting has been determined and its non-diagonal components give the seismic moment (rigidity  $\times$  slip  $\times$  fault area), which is one of essential source parameters of an earthquake. The sum of the diagonal components (the trace) of a moment tensor represents volumetric change at the source. A moment tensor determined for a volcanic source frequently has non-zero trace. However, it has been failed to uniquely relate the diagonal components to the actual volume change, which remains a critical issue in volcanic seismology (Kazahaya et al., 2011). For example, two different volume changes DV and dV have been proposed for the seismic moment of a spherical source geometry; DV comes from the moment tensor definition of a seismic fault having opening displacements whereas dV is obtained from the equivalence of resultant displacement fields due to the former moment tensor and an isotropically expanding sphere in an elastostatic equilibrium.

The difference between DV and dV has been discussed in the last decade. Muller (2001) considered an open crack of a spherical shell shape and showed that DV is the volume of the opening and dV is only the part opening outward. Aki and Richards (2002) and Richards and Kim (2005) adopted Eshelby's approach which considers virtual operations consisting of cutting, stress-free transformation, elastic straining, and welding, and concluded that the difference is due to whether the volumetric change occurs in an unconfined condition (DV) or in a confined condition (dV). Kumagai et al. (2013) reconsidered this problem and concluded that the displacement field due to a spherical source does not coincide with that due to a three-perpendicular-crack source though they both are represented by isotropic moment tensors. They also extended the insights into sources in a bimaterial medium. It is worth mentioning that the approaches of AR2002 and RK2005 give a conceptual explanation on how to adjust DV to the actual volume change dV for a sphere, but not for arbitrarily shapes. Here we address how to make such adjustments for general geometries on the basis of the representation theorem. Our imaginary operation below gives a unified explanation for the two different volumetric changes and newly proposes a method of estimating dV of the inversion results for arbitrary source geometries.

We start with the representation theorem that gives the displacement field by two terms (without a body force): a surface integration on the source region with convolution of the surface displacement and the gradient of the Green's function normal to the surface (1), and that with convolution of the surface traction and the Green's function (2). Only (1) has been considered for the seismic fault because (2) vanishes due to the balance of the traction at the contacting surfaces of a fault. On the other hand, (2) does not vanish in the case of a volumetric source, and therefore a quantitative adjustment is required to include the effect of (2) into (1). We here demonstrate that such an adjustment is always realized by introducing an additional imaginary volumetric change, which works as 'displacement glut' in our representation of moment tensor. Our representation is found to be mathematically equivalent to the rather conceptual 'stress glut' representation proposed by Backus and Mulcahy (1976). We present a unified explanation for the existing various representations and propose a method to practically evaluate the moment tensor components from the boundary conditions of the volumetric source. The proposed representation will be useful in connecting dynamical models of volcanic processes and moment tensors.

キーワード: モーメントテンソル, 体積震源, 表現定理, グリーン関数, 火山性地震, 爆発震源

Keywords: Moment tensor, Volumetric source, Representation theorem, Green's function, Volcano seismology, Explosion source

## X線CT撮影による発泡マグマ模擬材料遅れ破碎の観察 X-ray CT observation of delayed fragmentation of vesicular magma analog

志田 司<sup>1</sup>; 青木 ヤマト<sup>1\*</sup>; 亀田 正治<sup>1</sup>; 市原 美恵<sup>2</sup>; 奥村 聡<sup>3</sup>; 上杉 健太朗<sup>4</sup>  
SHIDA, Tsukasa<sup>1</sup>; AOKI, Yamato<sup>1\*</sup>; KAMEDA, Masaharu<sup>1</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>2</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>3</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 農工大・工・機シス, <sup>2</sup> 東大・地震研, <sup>3</sup> 東北大・理・地学, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Mech. Systems Eng., TUAT, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Earth Sci., Tohoku Univ., <sup>4</sup>JASRI

爆発的火山噴火のトリガとされる発泡マグマの破碎メカニズムの解明を目的として室内実験を行った。特に、2011年の新燃岳噴火など、爆発的噴火の際に噴出するマグマの多くの粘度が低いことから、流体的な性質を帯びるマグマが脆性的な破碎を起こす原因を明らかにすることを目指した。

天然のマグマのレオロジー（剛性率、粘度）、ポイド率を模擬可能な酸素気泡入り水あめを試料とし、破碎のきっかけとなる急減圧を与える装置を用いて、減圧にともなう試料の挙動を観察した。この装置は、試料を設置した容器を加圧し、電磁バルブで大気（エアバッグ）に開放することで、容器内の圧力を急激に減少させることができるものである。本実験では、特に、発泡体内気泡分布の不均一性が破碎に与えるを明らかにするため、高輝度光科学研究センター（JASRI）のビームライン BL20B2 に装置を持ち込み、X線撮影（2048 × 644pixels, 8 μm/pixel）により、0.1deg ピッチで 0deg から 180deg まで 1800 枚の透過像を取得し、CT再構成により減圧前の発泡体内空隙構造を詳しく調べた。減圧時の試料の動的挙動をラジオグラフィ撮影（撮影速度 200 fps）によりとらえた。

試料は、外径 20 mm 程度の半球状である。初期圧力 ( $p_0$ ) は約 1.5 MPa, 減圧特性時間 ( $t_{dec}$ , 容器内と大気圧との圧力差が初期状態の 1/e になる時間) は約 50 ms, 試料の粘度は約  $1 \times 10^8$  Pa s, 加圧後の試料の平均気相体積（ポイド）率 ( $\phi_0$ ) は約 10% でそろえ、内部の気泡分布の異なるいくつかの試料を用いて観察を行った。

実験では、直径 1 mm 程度の気泡が比較的均一に分散して存在する試料は破碎せず、直径 10 mm 程度の大気泡の周りにいくつかの小気泡を含む構造をしているサンプルのみ破碎が生じた。このときの破碎開始時間は 960 ms であり、この時刻は、減圧特性時間に比べても、試料の Maxwell 粘弾性緩和時間（粘度/剛性率 = 150 ms）に比べても大きく遅れている。ラジオグラフィ撮影を参考に、破断箇所の構造を調べたところ、小気泡が連結、あるいは、切欠きが存在しているところから破壊が進んだことが推察できる。容器の減圧によって生じる大気泡回りの周応力によって、これらの部分からまず延性的にき裂が進展し、成長にともなうき裂先端部の試料物性が脆性遷移することで急激な破断にいたると考えられる。

以上の結果から、バルクの試料の性質が粘性流体的となる条件でも、試料内部の不均一な気泡分布をきっかけに脆性的な破碎が生じることを明確に示すことができた。



## 粘弾性母岩中におけるマグマ輸送のモデル実験：粘性率依存性 Model experiments on magma migration in a viscoelastic host rock : effect of viscosity

竹口 いくみ<sup>1\*</sup>; 隅田 育郎<sup>1</sup>  
TAKEGUCHI, Izumi<sup>1\*</sup>; SUMITA, Ikuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

部分溶融により発生したマグマは浮力によって地殻のマグマ溜まりへ、最終的に地球表層へと上昇する。その際、支配的な物理過程は変化し、アセノスフェアでは粘性変形であるダイアピル上昇、リソスフェアでは弾性破壊であるダイク貫入がマグマ輸送のメカニズムとされてきた (Rubin, 1995)。粘性変形と弾性破壊によるマグマ輸送は多くの研究がなされているが、その遷移領域における理解は十分ではなく、浮力クラックの形と速度を決定する要因については未だに不明点が多い。私達は柔らかい寒天を使ったモデル実験によりこの遷移領域におけるマグマ輸送の研究を進めている (Sumita and Ota, 2011)。本発表では、マグマの粘性率が粘弾性体中のマグマ輸送に与える影響について調べた実験結果について報告する。

本実験では、(1) 使用する寒天のレオロジー測定と (2) 注入実験、の 2 つを行う。注入実験は直径 160mm、長さ 250、500mm のアクリルの円柱内の寒天 (母岩) に CsCl 水溶液に増粘剤を加えたもの (マグマ) を上部からシリンジを用いて注入することで行う。その際、注入する体積・寒天との密度差・注入速度をそれぞれ 1ml、0.108g/ml、0.1ml/s に固定し、実験パラメーターとして寒天の濃度を 0.04~0.5wt%、注入流体の粘性率を  $10^{-3}$ ~650Pa・s と 5 桁変化させる。寒天の濃度を 1 桁変えることにより、剛性率、降伏応力が 3 桁変化する。クリープ試験により寒天はバネとフォークトモデルを直列につないだ粘弾性モデルで近似できることが分かっている。実験の様子は互いに直交する 2 方向と円柱下方からビデオカメラで撮影し、観察する。

寒天の剛性率が小さくなると、クラックの形が 2 次元 (板状) から 3 次元 (頭が膨れたもの) へと遷移した。2 次元から 3 次元へと遷移する臨界剛性率は 10Pa 程度であり、粘性率が高くなると臨界剛性率は小さくなる。この臨界剛性率の値は、歪が ~1 程度になる時の力の釣り合いから求まる剛性率  $G = \Delta \rho g V^{1/3}$  ( $\Delta \rho$ : 密度差、 $g$ : 重力加速度、 $V$ : クラック頭の体積) の値と整合的である。クラックは膨れた頭と薄いシート状の尾からなり、クラックが長くなるに従い次第に頭が薄く小さくなり、減速する。特に硬い寒天あるいは高粘性率流体を注入した実験ではクラックが実験容器内で停止した。この停止距離は寒天の降伏応力、流体の粘性率が大きくなると短くなり、クラックの形が 2 次元的になることと対応している。また注入流体の伝播距離は時間に対して冪乗則的に長くなる。冪の値は流体粘性率が小さくなるに従い、1/3 から 1 へと遷移した。冪の値 1/3 はクラックが長くなるに従ってクラックが一様に薄くなり減速するスケーリングに対応する (Taisne et al 2011)。傾きが 1/3 より大きくなるのは、クラックの形が 3 次元的になることと対応付けられる。以上の実験より、マグマの粘性率は粘弾性体中のクラックの移動速度ばかりでなく、クラックの形、減速の仕方、停止距離を支配することが分かった。

引用文献:

Rubin, A. M., 1995, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23, 287-336.

Sumita, I. and Y. Ota, 2011. Earth Planet. Sci. Lett., 304, 337-346.

Taisne, B. et al., 2011, Bull. Volcanol., 73, 191-204.

キーワード: 粘弾性, マグマ上昇, レオロジー, クラック

Keywords: viscoelasticity, Magma ascent, rheology, crack

## Bubble growth and resorption in magma: insights from dissolved water distributions in volcanic glass

MCINTOSH, Iona<sup>1\*</sup> ; LLEWELLIN, Ed<sup>2</sup> ; HUMPHREYS, Madeleine<sup>2</sup> ; NICHOLS, Alex<sup>1</sup> ; BURGISSER, Alain<sup>3</sup> ; SCHIPPER, C ian<sup>4</sup>  
MCINTOSH, Iona<sup>1\*</sup> ; LLEWELLIN, Ed<sup>2</sup> ; HUMPHREYS, Madeleine<sup>2</sup> ; NICHOLS, Alex<sup>1</sup> ; BURGISSER, Alain<sup>3</sup> ; SCHIPPER, C ian<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, Japan, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Durham University, United Kingdom, <sup>3</sup>ISTerre, Universite de Savoie - CNRS, France, <sup>4</sup>SGEES, Victoria University, New Zealand  
<sup>1</sup>IFREE, JAMSTEC, Japan, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Durham University, United Kingdom, <sup>3</sup>ISTerre, Universite de Savoie - CNRS, France, <sup>4</sup>SGEES, Victoria University, New Zealand

Volcanic eruptions are driven by the growth of gas bubbles in magma, which grow and shrink as volatile species exsolve from and dissolve back into the melt in response to changes in the local environment, particularly in pressure and temperature. This movement of volatiles, particularly water, is recorded in the glass around vesicles and recent studies have used this record to interpret natural samples. Here we investigate the processes that control bubble growth and resorption in magma, by measuring the distribution of dissolved water in experimentally-vesiculated volcanic glasses. Water concentration profiles obtained using SIMS-calibrated BSEM imaging and water speciation data obtained using FTIR spectroscopy, are interpreted in the context of the known pressure and temperature history of the samples.

Samples are found to have undergone partial bubble resorption during the quench to glass at the end of experiments, as a result of increasing water solubility with decreasing temperature. Analysis of the lengthscale and timing of the resulting water concentration profiles demonstrates that the majority of resorption occurs above the glass transition. This quench resorption is associated with a reduction in bubble volumes that creates characteristic textures, such as buckled melt films between adjacent vesicles and reoriented cracks around resorption halos. Highly disequilibrium water speciation ratios within resorption halos are found to be diagnostic of quench resorption and can preserve evidence of pre-quench bubble growth

Quench resorption can increase sample water concentrations and ratios of molecular to hydroxyl water species, and reduce bubble volumes and sample porosities. Studies based on these parameters must therefore consider the potential impact of quench resorption, which is expected to be greatest for samples with high water concentrations, slow quench and low initial sample porosities. Water speciation data offer a way to investigate these impacts in unconstrained natural samples and could provide a tool for forensic interrogation of their eruptive history.

キーワード: Bubble growth, Bubble resorption, Water speciation, FTIR, SIMS, Backscatter SEM  
Keywords: Bubble growth, Bubble resorption, Water speciation, FTIR, SIMS, Backscatter SEM

## 発泡カインेटックスを考慮した 1 次元マグマ流れの定式化と衝撃波管問題への応用 Formulation of the 1-D magmatic flow including vesiculation kinetics

寅丸 敦志<sup>1\*</sup>  
TORAMARU, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

これまで、火道流ダイナミクスのモデル化や数値計算では、マグマの発泡（ガス量の変化）に関しては溶解度に従った平衡が仮定されていた。しかし、実際には、気泡の核形成・成長のカインेटックスのために、必ずしも平衡が成り立っているわけではない。また、運動量保存に関しては、多くの場合定常状態が仮定されていた。減圧過程と発泡カインेटックスの相互作用、その結果生じる速度・圧力変化の基本的特性を知ることは、天然での爆発現象の時間発展やそれに関連する波動の励起を理解するために必要である。本研究では、気泡形成のカインेटックスを考慮した一次元の均一 2 流体モデルを定式化し、その基本的性質を調べたので、その結果を報告する。

均一流体を仮定するので、定式化の方針として、そのメリットを生かして、1 流体の定式化にできるだけ沿う。すなわち、1 流体では、密度の時間変化を記述する質量保存の式を、状態方程式を介して圧力の時間変化の式に変換するので、その方針に従う。発泡のカインेटックスを含める今回の定式化では、密度が圧力だけでなくガス量の関数でもある点だけが異なる。ガス量は、発泡のカインेटックスで決定される。定式化は基本的に次の 3 つの方程式系から成る。1) 圧力方程式（質量保存）、2) 運動方程式（運動量保存）、3) 発泡カインेटックスの構成式。結果として、圧力と速度に関して 1 流体の場合と異なるのは、圧力変化の式に、発泡による反応項が加わることだけである。この方程式系は、圧力、速度、液相中ガス濃度（すなわち気相ガス量）に関する偏微分方程式系になり、数値的に解くことが出来る。

定式化の正当性と基本的性質を理解するために、ショックチューブ問題を数値的に解いた。移流項に関しては改良 CIP 法を用いた。高圧側の初期ガス量が多く発泡のカインेटックスが無視できる場合には、圧力は通常の 1 流体と同様に、低圧側に進む衝撃波と高圧側に進む希薄波が形成され、解析解と一致する。それに対し、高圧側の初期ガス量が少なく発泡カインेटックスが効いてくる場合には、低圧側では同様の振る舞いを示すが、高圧側では希薄波フロント、核形成圧力フロント、核形成イベントが、それぞれ異なる速度で伝播することがわかった。それぞれの伝播速度は、核形成圧力（気液界面エネルギー）や気泡成長速度、高圧側での初期ガス量に依存する。発泡のカインेटックスが働く場合とそうでない場合での基本的な違いは、前者の場合、ガス生成の圧力が飽和圧力より小さくなることであり、気泡の核形成から噴出して急冷されるまでの時間が短くなる。逆に発泡が平衡で進行する場合は、噴出までにより長い時間を必要とし、気泡同士の合体や気液間の相対運動、脱ガスなどの影響を受けやすいと考えられる。このことは、発泡のカインेटックスが、爆発的噴火や非爆発的噴火といった噴火様式の遷移を支配している可能性を示唆している。

キーワード: 火道流, 発泡カインेटックス, 気泡核形成, 衝撃波管  
Keywords: conduit flow, vesiculation kinetics, bubble nucleation, shock tube

## 伊豆半島, カワゴ平火山の流紋岩質マグマの噴火条件 Pre-eruptive conditions of rhyolitic magma from Kawagodaira Volcano, Izu Peninsula

高島 惇<sup>1\*</sup>; 石橋 秀巳<sup>1</sup>  
TAKASHIMA, Jun<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Hidemi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of science, Shizuoka University

カワゴ平火山は、伊豆半島の天城火山北西部に位置する流紋岩質の単成火山であり、3060?3190 年前に噴火したとされている。同火山の噴火活動は四つのステージ (ステージ 1 : 火砕サージ噴火、ステージ 2 : プリニー式噴火、ステージ 3 : 火砕流噴火、ステージ 4 : 溶岩流出) に区分でき、一連の噴火で噴火様式が変化している。このような一連の噴火における爆発的から非爆発的への噴火様式の変化は、珪長質マグマの噴火では珍しくない現象である。この変化の原因として噴火直前のマグマの状態や火道上昇過程での脱ガス効率が大きく影響していると考えられているが、そのメカニズムの詳細については今も研究が続いている。本研究では、カワゴ平火山のプリニー式噴火・火砕流噴火・溶岩流出の三つの噴火様式による噴出物のサンプル採取を行い、それぞれについて岩石記載及び EPMA による鉱物・ガラスの化学組成の測定を行った。そして、各噴火様式の噴出物について、それぞれ噴火直前におけるマグマの温度・圧力・含水量状態を見積もり、これに基づいてカワゴ平火山の噴火様式変化のメカニズムについて考察した。

カワゴ平火山の噴出物は噴火様式に関わらず同一の斑晶組み合わせとモード組成を示した。斑晶は固相全体の 15% を占め、斜長石・角閃石・斜方輝石・マグネタイトからなり、石基はガラス質で 85% を占めていた。カワゴ平火山に含まれている角閃石は不連続なゾーニングを有していた。このゾーニングはコアとリムに区分することができ、それぞれのゾーニングを化学組成で比較すると、噴火様式に関わらず Al の量に顕著な違いが見られ、値が 1.2 と 1.7 の二つの集団に分離している。

角閃石 Al 含有量圧力計を適用し圧力を求めると、コアは 200?300MPa で、リムは 100MPa 付近で結晶化したことが分かった。また、斜長石-角閃石地質温度計から求めた温度は、噴火様式で違いは見られず平均温度は 859 °C であった。そして斜長石-メルト地質含水量計から求めた含水量は、噴火様式間でほとんど差はなく、5wt.%前後に集中した。この含水量は、100MPa における流紋岩質メルトの H<sub>2</sub>O 溶解度と概ね一致する。

地質温度計・圧力計によると、マグマは 200MPa?300MPa から 100MPa 程度まで減圧される間、温度は大きく変化しなかったことがわかった。このことから、噴火様式の変化は 100MPa よりも低圧領域での過程によって生じたと考えられる。また、見積もったメルト含水量が 100MPa における溶解度と概ね一致することから、この圧力で既に発泡が開始していたと考えられる。そして、少なくとも角閃石及び斜長石のリム部分の成長が完了するまでの間、マグマは深さ 2.5-3km に停滞していたと考えられる。このマグマの停滞の間に気泡はより上部へと浮上していき、マグマ溜まりの上部に気泡に富む部分、下部に気泡に乏しい部分という気泡のゾーニングが形成された。このゾーニングが、初期の爆発的から後期の非爆発的への噴火様式の変化と関連していた可能性がある。

キーワード: 東伊豆単成火山群, 流紋岩質マグマ, 噴火様式, ホルンブレンド

Keywords: Higashi-Izu monogenetic volcanic field, rhyolitic magma, eruption style, hornblende



### 3次元比抵抗構造から推定される草津万代鉱周辺の熱水系 Hydrothermal system around the Bandaiko hot spring inferred from a 3-D resistivity structure

神田 径<sup>1\*</sup>; 高倉 伸一<sup>2</sup>; 小山 崇夫<sup>3</sup>; 小川 康雄<sup>1</sup>; 関 香織<sup>1</sup>; 日野 裕太<sup>1</sup>; 長谷 英彰<sup>1</sup>  
KANDA, Wataru<sup>1\*</sup>; TAKAKURA, Shinichi<sup>2</sup>; KOYAMA, Takao<sup>3</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>1</sup>; SEKI, Kaori<sup>1</sup>; HINO, Yuta<sup>1</sup>; HASE, Hideaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

万代鉱は、草津温泉から西に約3 km離れた草津白根火山東山腹に位置する自然湧出の温泉である。1967年に硫黄鉱山の掘削中に湧出したもので、1976年より草津町内へ引湯して温泉利用しているほか、熱交換によって温水を作って町内へ供給し、冬期には道路融雪にも利用されている。温泉湧出地点は長い間不明であったが、掘進当時の状況が調査された結果、坑口より505m西方地点の発破により多量の高温熱水が噴出するようになったということがわかっている。現在、その真上の地表面は樹木が枯れ、地表付近の地温は80℃を超えていることから、万代鉱温泉の主要な湧出源があることは間違いないと思われる。万代鉱では、温泉湧出量の1~2割程度が噴気として常時噴出しており、坑道奥の地下浅部には気液混合の熱水の存在が確実である。また、前述のように温泉湧出地点や熱水の化学的性質が既にわかっていることから、熱水系の比抵抗イメージを明らかにする絶好のフィールドである。本研究の結果から、実体のよくわかっていない水蒸気爆発場の比抵抗イメージへの示唆も得られると考える。

そこで我々は、AMT法(Audio-frequency Magnetotellurics)による比抵抗構造調査を行った。観測は、2013年10月19日~26日に実施した。推定湧出地点の周囲19ヶ所において電磁場5成分の測定を行ったが、うち15ヶ所ではS/Nの良い夜間に、4ヶ所では昼間の数時間測定を行った。リモートリファレンスのためのサイトは設けず、相互リファレンスを行った。観測地域は、50Hzの商用電源が使用されているが、60Hzを使用する長野県との県境が近いいため、60Hzのノイズが広範囲に混入していた。解析は3次元解析を行った。Siripunvaraporn and Egbert (2009)の3次元インバージョンコードにより、インピーダンス4成分の15周波数を使用して比抵抗構造モデルを推定した。これまでのところ、万代鉱の坑口と終端付近で低比抵抗を示すという結果が得られている。発表では、温泉水の電気伝導度の測定値などを考慮して、万代鉱周辺の熱水系について考察する。

謝辞：本研究は、東京大学地震研究所の共同研究プログラムの援助を受けました。

キーワード: 比抵抗構造, 草津白根火山, 熱水系, 草津温泉, 万代鉱

Keywords: resistivity structure, Kusatsu-Shirane volcano, hydrothermal system, Kusatsu-onsen, Bandaiko

## AMT法による立山地獄谷周辺の比抵抗構造 Resistivity structure around the Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan, inferred from AMT

関 香織<sup>1\*</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 長谷 英彰<sup>2</sup>; 日野 裕太<sup>1</sup>; 小林 知勝<sup>3</sup>; 丹保 俊哉<sup>4</sup>  
SEKI, Kaori<sup>1\*</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; HASE, Hideaki<sup>2</sup>; HINO, Yuta<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Tomokazu<sup>3</sup>; TANBO, Toshiya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 理工学研究科地球惑星専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学 火山流体研究センター, <sup>3</sup> 国土交通省 国土地理院, <sup>4</sup> 立山カルデラ砂防博物館

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Geospatial Information Authority of Japan, <sup>4</sup>Tateyama Caldera and Sabo Museum

北アルプスの弥陀ヶ原(立山)火山には、現在も活発な噴気活動を行っている地獄谷と呼ばれる場所がある。この地獄谷は、過去に繰り返された水蒸気噴火によって形成されたとされ、近年では、硫黄流出をはじめ、噴気ガスの組成変化、沸点を超える高温噴気の出現など、活動の活発化が懸念されている地域である。本研究では、水蒸気噴火の発生場であった立山地獄谷の、熱水流体の分布と噴気孔の位置関係、またガスだまりの有無を調べるために、地獄谷を中心とした東北東-西南西方向の測線にそって8点AMT法(Audio-frequency Magnetotellurics)調査の観測点を設け、地下の比抵抗分布を2次元解析により推定した。その結果、地獄谷の直下には低比抵抗体が広がり、その下500m以深では高比抵抗体が存在することがわかった。また、相対的に低い比抵抗を示す領域が、高比抵抗体を割るように地獄谷浅部へと伸びているような構造も見られた。浅部の低比抵抗体は、より低比抵抗を示す上部と、相対的に比抵抗が高くなっている下部に別れており、地質や岩石学的情報から上部は熱水を含んだ粘土混じりの堆積層であると考えた。また、下部の相対的に高い比抵抗を示す領域は、熱水に高温のマグマ性ガスが入り混じったものではないかと思われる。粘土層は透水性が悪いため、この比抵抗体上部が、下部に存在するマグマ性ガスを留めるキャップの役割を果たしている可能性がある。深部にある高比抵抗体は、地獄谷周辺に広く露出する基盤の花崗岩であり、この基盤岩を割り浅部低比抵抗体へと伸びる相対的に低比抵抗の領域は、マグマ性ガスの供給路である可能性がある。この供給路の直上では、地獄谷で最も活動的な噴気孔が存在している。

## 比抵抗構造で見る台湾北部・大屯火山群の熱水系 Hydrothermal system at Tatun Volcano Group, northern Taiwan, inferred from resistivity structure

小森 省吾<sup>1\*</sup>; 宇津木 充<sup>2</sup>; 鍵山 恒臣<sup>2</sup>; 井上 寛之<sup>2</sup>; 陳 中華<sup>1</sup>; 江 協堂<sup>3</sup>; 吉村 令慧<sup>4</sup>; 神田 径<sup>5</sup>  
KOMORI, Shogo<sup>1\*</sup>; UTSUGI, Mitsuru<sup>2</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>2</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>2</sup>; CHEN, Chang-hwa<sup>1</sup>; CHIANG, Hsieh-tang<sup>3</sup>; YOSHIMURA, Ryokei<sup>4</sup>; KANDA, Wataru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 中央研究院地球科学研究所 (台湾), <sup>2</sup> 京都大学火山研究センター, <sup>3</sup> 国立臺灣大学, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Institute for Earth Sciences, Academia Sinica (Taiwan), <sup>2</sup>Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, <sup>3</sup>National Taiwan University, <sup>4</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>5</sup>Tokyo Institute of Technology

台湾北部には、金山断層・嵌脚断層中に形成された20以上の火山体が存在し、大屯火山群と呼称される。七星山は、大屯火山群の中で現在最も活発な噴気・放熱活動を有している。歴史時代に噴火記録がないこともあり、本火山群の活動は終了したものと考えられていたが、比較的若い噴出物の発見 (Chen and Lin, 2002; Belousov et al., 2010)、高い<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比を持つ噴気 (Yang et al., 1999; Ohba et al., 2010)、高温物質の存在・流体流動を示唆する震源分布・地震波形 (Konstantinou et al., 2007) から、七星山の深部に潜在的な噴火可能性を有するマグマが存在するのではないかとということが最近になって指摘されている。こうした結果に基づき、大屯火山群の将来の噴火可能性や活動様式について、マグマ脱ガスの観点から拘束条件を与えることを目的に、宇津木・他 (2012, JPGU) は AMT 法による浅部比抵抗構造調査を七星山において行った。宇津木らの研究を踏まえ、本研究では、低比抵抗領域がどの程度の広がりを持っているかを明らかにするため、七星山のおよそ2km北東の馬槽・大油坑 (擎天崗) 地域において AMT 法による浅部比抵抗構造調査を行った。

得られた時系列データは FFT により周波数領域に変換され、Gamble et al. (1979) によるリモートリファレンス処理とともに周波数ごとのインピーダンスを求めた。本観測によって良好なデータが得られた周波数領域は1 - 10,400Hzであった。比抵抗構造解析には、本研究で得られた馬槽・大油坑地域の他に、宇津木・他 (2012) で得られた七星山のデータを併せて用いた。本研究では、Caldwell et al. (2004) の手法による impedance phase tensor ellipse の主軸方向の特性などから、本調査地域を1) 七星山周辺、2) 馬槽温泉・大油坑 (擎天崗) 地域の2つに分けて2次元比抵抗構造を推定することを試みた。構造推定には、Ogawa and Uchida (1996) の ABIC 最小化法インバージョンコードを用いた。得られた比抵抗構造と掘削報告書 (MRSO, 1969, 1970, 1971, 1973)、噴気ガス・温泉水の酸素- 水素同位体比・硫黄同位体比 (Ohba et al., 2010; 大沢・他, 2013)、水準測量による浅部圧力源 (村瀬・他, 2013・I A V C E I) とを比較することで、以下に示すような熱水系の存在が推定された。

七星山直下では、深部から高溶存成分濃度 (~100,000ppm NaCl 等価濃度) の2相流体が供給されており、それが柱状の極低比抵抗 ( $\leq 3\Omega\text{m}$ ) 領域を深度2 - 1kmに形成する。また、本領域に対応した減圧源が見られる。流体の浅部への上昇の過程で気相が液相より分離し、蒸気に卓越した、6 - 30 $\Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗- やや低比抵抗の領域が深度1 - 0.5km程度に形成される。この蒸気卓越領域は、上層の3 $\Omega\text{m}$ 以下の不透水層により保持され、蒸気の一部は不透水層の切れ目から外部へ直接放出され、地表に小油坑と呼称される噴気地を形成する。また、上昇した蒸気は地表付近を流れる地下水と混合することで、いわゆる steam heated thermal water を生成する。この熱水は地形に沿って浅部 (0 - 1 km深) を流下し、10 $\Omega\text{m}$ 以下の比抵抗を持つ領域で表される馬槽温泉を形成する。

一方、擎天崗直下では、深部から蒸気に卓越した流体の供給があり、それが深度1km以深に4 - 30 $\Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗- やや低比抵抗領域を形成する。また、本領域に対応する増圧源が見られる。その上層には3 $\Omega\text{m}$ 以下の極低比抵抗領域で表される不透水層が存在し、気相卓越領域が保持されている。蒸気の一部は北向きに上昇し、大油坑と呼称される噴気地を形成する。

本研究により、気相に卓越した領域が七星山から大油坑・擎天崗にかけた領域に広く分布していることが推定された。本地域では、約6千年前に火山灰放出を伴う水蒸気爆発を経験している (Belousov et al., 2010)。このことは、本地域では少なくとも過去数千年にわたり蒸気が維持されており、依然として水蒸気爆発の危険があることが示唆される。

キーワード: 大屯火山群, 熱水系, 2相領域, 蒸気卓越領域, 圧力源

Keywords: Tatun Volcano Group, Hydrothermal system, Two-phase region, Vapor-dominated region, Pressure sources



## 阿蘇カルデラにおける表層電気伝導度分布 Conductivity distribution of the surface layer in Aso Caldera

鍵山 恒臣<sup>1\*</sup>; 吉川 慎<sup>1</sup>; 宇津木 充<sup>1</sup>  
KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1\*</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>1</sup>; UTSUGI, Mitsuru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

火山活動には、マグマが地表に噴出しやすいか地下に留まりやすいかによって「噴火卓越型」から「地熱活動卓越型」まで幅広い多様性がある。異常現象が捉えられても噴火に至らない「噴火未遂事象」やマグマが地下に留まるイベントを繰り返す中で、深部から上昇してきたマグマが滞留しているマグマとぶつかることによって、カルデラ生成噴火などの「低頻度大規模噴火」が発生するとも考えられている。こうした現象は、マグマが地表にまで到達することなく地下に滞留し、マグマに含まれている揮発性成分が地表から噴出することに特徴があると考えられる。したがって、揮発性成分が火山の周辺にどの程度拡散しているか大変興味を持たれる。地熱地域では、地下深部から供給される火山ガスが地表に噴出するとともに帯水層に付加されて周辺に拡散していると考えられる。鍵山(2006)は、霧島火山群において地下浅部の帯水層の比抵抗が火口中心から周辺に向かうにつれて高くなるとともに、通常は高比抵抗であることが一般的な表層の比抵抗も中心部ほど低くなる傾向が見られること、地熱活動の活発な火山ほど低比抵抗域の面積が広くなることを示している。VLF-MT 観測によって得られる電気伝導度は、深さ数 m から 100m 程度までの表層に関する情報であるが、短時間に多数の点で測定が可能であり、比較的電磁気ノイズの大きい場所でも測定が可能であるので、火山・地熱活動の詳細な分布を知ることが可能になる。

阿蘇カルデラは、中岳火口に湯だまりを有し、その熱水が周辺に拡散しているか大変興味をもたれる。また、内牧温泉など、カルデラ内に存在する温泉の熱源と中岳の火山活動との関係も興味をもたれる。こうしたことから、阿蘇カルデラ北部に続き、南部においても VLF-MT による電気伝導度調査を実施し、阿蘇カルデラ全体の電気伝導度分布を明らかにした。以下にその概要を述べる。

**阿蘇カルデラ全域の特徴:** 阿蘇カルデラの表層電気伝導度は大きく 2 つに大別される。カルデラ床である阿蘇谷・南郷谷は、 $100 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度を示し、かつ比較的均質である。一方、中央火口丘群はそれ以下の低電気伝導度域となっている。この結果は、カルデラ床が過去にカルデラ湖を形成しており、地下水が豊富であることを反映しているのに対して、火口丘群では、緻密な溶岩や空隙の多いスコリアなどで覆われているためと思われる。

**中央火口丘群の特徴:** 火口丘群は全般に低電気伝導度であるが、個々の火口丘ごとに異なる特徴を持っている。中岳(火口近傍を除く)や北西に位置する米塚、杵島岳などでは  $30 \mu\text{ S/cm}$  以下となっている一方、中岳の西に位置する草千里では  $30 \mu\text{ S/cm}$  以上となっている。また、西部の吉岡や湯之谷、地獄、垂玉などの温泉地周辺では、 $300 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度域となっている。中岳の周辺部は低電気伝導度であるが、火口のごく近傍では  $300 \mu\text{ S/cm}$  以上の高電気伝導度となっている。また、中岳の北側山麓の仙酔峡から一宮付近では、米塚や杵島岳の北側山麓が低電気伝導度であるのに対して高電気伝導度となっている。また、中岳から南側の白川方向に電気伝導度の高い領域が伸びており、湯之谷、地獄・垂玉から南西方向にも高電気伝導度域が伸びている。これらの結果は、中岳の湯だまりから熱水が流出していることを示唆している。

**阿蘇谷の電気伝導度分布:** 阿蘇谷はほぼ全域で高電気伝導度を示すが、内牧温泉から三重塚にかけての領域および赤水温泉周辺において  $300 \mu\text{ S/cm}$  以上を示している。内牧-三重塚の延長には中岳が位置しており、なんらかの構造があるのかもしれない。また、内牧温泉の高電気伝導度領域は西南西-東北東方向に伸びる傾向があり、この線は温泉の並びや阿蘇カルデラ北部の地震活動の並びに一致する。これらの特徴は内牧温泉の熱水が構造線に規定されていることを示唆している。

**南郷谷の電気伝導度分布:** 南郷谷の電気伝導度も阿蘇谷と同様に高い値を示すが、三重塚周辺のような特に高い値は示していない。

こうした結果は、阿蘇カルデラにおいて、マグマから火山ガスがなんらかの構造線に支配されつつ発散されており、その脱ガス量が高電気伝導度領域の広さからかなり大きいことを示している。このことは、阿蘇火山においてしばしば噴火未遂が起きていること(地熱活動卓越型となっていること)と矛盾しない。

キーワード: 電気伝導度, 地熱活動, 噴火未遂, 阿蘇カルデラ

Keywords: Electrical conductivity, Geothermal activity, Failed eruption, Aso Caldera



## 火山性地盤変動における熱膨張モデルと茂木モデル The thermal expansion model and the Mogi model for volcanic ground deformation

狐崎 長琅<sup>1\*</sup>  
KITSUNEZAKI, Choro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>なし

<sup>1</sup>none

(1) 昨年本学会で提案した熱膨張モデル(狐崎・村岡,2013)について,その基礎面を茂木モデル(Mogi,1958)との関連において再構成した.茂木モデルでは,大地を半無限等方均質弾性体とし,地表を自由平面とする.地下に球状の圧力源を設定し,それによる地表の変位を求める.その際の地表の重力変化については,萩原(1977)が考察した.このモデルにおいては,球域内は基本的には空洞(あるいは異質物質)とされる.その特例として球域内が外部と同一物質で,域内の温度のみが上昇するとする.この場合,熱膨張が圧力源となり,茂木モデルは球状熱膨張モデル(STモデル)に転化する.この場合球域内では質量変化はなく,地表での重力変化も地表隆起によるフリーエア効果(FE)によってのみ生じる.

(2) 上記のSTモデルは,熱域が任意形状の場合にも拡張できる.熱域を微小な格子に分割するとする.各格子要素(立方体)は実効的には球状熱域要素として機能するので,それらによる出力(地表の変位,重力変化等)はSTモデルで与えられる.熱域全体による出力は各要素の出力の和となる.従って,任意形状の熱域においても,地表の垂直変位によるフリーエア効果(FE)のみが重力変化に寄与する\*.

\*[注] 狐崎・村岡(2013)における関連記述がここでは訂正されている.

(3) 実際の火山体浅部は概ね多孔質媒質とみなせる.間隙は水で飽和しており,流通状態にあるとする.(1)(2)の熱膨張モデルにおいて,媒質をこのような水飽和多孔質に置き換える.この場合間隙水に圧力変化はなく,固体部(骨格)は間隙水とは独立に挙動する.固体部の熱膨張は,(2)で述べたように地表変位とFEによる重力変化を生む.一方,熱域内の間隙水は温度上昇(沸点以下)に対応して,自由に膨張し,その密度も低下する.(水の熱膨張率は固体(岩石)よりも10倍以上大きい.)これによる重力変化がFEに加算され,総合的には重力変化は若干増幅される.このことを秋田駒ヶ岳に関わる数値例で示す.

[参考文献]

萩原幸男(1977): 伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルとそれに伴う重力変化, 震研彙報, 52巻, 301-309.

狐崎長琅・村岡淳(2013): 秋田駒ヶ岳火山における重力変化と熱膨張モデル, 地球惑星科学連合, 講演予稿, SVC52-04.

Mogi, K.(1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.36,99-134.

キーワード: 熱膨張モデル, 茂木モデル, 重力変化, 地盤変動, 秋田駒ヶ岳, 多孔質媒質

Keywords: thermal expansion model, Mogi model, gravity change, ground deformation, Akita-Komagatake, porous media

## 2つの周期がある間欠泉:El Cobreloa El Cobreloa: A geyser with two distinct eruption styles

並木 敦子<sup>1\*</sup>; Munoz Carolina<sup>2</sup>; Manga Michael<sup>2</sup>  
NAMIKI, Atsuko<sup>1\*</sup>; MUNOZ, Carolina<sup>2</sup>; MANGA, Michael<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地球惑星, <sup>2</sup> カリフォルニア大学バークレー校  
<sup>1</sup>DEPS, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>UC Berkeley

We performed field measurements at a geyser nicknamed “El Cobreloa”, located in the El Tatio Geyser Field, Northern Andes, Chile. The El Cobreloa geyser has two distinct eruption styles: minor eruptions, and more energetic and long-lived major eruptions. Minor eruptions splash hot water intermittently over an approximately 4 minute time period. A major eruption begins with an eruption style similar to minor eruptions, but then transitions to a voluminous water-dominated eruption, and finally ends with energetic steam discharge that continues for approximately 1 hour. We calculated eruption intervals by visual observations, acoustic measurements, and ground temperature measurements. All measurements consistently show that each eruption style has a regular interval: 4 hours and 40 minutes for major eruptions, and approximately 14 minutes for minor eruptions. We develop a model, in which the geyser reservoir, connected to the surface by a conduit, is recharged by the deep, hot aquifer. More deeply derived magmatic fluids provide the enthalpy to heat the reservoir. Boiling in the reservoir releases steam and hot water to the overlying conduit causing minor eruptions, and heating the water in the conduit. When the conduit becomes warm enough, the water in the conduit is able to boil, leading to a steam-dominated eruption that empties the conduit. The conduit is then recharged by the shallow, colder aquifer, and the eruption cycle begins anew. El Cobreloa provides insight into how small eruptions prepare the geyser system for large eruptions.

キーワード: 間欠泉, チリ, 地熱, 噴火

Keywords: geyser, El Tatio, geothermal systems, eruption

## 箱根山大涌谷火山ガス組成の時間変化 Time variation in the chemical composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Japan

大場 武<sup>1\*</sup>; 久野 友暉<sup>1</sup>; 左合 正和<sup>1</sup>  
OHBA, Takeshi<sup>1\*</sup>; KUNO, Yuki<sup>1</sup>; SAGOU, Masakazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東海大学理学部化学科

<sup>1</sup>Dep. Chem. School Sci. Tokai Univ.

### 序

箱根山は神奈川県西部に位置する活火山で、カルデラ構造を有し、中央火口丘の山腹には地熱地帯が発達している。中央火口丘を形成するマグマ噴火活動は、約五万年前（久野, 1972）に始まり、約三千年前（Kobayashi et al. 1997）まで継続したと考えられているが、最終のマグマ噴火活動から現在に至る期間の長さは、一連の活動継続期間に比べて短く、今後マグマ活動が再開しないとは言えない（町田, 1971）。約三千年前の噴火時には、中央火口丘神山が山体崩壊し発生した岩屑なだれによって、早川が堰き止められ、芦ノ湖が形成された（大木・袴田, 1975）。

箱根山で有史の噴火記録はないが、カルデラ内ではたびたび火山性地震が群発する。特に、2001年6月から10月にかけて発生した地震活動は活発で、中央火口丘の地下で体積膨張が観測され、山体に地殻変動をもたらした。この地殻変動は、深さ7kmの球状圧力源と、大涌谷および駒ヶ岳の浅部における潜在的な開口割れ目により説明された（代田・他, 2009）。2001年7月には大涌谷に掘削されていたボーリング孔の蒸気放出圧力が異常に増大した（辻内ほか, 2003）。

箱根山のカルデラ内には、15000人が居住し、平均して毎日5万人の観光客が訪れている。箱根山における火山災害を防止を目的とし、神奈川県温泉地学研究所は箱根山で、微小地震活動、地殻変動、および地下水位等の多項目の観測を1961年以来、継続している。

火山活動の本質はマグマの脱ガス現象であり、マグマ脱ガスに伴い放出される揮発性成分の一部は、火山ガスの成分を構成する。火山ガスは、火山現象を理解する上で本質的に重要な研究対象と言える。本研究では、大涌谷地熱地帯の火山ガスの繰り返し採取・分析の結果について報告する。

### 火山ガスの採取

大涌谷地熱地帯の自然噴気を2地点において2013年5月から繰り返し採取・分析した。ひとつは、駐車場の南東200mにある噴気で、2001年以来観測を継続している場所であり、定点と呼ぶ。二か所目は、駐車場の北方500mの山麓にある噴気で、近年になり出現した。この噴気を新噴気と呼ぶ。新噴気の周辺では、樹木が枯死している。両者とも、噴気の出口温度は96℃前後であり、水の沸点に近い。定点の噴気は、温泉水の湧出を伴うが、新噴気では、蒸気のみが放出されている。噴気は5MのKOH水溶液を用いたGiggenbachボトルで採取した。

### 結果と考察

定点と新噴気の組成は両者とも98%程度が水蒸気で占められ、次いでCO<sub>2</sub>が1~2%含まれていた。定点の噴気は、H<sub>2</sub>Sを0.2~0.4%含み、新噴気はその濃度が、0.036~0.050%と約10分の1であった。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比を取ると、定点の噴気については、5月から10月にかけて、単調な減少傾向が見られた。代田（2013）は検知管を用い、新噴気の組成を2012年3月から2013年9月にかけて頻りに測定し、2013年1月に急激なCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の上昇を見出している。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は4月から9月にかけて単調に減少した。この傾向は本研究で見出した定点のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の傾向と一致している。

神奈川県温泉地学研究所によると、箱根山では2013年1月から2月にかけて地震の発生回数が急激に増加し、その後低下した。本研究で検出した噴気の組成変化は、代田（2013）が新噴気で見出した変化とともに、箱根山の火山活動に対応した変化であると推測される。箱根山において噴気化学組成の変動は、火山活動の良い指標として用いることができると考えられる。

キーワード: 噴気, CO<sub>2</sub>, 火山活動, 熱水系

Keywords: Fumarolic gas, CO<sub>2</sub>, Volcanic activity, Hydrothermal system

## 十勝岳周辺の温泉の地球化学的特徴と火山活動に伴う変化 Geochemical characteristics and changes of thermal waters around Tokachidake volcano, Japan

高橋 良<sup>1\*</sup>; 柴田 智郎<sup>1</sup>; 村山 泰司<sup>1</sup>; 荻野 激<sup>1</sup>; 岡崎 紀俊<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Ryo<sup>1\*</sup>; SHIBATA, Tomo<sup>1</sup>; MURAYAMA, Yasuji<sup>1</sup>; OGINO, Tagiru<sup>1</sup>; OKAZAKI, Noritoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道立総合研究機構 地質研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Hokkaido, HRO

北海道の中央部に位置する十勝岳は、20世紀以降、1926年、1962年、および1988-89年にマグマ噴火を起こしている。2010年以降、十勝岳では山頂火口域での地震活動や熱活動の活発化が認められ、将来のマグマ噴火が懸念されている。地質研究所では、十勝岳の火山活動状況を把握するため、1986年から周辺の温泉の観測を継続している。1988-89年噴火の前後には、温泉成分や泉温が大きく変化したことが観測されている（村山ほか、1991）。したがって、これらの温泉の成因と火山活動との関係を明らかにすることは、今後の噴火活動を予測する上で重要である。

山頂火口群から約2km南西のヌッカクシ火口（安政火口）内と、その下流域の溶岩流の末端には複数の温泉が自然湧出している。これら自然湧出の温泉はpHが低く、3.2以下を示す。1986年の時点では、これらの温泉中の陰イオン成分は、硫酸イオンに富み、塩化物イオンに乏しかった。また、ヌッカクシ火口からの距離が離れるにしたがって、陰イオン濃度が低くなる傾向がある。これらの特徴をもとにすると、ヌッカクシ火口域での噴気・熱水活動を起源とする硫酸イオンに富む熱水（Sタイプ）が、地下浅部を流動する間に周囲の地下水（GWタイプ）と混ざり、溶岩流の末端で温泉として湧出していると考えられる。

一方、本研究で対象とした温泉のうち最下流に位置する吹上温泉地域（標高1,000m）の温泉では、1986年の観測開始直後から塩化物イオンやナトリウムイオンの濃度が急激に上昇した。これらの成分濃度の上昇は、1988-89年噴火を挟んで1992年頃まで続き、それ以降は減少に転じた。成分の変化に伴って、泉温も1988-89年噴火を挟んで20℃以上上昇した。このような成分と泉温の上昇は、火山活動の活発化に伴って、NaCl成分に富む高温の熱水（NaClタイプ）が浅部帯水層に混入したために生じたと考えられる。このような温泉の変化は、吹上温泉地域よりも上流の翁温泉（標高1,060m）では認められないことから、NaClタイプ熱水の混入は翁温泉よりも下流で起こっていると推測できる。

以上のように、この地域の温泉は3つの端成分（Sタイプ、NaClタイプ、GWタイプ）の混合によって形成されている。NaClタイプ熱水の影響は吹上温泉地域でのみ認められ、その混入量は火山活動の変化に伴って変化する。最近では、2010年以降の火山活動の活発化に伴って、2012年頃から吹上温泉地域の温泉で塩化物イオンやナトリウムイオン濃度が再び上昇している。しかし、その濃度は1988-89年噴火前と比較すると低く、酸素・水素同位体比の値にも大きな変化は認められない。したがって、NaClタイプ熱水の混入量はまだ小さいと言えるが、十勝岳の火山活動状況を把握するため、今後も注意深く温泉観測を続ける必要がある。

キーワード: 十勝岳, 温泉, 化学成分, 噴火予測

Keywords: Tokachidake volcano, thermal water, chemical composition, eruption forecasting



## 温泉地域の同位体挙動のケーススタディ Case study of the behavior of isotope in several hot-spring field

柳澤 教雄<sup>1\*</sup>  
YANAGISAWA, Norio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研・地圏資源

<sup>1</sup>AIST

### 1. はじめに

地熱地域の熱水流動を解析するにあたり、熱水中の同位体は、その熱水の起源や流動にともなう水岩石反応を示唆する。また、国内の温泉には様々な起源があり、マグマからの分離、天水の地下での加熱など考えられる。さらに、EGSに代表されるように、地下に水を注入し、熱抽出を早める例もある。

本発表では、近年話題となっている温泉発電むけの高温温泉などで酸素および水素の安定同位体分析を行った事例を紹介し、温泉起源の多様性について考察する。

### 2. 測定事例

#### (1) 八丈島

八丈島には現在 3,300kW の地熱発電所が稼働している。八丈島の水理系を解明するために、地熱発電所周辺のいくつかの湧水、温泉そして地熱発電所の熱水の酸素・水素同位体比の比較検討を行った。その結果、湧水の  $\delta D$  は -35 ‰ であり、酸素・水素同位体ダイヤグラムでは八丈島の降雨の変動範囲内の  $d = 20$  付近に分布した。温泉水では湧水に近い値を示す例と、 $d = 8$  付近で海水に近い値を示す例があり、島内に天水起源と海水起源の温泉が分布することが示された。また、地熱発電所の熱水の同位体比は、これらの温泉に比べ相対的に  $\delta^{18}O$  が高く、マグマ水が関与していると考えられ、また地熱熱水と温泉熱水の起源が異なることを示唆する

#### (2) 新潟県松之山温泉地域

松之山温泉地域では、現在温泉バイナリー発電実証試験が行われている。この地域には 100 °C 近い温度で Cl 濃度が 10,000mg/l 前後の高塩濃度の源泉がいくつか存在し、その 1 つを発電試験に利用している。これらの源泉の  $\delta D$  は -25 ‰ 付近、 $\delta^{18}O$  は 0 ‰ 付近であり、同地域の河川水の天水ラインより相対的に  $\delta^{18}O$  が高い傾向であった。また、同地域の Cl 濃度が 2,000mg/l 程度の松之山 4 号井では、同位体比は、河川水と高温源泉の直線上に位置した。この地域付近には火山はないがガス田が近く、温泉からメタンガスの発生がありジオプレッシャー型と考えられていることから、高温温泉水の起源は化石海水と考えられ、また松之山 4 号井では化石海水の源泉と天水の混合が行われていることが示された。

#### (3) 静岡県南伊豆温泉地域

南伊豆温泉地域にも、100 °C 近い高温で Cl 濃度が 10,000mg/l 前後の源泉がいくつか存在する。また、その源泉の東側にも温泉が広がっているが、東に行くほど源泉の温度が低下し、同時に Cl 濃度が低下している。そこで、いくつかの源泉と湧水の酸素水素同位体比を測定したところ、全ての源泉と湧水は天水起源のライン上に位置した。これより、高温の源泉も天水起源であること、また温泉水が地表付近で東方に流動していく過程で天水により希釈され、温度、Cl 濃度が低下することが示唆される。

キーワード: 温泉, 地熱, 同位体, 天水, 化石海水

Keywords: hot spring, geothermal, isotope, meteoric water, fossil salt water

## トカラ列島小宝島の温泉の熱水地球化学 Fluid geochemistry of hot springs at Kotakara-jima, Tokara Islands

堤 彩紀<sup>1\*</sup>; 石橋 純一郎<sup>1</sup>; 今野 祐多<sup>2</sup>; 横瀬 久芳<sup>3</sup>  
TSUTSUMI, Saki<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>1</sup>; KONNO, Uta<sup>2</sup>; YOKOSE, Hisayoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>海洋研究開発機構, <sup>3</sup>熊本大学大学院自然科学研究科  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, 33 Kyushu University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

【はじめに】 カルデラ地形は、熱源・帯水層・不透水層等がそろっており、熱水循環系が発達しやすい地質環境である。横瀬ほか(2010)は、九州の火山フロントの南方延長線上のトカラ列島近傍の海底に、第四紀の火山活動で形成された巨大カルデラが存在することを提唱している。そのうちの一つである宝島カルデラでは、その外輪山に位置する小宝島で、90℃以上の高温の温泉が海岸沿いに噴出していることが知られている。この小宝島の温泉水を採取・分析した結果を報告し、その熱水形成機構を考察する。

【試料の採取と分析方法】 温泉水試料の採取は、2013年5月に行われた。温泉水の温度・pH・電気伝導度・酸化還元電位を現地で測定した。温泉水試料は、0.45 μm フィルターでろ過してポリびんに入れて持ち帰り、実験室にて主要溶存成分の分析を行った。主要陽イオン濃度はICP - AES法、陰イオン濃度はイオンクロマトグラフィーを用いて分析した。アルカリ度はグラン法に基づく滴定法、ケイ素濃度は比色分析によって定量した。

【結果と考察】 温泉水の化学組成の特徴として、Cl<sup>-</sup>濃度が高いこと、Na/Cl比が0.75と海水とほぼ一致すること、酸素・水素同位体比が海水の値に近いこと、があげられ、熱水が海水を起源としていると考えられる。また、海水に比べてMg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度が低く、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>濃度が高かった。これは海水と岩石の熱水反応において見られる特徴と一致している。地化学温度計を適用すると、熱水貯留層内の温度は250℃~300℃とかなりの高い温度であると推定できる。また、これまでに宝島カルデラ周辺で行われた海底ドレッジでは、玄武岩質安山岩、安山岩、デイサイト、流紋岩からなる溶岩片などが多量に採取されており、最近のマグマ活動が示唆される。

これらの結果から、宝島カルデラに規制された熱水循環系があり、その一端が小宝島の海岸で高温の温泉水としてあらわれている可能性が高い。

キーワード: 巨大カルデラ, 熱水循環系, 海水岩石反応

Keywords: Giant caldera, hydrothermal system, seawater-rock interaction

## 比抵抗構造探査によって推定された長野県・白骨温泉の熱水供給系 Hydrothermal system beneath Shirahone hot spring, Nagano, Central Japan, revealed by resistivity survey

山谷 祐介<sup>1\*</sup>; 茂木 透<sup>2</sup>  
YAMAYA, Yusuke<sup>1\*</sup>; MOGI, Toru<sup>2</sup>

<sup>1</sup>産業技術総合研究所, <sup>2</sup>北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター  
<sup>1</sup>GSI, AIST, <sup>2</sup>ISV, Hokkaido Univ.

長野県西部の梓川流域には多数の温泉や噴気地などが存在し、顕著な地熱兆候を示している。そのうちの一つである白骨温泉は全国的にもよく知られた温泉で、その温泉水は複数の入浴施設に利用されている。付近には、温泉成分の炭酸水素塩が沈殿堆積して形成された噴湯丘や球状石灰岩が広く分布しており、古い時代から温泉が自然湧出していた痕跡を残している。

白骨温泉地域では、ボーリング調査や物理探査などはこれまでほとんど行われておらず、温泉水の供給系については明らかにされていなかった。供給源である温泉貯留層とその熱源の規模を把握することは、将来的な温泉の持続性や地熱エネルギー資源の把握のために有用である。このため、白骨温泉周辺の地熱系を議論する目的で、広帯域MT法による比抵抗構造探査を行った。測定は、白骨温泉をNNE-SSW方向に縦断する3kmの測線に沿う6地点で行った。各地点で得られた見かけ比抵抗およびインピーダンス位相を使用し、2次元構造を仮定したインバージョン解析を行い、地下3kmまでの比抵抗断面を推定した。

比抵抗構造は、おおよそ1—3000Ωmの範囲をとり、鉛直方向、水平方向ともに変化に富んでいる。この地域の普通の比抵抗は数十—数百Ωmの範囲にあり、その中に地下水(熱水)が集まっているところに10Ωm以下の低抵抗域が形成されているとみられる。白骨温泉直下の深さ400—1000mと2000m以深には顕著な低比抵抗体(3Ωm以下)が見つかった。このうち浅部の低比抵抗体は、白骨温泉の温泉貯留層と考えられ、そこから断裂系に沿って熱水が地表まで上昇していると考えられる。特有の乳白色の温泉水は、表層近くに分布する石灰岩質の層を熱水が通過する過程で、その成分が溶解することが原因の一つと考えられる。一方、深部の低比抵抗体は、温泉の熱源となる高温の領域を示していると考えられ、現在に至るまで高温を維持した貫入岩体を示している可能性がある。

比抵抗断面は、この地域を北西—南東方向に走る活断層である境峠断層を横切っている。地表断層の直下は、周囲に比べて高比抵抗と推定された。一般的に、断層の周辺は、透水性の高い破碎帯に水が浸入して低比抵抗となることが多い。それに対してここでは高比抵抗であるので、境峠断層の複数の活動セグメントのうち、断層活動後に地下水が衰退し、破碎帯が固着している一部分を見ている可能性がある。

キーワード: 温泉貯留層, 白骨温泉, 比抵抗, マグネトテルリクス法, 地熱系

Keywords: hydrothermal reservoir, Shirahone hot spring, resistivity, magnetotellurics, geothermal system

## PS-InSAR 解析によって捉えられたオハアキ地熱開発地域における地表変動 Ground deformation around Ohaaki geothermal field, New Zealand inferred from persistent scatterer SAR interferometry

石塚 師也<sup>1\*</sup>; 辻 健<sup>2</sup>; 松岡 俊文<sup>1</sup>; 藤光 康宏<sup>3</sup>; 西島 潤<sup>3</sup>  
ISHITSUKA, Kazuya<sup>1\*</sup>; TSUJI, Takeshi<sup>2</sup>; MATSUOKA, Toshifumi<sup>1</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>3</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科, <sup>2</sup> 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所, <sup>3</sup> 九州大学大学院 工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>2</sup>International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER), Kyushu University, <sup>3</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

ニュージーランド北島の中央部に広がる Taupo Volcanic Zone と呼ばれる火山群は、オハアキやワイラケイ地熱地域が存在する、世界有数の地熱開発地帯として知られている。この地帯に存在する地熱開発地域の中には、地盤沈下が報告されている地域もあり、ワイラケイ地熱地域では、年間約 30-50mm の地盤沈下が推定されている [Allis et al., 2009]。一方で、このように地熱開発に伴う地表変動現象が報告されている例は未だ少なく、今後の研究による地熱開発地域における地表変動現象の理解が求められると考える。

本研究では、Taupo Volcanic Zone の東側に位置するオハアキ地熱開発地域を対象として、persistent scatterer SAR interferometry (PS-InSAR) 解析を行うことにより、オハアキ地域の地表変動の推定を行った。PS-InSAR 解析では、SAR の観測間において、安定したマイクロ波散乱特性を示す散乱体の位相情報のみを用いて地表変動を推定するため、通常の InSAR 解析よりも高精度に地表変動を推定できることが知られている。解析には、2007 年 1 月から 2011 年 1 月に北行軌道で取得された 21 シーンの ALOS/PALSAR データを用いた。解析の結果、地熱開発地域周辺で年間約 60mm の衛星から遠ざかる向きの変動が発生していると推定され、地盤沈下と考えられる。また、地盤沈下が発生している地域には、明瞭な境界が存在し、断層により地盤沈下域の境界が定まっている可能性がある。

Allis, R., C. Bromley, and S. Currie, Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand, *Geothermics*, vol. 38, pp.169-180, 2009.

キーワード: 地表変動, PS-InSAR 解析, オハアキ地熱地域

Keywords: ground deformation, persistent scatterer SAR interferometry, Ohaaki geothermal area



## Gravity Monitoring at Takigami Geothermal Area, Oita Prefecture, Japan Gravity Monitoring at Takigami Geothermal Area, Oita Prefecture, Japan

PRATIWI, Maryati<sup>1\*</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>  
PRATIWI, Maryati<sup>1\*</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kyushu University, Fukuoka, Japan

<sup>1</sup>Kyushu University, Fukuoka, Japan

The gravity monitoring at Takigami geothermal area has been applied since November 1996 (Oka et al., 2011). In this area, the nearest geothermal manifestations are about 1-2 km to north and east of Takigami (Furuya et al., 2000). So, there are no geothermal manifestations at the surface. The geothermal power plant was built at Takigami in August 1991. It was reported that its power plant output was changed from 25,000 kW to 27,500 kW in June 2010 (Kyushu Electric Power Co., Inc., 2010)

We analyzed the gravity data from August 2008 until August 2013. We found that the gravity changes at the northern zone, the western zone, and the southwestern zone of this area are quite stable historically. This result indicates that the recovery state for these zones is almost done. However, the data at the eastern zone shows gravity increasing. It was assumed that the subsurface fluid at Takigami area flows from south, which is the direction Kuju Mountain area. Then, we noted that the fluid from south is filling the faults in eastern area in the beginning before going through to northern area (due to its high permeability (Jalilinasrabad et al., 2011)), thus the recovery state in the eastern zone has not been done.

By using theorem of Gauss, we calculated the mass changes based on the gravity changes from August 2009 to August 2012. This calculation is excluding the northern area as it has different water system, and removed the effects of precipitation and evapotranspiration by Gwater-e program (Kazama, 2011). And, we found that the mass increases as much as 10.12 Mt in the Takigami geothermal area. This mass change is associated with the production and reinjection process of geothermal fluids.

### REFERENCES

- Furuya, S., Aoki, M., Gotoh, H. and Takenaka, T. (2000), " Takigami geothermal system, northeastern Kyushu, Japan, " *Geothermics*, 29. 191-211.
- Jalilinasrabad, S., Itoi, R., Gotoh, H., and Tanaka, T. (2011), " Development of the Optimum Numerical Reservoir Model of the Takigami Geothermal Field, Oita, Japan " *Proc. of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford , California, SGP ? TR ? 191.*
- Kazama, T., K. Yamamoto, and Y. Fukuda (2011), " Hydrological disturbance corrections for relative gravity data observed at Sakurajima Volcano. " *116th Meeting of the Geodetic Society of Japan*, 17 (oral presentation at Gifu).
- Kyushu Electric Power Co., Inc. (2010). " Introduction to Geothermal Power Station of Kyushu Electric Power Co., Inc. " [Company brochure].
- Oka, D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuda, Y. and Taniguchi, M. (2011), " Geothermal Fluid Flow Monitoring by the Repeat Gravity Measurement at the Takigami Geothermal Field, Japan — Application of Hybrid Gravity Measurement by an Absolute Gravimeter (A10) and Relative Gravimeters (CG-3M and CG-5) —" *Proc. of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford , California, SGP ? TR ? 191.*

キーワード: gravity change, gravity monitoring, mass change, Takigami  
Keywords: gravity change, gravity monitoring, mass change, Takigami

## 日射の影響が無視できる条件下における熱収支法 Heat balance technique under the condition that the influence of solar radiation can be negligible

藤光 康宏<sup>1\*</sup>; 西島 潤<sup>1</sup>  
FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>1\*</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院  
<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

地熱地域からの放熱量を求める手法の一つである熱収支法 (Sekioka and Yuhara, 1974) では、単位面積当たりの放熱量と地熱異常温度 (地熱異常地域と通常地域の地表面温度差) とを関連づける比例定数として地熱流量係数が用いられる。地熱流量係数は対象地域における微気象観測により決定されるが、著者らはこの地熱流量係数の正確な決定のために微気象連続観測装置を製作して、各地で観測を行い、地熱流量係数に関する幾つかの考察を行ってきた (藤光ほか, 2009; 藤光ほか, 2010; 藤光ほか, 2011)。

熱収支法では、地熱異常が認められない地点の地表面温度を基準温度と設定し、基準温度より高い地表面温度を示す地点はすべて地熱異常地域と考える解析を行うが、研究を進める中で、日射が基準温度の決定に与える影響が、同手法による放熱量推定の精度を左右する大きな要因の一つであることが判明した。そこで、日射の影響が無視できる場合を想定し、夜間における人工発熱体を熱源とした観測実験を実施して、新たな解析手法による熱収支法の高精度化を目指した。

新たな解析手法では、日射がない状態における熱収支を考察すると共に、外部拡散係数の決定にリチャードソン数を導入し、さらに Bowen 比の逆数の決定方法を変更した。その結果、人工発熱体からの実際の発熱量とほぼ同じ値の放熱量が、新たな解析手法により算出された。

本研究を進めるにあたり、当時九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻修士課程の押方彰平氏には、現地観測やデータ解析などで多大な協力を頂いた。

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2009) 熱収支法で用いられる地熱流量係数の時間変化。日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集, V161-P012.

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2010) 熱収支法で用いられる地熱流量係数と地表面温度異常量との関係。日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SVC061-P03.

藤光康宏・西島 潤・江原幸雄 (2011) 熱収支法の地熱流量係数と各種微気象データとの関係。日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SVC049-P10.

Sekioka, M. and Yuhara, K. (1974) Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, No. 14, 2053-2058.

キーワード: 熱収支法, 地熱流量係数, 微気象, 放熱量, 日射, 基準点温度

Keywords: Heat balance technique, coefficient of geothermal flux, micrometeorology, heat discharge rate, solar radiation, reference temperature

## Tephra2による大山倉吉テフラの再現計算 Simulation of the Daisen-Kurayoshi tephra, in the San-in district, SW Japan, using Tephra2

山元 孝広<sup>1\*</sup>; 杉山 実<sup>2</sup>; 田島 靖久<sup>2</sup>  
YAMAMOTO, Takahiro<sup>1\*</sup>; SUGIYAMA, Minoru<sup>2</sup>; TAJIMA, Yasuhisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門, <sup>2</sup> 日本工営  
<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Nippon Koei Co Ltd

大山倉吉テフラ (DKP) は、約5万年前に大山火山から噴出した大規模なプリニー式降下堆積物で、山陰から北陸、北関東や東北南部を広く覆っている。その規模は、国内の降下堆積物では最大級であり、テフラの体積は20km<sup>3</sup>を超えるとされているが、定量的な検討はほとんど行われていない。そこで、本発表では Tephra2 を使った DKP の再現計算結果を報告する。Tephra2 は、南カリフォルニア大学で開発された移流拡散モデルを元にした噴煙からの火山灰堆積量分布の計算コードで、一般公開されている。今回はこのコードを使って、堆積物分布の情報から噴煙柱パラメータをインバージョン的に求めることを試みた。再現計算は、米子の年平均高度別の風データを用いて、噴煙柱高度について5ケース (10?18km)、噴出量について4ケース (1?8 × 10E+18kg)、平均粒径について4ケース (0?3 φ)、粒径偏差について5ケース (1?5 φ) の合計400ケースについて実施して実施した。これまでに示されている DKP の層厚分布を説明するためには、噴煙柱が18kmと高く、噴出量が4?8 × 10E+18kg (見かけ体積40?80km<sup>3</sup>) となる。実際の噴煙柱高度は更に高かった可能性はあるものの、高度18kmを超えると風速が極端に小さくなるため、解析結果は噴煙柱高度18kmケースとほとんど違いがなく、この種の再現計算では区別することが出来ない。

本報告は、特別会計に関する法律 (エネルギー対策特別会計) に基づく文部科学省からの受託事業として、原子力機構が実施した平成25年度「外部ハザードに対する崩壊熱除去機能のマージン評価手法の研究開発」の成果である。

キーワード: 大山倉吉テフラ, Tephra2  
Keywords: Daisen-Kurayoshi tephra, Tephra2

## 降灰ハザード評価における代表気象条件の選定への考察 Insight into setup of typical meteorological conditions for evaluating volcanic ash hazard

服部 康男<sup>1\*</sup>; 須藤 仁<sup>1</sup>; 郷 祐美子<sup>2</sup>; 土志田 潔<sup>1</sup>; 平口 博丸<sup>1</sup>; 石原 修二<sup>2</sup>  
HATTORI, Yasuo<sup>1\*</sup>; SUTO, Hitoshi<sup>1</sup>; GO, Yumiko<sup>2</sup>; TOSHIDA, Kiyoshi<sup>1</sup>; HIRAKUCHI, Hiromaru<sup>1</sup>; ISHIHARA, Shuji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所, <sup>2</sup> 電力計算センター

<sup>1</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry, <sup>2</sup>Denryoku Computing Center

Estimation of ash concentration and deposition is of practical interest in evaluation of volcanic ash risk on critical infrastructure (e.g. Wardman et al. 2012). For estimating ash concentration and deposition, numerical simulations with an ash transport- and deposition-model have become a powerful tool (e.g. Folch 2012). However, the setup of meteorological conditions, which mainly control the ash transport- and deposition- processes in the atmosphere and on the ground, has not been discussed in details.

In the present study, we examine the estimation of ground deposition for a real test case, a volcanic ash hazard in Kanto-area for an eruption at Mt. Fuji, with various meteorological conditions by using an ash transport- and deposition-model, fall3d. The meteorological conditions are generated with the 53 years reanalysis meteorological dataset, CRIEPI-RCM-Era2, which has a temporal- and spatial resolutions of 1 hr and 5 km; the typical and extreme conditions were sampled by using Gumbel plot and an artificial neural network technique.

The ash deposition is invariably limited to the west area of Mt. Fuji, even with the typical wind conditions on summer, while the isopach of ground deposition depicted various distributions, which strongly depends on meteorological conditions. This implies that the concentric circular distribution must not be realistic. Also, a long-term eruption, such as the Hoei eruption during stage3, yields large deposition area due to the diurnal variations of wind direction, suggesting that the attention to the differences between diurnal variation and fluctuations of wind direction on evaluating of volcanic ash risk is vital.

More details will be presented in the presentation, and we believe that our study must be helpful to develop the numerical simulations for evaluation of volcanic ash risk.

キーワード: 火山灰輸送-堆積モデル, 長期気象再解析, 極値, 人工ニューラルネットワーク, 移流・拡散, 数値シミュレーション

Keywords: Ash transport- and deposition-model, Long-term meteorological reanalysis, Extreme value, Artificial neural network, Advection-diffusion, Numerical simulation



## トンガリロ火山（ニュージーランド）における防災対策のための火山弾三次元数値モデル

### Numerical model of 3D ballistic trajectory for hazard assessments at Upper Te Maari eruption of Tongariro volcano in New

常松 佳恵<sup>1\*</sup>; フィッツジェラルド レベッカ<sup>2</sup>; ケネディー ベン<sup>2</sup>  
TSUNEMATSU, Kae<sup>1\*</sup>; FITZGERALD, Rebecca<sup>2</sup>; KENNEDY, Ben<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup>カンタベリー大学地質学科

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Department of Geological Sciences, University of Canterbury

Ballistic bombs and blocks are energetic pyroclasts deposited around volcanic craters. Hazard assessments of ballistic projectiles are important for people, buildings, and roads around vent especially in tourist and residential areas. Tongariro volcano, an active volcano in a popular national park in New Zealand, erupted August 6th, 2012 after one hundred years. By combining acoustic signals with eyewitness descriptions, five eruption pulses from fissures around Upper Te Maari crater were characterized and conditions of particle ejection were defined. A distribution of ballistic blocks was mapped from orthophotos and field campaigns. In order to clarify characteristics of ballistics at Tongariro volcano and assess future hazards, a numerical model of ballistics is modified and applied to the 2012 eruption. At first, 3D multiparticle model based on Discrete Event Simulation (DES) method is converted to the model based on semi-Lagrangian method to include an effect of air drag and gas flow around airborne particles. Initial conditions, such as ejection direction and speed, were calibrated to explain both spatial and size distribution of deposit bombs. Finally, an initial particle velocity of 200 m/s and gas flow velocity (constant) of 150 m/s are obtained as conditions of best fit. Furthermore, we applied this model to the assessment of future eruption regarding Tongariro Alpine Crossing, a walking trail in the national park frequented by ~80,000 people each year. Impacts of two extreme eruption cases are simulated by the numerical model. Negligible probabilities of fatality along the TAC are found from a magnitude smaller eruption, similar in size to the November 2012 eruption. However, a magnitude larger eruption could result in higher probabilities in certain areas of the track which it would be unlikely to survive the eruption. Varying the input parameters from the calibrated model allows for the assessment of future ballistic hazard from larger and smaller eruptions of Upper Te Maari Crater. A possibility of applying this model to the assessment of Japanese volcanoes such as Mt. Fuji will be discussed.

キーワード: 火山弾, ハザードマップ, 数値モデル, 火山噴火, 防災対策, トンガリロ火山

Keywords: Ballistics, Hazard map, Numerical model, Volcanic eruptions, Hazard assessment, Tongariro Volcano

高周波地震動の振幅分布から推定される泥流の発生位置と移動：2013年10月16日  
伊豆大島  
Estimation of locations and migration of debris flows on Izu-Ohshima Island on 16 Oct.,  
2013 by seismic amplitudes

小木曾 仁<sup>1\*</sup>; 蓬田 清<sup>2</sup>  
OGISO, Masashi<sup>1\*</sup>; YOMOGIDA, Kiyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁精密地震観測室, <sup>2</sup> 北大理

<sup>1</sup>Matsushiro Seismological Observatory, JMA, <sup>2</sup>Grad. Sch. Sci., Hokkaido Univ.

平成25年台風26号に伴う大雨により、10月16日未明に伊豆大島で大規模な土砂災害が発生し、大きな被害が発生した。

発生した泥流に伴うと考えられる震動波形が東京大学地震研究所・防災科学技術研究所・気象庁が設置している伊豆大島火山観測網の複数の地震計で同時に記録されていた。振幅の大きい震動は16日0時から6時の間に少なくとも5回認められ、振幅の小さいものは無数に認められる。

これらの震動はその始まりがはっきりしないため、P波などの相の到着時を利用した従来の震源決定手法を用いることはできない。そこで、振幅の大きい5つの震動の記録部分について、Battaglia and Aki(2003)、Kumagai et al.(2010)に基づいて高周波成分の振幅分布からおのおのの震動源を推定した。この手法では、バンドパスフィルタをかけた波形についてRMS振幅を計算し、サイト特性を補正したのち、振幅の幾何減衰と内部減衰を仮定して、観測振幅との残差が最も小さくなる震源位置をグリッドサーチにて探索する。一般に振幅分布は方位依存性を持つが、地殻浅部の強い微細不均質による散乱効果のため、見かけ上振幅分布が等方的となる現象(Takemura et al., 2009)を利用している。本研究では、記録された震動の上下動成分に対して5-10Hzのバンドパスフィルタをかけたのち、それらの震動がS実体波から構成されているとして震源位置を探索した。その際、震源位置は地表面を仮定し、また、S波速度は1.44km/s、内部減衰はQ=100を仮定した。サイト特性は伊豆大島から離れた場所で発生した非火山性地震からの各観測点におけるコーダ波部分を用いて推定した。

5つの震動源は、いずれも御神火スカイラインから元町地区の東側にかけて推定された。継続時間の短いひとつの震動を除いた4つの震動については、それぞれの震動の継続時間(約60~80秒)内で震動源が西方向(山側から下流側)へ移動しており、その震動内における土砂の移動を検知している可能性がある。その移動速度は約40km/hから70km/hに達していた。また、震源振幅の時系列はその最大値や継続時間が5つのイベントでそれぞれ異なり、泥流の発生形態の多様性を示している。

一般的に、火山観測網は狭い範囲に多くの地震計が設置されており、本来の目的である火山活動に伴う地震や微動の観測のほか、本研究のような泥流の震源やその発生形態の推定にも有効である。振幅分布を利用した震源決定手法は準リアルタイムでその震動源や震源振幅の時系列が推定可能であり、火山周辺で発生するさまざまな災害の発生箇所や規模の早期推定に非常に有効であろう。

謝辞：東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、気象庁の伊豆大島観測網の地震波形を使用しました。また、国土地理院作成の数値地図50mメッシュ(標高)、及び電子国土システムによる背景地図を使用しました。

キーワード: 地震動振幅分布, 震動源, 土石流, 伊豆大島

Keywords: distribution of seismic amplitudes, locations and migration of debris flows, Izu-Ohshima Island

## G-EVER 次世代型火山災害予測システム G-EVER Next-generation Volcanic Hazard Assessment System

宝田 晋治<sup>1\*</sup>; Bandibas Joel<sup>1</sup>  
TAKARADA, Shinji<sup>1\*</sup>; BANDIBAS, Joel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研地質調査総合センター

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST

アジア太平洋地域大規模地震・火山噴火リスクマネジメント (G-EVER) コンソーシアムでは、2012年に発足以来、アジア太平洋地域の研究機関とともに、情報共有、国際標準化、ワーキンググループ活動等、各種の地震火山ハザード・リスク対策活動を進めている (<http://g-ever.org>)。次世代型火山災害予測システム WG では、近未来の火山防災システムとして、火山噴火の進行のさまざまな段階で、噴火予測、被害想定、避難等に利用可能な、リアルタイム火山災害予測システムの構築を目指している。現在、火山の噴火履歴、火山噴火データベース、数値シミュレーションを統合化した、次世代型火山災害予測システムの構築を進めている。

日本及びアジア太平洋地域の主な活火山において、過去にどのような経緯をたどって大規模噴火に至ったか、主要な火山噴火の噴火履歴をとりまとめることが、今後の噴火予測やイベントツリーの作成を行う上で重要な基礎データとなる。より精度の高い分布図を作成し、個別の噴出量を、統一した手法で再計算する必要がある。各火山の主要噴火の噴出量と年代を精度よく求めることができれば、より精度の高い階段ダイヤグラムを作成でき、確率的噴火予測等に利用できる。各噴出物の噴火年代、噴出量、噴火形態をとりまとめた火山噴火データベースは次世代システムの基礎データとなるため、より精度の高いデータベースの構築が必要である。また、各火山噴出物の体積の推定方法の標準化は、噴火の規模の精度を高める上で必須である。過去の主要な大規模噴火については、火砕流、火砕サージ、岩屑なだれ、溶岩流、降下テフラ、弾道物、火山泥流について各種のシミュレーションを予め実施しておき、各地域のリスク評価を行っておくべきである。高精度なシミュレーションの実行には時間がかかるため、予め代表的な場合のシミュレーション結果を求めておくと、噴火時により迅速な対応ができる。

活火山の過去の噴火履歴、火山噴火データベース、各種シミュレーションを統合化し、次世代型リアルタイム火山災害予測システムを構築中である。各噴出物の分布域、噴出量等を、検索の上、タイムライン等により容易に取り出し、表示・比較検討できるシステムを予定している。また、過去の火山噴火データベースから、類似した噴火履歴を検索し、今後の噴火推移予測に利用可能なシステムを計画している。次に、シミュレーション技術により、噴火地点、噴火形態、噴出量、噴出率、風向きを変動させて、何分後にどの範囲まで火砕流や降下テフラ等の噴出物の影響が及ぶかを図示できるシステムが必要となる。そのシステムは、GISを用いて、ある噴火現象に対して、既存の主要道路や家屋、避難所等の情報と重ね合わせて演算することにより、何分後にどの地点がどの程度の被害を受けるのか、現地で状況に応じて臨機応変にリスク評価ができることが望ましい。予め活火山周辺地域において、火山噴火現象ごとにシミュレーションをくり返し、確率的火山噴火予測図を作成することも必要である。

2013年6月より試験公開を開始した次世代型火山災害予測システムでは、ASTER Global DEMを用いて、ほぼ全世界中の火山のエネルギーコンモデルによるシミュレーションが可能である。また、全世界の火山毎に、スミソニアン GVP 火山DB、VOGRIPA、日本の火山DB、ASTER 火山衛星画像DB等の主要火山DBへのリンク機能を持ち、過去の火山噴火履歴やデータベースへアクセスできる。現在、約3200以上の世界各地の第四紀火山を一覧表示リストや分布図から選択し、個別の火山情報を取り出すと共に、様々な条件を変えてシミュレーションを実施することができる。シミュレーション結果は、Google Maps (地形図、道路地図、衛星画像) や Bing Maps、国内の25000分の1地形図、シームレス地質図などと重ね合わせることが可能であり、詳細な災害評価や影響範囲の推定に用いることができる。さらにShapeファイルやGoogle Earthへの出力も可能であるため、ダウンロードの上GISによる詳細な検討や、3Dでの災害評価ができる。現在、Titan2Dによる火砕流や岩屑なだれのシミュレーションシステム及び国内の10mメッシュ標高データの実装作業を進めているところである。今後、DOWNFLOW(溶岩流)、Tephra2やAsh3D(降灰)等のシミュレーションの実装を計画している。さらに、イタリアINGVと連携し、火砕流や降灰に関する確率的火山災害予測システムの構築を進める計画である。アジア太平洋地域及び日本国内で、ハザードマップの作成・改訂、国レベルの防災プラン策定、自治体の地域防災計画等に利用されることを想定している。

G-EVER 次世代型火山災害予測システムの URL(<http://volcano.g-ever1.org/vhazard/HazardAssessment/>)

キーワード: 火山, 災害, アジア太平洋, G-EVER, シミュレーション, データベース  
Keywords: volcano, hazard, Asia-Pacific, G-EVER, simulation, database



## マグマデータベースに基づく火山活動評価のための経験則を得る試み An attempt to obtain empirical evidences for petrological assessment of volcanic activity based on magma database

竹内 晋吾<sup>1\*</sup>; 土志田 潔<sup>1</sup>; 三浦 大助<sup>1</sup>  
TAKEUCHI, Shingo<sup>1\*</sup>; TOSHIDA, Kiyoshi<sup>1</sup>; MIURA, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup> Central Research Institute of Electric Power Industry

### 【目的】

国内の火山においては、活動履歴・噴火様式・噴火規模について品質の高いデータベース (Hayakawa, 1996 -; 工藤・星住, 2006 -) が整備されつつある。その一方で、これらの噴火の原因となったマグマについて、岩石学的側面からは不明な事例が多い。そこで我々は、過去約 10 万年間に国内で発生した大規模噴火を中心に噴出物解析を進め、岩石学的性質に関するデータベース (マグマ DB) の構築を進めている。マグマ DB により、岩石学的パラメーター (全岩組成・メルト組成・斑晶量等) と噴火パラメーター (噴火規模・噴火様式等) との関係を多数の噴火事例について検討することにより、両者の間の普遍的な関連性を得て、火山活動評価のための経験則を得ることを目指している。

### 【解析対象と解析手法】

過去約 10 万年間に国内で起こった噴火のうち、約 90 事例について現在までに噴出物解析を行っている。大規模な噴火を可能な限り網羅するという方針の基に解析対象は選択された。噴火マグニチュード (M) で M=4-8 の噴火事例を主に対象とし、比較的最近に起こった M=1-3 の噴火事例も少数含む。現時点でマグマ DB は、全岩組成・斑晶量 (一部は斑晶モード組成)・石基組織画像 (100  $\mu$ m-2.5 mm 四方)・cm スケールの火山岩組織元素像・電子像 (1 cm-3 cm 四方) のデータからなる。それらに加え、マグマ溜まり条件でのメルト組成に相当する石基組成を求めている点が大規模な特徴である。

### 【解析結果】

噴出物解析を行った約 90 事例に加え、Takeuchi (2011) によってコンパイルされた国内事例 11 例を追加し、検討することにより、現時点では以下の傾向が見いだされつつある。以下では斑晶を含むマグマ全体を指す場合にはマグマを用い、液相のみを指す場合にはメルトを用いる。

(1) 流紋岩質メルト (石基 SiO<sub>2</sub> 量 > 70 wt%) を含むマグマ (安山岩から流紋岩質マグマ) は M=4-8 の噴火を引き起こす一方、玄武岩からデイサイト質メルト (石基 SiO<sub>2</sub> 量 < 70 wt%) を含むマグマ (玄武岩からデイサイト質マグマ) の噴火規模は M=5 以下が大半である。

(2) 流紋岩質メルト (石基 SiO<sub>2</sub> 量 > 70 wt%) を含むマグマは斑晶量が増大するにつれ、噴火の最大規模が小さくなり、0-20 vol% の斑晶量範囲では最大規模は M=8 である一方で、20-50 vol% の斑晶量範囲では最大規模は M=6 である。

### 【今後の展望】

基本的な岩石学的パラメーターであるメルト組成や斑晶量によって噴火規模に関するある程度の制約が噴火実績の観点から与えられることが本研究から示唆される。噴火の初期段階で迅速な噴出物解析を行い、メルト組成や斑晶量を得ることにより、その後の噴火シナリオの構築にまで貢献できる可能性を秘めている。今後は、その他の岩石学的パラメーターと噴火パラメーターの関係を検討するとともに、例外がどの程度、存在するかを明らかにし経験則としての信頼性を高めていきたい。また岩石学的パラメーターと噴火パラメーターの関連性は実用的な経験則としてだけでなく、噴火メカニズムの普遍的理解のためにも重要な観察事実となる。

キーワード: マグマ, 噴出物解析, 火山活動評価, データベース

Keywords: magma, petrological analysis of volcanic rock, assessment of volcanic activity, database



## カメルーン、マヌン湖の溶存 CO<sub>2</sub> 量の経時変化 Temporal variation (2011-2013) of the amount of CO<sub>2</sub> dissolved in Lake Monoun, Cameroon

大場 武<sup>1\*</sup>; イッサ I<sup>1</sup>; 佐々木 由香<sup>1</sup>; 日下部 実<sup>2</sup>; 吉田 裕<sup>3</sup>; 上田 晃<sup>2</sup>; 穴澤 活郎<sup>4</sup>; 佐伯 和人<sup>5</sup>; 金子 克哉<sup>6</sup>; 宮縁 育夫<sup>7</sup>; アカ FT<sup>8</sup>; タニレケ G<sup>8</sup>; ヘル JV<sup>8</sup>  
OHBA, Takeshi<sup>1\*</sup>; ISSA, I<sup>1</sup>; SASAKI, Yuka<sup>1</sup>; KUSAKABE, Minoru<sup>2</sup>; YOSHIDA, Yutaka<sup>3</sup>; UEDA, Akira<sup>2</sup>; ANAZAWA, Katsuro<sup>4</sup>; SAIKI, Kazuto<sup>5</sup>; KANEKO, Katsuya<sup>6</sup>; MIYABUCHI, Yasuo<sup>7</sup>; AKA, F t<sup>8</sup>; TANYILEKE, G<sup>8</sup>; HELL, J v<sup>8</sup>

<sup>1</sup> 東海大学, <sup>2</sup> 富山大学, <sup>3</sup> 吉田技術士事務所, <sup>4</sup> 東京大学, <sup>5</sup> 大阪大学, <sup>6</sup> 京都大学, <sup>7</sup> 熊本大学, <sup>8</sup> IRGM カメルーン  
<sup>1</sup> Tokai Univ, <sup>2</sup> Univ Toyama, <sup>3</sup> Yoshida Eng Office, <sup>4</sup> Univ Tokyo, <sup>5</sup> Osaka Univ, <sup>6</sup> Kyoto Univ, <sup>7</sup> Kumamoto Univ, <sup>8</sup> IRGM Cameroon

### 序

1984年8月15日の深夜23時頃、カメルーン共和国北西部に位置するマヌン湖の北約6kmの住民が大きな音響と地震動を感じた。その後、湖から致死性の気体が発生し、地表から数mの気層を形成し、湖の周囲に広がり37名がその気体の影響で死亡した。致死性の気体は翌日の午前10頃には拡散し安全となった (Sigurdsson et al, 1987)。Sigurdssonらは地震動により湖の東部で湖水に向かって崖崩れが発生し、その土砂が深層湖水を攪拌した結果、飽和濃度に達していた溶存CO<sub>2</sub>が発泡し、CO<sub>2</sub>ガスを主体とする致死性のガスが湖面から大量に発生したと推定した。このように湖からCO<sub>2</sub>ガスが噴出する現象は湖水爆発と呼ばれており、1986年には同じくカメルーンのニオス湖で発生した。湖水爆発は溶存CO<sub>2</sub>濃度が飽和に達し自然に発生する可能性もある。湖水爆発によるガス災害を防ぐため、マヌン湖で2003年に脱ガスパイプが設置され、2009年までに大半のCO<sub>2</sub>が除去されたが、深層水CO<sub>2</sub>濃度の低下により脱ガスは停止した。そのため我々は2013年12月には深層水をポンプで強制的に組み上げ脱ガスさせる装置を設置した。

### CO<sub>2</sub> 量の見積もり

湖水に蓄積するCO<sub>2</sub>量は、湖盆地形と溶存CO<sub>2</sub>濃度の深度プロファイルから計算される。溶存CO<sub>2</sub>濃度は以下の二つの方法で観測した。

#### 1. MK法 (Kusakabe et al, 2000)

50mLのディスポシリンジにあらかじめ入れてある5M KOH溶液10mlを湖水約30mlと任意の深度において混合させ、全CO<sub>2</sub>種 (CO<sub>2</sub>aq, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) を炭酸イオンとして固定し、研究室に持ち帰り酸滴定により全CO<sub>2</sub>種濃度を求める。この方法は正確で信頼性が高いが採取と分析に手間がかかるので、深度プロファイルのデータ点は、離散的にならざるを得ない。

#### 2. CTD法 (Kusakabe et al, 2000)

いわゆるCTDにより湖水の温度、電気伝導度、pHの深度プロファイルを取得し、以下の手順で全CO<sub>2</sub>種濃度を推定する。CTDによる観測の利点は、ノイズの少ないほぼ連続に近い深度プロファイルを得られることである。

a) 電気伝導度Cを25℃の値(C<sub>25</sub>)に規格化する。この際に電気伝導度は温度に対し2%の割合で変化すると仮定する。

b) 仮の定数としてNaHCO<sub>3</sub>溶液のモル電気伝導率を用い、C<sub>25</sub>からHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度とイオン強度を求める。

c) H<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>の活量係数をDaviesの式で求め、実濃度ベースのH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>とHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の酸解離定数を求める。

d) 上述の酸解離定数、温度、pHから全CO<sub>2</sub>濃度を計算する。

本研究では上述の1と2の方法で得られた値を以下の手順で整合的に組み合わせる。

e) d)で求めた全CO<sub>2</sub>濃度とMK法で求めた全CO<sub>2</sub>濃度を各深度で比較し、濃度の差の二乗和を計算する。

f) b)とc)では実際の湖水の組成とは異なる組成を仮定している。そこで電気伝導と組成の間の不一致を補正するために、新たな係数kを導入する。kはC<sub>25</sub>-corr=k\*C<sub>25</sub>で定義される。C<sub>25</sub>-corrが修正された電気伝導度で、これを用いて何度かa)からe)までの計算を繰り返し、二乗和が最小になるようなkの最適値を見つけた。

### 結果

全CO<sub>2</sub>濃度プロファイル (Fig. 1) から2011年から2012年にかけて、高濃度20mmol以上の深層水の厚みが増加し、2012年から2013年にかけても、高濃度深層水の厚みがわずかに増えた。マヌン湖は東部から河川が流入し、西部から流出しており、水面から-30mまでの層は河川水の影響が大きいうえで全CO<sub>2</sub>濃度が低い。そこで湖底直上の深度である-98mから-30mにかけて全CO<sub>2</sub>濃度を積分したところ、2011年、2012年、2013年の全CO<sub>2</sub>量はそれぞれ、101, 118, 119Mmolとなった。これらの値は、Kusakabe et al (2008)が求めた脱ガスパイプ設置直前の値、600Mmolに比べれば圧倒的に少ない。マヌン湖に溶存しているCO<sub>2</sub>はマントル起源で (Nagao et al., 2010)、マグマの寿命が一般的に数万年であることを考えるなら、マヌン湖にはこれからもほぼ永続的にCO<sub>2</sub>が供給される。マヌン湖におけるCO<sub>2</sub>の蓄積量は増加傾向にあり、2013年12月からスタートした深層水の組み上げ装置を稼働させ続けると同時に、モニタリングも定期的に行うことが必要である。

SVC52-07

会場:416

時間:4月28日 11:45-12:00

キーワード: マヌン湖, CO<sub>2</sub>, 湖水爆発, カメルーン, マグマ  
Keywords: Lake Monoun, CO<sub>2</sub>, Limnic eruption, Cameroon, Magma

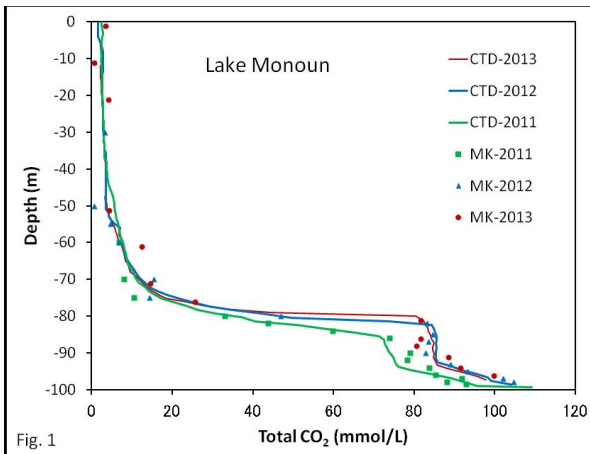


Fig. 1

## 極座標系で見た富士火山の地形と防災 Topographical features of Fuji volcano as seen in the polar coordinate system

千葉 達朗<sup>1\*</sup>  
CHIBA, Tatsuro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> アジア航測株式会社  
<sup>1</sup> Asia Air Survey Co., Ltd.

はじめに

富士山は日本で一番高い山であると同時に最も活発な火山である。長期的に見ると、過去1万1千年間の噴出量は、48立方キロに及ぶ(宮地 1988)。これは、カルデラ噴火を除けば日本一の値である。また、富士山は毎年30万人が山頂に登るほど傾斜がゆるく、火山礫を積み上げた巨大なボタ山のようなものともいわれる。

一つの火口で数多くの噴火を繰り返した結果、火口の周りに直径10km比高2000mの巨大な円錐形の火山体が形成された。富士山は、小御岳、古富士、新富士と時代区分されており、段階的に積み上げるように成長してきた。古い山体の一部も斜面上に突き出すように残っている。小御岳や北東斜面から小富士にかけての古富士火山の尾根などである。富士山が見る方向によってさまざまな形を示すのは、このような特徴による。

検討範囲

富士山は巨大な円錐であるが、その斜辺の傾きは一律ではない。山頂から離れるに従い、徐々に傾きが小さくなるような“指数曲線”を描く。またこの曲がり具合は、方向によってかなり異なる。単純な“末広がりの円錐”ではない。本稿では、極座標変換という手法で、富士山にメスを入れ、切り開くことで、富士山を新たな視点からみていきたい。検討対象は、山頂(最高点ではなく、大内院のほぼ中央)を中心とする半径13.5kmの円形の範囲とした。この距離は、山頂から側火山分布限界までの距離である。北東方向の小白、北西方向の下り山火口、南方向の大淵火口南限、南西方向の天母山はいずれもこの円周上に位置する。地形データについては、国土地理院の基盤地図情報0.4秒メッシュ(約10m)もとに、直交座標系(第VIII系)の50mメッシュにリサンプリングして使用した(図3)。極座標の原点は、山頂の大内院のほぼ中央(緯度35.36295, 経度138.73035)とした。

安息角

一般に火山の斜面勾配は、火口から地上にもたらされた物質の状態や運動メカニズムで決定される。これを、安定勾配や安息角と呼ぶ。富士山の山頂の火口近傍では高温状態のマグマの飛沫が落下し、再び相互に付着して一体化した溶結降下火砕物が見られる。この付近は、35度以上の傾斜で安定している。山頂から少し離れ、傾斜が20度程度の地域では、高温のマグマがそのまま液体として流れた溶岩流や高温の粉体や気体がなだれのように斜面を高速度で下る火砕流のつくる地形が観察できる。さらに、傾斜が10度程度に緩くなると、土砂と水が混合し高密度の流れとなって谷底を流れる土石流・泥流などがあらわれる。これらをさらに、降下スコリアや降下火山灰などの風成層が覆うので、時間とともになめらかとなっていく。局地的には、谷が形成されたり埋めたてられたり、さまざまなことがおきている、総じて、周りより高い部分は削り取られ、低い部分は埋まっていく、かくして富士山は世界的にもまれな、見事な末広がりの巨大な円錐となった。

平面図

極座標変換後の地形を見ると、側火山の集中する部分は周囲よりも高く、ニキビのように盛り上がっていることがわかる。特に、135度方向と315度方向に集中していることがわかる。なお、250度付近の高度のギャップは、丹沢山地が東側から突き出している影響で、南の御殿場側が低くなっている。

投影断面

X軸に山頂からの方位、Y軸に高度をとり、50m DEMの格子点頻度分布を投影断面カラーで示し投影断面を作成した。富士山をスカートに例えれば、明るい下限の線がフレアスカートの周囲の高さに相当する。この図を見ると、最も標高が低いのは南西の富士宮方向であることがわかる。次に、御殿場方向、最後に富士吉田方向である。北西方向や南東方向に泡立つような模様が見えるが、側火山の山体の影響である。また、方位角200度から250度の忍野から山中湖にかけての方面は、周辺よりも有意に標高が高い。この方向に古富士の山体斜面があることなどを考慮すると、古富士の山麓緩斜面と見たほうがいいのだろう。

文献

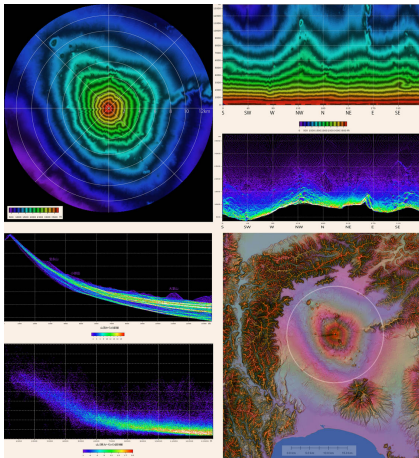
千葉達朗(2010) 富士山の地形-50mDEM円柱座標変換解析の試み-, 富士学研究,7,1,3-13.  
宮地直道(1988) 新富士火山の活動史, 地質学雑誌, 94, 6, 433-452.

キーワード: DEM, 安息角, 投影断面, スラッシュ雪崩, 溶岩流, 活断層  
Keywords: DEM, angle of repose, profile, slush avalanche, lava flow, active fault

SVC52-08

会場:416

時間:4月28日 12:00-12:15





## 災害伝承のツールとしてのジオパーク：島原半島ジオパークの事例 Tool handing down disaster experiences using Geoparks: examples of Unzen Volcanic Area Global Geopark

大野 希一<sup>1\*</sup>

OHNO, Marekazu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 島原半島ジオパーク事務局

<sup>1</sup>Unzen Volcanic Area Geopark Promotion Office

島原半島に暮らす住民は、繰り返し雲仙火山の噴火によって、繰り返し被災してきている。記録に残る最古の噴火である1663年の寛文噴火では、火口からあふれた熱水に誘発された土石流が麓の集落を襲い、30名余が犠牲になった。1792年の寛政噴火では、火山活動に伴う強い地震によって誘発された眉山溶岩ドームの大崩壊と、崩壊土砂が引き起こした津波により、約15000人が犠牲になった。さらに1990年から約5年間継続した平成噴火では、溶岩ドームの崩落による火砕流および火砕サージにより、44名が犠牲となった。このような災害が繰り返し発生し続けるにもかかわらず、島原半島の人々は活火山・雲仙の近傍に暮らし続けている。

活火山の近傍に暮らし続ける以上、火山災害のリスクは常に付きまとう。過去の災害の経験を後世に伝え、防災意識が地域住民の中に根付けば、災害からのリスクは大いに軽減される。しかし噴火間隔が100~200年のオーダーにある雲仙火山は、被災経験の持続的な伝承が難しく、情報の風化はもちろん、誤った情報が伝達される可能性もある。また、必要以上に災害を強調した情報の伝達は、地域住民の不安をあおる結果にもなりかねない。これらの課題を克服する仕組みの一つが、ジオパークである。

ジオパークでは、学術的価値を持つ地域資産（露頭や景観を含む）を保全しながらそれらを教育や観光に活用し、持続可能な形で地域を発展させることが要求される。よって、ジオパークで行われる教育活動の中に防災教育を組み込めば、地域の子供たちの防災意識を高め、将来的には地域全体の防災意識の底上げに繋げることができる。今回の発表では、島原半島ジオパークで演者が実施している「ジオパーク学習」の様子を紹介する。

島原市内の全小学校6年生および中学1年生は、総合学習の時間の中で1日かけて見学ツアーを行い、ジオパークに認定された地域の見どころを学んでいる。小学6年生が学習するテーマは「平成・寛政噴火とその災害」で、子供たちは火砕サージで被災した小学校の校舎跡や、土石流に埋もれた家屋が保存されている公園の見学を通じて、20数年前に自らが暮らしている町で何が起きたのかを学ぶ。また、山体崩壊が作り出した地形や、崩壊が起こる前の海岸線の位置を確認しながら、222年前に起きた大災害を体感する。ツアーの中では、災害を引き起こした火山現象の説明だけでなく、湧水を飲んだり、絶景スポットを紹介したり、地域の郷土料理の魅力も説明しながら、なぜ活火山の近くに人々が暮らし続けるかを問いかけ、子供たちにその理由を考えてもらっている。

これは「防災教育」ではない。しかし、地域の子供たちが、地域の学術的価値や火山噴火の怖さを正しく理解し、かつ人々が火山の近くに暮らし続ける理由を理解すれば、それはおのずと防災の意識の醸成につながる。同様の取り組みは、現在ジオパークに認定されている他の火山地域（洞爺湖有珠山、伊豆半島、箱根、伊豆大島、阿蘇、霧島、桜島・錦江湾）においても行われつつあり、ジオパークは日本国民の火山防災に対する意識の向上に、確実に寄与していると言える。

キーワード: 島原半島世界ジオパーク, 防災教育, ジオサイト, 平成噴火, 島原大変

Keywords: Unzen Volcanic Area Global Geopark, Education of disaster prevention, geosites, Heisei eruptopm, Shimabara Catastrophe

## 2011 年霧島山新燃岳噴火をキッチン火山実験で再現する Reproduction of the Eruptive sequence of the 2011 Shinmoedake eruption using the kitchen volcano experiments

井村 隆介<sup>1\*</sup>; 谷山 天一<sup>2</sup>

IMURA, Ryusuke<sup>1\*</sup>; TANIYAMA, Hirokazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学 大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 宮崎県高原町役場

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, <sup>2</sup>Takaharu Town Office, Miyazaki Prefecture

小・中学生を対象に 2011 年霧島山新燃岳噴火をキッチン火山実験で再現するプログラムを実施した。2011 年噴火の推移を実際の写真や図で解説しながら、食材を使った実験でそれを順番に再現した。マグマの発泡・噴出（準プリニー式噴火）から揮発性成分の抜けた溶岩の流出（火口内への溶岩の流出）などの噴火のメカニズムや軽石・火山灰の分布様式などへの理解が、実際に起こったこと、見られたこととつぎあわせることで、格段に進んだ。霧島山東麓では、2011 年の新燃岳噴出物を実際に観察できるので、野外観察と組み合わせることによって、より有意義なものになった。2011 年新燃岳噴火を知ることは、子ども達に防災を意識させずに防災を学んでもらえることにつながる。このプログラムは霧島ジオパークにおける教育・防災分野の重要な部分を担うものである。

キーワード: 2011 年新燃岳噴火, キッチン火山学

Keywords: The 2011 Shinmoedake eruption, kitchen volcano experiment

## 火山観測用自走式センサー「ほむら」の開発 HOMURA: Development of mobile sensor for volcanic exploration

金子 克哉<sup>1\*</sup>; 伊藤 公一<sup>2</sup>; 安部 祐一<sup>3</sup>; 岩堀 功大<sup>4</sup>  
KANEKO, Katsuya<sup>1\*</sup>; ITO, Koichi<sup>2</sup>; ANBE, Yuichi<sup>3</sup>; IWAHORI, Kodai<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院人間・環境学研究科, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 京都大学工学研究科, <sup>4</sup> 京都大学理学部  
<sup>1</sup>Human and Environmental Studies, Kyoto University, <sup>2</sup>Graduate school of Science, Kyoto University, <sup>3</sup>Graduate school of Technology, Kyoto University, <sup>4</sup>Faculty of Science, Kyoto University

火山噴火の予兆現象を把握し、火山噴火のダイナミクスの理解を行うためには、火口近傍さらには火口内における諸現象のモニタリングが必須である。現状において、火山活動の静穏時に設置された火口カメラによる監視、火山ガス、地震、電磁気学的観測などが行われている。一方、活動が活発化している火山において、新たに観測機器を設置しようとしても、危険性のためそれができず、十分な観測体制を持っていない場合もある。これまでに、いくつかのプロジェクトで火山観測用の無人ロボットの開発が試みられてきたが、巨額な研究開発費が必要ということもあり、プロジェクトの終了とともに開発が停止し、実用化に至っていないのが現実である。

本研究では、この現状を打破し、火口内やごく近傍の機動的観測を行う実用的な無人陸上車両型ロボットのシステム「火山観測用自走式センサー」の開発を行う。我々はこのシステムを「ほむら」と名付けた。我々は、目視下あるいは遠隔地からの無線操縦により、火山フィールドを走行し、人が近づけない活動中の火口近傍や火口内の映像および搭載センサーによる観測データをリアルタイムに操縦局に送信するロボットを目指し開発を行っている。今回の発表では、ほむら開発の現況と、伊豆大島で行った Docomo の FOMA 無線通信を用いた遠隔操縦試験の結果について報告を行う。

ほむらの開発の基本指針は、(1) 不整地走行において簡単に走行不能にならない車体とすること、および、(2) 製作運用のコストに優れること、の2点である。この指針のもと、ほむら試作機を製作した。ほむらは、上下対象の構造を持つ6輪の車形状のロボットである。大きさは長さ750x幅430x高さ310mm、重さは約12kgである。動力源は2セルのリチウムポリマー電池(7.4V、容量約250Wh)である。機体内には、カメラ、GPS、CO<sub>2</sub>ガスセンサーなどのセンサー類を収納する。基地局との通信は、デジタル無線通信で行う。基地局とのコマンド、データの送受信、走行およびセンサーの制御は、搭載された小型コンピュータにより行われる。車体の製作費用は、約20万円であり、これまでに開発された火山観測ロボットに比べ桁違いに安価なものとなっており、小型ゆえに運搬、運用も簡単である。

実際の運用に当たり、大きな問題となるのは、無線通信手段である。現段階において、1.2GHz帯10kbpsの直接通信、2.4GHz帯38kbpsの直接通信、Docomo FOMAによる64kbps通信の3種類のデジタル無線通信モジュールを用いることができる。直接通信においては、通信インフラを必要としないため、どの火山でも運用可能であるが、確実な通信を行うためには、基地局から1km以内でほむらを見通すことが必要となる。したがって、直接通信による運用は、観測対象までかなり近づける場合に限られる。一方、FOMA通信においては、FOMA通信インフラが必要であるが、それがある場合には、基地局を任意の場所におくことが可能である。

我々は、2013年11月、伊豆大島三原山および裏砂漠において、FOMA通信を用いて、ほむらの遠隔操縦試験を行った。三原山の山頂火口より、北に約2kmはなれたカルデラ縁(伊豆大島温泉ホテル)に基地局を設置し、そこから山頂火口を目指して、ほむらをスタートさせた。操縦は、すべて、ほむらを目視することなく、内臓のカメラ、GPSなどのセンサーデータのみにより行われた。結果として、5日間、1回の電池交換により、ほむらは、大島温泉ホテルより登山道を経て、山頂に至り、登山道外の斜面を裏砂漠へ下り、温泉ホテルより約1kmの地点まで戻ることができた。この実験により、目視によらない遠隔操縦により、火口周辺へのアプローチが十分に可能であることがわかった。その一方で、溶岩流の盛り上がり部分が壁になり、ほむらに対してFOMA中継局方向がさえぎられると、FOMA無線は、不安定になり、最悪通信が完全に途絶してしまう。このような場所が、ほむらのルート上に4ヶ所あった。このことは、三原山において、遠隔操縦だけでほむらが山頂まで達することは実際に不可能であることを示している。陸上を走る観測ロボットを火山で運用する場合には、事前に十分な検討を行い、安定した無線通信手段を確保することが必須である。携帯電話無線網を利用する場合には、状況に応じ、臨時の中継局を設置するなどが必要になるであろう。

キーワード: ロボット, 遠隔操縦, 携帯電話通信, 伊豆大島  
Keywords: robot, Remote control, Telecommunication by cell phone, Izu-ohshima

## 噴煙柱からの粒子離脱 (2) —観測点配置による再現性評価 Particle fallout from an eruption column (2) - evaluation of reproducibility

萬年 一剛<sup>1\*</sup>  
MANNEN, Kazutaka<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神奈川県温泉地学研究所  
<sup>1</sup> Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

降下火山灰シミュレーションにおいて、地上における堆積量見積の誤差が生じる原因として、噴煙柱のどの高さからどれだけの量の粒子が放出されているかを示す給源パラメータの不確実性が考えられる。給源パラメータは高さにかかわらず均質としたり、粒径と噴煙の上昇速度の関連から決めたり(鈴木モデル)されているが、観測を元に調べた研究はほとんど無い。著者は Tephra2 と観測された気象場を用いて、伊豆大島 1986 年噴火の給源パラメータをインバージョンによって求めようとしている(昨年度本大会)。

今回は、観測点配置によって、再現される給源パラメータにどのような違いが生じるかを、2つの方法を使って評価した。

1つは、ダミーの噴煙パラメータを与えて、各観測点における降灰量を計算し、その計算結果にもとづくインバージョンで、最初に与えたダミーの噴煙パラメータを再現できるか確認するというものである。

もう1つは、ジャックナイフ法によるものである。この方法では、観測点を順番に一つずつ外し、その都度給源パラメータを計算する。その都度計算される給源パラメータは「疑似値」とよばれるが、最終的な給源パラメータの推定値は疑似値の平均値、給源パラメータの誤差は疑似値の標準偏差となる。

伊豆大島 1986 年 B 噴火について、この2つの方法を使って、観測点配置による再現性を評価したところ次のことがわかった。まず、再現できる高度の範囲は粒径によって異なり、-3phi で 7km、0phi で 4km が上限であった。またジャックナイフ法による給源パラメータの誤差はあまり大きくなく、ほとんどの場合 10% 以下であった。

キーワード: 降下火山灰, Tephra2, シミュレーション  
Keywords: Pyroclastic fall, Tephra2, simulation



## MODIS データを利用した火山・溶岩活動の検知 Detection of thermal anomaly associated with volcanic activity from MODIS data

堤 梨花<sup>1\*</sup>  
TSUTSUMI, Rika<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Chiba University

世界には多くの火山が存在するが、その全てを連続監視することは多くのコストを要するため困難である。一方、火山活動は温度上昇を伴うという点と、衛星によるリモートセンシングでは広範囲の地表面温度の監視が可能ということ踏まえ、衛星データを使用することで、効率的に多くの火山を連続監視することができる。

よって、我々は人工衛星 Aqua/Terra に搭載されているセンサ MODIS の L1 夜間赤外データを用いて、火山周辺の地表面温度の時空間的な統計解析を行うことによって、火山活動（特に人命に関わる甚大な被害をもたらす溶岩活動の監視や火砕流予測を目的として）に伴う温度異常を検知するアルゴリズムを構築することを本研究の目的としている。

また、本解析では、雲ピクセルの棄却が必須であり、雲に対する感度が高いとされる 4 つの輝度温度のバンド間差分値 (BTD : Brightness Temperature Difference) (band31-band20, band31-band27, band31-band20, band34-band35) を用いて、各 BTD の特性を考慮し、雲ピクセルの棄却を行った。雲ピクセルの棄却手法の精度を検証するため、日本の 8 か所 (札幌・新潟・富山・つくば・東京・松江・長崎・辺戸) で、LIDAR データ (国立環境研究所) と MODIS データの雲判別に用いた各 BTD の値を比較した。その結果、熱帯 (辺戸) および日本地域の火山活動の監視については、雲判別に用いた手法が、十分な能力があることが分かった。精度よく雲ピクセルの棄却を行ったことで、先行研究 (Noguchi 2010) で出ていた雲ピクセルによる火山活動期間以外の温度異常の誤検知をなくし、火山活動期間中の溶岩活動に伴う温度異常のみの検知に成功した。

キーワード: MODIS, 火山, 溶岩, 新燃岳, Lidar

Keywords: MODIS, Lidar, Volcanic activity, Shinmoe-dake, lava activity

## 西暦 1779 年以降の桜島火山における玄武岩質マグマの多様性と注入時期 Variations of basaltic magmas and their timing of injection into the magma system of Sakurajima volcano since AD 1779

海老原 佳帆<sup>1</sup>; 中川 光弘<sup>1\*</sup>; 吉本 充宏<sup>1</sup>; 小林 哲夫<sup>4</sup>

EBIHARA, Kaho<sup>1</sup>; NAKAGAWA, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Mitsuhiro<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Tetsuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地球惑星システム科学, <sup>2</sup> 北海道大学地球惑星システム科学, <sup>3</sup> 北海道大学地球惑星システム科学, <sup>4</sup> 鹿児島大学地球環境科学

<sup>1</sup>Earth & Planetary System Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Earth & Planetary System Sci., Hokkaido Univ., <sup>3</sup>Earth & Planetary System Sci., Hokkaido Univ., <sup>4</sup>Earth & Environmental Sci., Kagoshima Univ.

桜島火山の歴史時代噴火のマグマ系に関して、中川・他(2011)では、1471年・1779年噴火においては珪長質マグマ(S マグマ)と安山岩質マグマ(A マグマ)による二端成分マグマ混合が起き、1914年以降の噴火では、S + A の混合マグマに玄武岩質マグマ(B マグマ)が注入していると結論付けた。20世紀以降にB マグマが注入した根拠としては、20世紀以降の噴出物にかんらん石や高 An 斜長石が含まれていることと、全岩化学組成において20世紀以降とそれ以前とは組成トレンドが異なることを挙げている。先行研究で分析された1779年の噴出物は陸上の試料のみであったが、この年はプリニー式噴火の直後に海底でも噴火が起きたことが知られている。本研究では1779年海底噴出物を新たに採取し、既存のデータと合わせ、18世紀以降のマグマプロセスについて考察を行う。

1779年海底噴出物は、主に縞状の軽石と黒色でやや発泡した溶岩で構成されている。斑晶鉱物としては斜長石、斜方輝石、単斜輝石、磁鉄鉱を含んでおり、少量のかんらん石が晶出するという点で陸上噴出物とは異なる。海底噴出物に含まれているかんらん石斑晶は、反応縁を持たない。一方、20世紀以降の噴出物も同様にかんらん石斑晶を含んでいるが、それら斑晶は反応縁のないものとあるものの両方が共存する特徴がある。1779年海底噴出物のかんらん石はFo=78~74にほとんどの斑晶が集中し、Fo=77にピークを示す。20世紀以降の噴出物ではFo=81に組成のピークを持ち、Mgに乏しい斑晶も含むFo=82~60の広い組成幅を示す。20世紀以降のかんらん石斑晶組成と反応縁の関係に注目すると、Fo=74以上の組成のものは反応縁を持たないが、それよりも低Foの斑晶には反応縁が認められた。磁鉄鉱は噴火年代によらずMg/Mn=4~12の組成を示すが、1779年海底噴出物はバイモーダルな組成分布である。一方、全岩化学組成においては、1779年海底噴出物はSiO<sub>2</sub>=○-○wt%のデイサイト~安山岩で、1779年陸上噴出物より組成幅が苦鉄質側に広いことで区別できる。MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>などのハーカー図では1779年陸上噴火、同海底噴火、20世紀以降の3グループで異なる直線トレンドを示す。1779年海底噴出物の斜長石、斜方輝石、単斜輝石斑晶は、陸上噴出物中の斑晶と類似した組成を示す一方で、輝石と非平衡な高Foかんらん石(Fo=77)や高Mg/Mn磁鉄鉱といった、陸上の試料中では存在しないMgに富む斑晶も認められる。これらのことより1779年海底噴火では20世紀以降と同様に、陸上で噴出したS+Aの混合マグマに玄武岩質マグマが注入したと考えられる。つまり玄武岩質マグマのマグマ系への注入は1779年海底噴火前には起こっていたことが明らかになった。しかしながらかんらん石斑晶の組成に注目すると、18世紀以降の桜島火山においては、1779年海底噴火から注入したFo=77のかんらん石斑晶を含む玄武岩質マグマ(B1 マグマ)と、20世紀以降注入しているFo=81のかんらん石斑晶を含む玄武岩質マグマ(B2 マグマ)の、2種類の玄武岩質マグマの存在が示唆される。これは全岩化学組成において、1779年海底噴火と20世紀以降の組成トレンドが異なることも調和的である。それらの玄武岩質マグマの注入時期は、Fo=77あるいはFo=81のかんらん石斑晶が反応縁を持たず、さらに不均質な石基組織が認められることから、B1あるいはB2のマグマ注入後、速やかに噴火にいたったと考えられる。しかしながら20世紀の噴出物ではかんらん石斑晶の組成幅は広く、Mgに乏しいかんらん石斑晶は輝石反応縁を持っている。つまり反応縁のあるかんらん石は注入後、メルトと十分に反応して噴火にいたったと考えられる。その反応過程でかんらん石はFeに富む組成へと変化したと考えられる。このように反応縁を持つかんらん石斑晶を含む20世紀噴出物では、それ以前の繰り返しの玄武岩質マグマの注入現象を記録している出残りマグマに、新たに玄武岩質マグマが注入したと考えられる。

以上のかんらん石斑晶から推測される、18世紀以降の桜島火山における玄武岩質マグマの注入プロセスは、次のとおりである。1779年海底噴火では、直前の陸上噴火で噴出したS+Aの混合マグマに新たにB1 マグマが注入して、短時間のうちに噴火した。この出残りマグマでは、噴火後にかんらん石とメルトの反応が進み、反応縁を持つかんらん石が生産された。そして1914年噴火では、その出残りマグマに大量のB2 マグマが注入し、やはり短時間のうちに噴火に至った。しかし1914年噴出物には反応縁を持たないFo=77のかんらん石も多く認められるので、B1 マグマも貫入した可能性がある。1955年以降は、反応縁を持たないFo=81の少量のかんらん石斑晶を含んでおり、1955年以降は出残りマグマにB2 マグマのみの注入が断続的に続いているようである。

キーワード: 桜島火山, マグマ系, マグマ混合, かんらん石, 火山噴火

Keywords: Sakurajima volcano, magma system, magma mixing, olivine, volcanic eruption

## 新燃岳 2011 年噴火最盛期における本質物の見かけ密度変化 Bulk density change of juvenile clasts during the climactic phase of the 2011 Shinmoe- dake eruption

鈴木 由希<sup>1\*</sup>; 市原 美恵<sup>1</sup>; 前野 深<sup>1</sup>; 長井 雅史<sup>2</sup>; 中田 節也<sup>1</sup>  
SUZUKI, Yuki<sup>1\*</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>1</sup>; MAENO, Fukashi<sup>1</sup>; NAGAI, Masashi<sup>2</sup>; NAKADA, Setsuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・地震研, <sup>2</sup> 防災科研  
<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

新燃岳 2011 年噴火の最盛期は、1 月 26 日から 27 日にかけての準プリニー式噴火と、その後、1 月末にかけての火口での溶岩蓄積である (Nakada et al., 2013, EPS). 準プリニー式噴火は、約 12 時間おきに 3 回起きた (1/26PM, 1/27AM, 1/27PM). この研究では、上記最盛期における火道でのマグマ上昇過程を、噴出物の石基組織から明らかにする。最終的には、1) 間欠的な準プリニー式噴火の発生機構の特定、2) マグマ上昇において、噴火強度や様式が決定された段階と、その際の上昇条件 (e.g. 速度) の特定、を目指す。

準プリニー式噴火については灰・茶色の軽石、火口溶岩については 2 月 1 日噴火の噴石を、主な分析対象とした。全て、噴火に際したマグマ混合の産物であるが、2 端成分の混合比が互いに類似している。そこで上昇の出発条件、すなわち、噴出直前のマグマ溜まりにおける、バルク組成、斑晶量、温度、含水量にも相違はない ( $\text{SiO}_2=57\text{-}58\text{wt.}\%$ ,  $30\text{vol.}\%$ ,  $960\text{-}980\text{C}$ ,  $4\text{wt.}\%$ ; Suzuki et al., 2013a, JVGR). 軽石と同時に噴出した石質岩片についても、全岩組成や実体鏡下での観察により、2011 年のマグマ由来と判断されるものは分析対象とした。

報告する“見かけ密度”は、火道でのマグマ上昇時の気相の分離 (脱ガス) 程度を反映している値であり、上昇速度が遅いほど分離が促進される傾向がある。これにより、1) 最盛期を通じた、上昇速度変化の概要が把握され、合わせて、2) 2 度目の準プリニー式噴火開始相当層準も初めて特定された。

Nakada et al. (2013) と Maeno et al. (revised) に基づき、1 月 26 日から 27 日にかけての堆積物を、火口南東 2-3km の分布軸付近にて採取した。以下ユニット名は Nakada et al. (2013) のものである。1/27PM 相当層は、そのイベントの際現地調査が行われていたため、以前から特定出来ていた (Layer5)。1/26PM から 1/27AM の堆積物は、軽石を主体とする Layer2 から Layer4 に対応する。Layer2 から Layer3 にかけて逆級化、Layer3 から Layer4 にかけて正級化する特徴がある。しかし、この連続的な粒子サイズ変化のため、2 つのイベントの境界を特定出来ていなかった。なお Layer2 から Layer4 は、最初と次の準プリニー式噴火の間の噴火の低調期 (1/26, 19:00 から 1/27, 2:00) の噴出物を含まない (飛ばしているとするれば、火山灰層となるであろう)。サンプル採取時に、各ユニットは、lower と upper のサブユニットに 2 分割した。Layer2 と Layer4 では、サブユニットによる粒子サイズの変化はない。Layer3 では、upper が lower に比べ粗い。

特に Layer2-4 における見かけ密度変化に着目する。Layer2-low から Layer3-low で  $1.0\text{-}1.7\text{ g/cm}^3$ , Layer3-up で  $1.0\text{-}2.0\text{ g/cm}^3$ , Layer4-low から up で  $0.8\text{-}1.4\text{ g/cm}^3$  である。つまり Layer3-up にかけて最小値不変で最大値のみが増加し、Layer3-up と比べその上位では最大値・最小値の両方が減少している。平均値は Layer2-low から順に、 $1.25\text{ g/cm}^3$ ,  $1.28\text{ g/cm}^3$ ,  $1.27\text{ g/cm}^3$ ,  $1.44\text{ g/cm}^3$ ,  $1.14\text{ g/cm}^3$ ,  $1.17\text{ g/cm}^3$  である。

見かけ密度の高い軽石に富むことを根拠とし、Layer3-up が 2 度目の準プリニー式噴火の開始に対応すると提案する。先ず、見かけ密度の高い軽石が、1 回目の準プリニー式噴火の期間に噴出したとは考えにくい。新堀・福井 (2012) を参照すると、1 回目の準プリニー式噴火の期間に噴煙高度が低下する (=噴出率が低下、火道径一定であればマグマ上昇の速度低下に等しい) ステージを認めないためである。一方、1 回目の準プリニー式噴火後の噴火低調期 (1/26, 19:00 から 1/27, 2:00) には、噴出率低下のため、脱ガスの進んだ低発泡度のマグマが火道の頂部や縁などに存在したものと考えられる (e.g. Hammer et al., 1999, BV). この低発泡度のマグマは、2 回目の準プリニー式噴火が開始した際、後続の脱ガスの進んでいないマグマを伴いながら噴出し、Layer3-up として堆積した。Ichihara et al. (submitted) の空振と地震のデータによれば、噴火低調期 (1/26, 19:00 から 1/27, 2:00) には爆発はなく、準定常的な火道流システムが続いていた。そこで、この時期火道を埋めた低発泡度のマグマは、火道閉塞は起こさなかったであろう。

Layer4 の噴出時期は特定できない。しかし Layer3up から Layer4 にかけての見かけ密度の低下は、2 度目の準プリニー式噴火の間に噴煙高度が上昇することと (e.g. 1/27 2:00 の約 5km < 1/27 4:00 の約 7km), そして実際マグマ溜まりの収縮率も加速している (Ueda et al., 2013) ことと調和的である。しかし Layer3up から Layer4 にかけて軽石サイズが減少することは、噴出率の上昇と調和的ではないので、この点を説明する必要がある。

キーワード: 新燃岳, 準プリニー式噴火, 見かけ密度, 脱ガス, 空振, 噴煙高度

Keywords: Shinmoe-dake, Sub-Plinian eruption, Bulk density, Outgassing, Infrasound, Plume height



## 2000年三宅島噴火時のマグマの移動現象の推定 Hypocentral migration associated with magma intrusion in the 2000 Miyakejima eruption

松山 諒太郎<sup>1\*</sup>; 森田 裕一<sup>1</sup>; 酒井 慎一<sup>1</sup>; 上田 英樹<sup>2</sup>  
MATSUYAMA, Ryotaro<sup>1\*</sup>; MORITA, Yuichi<sup>1</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>; UEDA, Hideki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 防災科技研  
<sup>1</sup> ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> NIED

### 1. はじめに

ダイク貫入は進行方向がテクトニクスな応力に支配される大規模なマグマ移動現象である。ダイク貫入現象の理解は、火山とテクトニクスの理解に重要である。2000年三宅島噴火では、6月末から地震が山頂から北西岸に移動し、その後神津新島付近まで震源が移動した。その後も8月末まで三宅島北西海域で多くの地震が発生し、大規模なダイク貫入が発生したと考えられている。ダイク貫入は、ダイク先端で応力が集中して地震が発生するため、震源移動からマグマの移動が観測できる。つまり、ダイク貫入時の震源分布はマグマの移動に関する情報が得られる重要な手がかりである。本研究は、これまで全体の地震活動が必ずしも詳細に解明されていなかった2000年三宅島噴火活動時の震源分布を精度良く再決定し、それに基づき2000年三宅島噴火に伴う大規模なダイク貫入現象の理解を目指す。

### 2. 解析手法

これまでの解析では、震源域から遠く離れた島嶼部の観測点のデータを用いて震源が推定されていた。7月2日以降は、震源域直上に海底地震計が設置され、そのデータを用いた解析も行われているが、一部の期間だけにとどまっている。そのため、このときの地震活動の全体像が明らかでなかった。本研究では、海底地震計のデータを有し、高精度に震源が推定できる地震を「参照地震」とし、海底地震計が設置されていない時期も含め地震活動度の高かった2000年6月26日から8月31日までの活動全体のできるだけ多くの地震の震源を、参照地震との相対位置で推定するという手法を用いて再決定した。

通常のこのような場合には Double Difference 法が良く用いられるが、この方法ではいくつかの不都合な点が明らかになったため、本研究では以下のような改良を行い、解析した。

(1) 震源精度の高い参照地震の震源を極力動かさないという拘束条件を付けて、参照地震とその他の地震の震源を同時に再決定するように改良した。その際、波形相関を用いた精度の高い初動時間差も利用した。(2) 公開されている Double Difference 法や、これを用いた多くの先行研究では、震源決定の際の速度を成層構造で与えている。これをそのまま利用すると、速度構造の境界で、見かけ上の震源の集中が現れた。この影響を取り除くため、深さ方向に連続な速度構造を利用できるようにプログラムを改良した。

### 3. 結果と考察

この解析により、3000個の参照地震を用いて、約3万個の地震の震源を再決定した。得られた震源分布には以下の特徴が見られる。

(1) 地震活動は、震源が三宅島からその北西海域に大きく移動する活動初期(7月1日まで)と、それ以降の、多くの地震が約2か月間継続して海域で発生する主活動期に分けられる。

(2) 活動初期では、地震はいくつかのクラスターに分かれてバースト的に活動した。三宅島に最も近いクラスターからクラスターごとに時間差を持って北西方向に震源が移動する。三宅島に最も近いクラスターは、それ以外のものと震源の配列方向が異なる。また、このクラスターは活動初期以降には地震がほとんど発生していない。

(3) 主活動期は、ほぼ鉛直の面上(主活動域)で発生している。面の走向は広域応力場の主圧軸方向とほぼ一致している。この期間は、地震が領域の色々な場所でバースト的に発生した。1つのバーストは数時間から半日程度の活動を行い、震源が深部から浅部に移動する活動が多く見られた。また、震源の深さ断面を見ると、震源が分布するほぼ鉛直の断面は、構造境界の存在が示唆される深さ12km付近で鉛直から少し屈曲することが新たに分かった。

(4) 主活動期後半になると、主活動域の両端で、主活動域と震源の配列方向が異なる地震活動が高まった。この時の発震機構解は、広域応力場から期待されるものと一致し、節面を震源分布方向に持つ横ずれ断層であった。

主活動域の大規模なダイクを形成したマグマが、三宅島から水平方向に供給されたか、直下の深部から供給されたかについてはこれまで定説がなかった。本研究は、精度の良い震源分布から、上記に挙げた地震活動の特徴を見出した。さらに、他の観測事実も考慮すると、主活動域のダイクは三宅島のマグマ供給系と独立して存在し、ダイク直下の深部から上昇してきたと考えるほうがより妥当であることが明らかになった。これは、大規模なダイクが必ずしもマグマの水平方向に移動してできるのではなく、深部にある既存のマグマ溜りから上昇し、ダイクを形成する例もあることを示している。

【謝辞】解析には、気象庁、防災科技研、東京都、海上保安庁、海洋研究開発機構のデータを利用した。関係機関の方々に謝意を表します。



SVC53-03

会場:413

時間:4月28日 14:45-15:00

キーワード: ダイク貫入, 2000年三宅島噴火, 震源移動, 地震活動, テクトニクス

Keywords: dike intrusion, 2000 Miyakejima eruption, hypocenter migration, seismic activity, tectonics

## 阿蘇カルデラ西方に分布する花房層の鉱物組成の時間変化 Temporal variation of mineral composition of Hanafusa Formation distributed in the western area of Aso caldera

杉山 芙実子<sup>1\*</sup>; 長谷中 利昭<sup>1</sup>  
SUGIYAMA, Fumiko<sup>1\*</sup>; HASENAKA, Toshiaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科  
<sup>1</sup> Graduate school of Science and Technology, Kumamoto university

阿蘇火山は4回の大規模火砕噴火を起こしたが、時間とともに火砕噴火を起こしたマグマの組成が変化し、阿蘇-4火砕流堆積物には斑晶に普通角閃石が含まれるようになった (Watanabe, 1979)。阿蘇-4直前に噴火した大峰火山、高遊原溶岩にも普通角閃石の微斑晶が認められるので (黒川ら, 2012)、普通角閃石の出現は阿蘇火山のマグマ供給系の変化を知る手がかりになる。花房層は阿蘇-4火砕噴火以前に形成した湖成層で、阿蘇カルデラから西方約20 kmに分布するので、堆積物中に含まれる鉱物を分析し、普通角閃石の出現時期を求めた。

花房層は菊池市亀尾の花房台地に見られ、砂層とシルト層の互層からなる層厚約10 mの地層で (宮本, 1962)、阿蘇-3火砕流と阿蘇-4火砕流の間に形成した。試料採集は菊池市亀尾梶迫?木柑子で行い、梶迫では湖成層に含まれる軽石層、その直上にある砂層を採集、木柑子では阿蘇-4火砕流堆積物と境界を接するシルト層および、花房層模式地の層厚130 cmのシルト層を採集した。境界から150 cmの位置でテフラを確認した。このテフラは花房層の堆積速度から求めた年代が10万年前に相当し、バブル型のガラスを多く含み、構成鉱物の組合せが一致したので、阿多テフラと考え、この広域テフラより上位を上部シルト層、下位を下部シルト層とした。

鉱物分析は、採集した堆積物を水で攪拌し、沈殿した物質をふるい分けし、125-250  $\mu\text{m}$ のサイズのものを用いた。

(1) 下部シルト層からは、斜長石、単斜輝石、斜方輝石の結晶が出てきた。この斜長石は自形結晶が無く、汚れた印象を与える面を持つ結晶がめだった。

(2) 上部シルト層中には下部シルト層では見られなかった普通角閃石と、自形を示す新鮮な斜長石の結晶が含まれていた。普通角閃石は自形を示すものがほとんどであった。単斜輝石と斜方輝石も含まれており、その量は阿蘇-4火砕流堆積物中のものと同程度であった。

(3) 軽石層中の軽石は全岩化学分析の結果、阿蘇-4火砕流堆積物と似通った組成を示したが、黒川ら (2012)、山崎ら (2013) が報告した小谷軽石流堆積物、弁利スコリア流堆積物、大峰火山噴出物の化学組成とは異なる分化トレンドを示した。

(4) 軽石層直上の砂層中の鉱物には、斜長石、普通角閃石、単斜輝石、斜方輝石、不透明鉱物が含まれていた。さらに、下位の軽石層に無いかんらん石が認められた。EPMAで得た鉱物化学組成はWatanabe (1979) が報告したいずれかの阿蘇-4火砕流堆積物に一致するか近いものであった。なお、本研究で調べた試料にはHunter (1998) が阿蘇-4火砕流堆積物から報告したカミングトン閃石は認められなかった。

以上の結果を総合すると、普通角閃石の出現は阿蘇-4火砕噴火の1万年前にさかのぼることがわかったが、明瞭なテフラ層が含まれていなかったため、普通角閃石結晶の由来は不明である。

キーワード: 花房層, 普通角閃石, 阿蘇-4テフラ, 阿蘇-4火砕流

Keywords: Hanafusa formation, hornblende, Aso-4 tephra, Aso-4 pyroclastic flow

## Opx の累帯構造を用いた初生マグマ推定法と四国北東部の HMA マグマ形成場の時空間変化への適用 Estimating composition of primitive magma by using opx, and temporal and spatial change of HMA magmatism in NE Shikoku

森里 文哉<sup>1\*</sup>; 小澤 一仁<sup>1</sup>  
MORISATO, Fumitoshi<sup>1\*</sup>; OZAWA, Kazuhito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科  
<sup>1</sup>School of science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>School of science, The University of Tokyo

沈み込み帯は海洋プレートがマントル内に下降を始め、大陸地殻の形成・削剥が生じる場所であり、プレートテクトニクスの進化を明らかにする上で重要である。沈み込み開始時については、マントルウェッジの温度構造や含水量の時間変化が数値シミュレーションによって推定されてきたが (Iwamori, 2000 など)、物質情報からの制約は少ない。地球内部の温度構造を推定する方法の一つに、マグマを用いることが考えられる (Green, 1981)。その場合まず、マントルと最終的に平衡であった初生マグマ組成を知る必要があるが、結晶分別作用や、沈み込み帯の場合は特に地殻過程 (マグマ混合、地殻混染、脱ガスなど) の影響を除去することが必要となる。また、沈み込み帯ではマントルウェッジ内のマントル流動も火成活動に影響していると考えられており (Tatsumi *et al.*, 1983; 田村, 2003)、そのような上昇流を描き出すためには Sakuyama *et al.* (2009) のようにマグマ形成場の時空間変化を明らかにすることが必要となる。

沈み込みが開始して比較的時間もない場所として、西南日本弧が挙げられる。西南日本弧ではおよそ 17Ma に四国海盆が沈み込みを開始し、沈み込みの進行に伴い前弧域から背弧域にかけて火成活動の場が移行していったとされるが (Kimura *et al.*, 2005)、沈み込み帯の具体的な温度構造の変化については明らかになっていない。西南日本のうち、瀬戸内火山岩帯ではマントルカンラン岩と平衡に共存する高 Mg 安山岩 (HMA) が活動し、マントルウェッジや沈み込む海洋プレートの温度構造を含めた議論がなされてきたが (Tatsumi & Hanyu, 2003 など)、初生マグマ組成推定時にマグマ混合や脱ガスの影響を考慮すること、マグマ形成場の時空間変化を考慮することなど、未解決の問題が残されている。

今回我々は、波動累帯構造を示す Opx を用いたメルト組成の時間変化の推定法を考案し、瀬戸内火山岩帯に産する HMA の初生マグマ組成推定を試みた。そして初生マグマ組成の時空間変化から、マグマ形成場の推定を試みた。

対象とした HMA は四国北東部、香川県中部の城山地域 (Sato, 1982 など) に産出するものうち最も初生的 ( $\text{SiO}_2$ :57.3wt%,  $\text{MgO}$ :8.56wt%,  $\text{Mg\#}$ :69.3) なものである。斑晶としてカンラン石、Opx、少量の Cpx を含む。EPMA で斑晶組成の定量分析を行ったところ、カンラン石は正累帯構造を示し  $\text{Mg\#}$  の最高値 (87.6) が噴出物組成から計算される平衡値 (88.7) を下回るため、噴出物組成をもつメルトから閉鎖系で晶出したと判断した。一方 Opx には逆累帯構造のものや波動累帯構造を示すものがあり、それらの外形や組成境界が自形を示すため、結晶成長か接触したメルトからの元素拡散によって形成されたと判断される。その中に噴出物との平衡値 (88.8) よりも高い  $\text{Mg\#}$  (最大 91.5) を示すゾーンが存在し、カンラン石に比べより未分化なメルト組成を記録していると考えられる。またこれらの Opx の累帯構造に見られる組成変化は異なる斑晶間で一致するため、共通のメルト組成変化の様々な時間ステージを反映していると考えられる。

噴出物から初生マグマ組成を復元するには、Putirka (2005) のようにメルトが最も En 成分に富む Opx と平衡になるまで、分別されたカンラン石や Opx を加え戻すことが考えられる。ただし、マグマ混合によってできたメルトを出発点として結晶分別作用を補正すると、初生マグマ組成として誤った推定値が得られるため、混合前のマグマ組成を推定する必要がある。マグマの混合率を評価するために、例えば Kuritani (1998) はマグマ溜まり内の温度、含水量によって晶出する斜長石組成が異なることを利用して、噴出物に含まれる斜長石の累帯構造のパターンと量比を用いることを試みている。

以上を踏まえ、次のようにメルト組成変化を推定した。①融解実験の結果から Opx-メルト間の分配係数をコンパイルし、Opx を晶出させるメルト組成を推定。②結晶分別による組成変化トレンドとマグマ混合による組成変化トレンドをモデル計算と比較して区別。③Opx の累帯構造パターンと量比から混合率を推定し、マグマ混合が想定される場合には混合マグマの端成分を推定。④マグマ混合を除去した結晶分別トレンドに従い、最も En 成分に富む Opx とメルトが平衡になるところを初生マグマ組成とする。

香川県西部、七宝山地域 (川畑・周藤, 2000) の HMA に同様の手法を適用し、城山地域と比較して初生マグマ組成の空間変化からマグマ形成場を推定した。

キーワード: 沈み込み帯, 西南日本, 初生マグマ, マグマ混合, 高 Mg 安山岩  
Keywords: subduction, Southwest Japan, primitive magma, magma mixing, High-Mg andesite

## 霧島火山, 最近1万年間の活動ステージ区分と南九州の火山活動との関連について The relation of volcanic stages for the recent 10000 years of Kirisima and Southern Kyushu volcanoes

田島 靖久<sup>1\*</sup>  
TAJIMA, Yasuhisa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 日本工営  
<sup>1</sup> Nippon Koei Co., Ltd.

霧島火山は、加久藤火砕流噴火を境に古期霧島火山、新期霧島火山に分けられているが(井村・小林, 1991)、新期霧島火山、特に最新期の火山活動に関する活動期の分析はなされて来なかった。近年、新燃岳の1万年間の活動史より、新燃岳は活発な活動期と静穏な時期を繰り返していた火山であることが示された。その活動期は、5.6~4.5 cal ka BP、2.7~2.3 cal ka BPであり、2011年噴火は享保噴火から始まる最新の活動期に位置づけられる(田島・他, 2013)。加えて、4.5 cal ka BPと2.7 cal ka BPの間に中岳を起源とするテフラが複数層あることが判明し、霧島火山全体の活動を見直す必要性が生じた。なお、新燃岳と中岳起源の各テフラの間に挟まれる土壌厚から、中岳では4~3 cal ka BPの間に噴火が起きていた可能性が高いと推定される。一方、えびの高原の噴火活動史の解明より、9 cal ka BPに不動池溶岩が噴出し、4.3 cal ka BPに韓国岳の北斜面で水蒸気噴火に伴う岩屑なだれが発生し、1.6 cal ka BPに不動池で再度水蒸気噴火が発生し、今まで知られていなかった時期に噴火活動が生じていたことも明らかになった。

以上の結果と、井ノ上(1988)による古高千穂、高千穂峰火山、筒井・他(2007)による御鉢火山、井村(1994)の噴火活動履歴を加えて霧島火山全体の火山活動を考察した場合、1万年より若い期間の霧島火山の活動は3つのステージに区分可能となる。はじめに9.0~8.0 cal ka BP頃のえびの高原での溶岩噴出、新燃岳での溶岩噴出活動から始まり、8.1~6.8 cal ka BPに高千穂峰(井ノ上, 1998; 奥野, 2002)の成長、6.5 kaのEcテフラの頃まで続いた。この古高千穂・高千穂峰火山の成長によって特徴付けられる9.0~6.5 cal ka BPの時期は霧島火山全体の活動度が高まる活動ステージ(ステージC)と考えられる。その後、5.6 cal ka BP頃までは霧島火山全域での噴火活動が低調となる。続いて、5.6 cal ka BPに新燃岳において準プリニー式噴火が生じ、その後新燃岳では断続的に溶岩を流出させ4.5 cal ka BPに準プリニー式噴火を行った。4.6 cal ka BPには御池でのプリニー式噴火、4~3 cal ka BPには中岳で噴火が生じ、2.3~2.7 cal ka BPの新燃岳の活動が起きた。5.6~2.3 cal ka BPは、新燃岳・中岳の成長、御池の噴火で特徴付けられるステージであり、4.5 cal ka BP頃には霧島火山全体で活動度が高まった(ステージB)。その後、1.6 cal ka BP頃までは霧島火山全体の噴火活動が低調となった。最新の活動は、1.6 cal ka BP頃のえびの高原の噴火が始まりと考えられるが、本格的には約1.3 cal ka BP頃に誕生した御鉢(筒井・他, 2007)の活動からと推定される。初期は御鉢の成長が中心であったが、16~17世紀にはえびの高原、18世紀には新燃岳で享保噴火が発生した(ステージA)。なお、17~18世紀は御鉢、新燃岳、えびの高原と霧島火山全体で噴火が生じており、霧島火山全域の活動度が高まった時期と考えられる。つまり、霧島火山では、新燃岳だけでなく霧島火山全域において、活動が活発になる時期と静穏になる時期を繰り返しており、現在は約1600年前頃から続くステージの中にあると考えられる。霧島火山の活動時期が明らかになる事によって、桜島火山など南九州の火山との活動の関係についても議論を行う環境が整いつつあり、霧島と桜島火山では多くの似た噴火年代値を示し、広域な運動との関連が示唆される。

キーワード: 霧島火山, ステージ, 新燃岳, えびの高原, 長期活動史

Keywords: Kirishima Volcano, Volcanic stage, Shinmoedake, Ebinokogen, Long term activity



## アイスランド・ルートレスコーン調査報告ー火星のアナログとしてー Investigation report of rootless cone in Iceland -as an analogue of that of on Mars-

野口 里奈<sup>1\*</sup>; 猿谷 友孝<sup>1</sup>; 鈴木 由希<sup>1</sup>; 栗田 敬<sup>1</sup>  
NOGUCHI, Rina<sup>1\*</sup>; SARUYA, Tomotaka<sup>1</sup>; SUZUKI, Yuki<sup>1</sup>; KURITA, Kei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Rootless cone is a pyroclastic cone which has a variety of shape. It's formed by lava-water interaction [e.g. Fagents et al., 2002, Hamilton et al., 2010], but details such as formation conditions are still unknown. Since pervasive existence of various types of rootless cones has been clarified on the martian surface, terrestrial rootless cones are key to understand Martian volcanism and strong interests have been paid in the field of planetary science. We surveyed rootless cones in Iceland by RTKGPS (Real-Time Kinematic GPS) with material-scientific investigations on the constituent materials.

We investigated 3 rootless cone fields; Myvatn (northern Iceland), Landbrot (eastern Iceland), and Thjorsardalur (western of Hekla volcano). In this presentation, we will focus on Myvatn area. In Myvatn, rootless cones were formed by lava-lake water interaction. The lava is basaltic, and emanated from the fissure which locates in east of the lake [Thorarinsson, 1951], and flowed into the lake. We mapped more than 500 rootless cones by aerial photo survey. Most of cones locate around the lake, but some cone locates in in the down-flow region (40 km far from the lava source) area. In Myvatn, here exists unique rootless cone which has an inner cone in the summit crater. We named this as double cone. We focus on this type and conducted detailed morphological survey.

We found that slope angle of rootless cone depends on its size. For double cone, inner cone has gentler slope than that of outer cone. In case of single cone (no inner cone), large cones have steeper slope than that of small cones. Also, large cones have constant slope (repose angle: 32-33 degree), despite the slope angle of small cone varies. In case of the double cone, we found that the constituting material of the inner cone differs from that of the outer cone. The component material of the outer cone is lapilli - coarse ash size pyroclast. On the other hand, that of the inner cone is welded pyroclasts or agglutinate. For small cones, the summit part is covered with agglutinate. These differences should indicate different condition of the formation such as the amount of available water/heat supply by magma.

A We measured bulk chemical composition of the lava and the pyroclasts by XRF confirming no significant change along lava flow traveling. We also measured bulk density and size distribution of the pyroclasts of the rootless cones. We found density of the lava concordantly increases with traveling distance, which means bubbles progressively escaped from the lava during traveling while the formation of rootless cone seems not to be influenced by the vesicularity of lava. The size distribution seems to be correlated with the slope value of the cone, which strongly suggests the control of fragmentation on the formation of rootless cone.

キーワード: ルートレスコーン, アイスランド, 火星, ミーヴァトン, ダブルコーン

Keywords: rootless cone, Iceland, Mars, Myvatn, double cone

## 陥没カルデラを形成する大規模火砕噴火におけるマグマ溜まりのサイズおよび噴出率 Volume of magma chamber and eruption ratio for caldera collapse

下司 信夫<sup>1\*</sup>  
GESHI, Nobuo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

カルデラの陥没メカニズムを、単純なピストンシリンダーモデルを適応してモデル化し、実際の陥没カルデラ形成噴火の前駆噴火の噴出量や総噴出量と比較することにより、陥没カルデラ形成噴火の発生条件を推測した。

陥没カルデラは、マグマ溜まりから比較的短時間に大量のマグマが噴出することによりマグマ溜まりの天井が陥没して形成される。マグマ溜まり天井の破壊と沈降によって、マグマ溜まりに蓄積されている大量のマグマの噴出が促進されることから、陥没カルデラの形成条件は巨大噴火を駆動する重要なメカニズムである。多くのカルデラ形成噴火では、陥没開始に先立ち多量のマグマが短時間のうちに噴出するため、この前駆噴火の推移と駆動メカニズムの理解は、巨大噴火全体の推移を理解するために不可欠である。

多くのカルデラ火山は、カルデラ形成噴火の前後にも様々な規模の噴火を繰り返すが、最大規模の噴火でのみ陥没カルデラが形成される。それよりも小規模な噴火はより高頻度で発生するが、陥没カルデラの形成には寄与しない。たとえば、始良カルデラから29kaに発生したAT噴火では、陥没に先行して大隅降下軽石が噴出し、ついで陥没開始後に入戸火砕流が噴出し、現在の始良カルデラが形成されたと考えられている。一方、カルデラ形成前に噴出した福山軽石の噴火(～10km<sup>3</sup>DRE)や、後カルデラ期最大の噴火であるP14(Sz-S)噴火(～4km<sup>3</sup>DRE)では顕著なカルデラ陥没は発生しなかったと考えられている。始良カルデラの場合、陥没に先行して噴出した大隅降下軽石(～40km<sup>3</sup>DRE)の噴出量は、顕著な陥没を起こさなかった最大噴火の噴出量を上回る。このような関係は、噴出量の推定が比較的精度良く行われている他のカルデラなどでも認められる。比較的若い14の陥没カルデラの例では、陥没開始までの噴出量はカルデラのサイズ(径)と正相関があり、大型のカルデラほど前駆噴火の噴出量は大きい。

陥没カルデラ形成に必要な噴出量を、ピストンシリンダー型モデルを用いて推定した。このモデルでは、マグマ溜まりの減圧量がカルデラブロックを沈降させる駆動力、環状断層の摩擦がカルデラブロックの沈降に対する抵抗力となる。マグマ溜まりの減圧量は、マグマ溜まりの総体積に対するマグマ噴出量の比(噴出比)とマグマの体積弾性率にコントロールされる。環状断層の径が大きいほど、すなわち大型のカルデラほど陥没開始までの噴出比は小さくなる。大型のカルデラでは、より大量のマグマがマグマ溜まりに存在する状態でマグマ溜まりの天井が破壊されるため、より大量の火砕流を陥没開始後に噴出し得る。

このモデルではカルデラ断層の形状を円筒形と単純化し、マグマの体積弾性率を一定と仮定しており、さらにカルデラ断層の径や深さの推定にも不確実性があるため、これらの見積もりには大きな誤差が伴うが、陥没開始までの噴出量を噴出比で割ると、それぞれの火山の陥没前のマグマ溜まりの体積と、陥没開始時及び噴火終了時の噴出率が求められる。環状断層の直径が約15km、マグマ溜まり天井の深さが約6kmと考えられる始良カルデラの場合、噴火開始前のマグマ溜まりの体積は約600km<sup>3</sup>であったと推測される。陥没開始までにその約8%が大隅降下軽石として噴出し、陥没開始後にその約60%が入戸火砕流として噴出したと推測される。

キーワード: 大規模噴火, カルデラ火山, マグマ溜まり  
Keywords: large eruption, caldera volcano, magma chamber

## Identification and Geology of Taftan volcano Calderas, Sistan and Baluchestan, Southeast of Iran

### Identification and Geology of Taftan volcano Calderas, Sistan and Baluchestan, Southeast of Iran

Biabangard Habib<sup>1\*</sup>  
BIABANGARD, Habib<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Sistan and Baluchestan University of Zahedan, Iran

<sup>1</sup>Department of Geology, Sistan and Baluchestan University of Zahedan, Iran

The Taftan volcano, Sistan and Baluchestan province, SE Iran, is above 4050 m sea level and currently dormant, showing fumarolic activity near the summit. This volcano is located in a structural zone along the subduction of Oman oceanic crust below the Eurasia plate. Large volcanic centers including Chah-Shahe, Bazman and Taftan in Iran and Soltan in Pakistan have been developed during the Quaternary. Anjerk and Tamandan are two calderas from of Taftan volcano that identified for the first time. These calderas are mostly composed of pyroclastics, lava flows, ignimbrites and tuffs. Various volcanic eruptions had occurred during these calderas formation. The exposed lava flows and pyroclastics of these calderas mainly consist of andesitic and dacitic in compositions. The geochemical evaluation of the major and trace element compositions indicate the magma erupted from this volcano show a calc-alkaline trend.

Keywords: Taftan Volcano, Makran belt, Anjerk caldera, Tamandan caldera, Geochemical evaluation, Iran

スンダ弧東部ジャワ地域ケルト-ウェリラン火山クラスターのカリウム-アルゴン年代：カルデラを有する火山クラスターとの比較  
K-Ar ages of Kelut-Welirang volcano cluster, East Java, Sunda arc: comparison with clusters that hosts large calderas

土志田 潔<sup>1\*</sup>; 高田 亮<sup>2</sup>; 橘川 貴史<sup>3</sup>; 竹内 晋吾<sup>1</sup>  
TOSHIDA, Kiyoshi<sup>1\*</sup>; TAKADA, Akira<sup>2</sup>; KITSUKAWA, Takashi<sup>3</sup>; TAKEUCHI, Shingo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所, <sup>2</sup> 産総研地調, <sup>3</sup> セレス  
<sup>1</sup> CRIEPI, <sup>2</sup> AIST, GSJ, <sup>3</sup> Ceres, Inc.

Sunda arc, Indonesia, has many active caldera volcanoes and is well suited for studying the evolution of large caldera systems. Volcano groups are distributed in clusters at Sunda arc. Two adjacent volcano clusters in East Java, Semeru-Tengger and Kelut-Welirang, are compared. Semeru-Tengger volcano cluster consist of Semeru and Tengger-Bromo volcano systems. Tengger-Bromo system has formed Ngadisari and Sand Sea calderas. Kelut-Welirang volcano cluster consists of multiple active volcano groups and has comparable footprint and cumulative volume as Tengger-Bromo. However, large-scale eruptions in the order of 10km<sup>3</sup> or greater have not taken place at Kelut-Welirang volcano cluster.

Kelut-Welirang volcano cluster consists of five volcano groups. They are Penanggungan, Arjuno-Welirang, Argowayan, Butak-Kawi-Panderman, and Kelut from northeast to southwest. They are classified as active volcanoes except for Argowayan, and Kelut is currently active. However, their formation ages are not understood.

K-Ar dating is performed in order to determine and compare the long-term activity of the two clusters. Mass fractionation correction method is used for argon measurement, for many of the samples are very young. Samples with crystalline groundmass are selected for dating to obtain precise and reliable age. Groundmass is separated from phenocryst and used for dating.

The active periods and the ages of the volcano groups are identified by K-Ar dating as follows. (a) Argowayan, which consists about half of the volume of Kelut-Welirang cluster, has formed between 1.0-0.8Ma. (b) There was long dormancy in the area of this cluster, and the four volcano groups have formed within the past 0.2 m.y. (c) Kelut has started to form by 0.2Ma, and has repeatedly produced lava domes to present. (d) Much of Butak-Kawi-Panderman has formed around 0.2Ma. The group is considered active, but the long-term eruption rate of the group has decreased substantially since the early stage of edifice building activity at 0.2Ma. (e) Arjuno-Welirang is younger and likely started to form by 0.1Ma. (f) Penanggungan is the youngest volcano group and likely to have formed within the past 0.05 m.y.

The obtained ages allow us to compare Kelut-Welirang and Tengger-Semeru volcano clusters. Although Kelut-Welirang cluster has comparable volume to Tengger-Semeru, it consists of separate volcano groups formed at different ages. The long-term eruption rate for the past 0.2Ma is relatively large, but much of the erupted volume is contributed from new volcano group. In contrast, the volcano edifices of Semeru-Tengger have almost entirely formed from 0.5Ma to present. The eruptive centers are concentrated at Tengger and Semeru, and have repeated active periods.

キーワード: 年代測定, 第四紀, インドネシア, 質量分別補正法  
Keywords: age dating, Quaternary, Indonesia, mass fractionation correction method



阿蘇火山中央火口丘群, 完新世火山噴出物の岩石記載, 化学組成と古地磁気層序との対比  
Correlation between petrology and magneto-stratigraphy of Holocene volcanic products from Aso central cones

平川 雄一郎<sup>1\*</sup>; 長谷中 利昭<sup>1</sup>; 望月 伸竜<sup>2</sup>; 森 康<sup>3</sup>  
HIRAKAWA, Yuichiro<sup>1\*</sup>; HASENAKA, Toshiaki<sup>1</sup>; MOCHIZUKI, Nobutatsu<sup>2</sup>; MORI, Yasushi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 熊本大・院・自然科学研究科, <sup>2</sup> 熊本大学大学院先端機構, <sup>3</sup> 北九州市立自然史・歴史博物館  
<sup>1</sup>Grad School Sci & Tech, Kumamoto Univ., <sup>2</sup>Priority Organization for Innovation and Excellence, Kumamoto University,  
<sup>3</sup>Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

阿蘇中央火口丘群北西域に分布する 6 種類の溶岩 (中岳溶岩, 赤水溶岩, 杵島岳溶岩, 往生岳溶岩, 米塚溶岩, 上米塚スコリア) について, Miyabuchi et al. (2012) や弥頭ら (2013) が古地磁気方位を報告した 25 サイトから火山岩試料を採集した。採集試料について岩石記載と全岩化学組成を行い, 古地磁気方位や <sup>14</sup>C 年代に基づく Miyabuchi (2009) の層序と対応させた。

杵島岳噴出物は古地磁気方位が異なり, 活動時期が約 1000 年違うアグルチネートと溶岩流に分けられるが, それぞれの岩石記載から, 鉱物組み合わせは同一であるが, 石基の組織, 斑晶モード組成, 全岩化学組成が異なることがわかった。アグルチネートは <sup>14</sup>C 年代値から約 4000 年前頃と推定されている杵島岳スコリアと化学組成が一致した。

往生岳溶岩は土壌を挟む 2 枚の溶岩が露頭で確認され, 古地磁気方位も異なるので, 時間間隙を持つ 2 枚の溶岩流 (下位, 上位) に分けることができた。しかし, 岩石記載や全岩化学組成からは違いはみられなかった。

アカホヤ火山灰より若い年代を持つ 6 種類の溶岩は全て同じ斑晶鉱物組合せを持ち, 肉眼観察でも違いはほとんど認められないが, 噴出年代の違いに対応した化学組成の違いを見いだすことができた。また同時噴火の可能性のある溶岩 (杵島岳溶岩, 往生岳溶岩下位, 上米塚スコリア) についても化学組成の違いは SiO<sub>2</sub> で約 1 %程度で, 大きな違いはなかった。完新世の一連の溶岩は共通のマグマ供給系よりマグマが異なる火道を通して噴出した可能性が考えられる。

キーワード: 阿蘇中央火口丘群, 火山噴出物, 完新世, 古地磁気方位, 岩石記載, 化学組成

Keywords: post-caldera central cones of Aso volcano, volcanic products, Holocene, paleomagnetic directions, petrography, chemical compositions

## 西南日本弧、山口県大津地域に分布する中新世玄武岩類の成因 Magma genesis of Miocene basalts from Ootsu district, Yamaguchi Prefecture, SW Japan arc

東山 陽次<sup>1</sup>; 長谷中 利昭<sup>1\*</sup>; 柴田 知之<sup>2</sup>; 芳川 雅子<sup>2</sup>; 永尾 隆志<sup>3</sup>

HIGASHIYAMA, Yoji<sup>1</sup>; HASENAKA, Toshiaki<sup>1\*</sup>; SHIBATA, Tomoyuki<sup>2</sup>; YOSHIKAWA, Masako<sup>2</sup>; NAGAO, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>熊本大・院・自然科学研究科, <sup>2</sup>京都大・院・理・附属地球熱学研究施設, <sup>3</sup>(元)山口大・院・理工学研究科

<sup>1</sup>Grad School Sci. & Tech., Kumamoto Univ., <sup>2</sup>Beppu Geothermal Res. Lab., Kyoto Univ., <sup>3</sup>Grad School Sci. & Eng., Yamaguchi Univ.

山口県大津地域の中新世玄武岩類(以下、大津玄武岩類)は、日本海沿岸の角島、油谷島~向津具半島、青海島にかけてそれぞれ独立した溶岩流主体の火山として分布している。大津玄武岩類は、地質層序、岩石記載、全岩化学組成に基づいて、単斜輝石かんらん石玄武岩(COB)とかんらん石玄武岩 Magnetite-Rich type Basalt (MRB) 1・2 とかんらん石玄武岩 Magnetite-Poor type Basalt (MPB) の4グループに細分される。MRB1・2はFeO\*やTiO<sub>2</sub>に富むのに対し、MPBはSiO<sub>2</sub>やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に富む特徴を有する。MRB1・2、COBはアルカリ玄武岩、MPBはソレライトに区分される。本発表では、大津玄武岩類を対象に地質学的・岩石学的・地球化学的検討から、マグマの成因と起源マンツルの岩石学的性質について議論する。

各グループのかんらん石のMg値は高く、それと平衡にあるメルトは未分化マグマの組成を保持することが推定される。MRB、MPBはマスバランス計算によりそれぞれ異なったいくつかの段階的な分別結晶作用の過程を経たと予想されるが、両者は共通の初生マグマからの分化では説明することはできない。各グループの初生マグマは、MRB1、MRB2、COB、MPBの順に、マンツルとの最終平衡深度が浅くなり、部分溶融度が高くなる。始源マンツルで規格化したmulti trace element plotsでは、大津玄武岩類はLIL元素(Rb, Baなど)に富み、NbやSmには負異常が認められる。かんらん石とスピネルの鉱物組成(OSMA)から、MPBは4グループの中で最もfertileなマンツルに由来したと予想され、その他3グループの枯渇度はほぼ同程度で、ハルツバージャイト的である。また、4グループのLREE/HREE比(例えば、La/Yb比)は異なり、単一の起源マンツルの部分溶融度の違いでは説明できない。B/Nb比はマグマがマンツルから分離した深度が浅くなるに従って増加する傾向をもつ。分離深度が最も浅いMPBは他のグループに比べより沈み込み成分に富んだ起源マンツルに由来したと考えられる。

以上のことから、大津玄武岩類の化学組成の多様性は、マンツルプルームが浅部がより大きく沈み込み帯交代作用を受けたマンツル内を上昇し、それらを同化して組成を変化させ、各グループの初生マグマを順々に生成した結果であると考えられる。

キーワード: アルカリ岩, ソレライト, ホウ素, 希土類元素, マンツル

Keywords: alkaline rock, tholeiite, boron, rare earth element, mantle

## 北部フォッサマグナにおけるリフティング-沈み込み帯マグマ活動 Rifting- and subduction-related volcanism of the northern Fossa Magna related to the formation of the Sea of Japan

岡村 聡<sup>1\*</sup>; 稲葉 充<sup>2</sup>; 吉田 尊智<sup>3</sup>; 足立 佳子<sup>4</sup>; 新城 竜一<sup>5</sup>; 池田 保夫<sup>6</sup>  
OKAMURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; INABA, Mitsuru<sup>2</sup>; YOSHIDA, Takanori<sup>3</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>4</sup>; SHINJO, Ryuichi<sup>5</sup>; IKEDA, Yasuo<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 北教大札幌, <sup>2</sup> 石油資源開発, <sup>3</sup> 北教大札幌, <sup>4</sup> 新潟大理, <sup>5</sup> 琉球大理, <sup>6</sup> 北教大釧路

<sup>1</sup>Sapporo, Hokkaido Educ. Univ., <sup>2</sup>Japan Petroleum Exploration Co., Ltd., <sup>3</sup>Sapporo, Hokkaido Educ. Univ., <sup>4</sup>Faculty of Science, Niigata Univ., <sup>5</sup>Faculty of Science, Univ. Ryukyus, <sup>6</sup>Kushiro, Hokkaido Educ. Univ.

北部フォッサマグナ周辺の中新世-漸新世火山岩を対象に、玄武岩質火山岩の岩石化学的性質の時間的・空間的変化を明らかにし、フォッサマグナの形成をともなう日本海の拡大との関連性、陸弧から島弧火山活動の成立過程について考察した。

前期中新世の玄武岩質火山岩は、松川層、大倉層、結東火山岩類に代表され、高 Zr・Nb、高 LREE パターンで、エンリッチした Sr, Nd, Hf 同位体組成のアルカリ玄武岩、高マグネシウム安山岩、未分化玄武岩からなり、東北日本弧の第四紀火山岩には見られないマグマ組成である。これらは、日本海形成以前に存在したエンリッチした大陸リソスフェアマントル起源と考えられる。類似の火山岩は、能登半島の漸新世（高洲山層）-前期中新世火山岩（神和住層、別所安山岩類）にも認められ、糸魚川-静岡構造線より西方におよぶ日本海側の広域において、大陸性リソスフェア起源マグマが活動していたことを示す。さらに大和海盆の Site 794 から採取された前期中新世（22-17 Ma）玄武岩は大陸性玄武岩（J2 lavas; Pouclet et al., 1995）の特徴を示し、北部フォッサマグナ周辺のよりエンリッチした起源物質との共通性を示唆する。

北部フォッサマグナの前期中新世玄武岩の一部は、低 Zr・Nb、低 LREE パターン、低 LIL の低アルカリソレライト玄武岩からなり、より枯渇した同位体組成を示す。同様な玄武岩は、佐渡の前期中新世相川層に貫入するドレライトにも認められる。これらは、大和海盆の Site 794 から採取された玄武岩のうち、大陸性玄武岩に引き続き活動したとされる背弧海盆玄武岩（J3）と類似し、日本海形成をもたらした深部 MORB 様枯渇マントルの湧昇を示唆する。

佐藤ほか（2013）によれば、地震探査に基づく地質構造形成モデルから、北部フォッサマグナ東縁には、北東-南西方向を示す複数の中絶リフト構造が存在し、地殻の薄化、下部地殻の高速度化が見られ、大量の塩基性岩石の併入が推定されている。北部フォッサマグナの前期中新世玄武岩のうち、より枯渇した MORB 様玄武岩はこれら塩基性下部地殻を形成したマグマの噴出相の可能性があり、日本海拡大をもたらした深部アセノスフェアと密接に関連するであろう。同時期に活動したエンリッチ組成の未分化玄武岩は、この中絶リフト構造に近接して分布している。北部フォッサマグナでは、地殻の薄化をともなうリフト形成によって、大陸リソスフェア由来の未分化マグマが噴出しやすい環境にあったと推定される。

中絶リフト域は、日本海拡大後、短縮変形によって逆断層による反転運動に転換したが（佐藤ほか，2013），北部フォッサマグナの後期中新世火山岩類（寺泊層）の一部は、より枯渇した同位体組成を示す低アルカリ火山岩からなることから、MORB 様起源物質に由来するマグマが後期中新世にも引き続き活動したと推定される。

キーワード: フォッサマグナ, 大和海盆, MORB 起源物質, エンリッチマントル

Keywords: Fossa Magna, Yamato Basin, MORB source, Enrich mantle

## 東北日本背弧および孤内における中期中新世火山活動とテクトニクス The Middle Miocene tectonics and volcanism in the intra-arc and the back-arc region, Northeast Japan

細井 淳<sup>1\*</sup>; 天野 一男<sup>2</sup>  
HOSOI, Jun<sup>1\*</sup>; AMANO, Kazuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 茨城大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 茨城大学理学部

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Ibaraki University

東北日本には新第三紀の日本海拡大に伴った海底火山噴出物を主体とする地層(グリーンタフ)が広く分布している。これらの堆積物は、直接の観察が困難であり実態の解明が進んでいない海底火山活動や、日本列島の形成過程を知る手がかりを与える重要な地層である。グリーンタフは、古くより層序学的研究を中心に様々な研究が実施され、1990年初期には層序学的研究に基づいたテクトニクスが構築された(Sato and Amano, 1991 など)。しかし堆積学的な観点に基づいた研究はほとんど行われておらず、古火山体や火山噴火様式の実態は不明であった。本研究では当時の島弧内、背弧の代表的なグリーンタフ分布地を対象とし、堆積相解析に基づいた具体的な古火山体、火山活動の解明した。その上でこれらと比較し、中期中新世のテクトニクスについて検討した。

本研究地域は山形県酒田市周辺の出羽山地および岩手県西和賀町周辺の奥羽脊梁山脈であり、それぞれ当時の背弧および島弧内堆積物の代表的な分布地域である。それぞれの中期中新統の火山岩類・火山砕屑岩類を対象に、堆積相解析を実施した。結果、島弧内では15~14Maに流紋岩質の爆発的な火山活動と小規模な溶岩ドームを復元し、背弧側においては15~12Maに玄武岩質の水中溶岩噴泉型火山活動と少量の安山岩質、流紋岩質火山活動が行われたことが解明できた。

細井ほか(2013)は岩手県西和賀町周辺(島弧内)において、15Maを境に、静穏な環境から活発な火山活動が起こる場に変化すると共に、反時計回りの運動と急激な沈降が起こったことを明らかにした。この時の応力は、鉾脈の配列(大槻, 1989)および帯磁率異方性(細井, 2013)からNW-SE方向の引張応力場と考えられる。一方、出羽山地の本研究地域では、玄武岩質火山活動をもたらしたと考えられる岩脈の配列がNE-SW~ENE-SWS方向に配列しており、急激な沈降場であったことと合わせて考えるとNW-SE~NNW-SSE方向の引張応力場であったと考えられる。これは当時の弧内と同様の応力場である。以上を踏まえると、約15Maの日本海拡大時、急激なテクトニックな変化が起こり、その結果NW-SE方向の引張応力場のもとでバイモーダルな火山活動、沈降運動、回転運動が起こったと考えられる。この時の火山活動は背弧では12Ma頃まで継続したのに対し、孤内では約14Maと早期に終了し、静穏な環境へと変化した。このことは、15Maを境にしたテクトニックな変化が、孤内では早期に落ち着いたともと考えられる。

### 【引用文献】

細井 淳, 2013, 平成24年度深田研究助成報告書, 9-23.

細井 淳ほか, 2013, 堆積学研究, 72, 141-146.

Sato, H. and Amano, K., 1991, *Sedimentary Geology*, 74, 323-343.

キーワード: 中新世, テクトニクス, 背弧, 島弧内, グリーンタフ, 東北日本  
Keywords: Miocene, tectonics, back-arc, intra-arc, greentuff, Northeast Japan



## 新しい岩脈法に遺伝的アルゴリズム組み込み Paleostress analysis of dilational fractures using genetic algorithm

山路 敦<sup>1\*</sup>  
YAMAJI, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学  
<sup>1</sup> Kyoto University

岩脈や鉱脈など (以下, 岩脈), 流体圧で開口した亀裂の方向から, 形成時の応力がわかる. 異なる応力状態で作られた岩脈が混在している場合, 貫入面の極に混合ビンガム分布をフィッティングすることによってクラスター解析し, クラスターごとに 3 本の主応力軸, 応力比, 最大流体圧比が計算することができる (Yamaji and Sato, 2011).

このソフトウェアを公開するために, 遺伝的アルゴリズムを使って計算を高速化することを試みた. EM アルゴリズムを使う従来の方法にくらべて, 計算時間は通常で数分の一になり, また, EM アルゴリズムでは収束しにくかったデータでも遺伝的アルゴリズムなら対処できることが分かった.

キーワード: 実数値遺伝的アルゴリズム, マグマ圧, 混合ビンガム分布, 岩脈, 鉱脈  
Keywords: real-coded genetic algorithm, magma pressure, mixed Bingham distribution, dike, vein

## インドネシア、シナブン火山の活動履歴と噴火シナリオ Eruption History and Future Scenario of Sinabung volcano, North Sumatra, Indonesia

吉本 充宏<sup>1\*</sup>; 中田 節也<sup>2</sup>; Zaennudin Akhmad<sup>3</sup>; Prambada Oktory<sup>3</sup>; 外西 奈津美<sup>2</sup>; 高木 菜都子<sup>2</sup>; Hendrasto Muhamad<sup>3</sup>; 井口 正人<sup>4</sup>

YOSHIMOTO, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; NAKADA, Setsuya<sup>2</sup>; ZAENNUDIN, Akhmad<sup>3</sup>; PRAMBADA, Oktory<sup>3</sup>; HOKANISHI, Natsumi<sup>2</sup>; TAKAGI, Natsuko<sup>2</sup>; HENDRASTO, Muhamad<sup>3</sup>; IGUCHI, Masato<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> インドネシア火山地質災害防災局, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup> Faculty of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup> Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Indonesia, <sup>4</sup> Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

インドネシア、北スマトラに位置するシナブン火山は、2010年8月に有史以来初めての水蒸気爆発を行い、2013年9月再び活動を再開し、2014年1月-2月に溶岩崩落型の火砕流を頻発している。

本火山は約7万4千年前のトバ湖を形成したカルデラ噴火の後に成長したと考えられる成層火山である。本火山は、西側に分布する古期火山岩類と、中央部から東側に分布する新期火山岩類からなる。山体を構成する噴出物は、主に、溶岩流、溶岩ドーム、火砕流堆積物、山体崩壊堆積物、および土石流堆積物である。プリニー式噴火によって生じる降下軽石堆積物が認められない。山頂部は厚い溶岩流(ないしドーム)か溶岩尖塔からなり、火口が南北方向に配列している。中腹部には複数の溶岩流が明瞭な地形を作っている。山麓部には溶岩崩落型の火砕流堆積物が火山麓扇状地を形成している。北東側山麓には山体崩壊堆積物が分布している。2010年以前の最も新しい噴火は、9-10世紀の噴火で、山頂部で溶岩ドームおよびスパインを形成し、南東麓に火砕流堆積物を堆積させている。溶岩類は玄武岩質安山岩?安山岩で、安山岩質のものは角閃石斑晶を含む。古期の火山岩類は新期の火山岩に比べてややK<sub>2</sub>O量で富んでいる。山頂のドームおよびスパインは変質を被っているため、新期の火山岩に比べSiO<sub>2</sub>に富み、Na<sub>2</sub>Oに乏しい傾向を持つ。

2010年8月-9月噴火では5回の水蒸気噴火を起こし、終息した。これら噴出物には新鮮なマグマ物質は確認されていない。2013年9月に入って再び水蒸気爆発を頻発した。11月中旬からは火山灰中にマグマ物質の混入が認められ、11月23日のブルカノ式噴火では北東部に軽石が放出された。また、この噴火では噴煙が崩壊して小規模な火砕流が発生している。その後、12月下旬から山頂火口に溶岩が出現し始めた。2014年1月からは火口をあふれ出した溶岩が山体斜面を流下しはじめ、その先端が崩落し、火砕流を頻発している。現時点で火砕流の最大流走距離4.5kmとなっており、9-10世紀の噴火とほぼ同じ規模である。2013年からの活動で噴出した本質物質の化学組成は、角閃石を含む安山岩で新期の火山岩類の組成範囲中でSiO<sub>2</sub>に富む組成傾向をしめす。これらは9-10世紀噴火の組成範囲内にある。

2010年噴火後に提案された地質調査結果に基づく将来起こりうる最も可能性の高いシナリオは、雲仙普賢岳1991-1995噴火やモンセラート島のスプリエール火山1991年?現在噴火と同様の溶岩流ないし溶岩ドームを山頂部に形成し火砕流を頻発させる噴火である。一方、最も可能性の低いシナリオは、プリニー式噴火のような爆発的噴火を起こすことである。2014年2月時点までの2013年-2014年噴火の推移は、提案された噴火シナリオの最も可能性のあるシナリオと同じ経路をたどっている。

Keywords: Indonesia, Sinabung, volcanic eruption, eruption history, Scenario, pyroclastic flow

## カムチャツカ半島北部, 火山フロントの海溝側に分布する未分化な単成火山群の岩石学的研究 Petrological study of monogenetic volcanoes in the fore-arc region of the northern Kamchatka Peninsula

西澤 達治<sup>1\*</sup>; Churikova Tatiana<sup>2</sup>; Gordeychik Boris<sup>3</sup>; 石塚 治<sup>4</sup>; 中村 仁美<sup>1</sup>; 岩森 光<sup>5</sup>  
NISHIZAWA, Tatsuji<sup>1\*</sup>; CHURIKOVA, Tatiana<sup>2</sup>; GORDEYCHIK, Boris<sup>3</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>4</sup>; NAKAMURA, Hitomi<sup>1</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> ロシア科学アカデミー極東支部火山地震研究所, <sup>3</sup> ロシア科学アカデミー実験鉱物学研究所, <sup>4</sup> 産業総合研究所深部地質環境研究コア, <sup>5</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Institute of Volcanology and Seismology Far East Division, Russian Academy, <sup>3</sup>Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy, <sup>4</sup>Research Core for Deep Geological Environments, AIST, <sup>5</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

太平洋プレートの西部は、千島ーカムチャツカ海溝からオホーツクプレート下に沈み込んでおり、北部はアリューシャン海溝からベーリング海プレート下に斜めに沈み込んでいる。両者はカムチャツカ半島中部で交わり、三重会合点を形成している (Eichelberger *et al.*, 2013)。太平洋プレートの北端はトランスフォーム断層になっており、マントルウェッジが北 (ベーリング海方向) に向かって開いていると予想される。

カムチャツカ半島には少なくとも 29 の活火山が分布する。中央部は、北東ー南西方向に長軸をもつ大地溝帯 Central Kamchatka Depression (CKD) で大きく分けられ、CKD に集中する火山 (例えば Kluchevskaya Group, KG) と、CKD より海溝側 (Eastern Volcanic Front, EVF) と背弧側 (Sredinny Ridge, SR) にも火山があり、3 つの火山列があると考えられている。

EVF は北緯 55 度付近 (Kizimen 火山) を北端とし、スラブ上面の等深線とともに西に折れ曲がり、KG に続くようにも見える。しかし、EVF 北方延長上の、Kumuroch 山地にも単成火山群があることが、少なくとも 1960 年代に確認されている (Fedorenko., 1969)。地震面の観測や重力観測から推定された直下のスラブ深度は約 60km (Gorbatov *et al.*, 1997)、地殻の厚さは約 25-30km である (Park *et al.*, 2002)。先行研究によると、それらの火山岩はカンラン石含有玄武岩ー安山岩であり、高い MgO 含有量 (~11.8wt%) と低い FeO/MgO 比 (1 以下) を示す (Uspensky and Shapiro., 1984)。我々は、航空写真の立体視から、Kumuroch 山地に海溝に沿って南北 50km の間に 15 個の単成火山 (ここでは East Cone 火山群、EC と呼ぶ) を確認し、ヘリコプターによる調査を行った。

本研究では、EC のうち、8 火山の溶岩ブロックから採取した火山岩の薄片観察・岩石記載・全岩化学組成分析を行った。得られた火山岩試料 16 個はほとんどが新鮮な玄武岩、玄武岩質安山岩であり、その内 2 つは捕獲岩を含み、1 つは赤色酸化している。含まれる鉱物組み合わせは、カンラン石、単斜輝石、斜長石、不透明鉱物であり、火山ごとに鉱物の割合が異なる。試料の全岩化学組成はいずれも玄武岩ー玄武岩質安山岩のシリカ含有量を持ち、FeO/MgO は全て 2 以下であり、比較的未分化な性質を示す。

MgO 含有量は、同程度のシリカ量を持つ典型的な島弧火山玄武岩と比較すると、4wt% 程度高く、これは CKD に分布する火山の玄武岩質溶岩と似た特徴を示し、高 Mg 安山岩に類似する、もしくは分類される。高 Mg 安山岩は、マントルの比較的水を多く含む条件での溶融 (例えば、H<sub>2</sub>O 不飽和条件下では 1.0GPa, 1100-1250 °C、H<sub>2</sub>O 飽和条件下では 1.5GPa, 1030-1150 °C) で生じると考えられている (巽., 1995; 2003)。

薄片観察では EC の溶岩中に斜方輝石はほとんど見られない、一方で KG に産する溶岩には斜方輝石が含まれており (Churikova *et al.*, 2013)、当地域の Bezymianny 火山の捕獲岩はスピネルハルツバーサイトとの報告がある (Ionov *et al.*, 2013)。これらは、ソースマントルの鉱物構成、ソースマントルの H<sub>2</sub>O 量、生じたマグマ中の H<sub>2</sub>O 量と斑晶晶出温度・圧力条件のいずれか、もしくはそれらの組み合わせに、地域的な違いがあることを示唆する。

EC 単成火山群の成因を他の地域と対比させながら明らかにすることで、特異なテクトニクス場でのマグマ生成について、より明確な制約が課せられると期待される。

キーワード: 島弧, 高 Mg 安山岩, カムチャツカ半島, 三重会合点  
Keywords: arc, high-Mg andesite, Kamchatka Peninsula, triple junction



## 北海道中央部第四紀大雪火山群の火山地質学および岩石学的研究 —噴出率の長期時間変化とマグマの変遷について— Geology and petrology of Taisetsu volcano group, Japan; Evolution of magma and long-term time variation of eruption rate

石毛 康介<sup>1\*</sup>; 中川 光弘<sup>1</sup>; 松本 哲一<sup>2</sup>  
ISHIGE, Kosuke<sup>1\*</sup>; NAKAGAWA, Mitsuhiro<sup>1</sup>; MATSUMOTO, Akikazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, <sup>2</sup>産業技術総合研究所 地質調査総合センター

<sup>1</sup>Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan, National Institute of advanced Industrial Science and Technology

大雪火山群は、千島弧の最南端に位置する大雪-十勝火山列の北部を構成し、1 Ma 以降に活動した安山岩質の成層火山および溶岩ドーム群を形成してきた。本火山群の全域に及ぶ地質学的研究は国府谷ら (1966) による図幅調査や NEDO (1990) による K-Ar 年代調査についての報告があるが、いずれも古い研究であり、最新の火山学の概念を用いた研究が必要である。我々は、大雪火山群全域の火山地質層序の再検討を行い、さらに噴出物の岩石学的特徴および産業技術総合研究所において新たに 7 試料の試料の K - Ar 年代を明らかにした。その結果、活動の途中で長期の活動休止期が存在し、その後にマグマタイプが大きく変化したことが明らかになった。

本火山群の活動は活動様式、活動時期、噴出中心、岩石学的特徴から 4 つの活動期に区分される。ステージ 1 (1.0~0.75 Ma) では、安山岩質溶岩からなる平坦面状の地形で特徴づけられる、複数の火山体が形成された。これらの火山体は南北方向に配列している。噴出量は約 26 km<sup>3</sup> (DRE 換算, 以下略) と見積もられる。ステージ 2 は、下位のステージ 2-1 (0.6 Ma) と上位のステージ 2-2 (0.35~0.05 Ma) の 2 つに細分できる。ステージ 2-1 の噴出物は、火山群中央部にわずかに分布する溶岩流であり、分布が限られているため、その詳細な規模や構造については不明である。一方、ステージ 2-2 は、噴出中心と活動様式の違いで西部グループと中央グループにさらに細分される。西部グループでは、比較的大規模な成層火山が火山群の北西部に形成された。中央グループは火山群の北~北東部に複数の噴出中心が分布し、小型溶岩ドームを形成するとともに溶岩流を噴出した。ステージ 2 の総噴出量は 23 km<sup>3</sup> と見積もられる。ステージ 3 (約 3 万年前) は、大雪火山群では例外的な爆発的な噴火で特徴づけられる。大規模な火砕噴火によって、噴煙柱形成と火砕流の流出が起こった。降下火砕物は山体東部に分布し、降下火山灰は 180 km 離れた北海道東部で確認されている。噴出した火砕流は、北東・南西方向の深い谷に沿って流下し、現在では溶結凝灰岩として露出している。これらの活動によって、直径 2 km の御鉢平カルデラを形成した。噴出量は約 13 km<sup>3</sup> と見積もられる。ステージ 4 (約 3 万年前~現在) では、主な噴出中心が大雪火山群の南西部に移動し、溶岩ドームや成層火山を形成した。旭岳はステージ 4 の中で最も大型かつ最新の火砕丘であり、その山麓から流出した複数の溶岩流が西麓に広く分布している。旭岳には西方に開口した爆裂火口が形成され、そこでは現在でも噴気活動が活発である。このステージでは、御鉢平カルデラ東部の山腹から流走距離が約 6 km のミクラ沢溶岩が流出した。ステージ 4 の噴出量は約 10 km<sup>3</sup> と見積もられる。

各ステージの噴出量および K-Ar 年代データを基に、大雪火山群の階段図を新たに作成した。各ステージの噴出率は、ステージ 1 は >0.07 km<sup>3</sup>/ky, ステージ 2-1 は >0.01 km<sup>3</sup>/ky, ステージ 2-2 は >0.06 km<sup>3</sup>/ky, ステージ 3 は >0.33 km<sup>3</sup>/ky, ステージ 4 は >0.33 km<sup>3</sup>/ky となった。

階段図からは、0.7-0.4 Ma の活動が非常に低調であることが分かり、0.54-0.40 Ma の K-Ar 年代を示す噴出物は認められなかった。つまり、本火山群においては、0.7-0.4 Ma の間は小規模な活動があったかもしれないが、長い休止期であった可能性がある。また、0.4 Ma 以降は噴出率が増え、ステージ 3 で発生した約 3 万年前の大規模火砕流噴火において噴出率が最大に達し、その後のステージ 4 でも高い噴出率を維持しているようである。

大雪火山群噴出物の岩石学的性質は、ステージ間で区別できるが、上記の噴出率の変化に対応して、特にステージ 1 とそれ以降で大きく変化している。本火山群の岩石は、斑晶として斜長石、単斜輝石、斜方輝石および鉄チタン酸化物を含み、一部の岩石では少量のカンラン石、石英斑晶を含む安山岩~デイサイトであり、しばしば苦鉄質包有物を含む。ステージ 1 の岩石は斑晶として角閃石を含まないが、ステージ 2 および 3 では 0.3~5% 程度の角閃石斑晶を含むようになる。その後、ステージ 4 では角閃石を含む岩石が極端に少なくなる。これら岩石の全岩 SiO<sub>2</sub> 量は母岩では 56.4-69.1 wt. %, 苦鉄質包有物では 52.7-57.4 wt. % であり、中カリウム系列のカルクアルカリ系列に分類できる。ステージ 1 の岩石は、母岩では高い Zr 含有量を持つことから、他のステージの母岩と明瞭に区別できる。しかしながら、苦鉄質包有物の Zr 量はステージ間では区別できない。一方、ステージ 2 とステージ 3・4 で比較すると、SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 図や SiO<sub>2</sub>-Rb 図において、母岩は珪長質側で発散する異なるトレンドを示す。これらの 0.7?0.4 Ma の噴出年代において火山活動が低調になったこと、また、その年代を挟んで特に珪長質なマグマが大きく変化したことは、島弧会合部でのテクトニクスの変化を反映していると考えられる。



SVC54-03

会場:411

時間:5月1日 09:30-09:45

キーワード: 火山, 長期噴出率, 形成史, 大雪, 地質と岩石, マグマ変遷

Keywords: Volcano, Eruption rate, Formation history, Taisetsu, Geology and petrology, Transition of magma

## 浅間前掛火山の降下火砕堆積物からみた噴火推移の復元精度 Reconstruction accuracy of eruptive sequence inferred from the pyroclastic fall deposits of the Asama-Maekake volcano

安井 真也<sup>1\*</sup>  
YASUI, Maya<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 日本大学文理学部地球システム科学科  
<sup>1</sup> Dept. of geosystem sciences, Nihon University

浅間前掛火山の降下火砕堆積物に着目して、過去の噴火事例の噴火推移を検討し、その復元精度や火山活動の長期予測の可能性について考える。前掛火山の降下火砕堆積物のうち、A(天明噴火・18世紀)、B'およびB(大治および天仁・12世紀)、C(4世紀)などと呼ばれるものは軽石層を主体とする。時代の古いものでは、六合軽石や、藤岡軽石といった名称のものもある。一方、最近の2009年や2004年噴火は規模が小さく、個々の噴火の痕跡は地質単位としては残されていない。2009年や2004年噴火の堆積直後に採取された火山灰は、主に角張った石質岩片から構成される。天明噴火以降では特に20世紀前半にブルカノ式噴火が頻発したが、A降下火砕堆積物の上位の土壌には石質岩片の粒子が豊富に含まれている。つまり、天明噴火以降、浅間山麓では火山灰・土壌の混合層が形成されつつある。同様の火山灰・土壌混合層はA,B,C,Dの各降下火砕堆積物の下位にも認められるため、過去の大規模噴火のない期間にも、天明噴火以降のようなブルカノ式噴火の活動があったことが示される。一方、大規模噴火の降下火砕堆積物は多数の降下単位から成る場合が多く、主に軽石層から成るが、B', B,E降下火砕堆積物には石質岩片から成る火山灰層も挟まれる。前掛火山の大規模噴火ではブルカノ式噴火とサブプリニー式噴火が断続的に起こる場合もあるらしい。

天明噴火については、A降下火砕堆積物と火口壁層序、それらと火砕流や溶岩流との層位関係、噴出物の層序と豊富な古記録との対応から、細かい時間軸に沿った噴火推移の全体像の議論が可能である(Yasui and Koyaguchi, 2004など)。しかしながら、天明以前の噴火事例になると極端に情報量が減る。B'では火砕流堆積物との層位関係はおさえられるが、B降下火砕堆積物の場合は多数の流下単位から成る火砕流堆積物と降下火砕堆積物の分布方向が異なるために、層位関係が不明である。ただしB降下火砕堆積物には火砕流の灰かぐら由来とみられる火山灰の層が挟在することから、火砕流流出が示される層準が一つある。山頂部の地形やアグルチネートの存在は、天明、大治、天仁の各噴火事例で火砕丘が形成されたことを示唆するが、大規模な火砕成溶岩の流出は天明噴火のみらしい。以上を考慮すると天明、大治、天仁の噴火事例はそれぞれ異なる噴火推移をたどったようである。山体近くでは12世紀以降の堆積物が厚いために、それ以前の堆積物の露出が限定される。CおよびD降下火砕堆積物は大きなたかめ程度であるが、降下単位は複数あるらしい。C降下火砕堆積物は、火砕流堆積物との境界が認められる地点があるが、分布や層序の全体像はわからない。E降下火砕堆積物は、前掛火山の最近の堆積物が分布していない北西山麓においてよく観察でき、降下単位が多いことや火砕流を伴ったらしいことがわかるが、その他の情報に乏しい。

噴火の規模に関して、本研究ではA,A', B', B,C, およびE降下火砕堆積物の等層厚線図を作成した。さらにA,B', Bについては可能な限り降下単位毎の等層厚線図を作成した。これらの図から64cm、16cm、4cmの等層厚線を抽出して異なる噴火や降下単位間で比較した。全層厚の図の64cmの場合は、B, B', C, Aの順に等層厚線の囲む面積が減り、Eが最少である。降下単位別にみると、16cmの場合では、天仁噴火のB-4, B-6, 大治噴火のB'-4は、天明噴火の最盛期のA-21p(0.01km<sup>3</sup> DRE, Yasui and Koyaguchi, 2004)より規模が大きい、B'-1やA'はA-19p(0.003km<sup>3</sup> DRE)より規模が小さいらしい。同様に4cmの場合では、B-2, B-3はA-NNWやNE(0.001km<sup>3</sup> DRE)よりも規模が大きいとみられる。厳密には、風の強さの等層厚線の形状に与える影響や、噴煙の拡大における噴出率の違いの影響、時間経過に伴う堆積密度変化による層厚減少の影響を考慮する必要があるが、64cmの等層厚線が描ける噴火と、最大でも16cmの等層厚線しか描けない噴火あるいは降下単位とでは、噴出量のオーダーが違うということではできただろう。

現時点では、前掛火山の大規模噴火のうち噴火様式や噴出量の時間変化まで議論できるのは天明噴火のみで、それ以前については同様の精度での議論は難しい。また階段ダイヤグラムを作成する場合、特に12世紀以前の噴火事例の総噴出量の見積り精度が極端に落ちることになる。したがって浅間前掛火山の場合は、高頻度で小規模噴火を繰り返す火山に比べて長期的な活動予測が難しいといえる。

## H<sub>2</sub>Oに飽和した島弧ソレイトマグマの結晶分化作用：伊豆大島火山における事例研究 Polybaric crystallization of H<sub>2</sub>O-saturated island arc low-K tholeiite magmas: A case study of the Izu-Oshima volcano

浜田 盛久<sup>1\*</sup>; 岡山 悠子<sup>2</sup>; 金子 隆之<sup>3</sup>; 安田 敦<sup>3</sup>; 藤井 敏嗣<sup>4</sup>  
HAMADA, Morihisa<sup>1\*</sup>; OKAYAMA, Yuko<sup>2</sup>; KANEKO, Takayuki<sup>3</sup>; YASUDA, Atsushi<sup>3</sup>; FUJII, Toshitsugu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 日本科学未来館, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 環境防災総合政策研究機構  
<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>National Museum of Emerging Science and Innovation, <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>4</sup>Crisis and Environment Management Policy Institute

**はじめに：**島弧マグマに含まれる数重量%のH<sub>2</sub>Oは、マグマの発生・分化・噴火過程に大きく影響を及ぼすため、その量や挙動を制約することは重要である。本研究では、伊豆弧の火山フロント上に位置する伊豆大島火山から噴出する島弧ソレイトを例として、火山岩の化学組成と含水マグマ融解実験の既報データを組み合わせることにより、マグマの分化条件（特にH<sub>2</sub>O量）について議論する。

**伊豆大島火山の液組成のバリエーション：**我々は、伊豆大島火山の火山岩の化学組成のデータの中から、液組成を代表すると考えられる無斑晶質火山岩68個のデータを選び出した。火山岩は、液相濃集元素の濃度比の違いから、K/Zr比の低い火山岩(K/Zr<60)とK/Zr比の高い火山岩(K/Zr≥60)の2種類に分類される。これらの2種類の火山岩は、同一の初生マグマからの結晶分化作用によって導くことはできないため、起源マントルが異なるか、またはマントルの部分融解度の違いによって生じたのであろう。本発表ではK/Zrの高い(K/Zr≥60)噴出物のみに焦点を当て、同一の親マグマから結晶分化作用によって導かれた火山岩の組成バリエーションの起源について検討する。

K/Zrの高い火山岩は、高Al/Siトレンドと低Al/Siトレンドという2種類のトレンド、およびそれらのトレンドに挟まれた中間的な組成バリエーションを示す。このことから液は、高Al/Siトレンド上の液と低Al/Siトレンド上の液の混合物であるか、高Al/Siトレンドを導く結晶分化作用と低Al/Siトレンドを導く結晶分化作用との中間的な条件下で導かれたか、のいずれかであろうと考えられる。Hamada and Fujii (2008, *Contrib. Mineral. Petrol.*)による実験的研究によれば、高Al/Siトレンドは~3 wt% H<sub>2</sub>Oの未分化な液から、低Al/Siトレンドはほぼ無水の未分化な液から、それぞれ結晶分化作用により導くことができる。

**島弧ソレイトマグマの含水融解実験：**島弧ソレイトマグマは、Caに富む斜長石(An≥90, ただしリムはAn75)を斑晶にもつことが特徴として挙げられる。Hamada and Fujii (2007, *Geochem. J.*)は、伊豆大島火山の比較的未分化な2種類のマグマ(MA43とMA44, MgO~5 wt%)の含水融解実験(1~6 wt% H<sub>2</sub>O)を250 MPaで行い、晶出する斜長石の組成に及ぼすメルトの組成と含水量の効果を調べた。MA43は高Al/Siトレンド上の比較的未分化な液組成、MA44は低Al/Siトレンド上の比較的未分化な液組成を代表している。MA43試料を融解実験した結果、1~6 wt% H<sub>2</sub>Oの条件下で斜長石がリキダス相であり、斜長石の組成は、ほぼ無水の条件下では~An80であったが、含水量の増加に伴ってCaに富み、メルトの含水量≥3 wt%では~An90であった。MA44試料を融解実験した結果、低含水量(≤2 wt%)下では斜長石がリキダス相であったが、さらに含水量が増加すると単斜輝石がリキダス相として晶出した。斜長石の組成は、ほぼ無水の条件下では~An70であり、含水量の増加に伴ってCaに富むが、メルトの含水量~4 wt% H<sub>2</sub>Oで~An80に留まった。すなわち、Caに富む斜長石(An≥90)は、高Al/Siトレンド上の液(MA43)からは含水量≥3 wt%で晶出できるが、低Al/Siトレンド上の液(MA44)からは含水量に関わらず晶出できない。Caに乏しい斜長石リム(An~75)は、高Al/Siトレンド上の液からは晶出できないが、低Al/Siトレンド上の液からは晶出できる。

**結論：**伊豆大島火山の火山岩は、高Al/Siトレンドと低Al/Siトレンド、およびそれらのトレンドに挟まれた中間的な組成バリエーションを示す。高Al/Siトレンドは~3 wt% H<sub>2</sub>Oを含む未分化な液が、低Al/Siトレンドはほぼ無水の未分化な液が、それぞれ結晶分化作用を行うことによって導くことが可能である。我々は、伊豆大島火山の直下で、少なくとも地下4 kmの深度にあるマグマ溜まり(飽和含水量~3 wt%)から地表付近(ほぼ無水メルト)に至る深度においてメルトはH<sub>2</sub>Oに飽和し、深度に応じて飽和含水量の異なる条件下での結晶分化作用が同時進行していると考えられる。このようなH<sub>2</sub>Oに飽和したマグマのpolybaric crystallizationは、島弧ソレイトマグマの普遍的な特徴であろう。

キーワード: 島弧ソレイト, 火山フロント, Caに富む斜長石, 伊豆大島火山  
Keywords: Island arc low-K tholeiite, Volcanic front, Ca-rich plagioclase, Izu-Oshima volcano

三宅島八丁平カルデラの形成時間-テフラ中の植物痕から推察される噴火間隔  
The change time from magmatic to phreatomagmatic eruption, in the Hachodaira caldera eruption at Miyakejima Volcano

及川 輝樹<sup>1\*</sup>; 下司 信夫<sup>1</sup>  
OIKAWA, Teruki<sup>1\*</sup>; GESHI, Nobuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独) 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup>GSJ, AIST

2000年にカルデラ形成を行った三宅島火山は、約3kaに八丁平カルデラの形成に伴い、八丁平スコリアと八丁平火山灰があいついで噴出した。八丁平スコリアと火山灰中には多数の植物痕が認められ、プラント・オパール<sup>1</sup>の解析からスキ類であることが明らかとなった。噴火後の植生の存在、八丁平スコリアと火山灰の産状、三宅島の土壌生成速度を考慮すると、八丁平スコリアと八丁平火山灰との噴火間隔は長くても1年未満、おそらく数日以内と考えられる。つまり、スコリアの放出するマグマ噴火の後、カルデラ底が沈降した後、それほど間をおかずに八丁平火山灰を生成するマグマ水蒸気噴火が起こった。このようなカルデラ形成シナリオは、Geshi and Oikawa(2008:JVGR)が2000年カルデラ形成噴火でつくったモデルとの類似性が指摘される。

キーワード: 火山, カルデラ, 三宅島, 噴火, ススキ  
Keywords: volcano, caldera, Miyakejima, eruption, Miscanthus



## 伊豆小笠原弧北部，三宅島火山先大船戸期噴出物中に分布する軽石 Pumice deposits of the pre-Ofunato stage distributed in northwest of the Miyake-jima volcano, northern Izu-Bonin Arc

南里 翔平<sup>1\*</sup>; 鈴木 毅彦<sup>2</sup>

NANRI, Shohei<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Takehiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京・院, <sup>2</sup> 首都大学東京

<sup>1</sup>Graduate student, Tokyo Metropolitan University, <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University

伊豆小笠原弧北部の火山島である三宅島は、東京から約 180 km 南の、北西太平洋に位置している。島の北西部には海食崖が続いており、一色 (1960) はそこで淡橙色軽石凝灰岩の存在を報告している。本研究の目的は、この軽石凝灰岩の分布、層序、堆積構造、岩石学的特徴、鉱物学的特徴を詳細に明らかにすることである。本研究では一色 (1960) の軽石凝灰岩を三宅島先大船戸軽石 (OFP) として再定義した。OFP は島の西部から北部にかけて分布している。OFP は AT テフラ (30 ka; Smith et al., 2013) の下位に位置しており、このことは OFP の噴出年代が 3 万年より以前であることを示している。OFP の中には、火砕流様の堆積構造を示す地点がある。

OFP に含まれる  $K_2O$  と  $FeO$  の関係を見ると、 $K_2O$  が低く  $FeO$  が高い傾向が見られた。津久井ほか (2006) や齋藤・宮入 (2008) の示した伊豆小笠原弧の噴出物に対する同様の関係を見ると、前弧側の伊豆大島や八丈島の噴出物は、 $K_2O$  が低く  $FeO$  が高い傾向を示し、背弧側の新島や神津島の噴出物は反対に、 $K_2O$  が高く  $FeO$  が低い傾向を示している。このことから OFP は新島や神津島から漂着したものではなく、前弧側起源の噴出物であることが考えられる。

本稿では、三宅島火山の 3 万年前の噴火が、現在の三宅島の北西部における軽石噴火に特徴づけられることを明らかにした。現段階では OFP の給源や噴火様式を詳細に明らかにすることはできなかったが、今後、火砕流様の堆積構造が見られた露頭を詳細に調べることで、この 2 つの問題を明らかにしたい。

キーワード: 三宅島, 軽石, 三宅島先大船戸軽石, 伊豆小笠原弧北部

Keywords: Miyake-jima volcano, Pumice, Miyake-jima Ofunato Pumice deposit, Northern Izu-Bonin Arc

## 西之島 2013-2014 年噴火における火山島の形成過程 Formation process of a volcanic island during the 2013-2014 eruption at Nishinoshima, Ogasawara, Japan

前野 深<sup>1\*</sup>; 中田 節也<sup>1</sup>; 金子 隆之<sup>1</sup>  
MAENO, Fukashi<sup>1\*</sup>; NAKADA, Setsuya<sup>1</sup>; KANEKO, Takayuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo

日本近海での海底噴火は珍しくなく、海面上に火山体の一部が出現する事例はしばしば報告されている。しかし多くの場合、一時的に陸化しても短期間のうちに浸食により消滅してしまう。新しい火山島が形成されるためには浅海に大量の溶岩が流出し、浸食に耐え得る強固な「島の核」となる部分が形成される必要があるが、そのような条件を満たす比較的規模の大きな海底噴火の発生頻度は高くはない。海域での噴火による陸化過程が詳細に観測・観察されることは極めてまれである。

2013年11月に始まった西之島沖の海底噴火では、溶岩流出が継続し新たな火山島を形成するに至った。新島は1ヶ月半後には西之島と接合し、その後も成長を続けていることから、火山島の誕生と成長の過程に関するさまざまな知見を与える可能性がある。本研究では噴火が確認された直後から、上空からの観察、公開された航空写真や衛星画像（海上保安庁、国土地理院、宇宙航空研究開発機構による）をもとに噴火様式とその推移について解析している。

西之島は大型の海底火山の山頂火口縁に位置するが、2013-2014年噴火は、この山頂火口内の西之島沖南東およそ400 m、水深数10 mの浅瀬で開始した。新島発見直後には海水が火口に浸入することによりスルツェイ式噴火が発生したが、島の成長とともに火口が海面上に達した後は、ストロンボリ式噴火によるスコリア丘形成および溶岩流出へと噴火様式は移行した。その後主火口はほとんど同一の場所に存在し続け、スコリア丘の麓部から継続的に溶岩を流出し続けている。海に流出した溶岩流は水冷および自破砕により浅海底を埋め立てながら流動していると推定され、分岐を繰り返してほぼ全方位に流れて島を拡大している。溶岩流出とともにスコリア丘頂部ではストロンボリ式噴火が継続していることから、マグマは深部から安定して供給され続けていると考えられる。

噴火前の海底地形データをもとに、溶岩の海への流出量および流出率の時間変化を見積もったところ、流出量は2月初旬までの2ヶ月半でおよそ600万 $\text{m}^3$ に達し、流出率は多少の変動を伴うものの $0.5-1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度でほぼ一定である。この値は、日本国内では西之島以外で最も新しい火山島である昭和硫黄島噴火の溶岩流出期（1935年1-3月）の平均流出率およそ $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$  (Maeno and Taniguchi, 2006)と同程度である。一方、新旧の海底地形データの差分をもとに前回1973-74年西之島噴火における噴出量はおよそ2400万 $\text{m}^3$ と推定されることから、今回の噴火では2ヶ月半で前回のおよそ1/4の噴出量に達したことになる。なお、前回の噴火は水深100 m程度から開始し、およそ半年に及ぶ海底噴火のステージの後に新島を形成した。今回の噴火推移や島の成長速度は前回と異なるが、これは今回の噴火が水深数10 m以内の浅海域で開始したためと考えられる。2014年2月初旬の段階で、溶岩の浸食は一部に認められるものの島の面積変化への影響はほとんどないように見える。溶岩の流出状況と前回の噴火経緯を考慮すると、西之島は今後さらに面積を拡大していくと推定される。

キーワード: 西之島, 火山島, 溶岩流, スルツェイ式噴火, ストロンボリ式噴火  
Keywords: Nishinoshima, volcanic island, lava flow, Surtseyan eruption, Strombolian eruption

## 小笠原・硫黄島の旧噴火口で2012-2013年に発生した爆発現象に伴う噴出物の岩石学的特徴 Petrological characteristics of volcanic materials ejected during 2012-2013 explosive events on Ioto Island

池端 慶<sup>1\*</sup>; 田村 知也<sup>2</sup>  
IKEHATA, Kei<sup>1\*</sup>; TAMURA, Tomoya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学生命環境系, <sup>2</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, <sup>2</sup>Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

小笠原硫黄島は東京都区部の南 1250km に位置する北東-南西方向 8.5km、幅 4.5km の火山島である。硫黄島の西部に位置する旧噴火口 (通称: ミリオンダラーホール) では、2012 年 2 月上旬以降、泥や噴石を火口周辺に噴出する小規模な爆発現象が繰り返し発生している (気象庁, 2013)。2012 年 2 月, 2012 年 3 月, 2013 年 2 月, 2013 年 4 月に爆発現象を伴い、火口周辺に放出された泥を採取し、その試料の粒径 250  $\mu$  m-500  $\mu$  m 水洗残渣粒子を、実体顕微鏡と SEM を使用して観察した。

泥試料はいずれも灰色で、その構成物は、遊離鋳物片 (斜長石, 単斜輝石, かんらん石, 鉄チタン酸化鋳物), 比較的新鮮な火山ガラス片, 変質火山ガラス片, 岩片, 変質岩片, 黄鉄鉱集合体からなる (池端・田村, 2013)。泥試料中の変質岩片の比率は 2012 年 2 月の噴出物では高いが、比較的新鮮な火山ガラス片や他の構成物の比率は各爆発間で変化がなかった。SEM 像観察の結果、比較的新鮮な火山ガラス片の表面には、変質によって生じたと思われる小孔が確認された。また BSE 像観察により、火山ガラスの最外部は水和の影響を受けていることがわかった。火山ガラスの内部へ水和が進行する速さは、主に火山ガラスの化学組成, 地下水の化学組成, 堆積時の温度などに依存するため、硫黄島のような地熱活動が活発な場所では火山ガラスの水和の程度が粒子同士で異なることが予想される。そこで、泥試料に含まれる比較的新鮮な火山ガラス片を 400 °C-12 時間加熱し、水和の影響を除去した後に EPMA で分析し、化学組成を決定した。その結果、いずれの比較的新鮮な火山ガラス片も Le Bas et al.(1986) の Total Alkali-Silica 図において、硫黄島に広く分布する粗面岩の領域にプロットされた。また、EPMA で得られた値を主成分元素および微量元素のハーカー図にプロットすると、組成はいずれも EPMA の分析誤差の範囲で一つの領域に収まった。したがって、全試料に含まれる比較的新鮮な火山ガラス片は、旧噴火口の周辺に存在していた火山砕屑物に含まれる比較的均質な化学組成をもつ火山ガラス起源であることが明らかになった。以上の結果、今回の一連の爆発により放出された泥には新鮮なマグマに直接由来する粒子は確認されず、すべて旧噴火口周辺の既存の火山岩, 火山砕屑物やそれらの変質物が水蒸気爆発により放出されたものと考えられる。

海上自衛隊硫黄島航空基地隊硫黄島気象班には試料の採取と現地の情報提供をしていただいた。防衛省, 気象庁ならびに防災科学技術研究所には多方面で便宜を図っていただいた。

キーワード: 硫黄島, 旧噴火口, 泥, 火山ガラス, 水蒸気爆発

Keywords: Ioto Island, the Old Crater, mud, volcanic glass, phreatic eruption

## 阿蘇-4 大規模火砕噴火直前および初期噴出物の鉱物組成 Compositions of minerals in volcanic products from pre- and the early stage of Aso-4 large-scale pyroclastic flow

黒川 聖<sup>1</sup>; 山崎 秀人<sup>1</sup>; 長谷中 利昭<sup>1\*</sup>; 森 康<sup>2</sup>

KUROKAWA, Kiyoshi<sup>1</sup>; YAMASAKI, Hideto<sup>1</sup>; HASENAKA, Toshiaki<sup>1\*</sup>; MORI, Yasushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科, <sup>2</sup> 北九州市立自然史・歴史博物館

<sup>1</sup> Grad School Sci. & Tech., Kumamoto Univ., <sup>2</sup> Kitakyushu Museum of Natural and Human History

大峰スコリア丘形成, それに伴う高遊原溶岩流, 小谷 (おやつ) 火砕流は 9 万年前の阿蘇-4 火砕噴火の直前および開始初期の一連のイベントである。噴出物の全岩化学組成は大峰スコリア丘のスコリア, 62-66 SiO<sub>2</sub> wt. %, 高遊原溶岩, 63-66 SiO<sub>2</sub> wt. %, 小谷軽石, 67-69 SiO<sub>2</sub> wt. % と変化する。大峰・高遊原の組成トレンドは小谷の組成トレンドとはわずかではあるが, 明瞭に異なっている (山崎ら, 2013)。斑晶鉱物組合せは斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 不透明鉱物が共通で, 大峰スコリア・高遊原溶岩では普通角閃石の微斑晶, 小谷軽石では普通角閃石の斑晶が加わる。また斜長石がふるい状組織 (sieve texture) を持つことが特徴である。大峰スコリア, 高遊原溶岩では顕著であるが, 小谷では数が少ない。これらの斑晶鉱物に対して EPMA 分析を行い, 大規模火砕噴火を起こしたマグマ供給系の変化を知る手がかりを求めた。

マグマの組成トレンドの違いに対応して, 鉱物組成でも大峰スコリア・高遊原溶岩と小谷軽石の違いが観察された。高遊原溶岩の斜長石斑晶は An50-An60 のユニモダルな組成分布を持つのに対して, 小谷軽石の斜長石斑晶は An37-An56 の広い組成幅で, 複数のピークを持っている。斜方輝石斑晶の Mg# は高遊原溶岩 74-75 に対して, 小谷軽石 73-74, 単斜輝石, 普通角閃石についても Mg# のわずかな違いが認められる。

角輝石の鉱物化学組成から見積もられる大峰スコリアのマグマの温度は Wells (1977) で約 950 °C、無水での粘性は 10<sup>8</sup> 5.6 Pa・s であった。大峰・高遊原溶岩が阿蘇-4 火砕流噴火直前に噴出したのに対して, 阿蘇-2 火砕流噴火直前に流出した玉来川溶岩 (SiO<sub>2</sub>=61 wt.%) のマグマの温度は 1120 °C、無水での粘性は 10<sup>8</sup> 3.9 Pa・s が報告されている (小林, 2013)。この粘性の差が高遊原溶岩 (100m 厚, 7km 長) と玉来川溶岩 (10m 厚, 10km 長) のアスペクト比の違いを表していると考えられる。

大峰スコリア・高遊原溶岩に顕著に見られる斜長石のふるい状組織と普通角閃石の微斑晶の成長は大規模噴火前のマグマ供給系の進化に重要な制限を加える。ふるい状組織が斜長石の溶融過程を示しているとするれば, 温度上昇 and/or 水蒸気圧上昇の影響が考えられる。これに対して普通角閃石の微斑晶の成長の原因は, 温度低下 and/or 水蒸気圧上昇を示唆する。高遊原溶岩にはマフィック包有物や斑晶鉱物の逆累帯構造は認められない。従ってマグマ混合や温度上昇の可能性は少ない。どのような物理化学条件の変化があったのかは今後の課題である。

キーワード: 阿蘇-4 火砕流, 高遊原溶岩, 大峰火山, 溶岩流

Keywords: Aso-4 pyroclastic flow, Takayubaru lava, Omine volcano, lava flow



溶岩の古地磁気学的推定年代と噴出量からみた桜島・南岳成層火山の形成過程  
Forming process of Minamidake stratovolcano, Sakurajima, inferred from paleomagnetic  
age and volume of lava flows

味喜 大介<sup>1\*</sup>  
MIKI, Daisuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, yoto University

桜島・南岳成層火山を構成する溶岩類のうち、これまで年代が曖昧であった桜島南岳南斜面に分布する有村溶岩の古地磁気学的年代推定を行った。また、南岳起源の溶岩流の体積を推定し、これらを併せて南岳成層火山の形成過程について考察した。有村溶岩の古地磁気方位は偏角  $4.0^\circ$  E, 伏角  $40.5^\circ$  であり、3.1-2.7ka 頃の古地磁気学的推定年代が得られた。その下位の観音崎溶岩の古地磁気学的推定年代は 3ka 頃と考えられる。これらは数百年間のうちに相次いで発生した一連の噴火で流出した可能性が高い。古期南岳の溶岩のうち 3ka 前後に噴出した溶岩の噴出量が大きく、南岳成層火山の主部は 3ka 頃の数百年間にほぼ現在の形にまで急速に成長したと考えられる。天平宝字噴火で噴出した長崎鼻溶岩の体積は約  $0.8\text{km}^3$  と推定され、天平宝字噴火はこれまで考えられていたよりも噴火規模が大きかったと考えられる。天平宝字噴火以降現在に至るまでの新期南岳期にはそれ以前に比べて明らかなマグマ噴出率の増大が認められ、特に安永噴火以降の噴出率が高い。

## マイクロライトの形態 -斜長石マイクロライトの projection- Morphology of microlite -projections of plagioclase microlite-

佐野 恭平<sup>1\*</sup>; 寅丸 敦志<sup>2</sup>; 和田 恵治<sup>3</sup>  
SANO, Kyohei<sup>1\*</sup>; TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>; WADA, Keiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門, <sup>3</sup>北海道教育大学旭川校  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Hokkaido University of Education at Asahikawa

At Tokachi-Ishizawa (TI) rhyolite lava, Shirataki, Hokkaido, northern part of Japan, the interior structure transition can be observed, from the outer obsidian layer to the inner rhyolite layer. Thus TI lava is an appropriate target field for correlating textural characteristics with lava interior structure. In order to obtain insights into the magma ascent and outgassing process of viscous magma, we have analyzed oxide microlites of TI rhyolite lava, suggesting that dominant outgassing process is ductile permeable development (Sano et al., 2013 JpGU meeting). However, we have not examined the morphology of microlite. Morphology of crystal is considered to reflect the effective undercooling of the melt and provide the constraint for ascent process and water exsolution processes. In this study, we focused on the morphology of microlites, especially projections of plagioclase microlites. The projections mean localized growth of crystal from plagioclase surface.

In Shirataki, aphyric rhyolite lavas erupted ca. 2.2Ma and composed of 10 flow units. The TI lava is about 50 m in height and stratigraphic sequences from the bottom are a obsidian layer region, a boundary bounded region of obsidian and rhyolite, and rhyolite layer region. The obsidian layer region consists of a single vesicle-free obsidian about 7 m high. The rhyolite layer region consists of rhyolite layers with variable vesicularity, crystallinity and characteristic scales in layer thickness. The boundary banded region, which is located between the obsidian and rhyolite regions, consists of thin obsidian (<10mm in width) and rhyolite. In this study, we define the obsidian and rhyolite based on the differences in appearance of hand specimens and rock texture. Rhyolite has perlitic cracks in the glass and contains some amounts of crystalline materials, namely, spherulite and lithophysae. In boundary banded region, the fraction of obsidian decreases toward rhyolite layer region.

From the examination by scanning electron microscope (SEM) for thin sections from obsidian layer region, boundary banded region and rhyolite layer region, we found the projection texture in all samples. We measured projection length and number density ( $N_v$ ) of plagioclase microlites for obsidian and rhyolite layer regions. The measurement results show that plagioclase microlites in obsidian and rhyolite layer regions indicate the similar number density.  $N_v$  for obsidian layer region is  $1.8 \times 10^{11} - 3.5 \times 10^{11}$  [ $/m^3$ ] and  $8.2 \times 10^{10} - 3.0 \times 10^{11}$  [ $/m^3$ ] for rhyolite layer region, respectively. However, the length of projection is remarkably different between two regions. The mean values are 2.3  $\mu m$  in obsidian layer region, and 8.7  $\mu m$  in rhyolite layer region. The transition of mean length can be observed in boundary layer region.

Since the difference of projection length reflects the growth rate ( $G$  [m/s]) and growth time ( $t$  [s]) according to the theory of crystal growth (Keith and Padden, 1963; Lofgren, 1971; Rao, 2002), we can estimate the degree of effective undercooling at the formation time of projections. Under the assumption that  $G$  is constant for the time, the length of projection can be given by  $Gdt$ . Assuming the constant growth rate and growth time, the difference in projection lengths indicate that in growth rate, namely, the undercooling. Using experimental values for growth rate and undercooling, it is found that the rhyolite layer region experiences higher undercooling than obsidian layer region by 30 - 70 K. The projection can be formed after the nucleation of plagioclase microlite, which indicate the similar number density in obsidian and rhyolite layer region. Thus projections reflect the different undercooling after the nucleation of microlites. Based on the quantitative analysis of crystal morphology of microlites, we can obtain the insights into the magma ascent process that rhyolite layer region experienced higher undercooling than obsidian layer region.

キーワード: 組織解析, 黒曜石, 流紋岩, 溶岩, 白滝

Keywords: textural analysis, obsidian, rhyolite, lava, Shirataki

## 微量元素の主成分分析を用いた島弧マグマの分化プロセスの解析 Differentiation process of arc magmas revealed by principal component analysis on trace element composition

上木 賢太<sup>1\*</sup>  
UEKI, Kenta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup> Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

マントルと地殻の岩石の溶融の結果として生成されるマグマの化学組成は、地下の物理化学構造や溶融プロセスを反映している。上昇する過程で冷却、減圧を被り噴出するマグマの組成は、マントル、地殻、地表と、組成も温度圧力も異なる3つの場のプロセスの積分値である。マグマの化学組成は、固体地球に存在度が高く鉱物やマグマの構造を作る主体となる主要元素10元素と、地球上の存在度が小さく鉱物やマグマに微量にしか分配されない微量元素に大別できる。主要元素の挙動は場の温度、圧力と組成に支配され非線形である一方、温度や圧力の指標となる。微量元素は非線形性が弱いためリニアな加算性を仮定することができる。また、主要元素と比較して化学反応時の自由度が高いこと、特定の相への溶解度が桁で変化することから、一度何らかのプロセスで得られた特徴は上書きされづらく、特定の相のトレーサーとして用いることが可能である。以上の特徴から、微量元素は溶融・混合や分別のプロセス履歴に敏感である。以上のような微量元素の性質を考えれば、一連の活動の噴出物や隣接する火山噴出物に着目し多変量解析を用いて解析することで、火山岩の化学組成の多様性そのものもたらずプロセスやその数を抽出することが可能であると考えられる。一般的に火山噴出物の微量元素化学組成は組成-組成プロットにおいて一連のリニアな分布を示すため、主成分分析を用いることが妥当である。本研究は、主要元素や岩石学的に特徴の異なる火山で、微量元素組成に主成分分析を適用した。その結果、書く火山の微量元素の組成幅は3成分で説明できること、そして、微量元素主成分と主要元素との関係に着目することで、マグマ生成・分化プロセスを抽出することができることを示した。さらに大スケールの現象を描像するため、東北日本仙岩地域で、25km-25kmの範囲にまたがる17火山で採取された、262試料の14微量元素について同様の解析を行った。複数の火山の噴出物組成に同様の解析を行うことで、火山岩の化学組成幅は普遍的にマグマ混合、冷却と減圧による結晶分化で生成されることを示した。特に安山岩以上のSiO<sub>2</sub>含有量の岩石は、普遍的にマグマ混合で生成されることがわかった。

キーワード: 火山岩, 島弧マグマ, 結晶分化, マグマ混合, 微量元素

Keywords: volcanic rock, arc magma, crystal fractionation, magma mixing, trace element

## 中国北東部・長白山火山におけるマントル含水量：予察的検討 A preliminary estimation of water content of the mantle beneath Changbaishan Volcano, northeast China

栗谷 豪<sup>1\*</sup>; 奥村 聡<sup>2</sup>; 横山 哲也<sup>3</sup>; 伊藤 嘉紀<sup>2</sup>; 中村 美千彦<sup>2</sup>; 魏 海泉<sup>4</sup>

KURITANI, Takeshi<sup>1\*</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>2</sup>; YOKOYAMA, Tetsuya<sup>3</sup>; ITO, Yoshinori<sup>2</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>2</sup>; WEI, Haiquan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪市立大学, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> 東京工業大学, <sup>4</sup> 中国地震局

<sup>1</sup>Osaka City University, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>China Earthquake Administration

In northeast China, Cenozoic intraplate volcanic products are widely distributed. Geophysical studies have suggested that the underlying mantle transition zone is remarkably hydrous (Kelbert et al., 2009) and contains remnants of the subducted Pacific slab (Fukao et al., 1992); therefore, the Pacific slab stagnation and its relation to observed magmatism has received growing attention (e.g., Ohtani and Zhao, 2009; Richard and Iwamori, 2010). Beneath the Changbaishan volcanic field, a prominent low-velocity anomaly with a plume-like shape has been imaged in the upper mantle by P-wave tomography, which is suggestive of an upwelling of a mantle plume from the mantle transition zone (e.g., Zhao et al., 2009). In this study, to characterize the nature of the transition zone-derived mantle plume, the water content of the source mantle is estimated for basaltic products from the Changbaishan volcano.

Basaltic scoria samples were collected from a cinder cone, located about 20 km to the northeast of Tianchi volcano. One scoria sample was used for preliminary analysis of glass inclusions in some plagioclase phenocrysts. Basaltic lavas, which occur with abundant mantle xenoliths, were also collected from the outcrop near the cinder cone to know the primitive magma composition at the volcano. The MgO contents of the scoria and the lava are 5.1 wt.% and 9.1 wt.%, respectively. Major element compositions of quenched glass inclusions in the scoria sample were analyzed using EPMA, and the water contents were estimated by the difference of the analytical total of the major element analysis from 100 wt.%. Through calibration using an in-house standard glass sample of known water content, the water contents of the glass inclusions were obtained to be 0.15-3.4 wt.%. The FT-IR analysis was also performed for one glass inclusion of the estimated water content of 0.15 wt.% by EPMA, which yields the total water content of 0.2 wt.%.

Given that 3.4 wt.% represents the original water content of the melt without leakage, the H<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O ratio of the melt of 0.90 is obtained. If we assume that the H<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O ratio of the melt was not affected significantly by magmatic processes and the ratio is essentially constant in basaltic magmas at Changbaishan volcano, the water content of the primitive magma (2.4 wt.% in K<sub>2</sub>O) is estimated to be 2.2 wt.%. The source mantle for the Changbaishan basalts may contain ~0.5% sediment component (Kuritani et al., 2011), and the Ce content of the source mantle is estimated to be ~1.1 ppm using the Ce content of the sediment component of 57.3 ppm (Plank and Langmuir, 1998) and that of the depleted mantle of 0.77 ppm (Salters and Stracke, 2004). If we assume that Ce and H<sub>2</sub>O behave similarly during mantle melting (e.g., Michael, 1995), the compositions of the primitive basalt lava (Ce: 70 ppm, H<sub>2</sub>O: 2.2 wt.%) yield the water content of the source mantle of ~350 ppm. This estimated water content is significantly higher than that of the normal depleted mantle (~120 ppm; Salters and Stracke, 2004), suggesting that the transition zone-derived mantle plume is hydrous compared with the surrounding ambient upper mantle.

In this preliminary study, we have analyzed only seven glass inclusions in a single sample, and therefore, the water content of ~350 ppm may represent the minimum estimate. It is necessary to increase the number of data by EPMA and FT-IR analyses to more reliably estimate the source water content for the Changbaishan basalts.

キーワード: マントル, 含水量, 中国

Keywords: mantle, water content, China



## オマーンオフィオライトのオフリッジ巨大海底溶岩流の岩石学・地球化学 Petrological and geochemical variations within an off-axial submarine large lava flow from the Oman Ophiolite

大塚 遼<sup>1\*</sup>; 草野 有紀<sup>1</sup>; 金山 恭子<sup>1</sup>; 海野 進<sup>1</sup>  
OTSUKA, Ryo<sup>1\*</sup>; KUSANO, Yuki<sup>1</sup>; KANAYAMA, Kyoko<sup>1</sup>; UMINO, Susumu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学地球学教室

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University

Large submarine lava with thicknesses >100 m and volumes exceeding a few cubic kilometers are not uncommon volcanic constructs of mid-ocean ridges and around Hawaii Islands, yet details of the physical processes of eruption of these large lava flows are poorly understood. The V3 flow of the Oman ophiolite extruded at 90 Ma far off the paleospreading axis as thick lava flows with a minimum areal extent of >11 km by 1.5 km and the maximum thickness >270 m, yielding a minimum estimated volume >1.2 cubic kilometers. The V3 flow was fed by a thick feeder dike in the SW of the flow field and buried off-axial fault-bounded basins with a thick sedimentary cover in ~40 days. The upper V3 flow field consists of compound lobes that merge upstream into larger and thicker sheet-like lava, which grew endogenously as a vast sheet lobe.

Low-T hydrothermal alteration and weathering slightly modified the bulk compositions as indicated by moderate albitization of plagioclase and partial replacement of titanomagnetite and clinopyroxene by titanite and chlorite, respectively. However, strong positive correlations among incompatible HFSEs and REEs and relatively good correlations with major elements besides LILEs and Pb show that these elements were less mobile and preserve primary characteristics. FeO and TiO<sub>2</sub> show moderate increases with a decrease in MgO from 8 to 5 wt%, and then decreases with the decrease in MgO down to 4 wt%. 20-50 times enrichment in Th and depleted HREEs compared to primitive mantle of the V3 flow is similar to differentiated EMORBs.

Whole-rock major and trace element variations through a vertical transect at 8.7 km (T-21) from the feeder dike show fractional crystallization of clinopyroxene and plagioclase, the major phases in the groundmass of the lava, at a pressure of the paleowater depth. The stratigraphic variations show a notable enrichment in MgO and depletion in incompatible elements in the lowermost core, consistent with accumulation of olivine phenocrysts. Enrichment in incompatible elements in the uppermost core of the flow is in accordance with the model that the last solidified, residual melt resided in this horizon.

By contrast, samples collected from the basal crust every 0.5-1 km from the feeder dike, and vertical transects at 6.7 km (T-14) from the dike have whole-rock compositions spread over compositional spaces that could be explained by internal mixing of variably differentiated magmas. Interestingly, incompatible elements like Yb and Ti of the basal crust show increases downflow to ~5 km from the feeder dike and decreases further downflow. Because the basal crust is the quenched lava that came to rest first at that place, samples farther away from the feeder were extruded and emplaced later in the eruptive event. The downflow variations show extrusion of differentiated lava in the middle stage of the eruption and less differentiated lava in early and late stages. Meanwhile, the transect at T-14 is differentiated in the upper and lower crust and less differentiated in the core.

These intraflow variations in the bulk geochemistry indicate supply of less differentiated magma in an early stage of the eruption, which was progressively replaced by mixed magmas of variably differentiated and less differentiated ones toward the end of the eruption. The eruptive sequence of less differentiated to differentiated magmas with increasing FeO suggests extrusion from a density stratified magma chamber with less dense and Mg-rich magma underlain by more dense Fe-rich magma. The internal mixing among variably differentiated magmas with the progress of the eruption and the extrusion of less differentiated magma toward the end of the eruption suggest a renewal of magma toward the end of the eruption caused mixing of newly supplied less differentiated magma with the differentiated magma within the conduit and the lava tubes.

キーワード: オマーンオフィオライト, オブダクション, V3, 巨大溶岩, マグマ組成変化  
Keywords: Oman Ophiolite, obduction, V3, Large Lava Flow, chemical variation geochemistry

## ハイアロクラスタイトの形成メカニズムの解明 Factors governing fragmentation of submarine lava - mechanism of hyaloclastite formation

梅澤 優美<sup>1\*</sup>; 海野 進<sup>1</sup>; 草野 有紀<sup>1</sup>; 金山 恭子<sup>1</sup>; 北村 啓太郎<sup>1</sup>  
UMEZAWA, Yumi<sup>1\*</sup>; UMINO, Susumu<sup>1</sup>; KUSANO, Yuki<sup>1</sup>; KANAYAMA, Kyoko<sup>1</sup>; KITAMURA, Keitaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学地球学教室

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University

Hyaloclastite is water-lain volcanic breccia embedded in a matrix of glassy clasts by fragmentation of brittle lava under thermal stress. Fluidal basalt lava tends to form coherent flows like pillow lava and sheet flows. In contrast, viscous lava such as andesite and dacite is more likely to form hyaloclastite. This preference of hyaloclastite on lava composition indicates that mechanical response of solidified lava under stress is strongly dependent on composition. Fracturing of lava occurs when the rate of stress accumulation exceeds the rate of stress relaxation and ultimately reaches the mechanical strength of the lava. The rate of stress relaxation decreases with the increase in lava viscosity. Therefore, hyaloclastite is more common in viscous silicic lava.

However, the occurrences of pillow lava of dacite and rhyolite are known from the Ogasawara Islands, Unalaska Island, Oman Ophiolite, etc. Pillow lava is commonly associated with hyaloclastite of the same compositions. These examples demonstrate that factors other than lava composition determines fragmentation of lava. Then, the problem arises what are the governing factors that control the mechanical response of lava under stress. We will address these issues through comparative study on glass, quenched melt, of pillow lava and hyaloclastite of variable compositions spanning from basaltic andesite to rhyolite from the Eocene submarine volcanic strata in Chichijima, Ogasawara Islands.

Samples of glass from these sites were analyzed by EPMA for major elements and by SIMS for water contents. Eruption temperatures were estimated by clinopyroxene-liquid geothermometer of Putirka (2008). Crystal number densities of groundmass plagioclase and clinopyroxene were determined on COMPO images and modal abundance of constituent minerals were determined on element distribution maps of EPMA. Bulk viscosity of lava was estimated by the methods of Giordano et al. (2008) and Pinkerton and Stevenson (1992).

Dacite has phenocrysts of clinopyroxene, orthopyroxene, plagioclase and magnetite. Groundmass consists of clinopyroxene and plagioclase microlites and magnetite set in glass. In dacite glass, there is little difference in melt composition, eruption temperature, crystal number density between pillow lava and hyaloclastite. However, lower water content in hyaloclastite glass than in pillow margin glass yields higher bulk viscosity.

Andesite has phenocrysts of clinopyroxene, orthopyroxene, plagioclase and magnetite. Groundmass consists of clinopyroxene and plagioclase microlites and magnetite set in glass. Clinoenstatite xenocrysts enclosed by orthopyroxene rim are occasionally present. Hyaloclastite is higher in crystal number density and mode of groundmass plagioclase than associated pillow lava. Hyaloclastite glass is lower in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> than associated pillow glass, consistent with preferential crystallization of plagioclase. However, the cpx-saturated melt temperatures show little difference between pillow lava and hyaloclastite. Bulk viscosity estimated for the lava to become hyaloclastite is higher than the lava that formed pillows because of the larger crystal number density in hyaloclastite.

The above observations on dacite glass clearly indicate that water played an essential role in formation of hyaloclastite. Degassing either within the conduit or during flowage through lava tubes raised the bulk viscosity of lava and stress relaxation time, resulted in fragmentation of lava to form hyaloclastite. Although water content was not determined for andesite glass, higher crystal number density and modal amount of plagioclase in hyaloclastite with the same temperature as the coexisting pillow lava can be explained by volatile loss which raised the liquidus of plagioclase and its preferential crystallization, resulted in higher bulk viscosity and fragmentation of lava.

キーワード: ハイアロクラスタイト, 小笠原群島父島, 粘性, 水底溶岩流

Keywords: hyaloclastite, the Bonin Islands Chichijima, viscosity, submarine lava

雌阿寒岳, 阿寒富士の噴火史と噴出物の岩石記載  
Eruption history and petrography of Akanfuji in the Me-akan volcano, eastern Hokkaido,  
Japan

佐藤 鋭一<sup>1\*</sup>; 和田 恵治<sup>2</sup>  
SATO, Eiichi<sup>1\*</sup>; WADA, Keiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学教育推進機構, <sup>2</sup> 北海道教育大学旭川校

<sup>1</sup>Institute for Promotion of Higher Education, Kobe University, <sup>2</sup>Hokkaido University of Education at Asahikawa

Me-akan volcano is located in the Akan volcanic field, eastern Hokkaido, and ~250 km inland from the Kuril trench. The volcanic activity of Me-akan volcano began at least a few tens thousand years ago, and eight volcanic bodies with different peaks have been formed.

Akanfuji (1476 m), which is the newest volcanic body in the Me-akan volcano, started its eruptions about 2.5 ka, and the volcanic activity continued for 1,500 years. The eruption products of Akanfuji are composed of scoria fall deposits and lava flows. The scoria fall deposits are distributed from northeast to south from present vent. We described the scoria fall deposits to interpret the complex depositional sequence. As a result, 17 scoria fall layers were recognized for 1,500 years.

Akanfuji had erupted basalts through its history. Two types of basalts (types I and II) are recognized on the basis of phenocrysts assemblage. Type I is orthopyroxene (opx) bearing olivine (ol)-crynopyroxene (cpx) basalt and Type II is cpx bearing ol-opx basalt. They were formed by mixing between different types of basaltic magmas on the basis of the textural and mineralogical evidences.

キーワード: 雌阿寒岳, 阿寒富士, 噴火史, 玄武岩, マグマ混合

Keywords: Me-akan volcano, Akanfuji, Eruption history, basalt, magma mixing

## 渡島大島火山における AD1741 以前の噴火痕跡の発見 Evidence of eruption episodes before AD1741 of Oshima-Oshima Volcano, Hokkaido, Japan

吉本 充宏<sup>1\*</sup>; 中村 有吾<sup>1</sup>; 福原 紘太<sup>2</sup>; 西村 裕一<sup>1</sup>  
YOSHIMOTO, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Yugo<sup>1</sup>; FUKUHARA, Genta<sup>2</sup>; NISHIMURA, Yuichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 北海道大学理学部  
<sup>1</sup>Faculty of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Hokkaido University

北海道南西部に位置する渡島大島火山は 1741-42 年, 1759 年に噴火の記録が残されている。一方, それ以前の活動は歴史記録がなく, 噴火年代や規模は不明である。また, 本火山は, 海洋島火山で無人島であるため, 研究が進んでいなかった。ここでは, 渡島大島火山の噴火履歴を解明するため, 島に上陸して 3 度の地質調査を行い, その結果として最近 3000 年間に複数回噴火した痕跡を確認できたので概要を報告する。

本火山は, 1741 年以降の黒色スコリアに厚く覆われており, 1741 年以降の堆積物が確認できる場所が乏しい。3 回目の調査では, 山頂付近の露頭において山体を広く覆う黒色スコリアの層の下位の地層中に 2 層の白色細粒火山灰層を確認した。これらは火山ガラスの組成から AD1640 年の駒ヶ岳 d 火山灰 (Ko-d) と約 AD940 の白頭山? 苫小牧テフラ (B-Tm) に対比される。

本露頭では Ko-d の上位には土壌層 10cm を挟んで 1741 年以降の噴出物 A (淘汰の良い黒色スコリア層) が層厚 3m 以上堆積している。Ko-d と B-Tm の間には, Ko-d の下位に 3cm の土壌層を挟んで, 層厚 50cm の礫サイズの発泡した新鮮な岩片を含む淘汰の良い降下火砕物層 3 層と細粒降下火山灰層 4 層の互層からなる噴火堆積物 B が確認できる。堆積物 B と B-Tm の間には 8cm の土壌層を挟み, B-Tm の下位は, 層厚 25cm の土壌層を挟んで, 淘汰の良い暗茶褐色スコリアないし黒色スコリアからなる堆積物 C が厚く堆積している。

堆積物 B はその岩相および構成物からマグマ噴火とマグマ水蒸気噴火の堆積物の互層であると考えられる。また, 土壌の形成速度が一定と仮定した場合, 堆積物 B は AD1450 ごろに噴火によってもたらされたと推定でき, 堆積物 C は BC600 年頃と推定できる。一方, これらの堆積物 B および C をもたらした噴火の火山灰は北海道日本海沿岸および奥尻島では確認されていない。本調査の結果, 渡島大島火山は最近 2500 年間に歴史時代の 2 回の噴火を含めて 4 回の噴火活動を行っていたことが明らかとなった。

なお本研究は科研費基盤研究 C 課題番号 24540447 を使用した。

キーワード: 渡島大島, 噴火履歴, 広域テフラ  
Keywords: Oshima-oshima, eruption history, tephra



## 北八甲田火山群北部におけるマグマの組成変化と分化プロセス Compositional variation and magmatic differentiation at the northern Kita-Hakkoda volcanic group

小松 翔<sup>1\*</sup>; 大場 司<sup>1</sup>  
KOMATSU, Sho<sup>1\*</sup>; OHBA, Tsukasa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学  
<sup>1</sup> Akita Univ.

北八甲田火山群は、約 0.6Ma 以降、複数回のマグマ噴火を起こしたとされる第四紀火山である(工藤ほか, 2004; 村岡・高倉, 1988)。本研究では、約 0.4 – 0.2Ma に活動したとされる本火山群北部において、火山層序を構築し、全岩および鉱物化学組成分析を行った。その結果からマグマの組成変化と分化プロセスを解明した。踏査結果と地形解析結果に基づき本地域の火山岩類を下位から八甲田第 2 期火砕流堆積物、寒水沢下部軽石流堆積物、北八甲田北部玄武岩質安山岩溶岩、田茂范岳下部安山岩溶岩、寒水沢上部軽石流堆積物、田茂范岳上部安山岩溶岩、田代平湖成堆積物、鳴沢土石流堆積物、前嶽溶岩、鳴沢台地安山岩溶岩、大崩沢土石流堆積物、大崩沢ブロックアンドアッシュフロー堆積物の 12 層に分類した。層序を基にマグマ組成の時間変化を解明した。本地域における初期 (0.4Ma) の噴出物は、分化したソレイト質玄武岩質安山岩溶岩である。休止期間を挟み、約 0.2Ma に開始した活動では、初期に SiO<sub>2</sub>60% のカルクアルカリ安山岩マグマが噴出し、その後、SiO<sub>2</sub>52 – 58% の比較的低 SiO<sub>2</sub> のカルクアルカリ玄武岩質安山岩からソレイト玄武岩の活動に推移する。初期のソレイト質玄武岩質安山岩の活動は、北八甲田北部玄武岩質安山岩溶岩、休止期間後の安山岩の活動は田茂范岳上部安山岩溶岩、低 SiO<sub>2</sub> のカルクアルカリ玄武岩質安山岩～ソレイト質玄武岩の活動は前嶽溶岩、その後の安山岩の活動は鳴沢台地安山岩溶岩にそれぞれ相当する。本地域の火山岩には斜長石、普通輝石、斜方輝石、かんらん石、不透明鉱物が斑晶鉱物として含まれる。これに加えカルクアルカリ系列岩の一部には融食形石英が斑晶として含まれる。ソレイト系列の斑晶鉱物には、非平衡組織が認められず、開放系マグマプロセスの痕跡は無い。北八甲田火山群のソレイト系列岩の組成変化トレンドは結晶分化トレンドであるとされている(佐々木ほか, 1985; Ohba et al. 2009)。本研究の分析値も同一トレンド上に位置することから、結晶分化作用による組成変化と考えて矛盾は無い。これとは対照的にカルクアルカリ系列に属する岩石には、非平衡組織が認められ、開放系マグマプロセスが示唆される。例えば、Mg に富むかんらん石斑晶と融食形石英斑晶の共存や正累帯構造を示す輝石と逆累帯構造を示す輝石の共存が認められる。カルクアルカリ系列の組成変化は、SiO<sub>2</sub>60% 安山岩と SiO<sub>2</sub>52% のソレイト玄武岩の間でおおむね直線的な組成変化を示すことから両者の混合が示唆される。時間変化に従いマグマの組成が変化することから、マグマの混合比が時間とともに変化したと考えられる。

キーワード: マグマ混合  
Keywords: Magma mixing

## 秋田県湯沢市，三途川カルデラの火山活動史と地質構造 The volcanic history and geological structure of Sanzugawa Caldera, Yuzawa, Akita pre- fecture

大木 郁也<sup>1\*</sup>; 大場 司<sup>1</sup>  
OKI, Fumiya<sup>1\*</sup>; OHBA, Tsukasa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学  
<sup>1</sup> Akita Univ.

秋田県南部に位置する三途川カルデラは、約 1Ma 以前に大規模火砕流を伴うカルデラ陥没により形成した。本地域には、カルデラ形成時に堆積したとされる虎毛山層が分布する。虎毛山層は、下位より虎毛山凝灰岩部層、皆瀬川凝灰岩部層からなる。虎毛山凝灰岩部層は、溶結凝灰岩、火山礫凝灰岩、凝灰質砂岩・黒色頁岩・礫岩の互層からなり、層厚は 900m に達する。皆瀬川凝灰岩部層は、火山礫凝灰岩、凝灰岩、礫岩からなり、層厚は 450m に達する。虎毛山層は、8 層の火砕流堆積物 (PDC-1~8)、土石流堆積物 (DF-1)、湖成堆積物 (LD-1) から構成される。これらの層序は、下位より PDC-1, DF-1, LD-1, PDC-2~PDC-8 からなる。各層の厚さは PDC-1 が 20m, DF-1 が 80m, LD-1 が 140m, PDC-2 が 50m, PDC-3 が 250m, PDC-4 が 200m, PDC-5 が 340m, PDC-6 が 160m, PDC-7 が 90m, PDC-8 が 30m である。火砕流堆積物は、塊状無層理の火山礫凝灰岩からなり、軽石と異質岩片を含む。しばしば、炭化木片を含み、脱ガスや柱状節理が発達する。PDC-4, 6 は火砕流堆積物の基底部はグラウンドサージ堆積物からなる。このグラウンドサージ堆積物には、低角斜交層理が発達し、デューン構造が認められる。このうち PDC-6 は、グラウンドサージ堆積物の下位にグラウンドブレッチャーが認められる。このグラウンドブレッチャーは、最大礫径 2.5m の異質岩片を含む基質支持礫岩からなる。また、PDC-1, 3, 4, 8 は特徴的に溶結相を伴う。溶結相には、ユータキシティック組織やスフェルライトが認められる。土石流堆積物 (DF-1) は、層理が発達し、円礫を主体とする礫支持礫岩からなる。礫は平行に配向し、弱く逆級化する。湖成堆積物 (LD-1) は、黒色頁岩及び凝灰質砂岩、礫岩の互層からなる。黒色頁岩にはラミナが発達し、凝灰質砂岩には葉理・層理が発達し、礫岩は塊状無層理である。湖成堆積物 (LD-1) の上位の PDC-2 は、水中環境での堆積を示唆する。8 層の火砕流堆積物の存在は、本地域では火砕流が少なくとも 8 回発生していたことを示唆する。火砕流堆積物 (PDC-4) の流向方向は、グラウンドサージ堆積物のデューン構造から、北東から南西方向であると推定でき、給源位置は滝ノ原火口であると推定した。休止期間を示す湖成堆積物 (LD-1) が虎毛山層中部に狭在し、カルデラ陥没が少なくとも 2 回発生したと推定される。地層の走向は石神山周辺を中心とする半同心円構造をなし、その傾斜は半同心円の外側を向く。この構造は、石神山周辺を中心とするドーム状の隆起構造を示唆する。この隆起構造は、再生ドームであると考えられ、カルデラ中心域にあたる小安岳周辺の基盤岩の高まりの原因の一つである。再生ドームの形成と厚い火砕流堆積物の分布と環状割れ目の存在は、三途川カルデラが Valles 型カルデラである可能性を示唆している。

キーワード: 三途川カルデラ, 虎毛山層, 火砕流堆積物, 再生ドーム

Keywords: Sanzugawa caldera, Torageyama Formation, Pyroclastic density current deposit, Resurgent dome

## 蔵王火山、馬の背アグルチネート活動期の層序とマグマ組成変化 Stratigraphy and chemical compositions of eruption products in Umanose agglutinate activity, Zao volcano

河野 元<sup>1\*</sup>; 伴 雅雄<sup>2</sup>; 及川 輝樹<sup>3</sup>

KAWANO, Gen<sup>1\*</sup>; BAN, Masao<sup>2</sup>; OIKAWA, Teruki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 山形大・理工, <sup>2</sup> 山形大・理, <sup>3</sup> 産総研・地質情報

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Yamagata University, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan/ AIST

東北日本火山フロント中央部に位置する蔵王火山の最新期活動は、約 3 万年前より始まり現在も継続中である。最新期噴出物は下位から駒草平アグルチネート、馬の背アグルチネート、五色岳火砕岩に分類されている。なお、最新期の開始時に山頂付近に長径 2 km のカルデラ (馬の背カルデラ) が形成されている。本研究では、最新期中の約 8~4 千年前の馬の背アグルチネート活動期のテフラおよび火口近傍相の層序を検討した。また、火口近傍相に含まれる火山弾やスコリア組成の時間変化も検討したのでそれらの結果を報告する。

【テフラ層序】 先行研究では馬の背アグルチネート活動期のテフラとしては Z-To 5~8 が識別されていた。今回の再検討の結果では Z-To 5 について新たに 5 層 (下位より Z-To 5a, 5b, 5c, 5d, 5e) を識別し、結果として、馬の背アグルチネート活動期のテフラ層は 9 層 (Z-To 5a~8) となった。また、テフラ層の間に挟まれる古土壌またはテフラ層中に含まれる葉片の炭素 14 年代測定 (AMS 法) を基に形成年代について検討を行ったところ、Z-To 5a~8 (Z-To 5 は除く) は各々約 8.9, 7.3, 6.0, 5.6, 5.3, 4.7, 3.9, 3.6 ka と推定された。現時点で識別されるテフラは、火口 (五色岳付近) から北方においては Z-To 5a-8 で、西方・東方・南方においては Z-To 5e-7 である。

なお、五色岳の北方および南方において、Z-To 5e と 5d の間に白黄色の広域テフラが残存している。本層は主に軽石型の火山ガラスからなる。その火山ガラスの主成分組成は、十和田中楯火山灰 (To-Cu) とほぼ同じである。このテフラが To-Cu に対比されると考えて、層序的にも問題がない。

【火口近傍相】 馬の背カルデラ壁の一部において、馬の背アグルチネート火口近傍相が良く観察できる露頭がある。この露頭の下部は約 3 万年前の駒草平アグルチネートに属する噴出物からなる。この噴出物には、ガラス状光沢を示す火山弾及びスコリア質火山弾が特徴的に含まれている、厚いアグルチネートが認められる。その上位に馬の背アグルチネート活動期の火口近傍相が乗る。ローム層を挟みながら降下スコリア層 (火砕サージ層を伴う場合もある) が 10 枚以上累重している。

【マグマ組成時間変化】 噴出物はカルクアリカリ岩系の安山岩 (56.0-59.2% SiO<sub>2</sub>) である。斑晶は斜長石と両輝石が主体で、かんらん石が含まれる場合がある。斑晶は塵状包有物を含むなどの溶融組織を持つものが多い。ハーカー図上では一連の直線的な組成変化を示している。また、噴出物の SiO<sub>2</sub> 量が上位に向かって増加する変化傾向が 2 回認められた。これは一定の組成をもつ 2 端成分マグマの混合比が時間と共に変化したことを示唆していると考えられる。

キーワード: 蔵王火山, 馬の背アグルチネート, テフラ層序, マグマ進化

Keywords: Zao volcano, Umanose agglutinate, tephra stratigraphy, evolution of magma



## 吾妻火山, 後カルデラ活動期における噴火史 —カルデラ内噴出物と吾妻浄土平ボーリングコアの対比結果— Eruptive History of Post-caldera Stage, East-Azuma Volcano -Correlation between ejecta intra-caldera and boring core-

尾崎 守<sup>1\*</sup>; 藤縄 明彦<sup>2</sup>  
OZAKI, Mamoru<sup>1\*</sup>; FUJINAWA, Akihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 茨城大・院・理工, <sup>2</sup> 茨城大・理  
<sup>1</sup>Ibaraki Univ., <sup>2</sup>Ibaraki Univ.

### ○序論

吾妻火山は福島—山形県境に位置する第四紀の成層火山である。最近7千年間の噴火は、東吾妻火山のカルデラ周辺、一切経山北部から浄土平の南まで北西—南東方向に伸びた長さ3km、幅1kmの範囲で発生し、降下火砕物を主体とする(山元, 2005)。カルデラのほぼ中央に位置する約6千年前から千年間継続した吾妻小富士の活動では、溶岩の流出も発生した(山元, 2005)。

火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会が中長期的に監視を強化すべきとした全国47火山に対し、2009年、気象庁により、深度100mの調査孔掘削によるボーリングコア採取と各種検層が行われた。吾妻火山もそのうちの1火山である。今回、吾妻火山ボーリングコアとカルデラ内に堆積する噴出物との岩相對比結果に基づき、カルデラ内における噴火史を構築したので報告する。

### ○ボーリングコアの層序と岩相

ボーリングコア掘削地点は吾妻小富士の北西約500mに位置する。本コアにおいては、採取直後に記載され、層序の概要はすでに報告済みである(火山噴火予知連絡会コア解析グループ, 2011)。このうち深度11.20~1.50mから採取された安山岩質火山岩塊・火山礫層は、吾妻小富士火山噴出物とされる。

対比に用いたのは、深度100.55m~81.07mの安山岩溶岩3試料(下部から順にNo.19~17)と、深度79.90m~14.20mの溶結した凝灰火山角礫岩・火山礫凝灰岩4試料(No.13~10)である。このうち安山岩溶岩(19~17)は、暗灰色を呈し、2~3mm程度の斜長石斑晶が目立ち、稀に包有物を含む。溶結した凝灰火山角礫岩・火山礫凝灰岩(13~10)には、灰色基質中に暗灰色の強く溶結し、レンズ状に引き伸ばされた火山岩塊、火山礫が包有される。

### ○露頭記載

今回新たに、東吾妻火山のカルデラ内の露頭において、溶岩流3層、火砕流1層を確認した。赤色立体地図(アジア航測株式会社作成)や地形観察から、いずれも吾妻小富士溶岩流(尾崎・藤縄, 2013)よりも下位と推定できる。

溶岩流1は、赤色立体地図や地形観察では確認されないユニットで、林道沿い標高430mの地点に一か所のみ、露出する。露出層厚は約5mである。岩質は緻密で、暗灰色を呈し、2~3mm程度の斜長石がよく目立つ。稀に包有物を含む。

火砕流堆積物は、国道126号線沿いの標高470m付近にて断続的に露出する。露出層厚は最大でも約2.5mである。露頭の上部は、大礫を含む未固結の崖錐堆積物により被覆されるが、境界部は確認できていない。弱溶結した明灰色の基質中に、暗灰色で扁平化した石質岩片を含む。

溶岩流2は、厚い台地状の地形を成し、浄土平爆裂カルデラ(藤縄・鴨志田, 1999)内に広範に分布する。地形判読から、火砕流堆積物の上位と判断できる。林道沿い標高660mの地点では、層厚10m以上で柱状節理が発達する露頭を確認した。同地点では、鴨志田(1991MS)において、吾妻小富士溶岩流に直接被覆されているのが確認されている。緻密で灰色を呈し、輝石が容易に識別できる。

溶岩流3は、カルデラ内南部に堆積・分布し、良く発泡しており、赤灰色を呈する。地形的に溶岩流2の上位にあたり、さらに吾妻小富士溶岩流によって被覆されている。3~5のフローユニットから成り、舌状地形や溶岩堤防も、不明瞭ではあるが識別できる。

### ○岩相の対比

コアの安山岩溶岩(19~17)と溶岩流1はいずれも暗灰色を呈し、2~3mm程度の斜長石斑晶が目立つ点、包有物を含む点で類似する。一方、溶岩流2や3とは岩相・岩質を異にする。コアの溶結した凝灰火山角礫岩・火山礫凝灰岩(13~10)と火砕流堆積物は、溶結度こそやや異なるものの、灰色基質中に暗灰色石質岩片を包有する点で類似する。溶岩流2・3と類似した溶岩は、コア中には確認できない。この理由として、①コア掘削地点にこれらの溶岩が堆積・分布していなかった、②コア掘削深度よりもさらに下位の噴出物であった、の二つの可能性が考えられる。しかし、露頭では、溶岩流2は、5-6千年前に噴出した吾妻小富士溶岩流に直接被覆される。また、溶岩流3は、不明瞭ではあるが表面微地形が確認され、こちらも吾妻小富士溶岩流により被覆されている。以上から溶岩流2, 3が溶岩流1より上位であることは確実に、②の可能性は否定される。

### ○対比に基づく噴火史



SVC54-P11

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

コアで確認された溶結火砕岩層は約 20m と厚いため、大規模な火砕噴火に由来する可能性が高い。そのような噴火が発生した場合、給源には凹地形がしばしば残される。地形から判断すると、給源としては浄土平爆裂カルデラが有力である。

溶岩流 1(コア 19~17) は、溶結火砕岩(コア 13~10) よりも下位のため、カルデラ形成以前の噴出物であることになる。

溶岩流 2 や 3 は火砕流堆積物よりも地形的に上位のため、これらはカルデラ形成後に噴出したものと考えられる。

キーワード: 吾妻火山, 浄土平, 噴火史, ボーリングコア, 層序

Keywords: Azuma Volcano, Jododaira, eruptive history, boring core, stratigraphy

## 草津白根火山殺生溶岩の斜長石斑晶の粒径分布とシンプレクタイト組織 Plagioclase phenocrysts and Opx-magnetite symplectite of the Sessho Lava of the Kusatsu-Shirane Volcano

押尾 和喜<sup>1\*</sup>; 上木 賢太<sup>2</sup>; 川野 心大<sup>3</sup>; 乾 睦子<sup>3</sup>; 野上 健治<sup>2</sup>

OSHIO, Kazuki<sup>1\*</sup>; UEKI, Kenta<sup>2</sup>; KAWANO, Munehiro<sup>3</sup>; INUI, Mutsuko<sup>3</sup>; NOGAMI, Kenji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国土館大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 国土館大学理工学部

<sup>1</sup>Kokushikan University Graduate School of Engineering, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology,

<sup>3</sup>Kokushikan University

草津白根火山は、群馬県の北西部と長野県の県境に位置する活火山である。約 57 万年前から活動を続け、溶岩流・火砕流堆積物などからなる(早川・由井,1989)。殺生溶岩は同火山を構成する溶岩流の一つで、約 3000 年前の噴火の際に本白根火砕丘付近から東側に流下したと推定されている(宇都ほか,1983)。溶岩は北部と南部に分岐し、最長 4.8km、最大幅 0.9km で溶岩末端崖の高さは 50~100m 前後であり、これらの数値から推定すると、流出面積は 6.27km<sup>2</sup> である。SiO<sub>2</sub> の含有量は 60~63wt % の安山岩溶岩である(高橋ほか, 2010; 上木・寺田, 2012)。

斑晶鉱物の化学組成や形態には、形成された時の情報が保持されているため(津根・寅丸,2004 など)、溶岩内に含まれる斑晶鉱物の化学分析や形態の解析を行うことで、噴火前のマグマだまり内がどんな環境だったのか推定することができる。一方、微斑晶や石基は噴火時に結晶化するとされ、過冷却度や冷却過程により形態や組成が変化する(鈴木,2006 など)。斜長石斑晶に着目して粒径の解析や化学組成の分析を行うことで、マグマだまりの化学的不均質や冷却速度の描像を行った。一枚の溶岩流に着目することで斑晶が形成された時のマグマだまり内の環境の多様性を解明できるという利点がある。本研究では、草津白根火山殺生溶岩の上流から下流まで、6ヶ所の異なる地点から試料を採取し、組織の観察を行った。さらに、鉱物モードおよび、斜長石斑晶の粒径分布とアスペクト比(長軸の長さ/短軸の長さ)の推定を行った。また、EPMA および SEM を用いて斑晶鉱物の化学組成の分析を行った。

殺生溶岩に含まれる斑晶鉱物は、斜長石+単斜輝石+斜方輝石+磁鉄鉱土かんらん石であり、石基はガラス質である。石基に含まれる斜長石斑晶の長軸の長さは 0.04~4.9mm と多様な大きさを示す。斜長石斑晶・微斑晶は、長軸の長さが短いものほどアスペクト比が大きい値を示し、針状の形を示す。また、一枚の溶岩流でも、粗粒な斑晶に富む箇所と細粒な斑晶に富む箇所が存在する。一方、斑晶モードは、石基 54.2~59.0%、斜長石 33.4~38.1%、磁鉄鉱 2.1~4.2%、輝石 3.0~6.4% の幅となり溶岩流内では均質であった。

SEM および EPMA を用いて化学組成の解析を行った結果、斜長石斑晶の構造としては、正累帯構造、逆累帯構造、振動累帯構造、局所的に An# の値が違うパッチ状累帯構造、同心円状の汚濁帯累帯構造の 5 種類が観察された。単一のサンプル内で 5 種類全て見つかったもの、振動、パッチ状、汚濁帯の 3 種類しか見つかっていないものが存在した。斜長石斑晶は、An#55~84 と一枚の溶岩流内でも幅広い組成を示した。希に発見されるかんらん石は母岩の安山岩質溶岩とは非平衡である高い Mg# (~83) を示す。

複数のサンプルから、opx-magnetite シンプレクタイトが確認できた。直径は 2~4mm で楕円形の形を示し、中心には、50~575μm 程度の磁鉄鉱が斑点状や縞模様で集中し、磁鉄鉱を覆う形で直径 75~975μm 程度の細粒の斜方輝石が塊状で分布していた。斜方輝石は、屈折率やバイレフリンゼンスが低く、同じ薄片に含まれる通常の斜方輝石斑晶とは鏡下で大きく異なる特徴を示す。外縁部には 10~675μm の様々な大きさの斜長石が付着していた。このような構造はかんらん石の急激な酸化によって生じると推定されており(Goode, 1974 など)、殺生溶岩の安山岩マグマの形成中に、急激に酸素雰囲気上昇するイベントが存在していたことを示唆する。

本研究の結果、一度の噴出イベントで流出した溶岩流内では、斑晶量は、すべての地点で均質であり、最終的な到達温度は均質であったことが推定された。一方、溶岩流内でも、斜長石のサイズや化学組成にいくつかの種類があることが分かった。殺生溶岩をもたらしたマグマだまり内部での結晶化の速度、すなわち冷却速度が多様性を持つことが示唆される。また、opx-magnetite シンプレクタイトが存在していたことから、草津白根山の安山岩溶岩の生成プロセスにおいて急激な酸化イベントが起きていたことが示された。

### 参考文献

早川・由井 (1989) 第四紀研究, 28, 1-17

宇都ほか (1983) 草津白根火山地質図, 地質調査所

高橋ほか (2009) 日本大学文理学部自然科学研究所 研究紀要 No.45 (2010) 205-254

上木・寺田 (2012) 火山 第 57 巻 (2012) 第 4 号 235-251

津根・寅丸 (2004) 火山 第 49 巻 (2004) 第 5 号 249-266

鈴木 (2006) 火山 第 51 巻 (2006) 第 6 号 373-391

Goode (1974) Nature, vol. 248, pp.500-501

SVC54-P12

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

キーワード: 溶岩, 結晶サイズ分布, 噴火, 安山岩, 活火山, シンプレクタイト組織

Keywords: Lava flow, Crystal size distribution, Eruption, Andesite, Active volcano, Symplectite

## 千波火山：気象庁伊豆大島千波崎ひずみ計コアの観察 Boring Core Observation of the Izu Oshima Sembazaki Strain Meter Well.

川邊 禎久<sup>1\*</sup>; 鬼澤 真也<sup>2</sup>; 小久保 一哉<sup>3</sup>  
KAWANABE, Yoshihisa<sup>1\*</sup>; ONIZAWA, Shin'ya<sup>2</sup>; KOKUBO, Kazuya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>産総研・地質調査総合センター, <sup>2</sup>気象研究所, <sup>3</sup>気象庁

<sup>1</sup>Geol. Surv. Japan, AIST, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, <sup>3</sup>Japan Meteorological Agency

We report the boring core observations of strain gauge well that Japan Meteorological Agency has been installed in the Sembasaki, Izu Oshima. The location of the well is at 34°42' 20.5168"N, and 139°21' 40.7016"E, and well altitude is 51.2m, and drilling depth is 100m. For deeper than about 70m deep, the core was recovered.

Depth from 70m to 86m is composed of volcanic breccia with thin layers of volcanic ash. Volcanic breccia is solidified and including fragments of various basalt, scoria and altered rocks. Some basalt fragments seems to be the essential with a quench rim. From the surrounding geology, this breccia can be compared to the Senzu Formation that is the product of explosive eruption at shallow sea in the first stage of Izu Oshima volcano.

The core, depth of 86m (below sea level 34.8m) or deeper, is made of fresh aphyric basaltic lava flow. At least 2 flow units can be identified. Both lava flows contain very small amount of plagioclase and clinopyroxene phenocrysts. There is no evidence that is water-cooled to the lava flow.

We performed the whole rock chemical composition analysis for basalt fragment of breccia and lava flows. All specimen have  $\text{SiO}_2 = 49.8 \sim 52.9\text{wt}\%$  and significantly lower  $\text{K}_2\text{O}$  content, about 0.2wt%, than the basalts of Izu Oshima volcano, except for one breccia fragment. The lower  $\text{K}_2\text{O}$  content than that of the rock of Izu Oshima volcano is consistent with the characteristics of the old basement volcanoes such as Fudeshima volcano.

In the sea floor of the west of the Izu Oshima, there are Semba spur accompanied by magnetic anomaly. Oshima et.al.(1987) pointed out that the Semba spur might be the older volcanic body and they named it Semba volcano. The height of the sea cliff is gradually increased from Sembasaki toward the north, and the highest around Tsuwai. The distribution of valleys around Tsuwai also shows the discordant rise in the foot of Izu Oshima volcano, and this discordant may lead to the Semba spur. The basalts from the Semba core indicate that the old basement volcano, Semba volcano, is also present in the Izu-Oshima southwest side.

キーワード: 伊豆大島, ボーリング, ボーリングコア, 玄武岩

Keywords: Izu Oshima, boring core, basalt



## 阿蘇火山、高野尾羽根流紋岩溶岩に発達する破砕性流理の起源と変形過程 Origin and deformation of the clastic flow bands in the Takanoobane rhyolite lava

古川 邦之<sup>1\*</sup>; 金丸 龍夫<sup>2</sup>; 宇野 康司<sup>3</sup>  
FURUKAWA, Kuniyuki<sup>1\*</sup>; KANAMARU, Tatsuo<sup>2</sup>; UNO, Koji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛知大学経営学部, <sup>2</sup> 日本大学文理学部地球システム科学科, <sup>3</sup> 岡山大学大学院教育学研究科

<sup>1</sup>Faculty of Business Administration, Aichi University, <sup>2</sup>Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, <sup>3</sup>Graduate School of Education, Okayama University

In this study, we showed that the clastic flow bands, which are developed in the Takanoobane rhyolite lava, were formed by shear fracturing of the high viscous magma within the shallow conduit. The flow bands broke up into the small particle-rich flow lines, which are ubiquitously observed in obsidian lavas.

The Takanoobane rhyolite lava (TR lava) is located at the Aso caldera in the middle of Kyushu Island in SW Japan. The lava is effused at 51±5 ka (Matsumoto et al., 1991). The thickness, estimated volume, and bulk rock chemistry of TR lava are 60-90 m, 0.14 km<sup>3</sup> (Miyabuchi et al., 2004), and 71-72 SiO<sub>2</sub> wt.% (Furukawa, 2006), respectively. In this study, we examined two drill cores (AVL1 and AVL4) provided by the Aso Volcanological Laboratory. Both drill holes penetrated the proximal part of TR lava. TR lava is composed of an inner crystalline part and marginal glassy parts.

The black to dark gray colored flow bands within a few millimeters thick are concentrated around the boundary between crystalline part and basal obsidian. The bands are composed of clastic materials with a diameter below a few mm. The clastic materials are composed of glassy lithics and minerals. Some clasts are rounded and fluidal shapes and show different textural occurrences from the surrounding rhyolite. The chemical compositions of the glassy lithics and those of glassy matrix of the surrounding rhyolite are slightly different. Within the bands, the streak texture, which is defined by difference of clasts and microlite contents, is conspicuous.

The differences in texture and chemical compositions between the clasts in the bands and surrounding rhyolite indicate that the clastic bands were not formed by autobrecciation within the lava. These observations indicate that the clastic bands are likely to be formed by shear fracturing of the high viscous magma within the shallow conduit such as Tuffen et al. (2003). The fractures would become pathway of the volcanic gasses, and the clasts were transported by the gas transport. The streak texture within the bands is interpreted as sedimentary structures, which were formed by gas transportation of clasts through fracture system. The rounded and fluidal shapes of the clasts indicate that the fracturing occurred when the conduit magma was enough hot. The clastic bands consequently break up and disappear. The bands show progressive loosening along the individual streak, where will be the structural weakness. Consequently, the streak develops into the individual thin bands. The small particles, such as glass particles, microlites and lithics, are released from margin of the clastic bands to the surrounding rhyolite. Since the high viscosity of the lava inhibits their homogenization, the particles are likely to be aligned along the flow line. The clastic flow bands, originated from shear fracturing, will thoroughly break up via this process. Our results mean that the clastic flow bands developed within silicic lavas is important for understanding of the shallow conduit system of silicic magma.

キーワード: 流紋岩, 溶岩, 流理, 火道, 阿蘇  
Keywords: rhyolite, lava, flow band, conduit, Aso

## 桜島大正溶岩中斜長石斑晶の組織から解明するマグマだまりプロセス Magma chamber processes revealed by textures in plagioclase phenocrysts through Taisho eruptions of Sakurajima volcano

山下 俊介<sup>1\*</sup>; 寅丸 敦志<sup>2</sup>  
YAMASHITA, Shunsuke<sup>1\*</sup>; TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences

火山噴出物中に見られる組織はその岩石の成因について重要な情報を記録している。特に斜長石斑晶は、多くの火山岩に含まれており、マグマだまりプロセスを理解するために多くの研究がなされている。桜島大正溶岩中の斜長石斑晶は、大きなメルト包有物を含むような構造(ハニカム構造)の有無により二種類に分類でき、この組織を有すものをH-PI、有しないものをC-PIと定義する。また、桜島では有史以降の噴火についてデイサイト質マグマと苦鉄質マグマのマグマ混合が斜長石斑晶の化学組成などにより示唆されている。しかし、組織の違いとの対応関係については言及されていない。したがって、斜長石斑晶についての組織と組成の対応関係は非常に興味深い。また、結晶サイズも結晶の生成環境について本質的な情報を与える。しかし、桜島大正溶岩の斜長石斑晶の結晶サイズ分布の研究は未だなされていない。したがって、化学組成・結晶サイズの二つの側面から斜長石斑晶組織の違いをみることは大変有意義であり、その結果を用いてマグマだまりプロセスを理解することが本研究の目的である。

FE-SEMを用いて組成分析を行った結果、H-PIのコアは高An部(An75-90)と低An部(An55-70)が1つの斑晶中に不均質に分布しており、メルト包有物周縁部は特異に低An部(An40-55)が存在していることが分かった。また、個々の斑晶は組成幅(An74-88)を持つ分布であった。H-PIのリムは均質でコアとは明瞭な境界を持ち、個々の斑晶はAn62程度の組成であった。C-PIのコアは清澄で1つの結晶での組成幅は小さいが、個々の斑晶は明確に異なる2つの組成グループ(An62程度, An85程度)に属した。C-PIのリムは均質でコアとの境界は明瞭なものとして存在しており、個々の斑晶のリム組成はAn62程度であった。結晶サイズ分布(CSD)の結果、H-PIは比較的直線、C-PIは下に凸な傾向を示すことが分かった。

以上の結果より斜長石斑晶は、組織と組成の観点から、以下の3タイプ(type-H, typeC-1, typeC-2)に分類される。type-Hは、メルト包有物を含み不均質な組成のコアを持つもの、type-C-1は、メルト包有物を含まずAn62程度で均質な組成のコアを持つもの、type-C-2はメルト包有物を含まずAn-rich(An85程度)で均質な組成のコアを持つものである。また、CSDがC-PIとH-PIでは全く異なる傾向を示したことから二つは全く異なる形成過程をとることが示唆される。特にC-PIは下に凸な傾向を示し、これは二つの斜長石斑晶の存在を示唆している(Higgins, 1996b)。桜島では、有史以降の噴火についてデイサイト質マグマと苦鉄質マグマのマグマ混合が示唆されており、混合前後の組成・平衡温度を理解することは組織の成因を理解する上でも大変重要であると考えられる。したがって、Putirka(2008)の斜長石温度計を用いて平衡温度の推定を行い、その結果、デイサイト質マグマは約850℃、苦鉄質マグマは約1050℃と見積もられた。このことは苦鉄質マグマが、マグマ混合によって急激に温度が低下したことを示す。先行研究では、ハニカム構造は急冷による骸晶状成長の結果であると考えられており(Lofgren, 1974)、type-Hは、混合直後に急冷された苦鉄質マグマ中で生成されたと考えられる。また、組成の結果からtype-C-1は混合後の組成が均質化された混合マグマ中で生成された斑晶、type-C-2は混合前の苦鉄質マグマ中に既に存在していた斑晶であると考えられる。

キーワード: 斜長石斑晶, ハニカム構造, 組織解析, 結晶サイズ分布, マグマ混合, 桜島火山

Keywords: plagioclase phenocryst, honeycomb texture, textural analysis, crystal size distribution, magma mixing, Sakurajima volcano

## 干渉 SAR 時系列解析による国後・択捉島の活火山周辺における地殻変動 Ground Deformation of Active Volcano in Kunashiri and Etorofu Islands using InSAR time series analysis

安藤 忍<sup>1\*</sup>; 三浦 優司<sup>2</sup>; 松森 敏幸<sup>2</sup>  
ANDO, Shinobu<sup>1\*</sup>; MIURA, Yuji<sup>2</sup>; MATSUMORI, Toshiyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁  
<sup>1</sup>MRI, <sup>2</sup>JMA

地表面の状態把握に優れた L バンド波長帯を有する ALOS/PALSAR は、植生の影響を受けにくく山岳地帯でも干渉性が良いことから、活火山地域での地殻変動観測に有効である。

気象研究所では、2007 年から北方領土を含む日本全国の活火山地域周辺を対象に差分 SAR 干渉解析を行い、火山噴火予知連絡会などで報告を行ってきた。しかし、2011 年 5 月に ALOS が運用を休止して以降は差分干渉解析できていない。近年、PS-InSAR や SBAS と呼ばれる InSAR 時系列解析手法が開発され、多くの事例が報告されている。

千島列島南部の国後島及び択捉島には、11 の活火山が存在している。本発表では、ALOS/PALSAR のアーカイブデータを活用し、これら 11 の活火山周辺の地殻変動について、スタンフォード工科大学が開発した StaMPS (Hooper et al., 2004) による検出を試みた。なお、該当地域は積雪地域のため、冬期間に撮像されたデータを除いて解析を行った。StaMPS ソフトウェアには、PS-INSAR, SBAS 法のほか、これらの結果を合成する機能が組み込まれているが、これらの結果の違いについても報告する。

本解析で用いた PALSAR データの一部は、火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験（火山 WG）に基づいて観測・提供されたものである。また、一部は PIXEL で共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR に関する原初データの所有権は経済産業省 (METI) 及び JAXA にある。なお、干渉画像の処理過程においては、ASTER GDEM を使用し、結果の描画については GMT を用いた。ここに記してお礼申し上げます。

キーワード: 干渉 SAR 時系列解析, 地殻変動, ALOS/PALSAR, 国内活火山  
Keywords: InSAR time series analysis, Ground deformation, ALOS/PALSAR, Domestic active volcano

## 雌阿寒岳ポンマチネシリ火口浅部の比抵抗構造 (序報) Preliminary result of resistivity modeling around Pommachineshiri crater at Meakandake Volcano, Japan

高橋 幸祐<sup>1\*</sup>; 松島 喜雄<sup>2</sup>; 高倉 伸一<sup>2</sup>; 山谷 祐介<sup>2</sup>; 有田 真<sup>1</sup>; 長町 信吾<sup>1</sup>; 大石 雅之<sup>2</sup>; 風早 竜之介<sup>2</sup>; 藤井 郁子<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Kosuke<sup>1\*</sup>; MATSUSHIMA, Nobuo<sup>2</sup>; TAKAKURA, Shinichi<sup>2</sup>; YAMAYA, Yusuke<sup>2</sup>; ARITA, Shin<sup>1</sup>; NAGAMACHI, Shingo<sup>1</sup>; OISHI, Masayuki<sup>2</sup>; KAZAHAYA, Ryunosuke<sup>2</sup>; FUJII, Ikuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地磁気観測所, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Meakandake Volcano, situated in Eastern Hokkaido, Japan, is an active volcano where a phreatic eruption occurs in every several years. Volcano-tectonic (VT) earthquakes mainly occurred below Pommachineshiri crater which is one of active craters of the volcano (Japan Meteorological Agency, 2013). A source region of the tremors occurred before the 2008 eruption was estimated beneath the southern slope of the crater (Ogiso and Yomogida, 2012). Significant changes in the geomagnetic field were observed in 2008 and 2009 around the crater. Hashimoto et al. (2009) pointed out that the temporal variations of the geomagnetic field in 2008-2009 were due to the thermal demagnetization of the material beneath the southern slope of the crater.

These VT earthquake, tremor and rock demagnetization events probably associated with the movement of volcanic fluids such as hydrothermal water, gas and melt. Therefore, understanding of a hydrothermal system of the volcano is a key to reveal the mechanism of the tectonic events occurred there.

Resistivity of rock strongly depends on the fluid inclusion. Therefore, an electro-magnetic measurement is an effective method to image the fluid distribution. We conducted audio-frequency magnetotelluric (AMT) surveys in August 2013 on the western slope of the volcano. The objective of the survey is to reveal the resistivity structure around Pommachineshiri crater and to infer the relationships among the fluid distribution, the seismic focal area, and the demagnetized area around the crater.

Since we have not finished the AMT survey on the eastern slope of the volcano yet, the resistivity structure around the Pommachineshiri summit crater is not well-constrained. Therefore, we present the two-dimensional resistivity structure beneath the western slope of the volcano as a preliminary result. The characteristics of the resistivity distribution are described as follows.

1) A resistive (more than several hundred  $\Omega$  m) layer locates at the top of the western slope of the volcano. Its thickness varies from 100 to 300 m on the profile. This layer can be regarded as a permeable lava or pyroclastic fall deposits.

2) Below the resistive surface layer, two conductive (less than 10  $\Omega$  m) bodies are found. One is located to the west of Pommachineshiri crater at depths of 300-1000 m from the surface. This conductor corresponds to a hydrothermal reservoir which relates to the fumarolic activity in the crater. The second conductor is found beneath the western part of the profile at a depth of about 1000 m from the surface. The discharge of hot spring water at the west of our survey region suggests that this conductor can be explained by the presence of the hydrothermal fluid and/or the altered rocks.

3) A resistive area (more than several hundred  $\Omega$  m) exists below the two conductors. Causes of this high resistivity are unknown yet.

Keywords: resistivity structure, Meakandake Volcano, volcanic fluid



## 2008年の噴火以降の雌阿寒岳における地磁気全磁力変化 Variation of Geomagnetic Total Intensity at Meakandake Volcano after the Eruptions in 2008

島村 哲也<sup>1\*</sup>; 有田 真<sup>1</sup>; 増子 徳道<sup>1</sup>; 藤井 郁子<sup>1</sup>; 福井 敬一<sup>1</sup>; 小木 曾仁<sup>2</sup>  
SHIMAMURA, Tetsuya<sup>1\*</sup>; ARITA, Shin<sup>1</sup>; MASHIKO, Norimichi<sup>1</sup>; FUJII, Ikuko<sup>1</sup>; FUKUI, Keiichi<sup>1</sup>; OGISO, Masashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地磁気観測所, <sup>2</sup> 気象庁地震火山部精密地震観測室

<sup>1</sup>Kakioka Magnetic Observatory, JMA, <sup>2</sup>Matsushiro Seismological Observatory, JMA

2008年の噴火以降大きな変化がみられなかった雌阿寒岳の全磁力観測値は、2013年7月に顕著な減少を始めた。全磁力観測値の減少は山体内部の昇温によるものと考えられるが、地磁気以外の観測値には顕著な変化はみられていない。本研究では、最近の変化を中心に雌阿寒岳における火山活動と全磁力変化について報告する。

雌阿寒岳は活動的な火山であり、近年では主にポンマチネシリ火口において1988年、1996年、1998年、2006年、2008年と小規模ながらも水蒸気噴火が繰り返し発生している(気象庁, 2013)。気象庁地磁気観測所では、雌阿寒岳の火山活動に伴う地磁気変化をとらえることを目的として、1992年以降年1~2回の全磁力繰り返し観測を実施している。繰り返し観測の観測点は観測当初はポンマチネシリ火口東側と南側を中心に12点設置したが、順次観測点を見直し現在は30数点で観測を行っている。2003年10月16日には観測の時間分解能を上げるため、ポンマチネシリ火口南側斜面に全磁力連続観測点(MEA)を設置し、5分間隔の観測値が得られている。加えて2013年9月28日には新たに全磁力観測点(ME2)をポンマチネシリ火口とMEAの間に設置し、MEA同様5分間隔の観測値が得られている。

地磁気の観測値には、地球外核や太陽等の火山以外の要因に伴う経時変化が含まれている。このため、連続観測並びに繰り返し観測とともに同時刻の女満別観測施設(MMB: 雌阿寒岳からほぼ北北東約60km)での観測値との差をみることで火山以外の要因を取り除き、火山要因の地磁気変化を抽出している。このほかに、気温変化によると思われる年周変化の補正、観測点の局所的な磁化方向の差異から生じる太陽活動等の影響に対する地点差の補正等を施している。

MEAにおける全磁力連続観測値(以下、MEA全磁力)は、2008年の噴火の際に顕著な減少がみられた。特に11月18日の噴火の2日前には、火山性微動の振幅の増加と共に、MEA全磁力にも減少がみられ、火山噴火予知の可能性が示された(橋本ほか, 2009)。2008年の噴火以降MEA全磁力は約半年間減少が続いたが、2009年6月頃には減少はほぼ停止した。2009年7月にはMEA全磁力は噴火以前と同様に再び緩やかな増加に転じ、山体内部の冷却が示唆された。その後、2011年1月から2013年6月まではMEA全磁力には若干の増減があったもののほぼ横ばいで推移し、この間は山体内部の温度低下が停止していた(山体内部への熱の収支が釣り合った状態)と考えられる。2013年7月には再びMEA全磁力に顕著な減少傾向がみられるようになり、山体内部の温度上昇が再開している可能性が高い。2013年11月以降、MEA全磁力の減少はやや緩やかになったものの2013年1月現在も継続している。

ME2における全磁力連続観測値(以下、ME2全磁力)も、2013年9月末の観測開始以来、MEA全磁力と同様の变化傾向となっている。MEA全磁力とME2全磁力の差に大きな変化がみられないことから、2013年10月以降の熱消磁源の位置はほとんど変化していないと考えられる。

山体内部の昇温域(熱消磁源)については、2008年の噴火の際に繰り返し観測の結果と磁気ダイポールを仮定した熱消磁モデルにより、ポンマチネシリ96-1火口(以下、96-1火口)南側斜面地下に推定されている(橋本ほか, 2009)。この熱消磁源は、2008年11月16日の火山性微動の震源の移動域(Ogiso and Yomogida, 2012)に含まれる。また、2013年のMEA全磁力の減少も、2008年と同様に96-1火口南側斜面地下に熱消磁源が推定されている。なお、解析には火山用地殻活動解析支援ソフトウェアMaGCAP-V(気象研究所地震火山部, 2013)を使用した。

2008年のMEA全磁力の低下の際には、噴火に伴い、火山性地震や火山性微動、噴煙高度の増加などがみられたが、2013年7月以降のMEA全磁力の低下では10月に火山性微動が1回あったものの火山性地震や火山性微動、噴煙高度、GPSによる地殻変動等に顕著な変化はみられていない(札幌管区気象台火山監視・情報センター, 2013)。現在のところ噴火にはいたっていないが、今回のように顕著な表面現象や地殻変動を伴わない山体内部の昇温を監視するには、特に地磁気の連続観測が有効と考えられる。また、熱消磁源の位置を監視する上では複数の連続観測点による観測が有効と考えられる。

キーワード: 雌阿寒岳, 地磁気全磁力, 火山, 噴火, 熱消磁

Keywords: Meakandake, geomagnetic total intensity, volcano, eruption, thermal demagnetization

## 十勝岳及び雌阿寒岳における最近の火山性地殻変動の繰り返し GPS 観測 Recent volcanic deformations observed by campaign GPS on and around Mt. Tokachi and Mt. Meakan

和田 さやか<sup>1\*</sup>; 森 済<sup>1</sup>; 奥山 哲<sup>1</sup>

WADA, Sayaka<sup>1\*</sup>; MORI, Hitoshi, Y.<sup>1</sup>; OKUYAMA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学院地震火山研究観測センター

<sup>1</sup> Hokkaido University, Institute of Seismology and Volcanology

十勝岳は北海道の中央部に位置し、日本でも有数の活動的火山である。最近の活動は活発であり、ここ 100 年間では、1926 年、1962 年および 1988~89 年には大規模なマグマ噴火が発生している。また、雌阿寒岳は北海道の東部に位置し、1996 年、1998 年、2006 年および 2008 年には水蒸気噴火が発生するなど、数年おきに水蒸気噴火を起こしている。本研究では、十勝岳および雌阿寒岳における広域繰り返し GPS 観測の結果について議論する。

十勝岳では 2007 年から、阿寒岳においては 2006 年から繰り返し GPS 観測を行っている。観測点は、十勝岳では 12 点、雌阿寒岳では 8 点を設置し、毎年数日~数週間の繰り返し GPS 観測を行っている。本研究では、これらの毎年の観測データのうち、十勝岳では 2007 年以降、雌阿寒岳では 2008 年噴火以降の観測データを用いた。さらに、これらの繰り返し GPS 観測と同期間の気象庁の観測点における観測データを同時に用いた。データ解析には、解析ソフトウェア RTKLIB (高須ほか、2007) を用い、観測データから各火山における地殻変動の時系列変化を推定した。これらの時系列変化のデータには、火山性と思われる地殻変動だけでなく、地域的なテクトニックな変動や、2011 年 3 月 11 日の東北沖太平洋地震による変動が含まれている。これらの非火山性の変動を補正するために、各火山周辺の国土地理院の電子基準点 (GEONET) における 2007 年から 2013 年までの連続観測データを用いて、各火山地域におけるテクトニックな変動と東北沖太平洋地震に伴った変動を空間的に線形近似して推定した。また、季節変化による影響を考慮に入れることで、より詳細な変動を推定することが可能であると考えられる。地域的なテクトニックな変動や、地震による変動、そして季節変化の補正を行うことによって推定された火山性地殻変動について、詳細な議論を行う。

謝辞

本研究においては、気象庁札幌管区气象台に GPS 観測データを提供していただきました。感謝致します。また、国土地理院の電子基準点 GPS 連続観測データを使用させていただきました。

キーワード: 十勝岳, 雌阿寒岳, 火山性地殻変動, GPS

Keywords: Mt. Tokachi, Mt. Meakan, volcanic crustal deformation, GPS

## 2013年の樽前山の火山活動と噴火シナリオへの適用の試み The Volcanic activity of Tarumaesan Volcano in 2013 and Trial of Application to the Eruption scenario

長山 泰淳<sup>1\*</sup>; 宮本 聖史<sup>1</sup>; 藤松 淳<sup>1</sup>; 碓井 勇二<sup>1</sup>; 伏谷 祐二<sup>1</sup>; 宮村 淳一<sup>1</sup>  
NAGAYAMA, Hiroaki<sup>1\*</sup>; MIYAMOTO, Masashi<sup>1</sup>; FUJIMATSU, Jun<sup>1</sup>; USUI, Yuji<sup>1</sup>; FUSHIYA, Yuji<sup>1</sup>; MIYAMURA, Jun'ichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 札幌管区気象台

<sup>1</sup> Sapporo Regional Headquarters, JMA

気象庁および北海道大学は、樽前山周辺に傾斜計およびひずみ計を設置し連続観測を行っている。この観測網により、2013年6月19日 - 7月4日に火山性の地殻変動が観測された。この地殻変動は茂木モデル(茂木, 1958)を仮定すると、樽前山山頂から北西に約1.5km離れた深さ3-4kmでの約 $10^5 \text{m}^3$ オーダーの体積膨張により説明が可能である。これは気象研究所(2008)や北海道大学ほか(2011)などによって従来から報告されてきた山頂溶岩ドーム直下のごく浅部の圧力源とは異なるものであった。気象研究所(2013)の分類によると、今回の圧力源は深部でのマグマの蓄積・移動によるゆっくりとした膨張を示すグループに属すると考えられる。また、今回の地殻変動に同期して、山頂溶岩ドーム直下のごく浅部でB型地震がやや増加した。これらのことは、火山性流体(現時点でその実体は不明)がより深部から山頂北西側の3 - 4kmの深さに上昇し、その影響を受けて山頂溶岩ドーム直下への熱フラックス(高温の火山ガスなど)が高まったのではないかと解釈している。

一方、体積膨張による火山性地殻変動が停止した7月上~中旬以降に、山頂西側の深さ3-5kmを震源とする火山構造性地震(VT地震)活動が始まった。この地震活動は8月にかけて特に活発で、9月下旬には最大地震M3.0が発生した。今回の活動は、1967年の気象庁による震動観測開始以来、最も顕著なVT地震活動となった。VT地震は、山谷ほか(2005, 2013)による高比抵抗領域(50-500 $\Omega\text{m}$ )で発生している一方、今回の圧力源から山頂直下にかけての低比抵抗領域(<50 $\Omega\text{m}$ )には発生していない。

噴火時の適切かつ迅速な防災対応を目指して、気象庁は全国の31火山(2014年1月時点)で噴火警戒レベルの運用を行っている。このレベルを適切に防災対策に活用して頂くため、火山活動の推移を時系列で表現した噴火シナリオにより地元自治体と意識の共有を図っている。樽前山は1909年を最後にマグマ噴火しておらず、近代的な観測を開始して以来経験した活動はいずれも山頂溶岩ドーム付近のごく浅部の現象である。マグマ噴火に至るまでの深部から浅部へのマグマ上昇に伴う現象の観測経験がないため、特に深部の現象については他火山での観測事例をもとに噴火シナリオが作成されている。今回の地殻変動やVT地震活動の原因は不明確であるが、その発生領域は樽前山周辺の地質構造あるいはマグマ供給系を反映したものと考えられる。そこで、今回の観測事実から、樽前山の深部(深さ3-5km以浅)の活動推移をイメージ化した上で、深部から浅部へ火山活動が推移する噴火シナリオの修正を試みた。

ただし、今回検討した火山活動のイメージは、多くの仮定に基づいた不確かなものである。噴火シナリオの信頼性を高めるためには、樽前山のマグマ供給系の解明が不可欠であり、さらなる地殻変動やVT地震などの観測事例の蓄積と地下構造探査が必要である。自然地震を用いた地震波減衰域の推定等、現時点でも可能な取り組みについては今後進めたいと考えている。その上で、深部からのマグマ上昇に伴う地殻変動や地震活動などの各種現象を確実に捉えるための観測体制を再検討する必要がある。

謝辞: 本研究を行うにあたり、北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターの傾斜計、ひずみ計データおよび、地震波形データを使用させて頂きました。ここに記して感謝いたします。

キーワード: 樽前山, 火山活動, 噴火シナリオ, 地殻変動, VT地震活動

Keywords: tarumae, volcanic activity, eruption scenario, ground deformation, VT seismicity



## 東北地方太平洋沖地震以後の八甲田火山群の活動 Volcanic activities of Hakkoda volcano after the 2011 Tohoku-Oki earthquake

山本 希<sup>1\*</sup>  
YAMAMOTO, Mare<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理・地球物理  
<sup>1</sup> Geophysics, Science, Tohoku University

The 2011 Tohoku-Oki earthquake of 11 March 2011 is one of the largest earthquakes in recent times, and it generated large displacements and deformation in and around the Japanese islands. Such large crustal deformation, especially the east-west extension exerted on Tohoku area, raises fear of further disasters including triggered volcanic activities as well as triggered seismicity. To assess the potential risks of triggered volcanic activities, understanding of the behavior of volcanic fluids in the crust and volcanic bodies would be a key. In this presentation, as examples of such possibly triggers volcanic activities, we report the recent seismic activities of Hakkoda volcano, and discuss the relation to the movement of volcanic fluids.

Hakkoda volcano is a group of stratovolcanoes at the northern end of Honshu Island, Japan. There are fumaroles and hot springs around the volcano, and phreatic eruptions from Jigoku-numa on the southwestern flank of Odake volcano, which is the highest peak in the main cones of Northern-Hakkoda volcanic group, were documented in its history. Since just after the occurrence of Tohoku-Oki earthquake, the seismicity around the volcano became higher, and the migration of hypocenters of high-frequency volcano-tectonic (VT) earthquake was observed.

In addition to these VT events, long-period (LP) events started occurring beneath Odake at a depth of about 2-3 km from February, 2013, and subtle crustal deformation caused by deep inflation source was also detected by GEONET GNSS network around the same time. The characteristics of LP events are summarized as follows: (1) The spectra of LP events are common between events irrespective of the magnitude of events, and they have spectral peaks at 6-7 sec, 2-3 sec, 1 sec, and so on. (2) The long-period component of LP events appears as a wave packet of a few cycles, and high-frequency (>1 Hz) signals sometimes overlaps it. (3) LP events sometimes occur like a swarm with an interval of several minutes. These characteristics of LP events at Hakkoda volcano are similar to those of LP events at other active volcanoes and hydrothermal area in the world, where abundant fluids exist. Our further analysis using far-field Rayleigh radiation pattern observed by NIED Hi-net stations reveals that the source of LP events is most likely to be a nearly vertical tensile crack whose strike is almost parallel to the direction connecting Odake summit crater and Jigoku-numa. The number of VLPs gradually decreased after September, 2013, and high-frequency VT earthquakes became more dominant in the seismicity around Hakkoda volcano. However, there were a burst of earthquakes beneath Southern-Hakkoda volcanic group, that includes a few low-frequency earthquakes, at the end of December, 2013.

These results suggest that the extensional stress field generated by the 2011 Tohoku-Oki earthquake causes the upward movement of volcanic fluids and heat from the deep, and results in an activation of hydrothermal activities at the pre-existent fracture zone at Hakkoda volcanic group.

Acknowledgment: We used Hi-net data provided by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

キーワード: 火山性地震, 火山性流体, 地殻流体, 長周期地震  
Keywords: Volcanic earthquakes, Volcanic fluids, Geofluids, Long-period events



## 十和田火山・平安噴火の噴火推移における新知見 New knowledge of eruptive sequence in Heian eruption of Towada volcano

広井 良美<sup>1\*</sup>; 宮本 毅<sup>2</sup>

HIROI, Yoshimi<sup>1\*</sup>; MIYAMOTO, Tsuyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大・院理, <sup>2</sup> 東北大・東北アジア研セ

<sup>1</sup>Grad.Sci.Tohoku Univ., <sup>2</sup>CNEAS., Tohoku Univ.

### 1. はじめに

十和田火山における最新の噴火である平安噴火 (Hayakawa,1985) は, 二重カルデラ湖である中湖を給源とし (工藤,2010), マグマ噴火とマグマ水蒸気噴火を交互に繰り返す活発な活動であった. 詳細な噴火層序は広井・宮本 (2010) にて報告したが, 本稿ではその最初の噴出物であるプリニー式降下軽石ユニット (OYU-1) の推移及びクライマックスの噴出物である毛馬内火砕流 (KPF) の発生機構について新たな知見が得られたため報告する.

### 2. OYU-1 ユニット中に挟在する細粒火山灰

平安噴火最初の噴出物であるプリニー式降下軽石 OYU-1 は南西方向に分布主軸を持ち, 給源から 50km 遠方まで確認できる. 多くの露頭において層構造を持たず, 淘汰の良い様な粗粒軽石層の層相を示し, 安定した噴煙柱の形成による降下軽石であると考えられてきた. しかし今回, 給源から 12km 圏内の複数地点において細粒火山灰層を挟在することが確認できた. 細粒火山灰層には 2 種類あり, 1 つは OYU-1 の下部に挟在する 1 枚のベージュ色の火山灰層で, 層厚 1?8 cm, 給源から南西?南南東の範囲に分布する. もう 1 つは OYU-1 の上部に挟在する複数枚の灰色の火山灰層で, 層厚 1?3 cm, 給源から南西?南南西の範囲に分布する.

いずれの火山灰層も降下軽石層と互層し, 多くは軽石層と明瞭な境界を持つ. 火山灰層を挟在しない場合の OYU-1 は粒径の変化のない様な層相を示すことから, 噴煙柱が継続しているなかで一部地域にのみ火山灰層が指向性を持って堆積したことがわかる. また火山灰は軽石層と懸濁することなく明瞭な境界をもつことから, 降下堆積物ではなく, 極めて短時間に堆積した流れ堆積物であることがわかる. また谷地形に支配されることなく微高地上や稜線を越えた地点にも分布しており, 比較的流動性の高いサージ様の堆積物であると判断される. 従って, これらの火山灰層はプリニー式降下軽石中の流れ堆積物であることから, OYU-1 の intra-plinian flow であるといえる.

その成因としては以下の 2 通りが考えられ, 1 つは分布範囲が狭く小規模であることから, 噴煙柱の部分崩壊に起因する可能性が唆される. OYU-1 規模の噴煙柱の場合は噴煙柱の全方位に流下する傾向があるとされる (福島・小林,2000) が, 今回, 全方位ではなく分布主軸方向に偏った分布を示している要因としては, 強風 (22m/s) の風下側にあたることを考えられる.

2 つめは, 平安噴火の給源火口がカルデラ湖であることから, 部分的ないし一時的にマグマ-水比を充足したマグマ水蒸気爆発由来のベースサージである可能性も考えられる. OYU-1 に続く OYU-2 はマグマ水蒸気噴火によるベースサージ堆積物であり, また OYU-1 の噴出中にマグマ水蒸気噴火を起こし得るマグマへと徐々に変化している (Hiroi and Miyamoto,2013) ことから, この火山灰層はマグマ水蒸気噴火への推移に際する前駆的な現象である可能性も挙げられる.

### 3. KPF の分布と流出形態

平安噴火のクライマックスにあたる KPF は, 噴出量約 5 km<sup>3</sup> の火砕流堆積物である (Hayakawa,1985). KPF のカルデラ外の分布は, 東縁の奥入瀬川の他は十和田カルデラ南縁に限られる. 十和田カルデラは南縁が最も低く (標高 630m), リム上で KPF が確認できるのは標高 760m が最高点である. また給源に最も近いリム上に位置する赤岩山 (給源から 2 km, 標高 785m), 及びその背後の沢沿いには分布が確認できない. 従来, KPF は直前のユニットである OYU-3 のプリニー式噴煙柱の崩壊による火砕流であると考えられてきた (松浦ほか,2007 等). しかしながら, KPF の分布は十和田カルデラリムの低所を選択的に流下したことを示し, 地形的高所は給源に最も近い地点であっても堆積が確認できない. 噴煙柱崩壊によって発生する火砕流の場合には高高度の噴煙柱が発生源となることから, このような低所偏重の分布傾向が現れるとは考えにくい. よって, KPF は噴煙柱崩壊型ではなく溢流型の火砕流であると考えられる. これは, KPF 発生直前の噴火様式がプリニー式降下軽石のユニット OYU-3 ではなく, マグマ水蒸気噴火によるベースサージユニット OYU-4 であるとした広井・宮本 (2010) の結果とも整合的である.

### 4. まとめ

平安噴火のように複雑な噴火推移を辿った活動においては, 今回報告したような火口近傍のごく狭い地域に分布する堆積物や, 単純なモデルには則さない噴出物が観察される. それらの噴出物の発生が噴出率の変化のようなマグマの内的要因によるのか, 湖水の影響といった外的要因によるのかを判断することは, 噴火形態を決定する要因を明らかにす

SVC55-P07

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

るための好材料となると期待される。

キーワード: 十和田火山, 平安噴火, イントラプリニアンフロー, 溢流型火砕流

Keywords: Towada volcano, Heian eruption, intra-plinian flow, Soufriere-type pyroclastic flow

## 蔵王火山、約30-10万年前の山体北部の岩石学的研究 Petrological study of northern part of ca. 300-100 ka volcanic edifices in Zao volcano.

高野 徹<sup>1\*</sup>; 井上 剛<sup>2</sup>; 伴 雅雄<sup>3</sup>; 及川 輝樹<sup>4</sup>; 山崎 誠子<sup>4</sup>

TAKANO, Toru<sup>1\*</sup>; INOUE, Tsuyoshi<sup>2</sup>; BAN, Masao<sup>3</sup>; OIKAWA, Teruki<sup>4</sup>; YAMASAKI, Seiko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 山形大学大学院理工学研究科地球環境学専攻, <sup>2</sup> 株) 日本工営, <sup>3</sup> 山形大学理学部地球環境学科, <sup>4</sup> 独) 産業技術総合研究所地質情報研究部門

<sup>1</sup> Graduate School of Department of Earth and Environmental Sciences, Yamagata University, <sup>2</sup> Nippon Koei Co., Ltd., <sup>3</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, <sup>4</sup> Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, National Institute of Advance

蔵王火山は東北日本火山フロント中部に位置する第四紀成層火山である。活動は約80万年前から現在まで継続しているが、約30-10万年前の活動により複数の中規模山体が形成された。これらが現在の山体の主要部を成している。しかし、それらの形成過程・マグマ組成変化の詳細は未解明の部分が多い。中規模山体は大きく北部と南部に分けられるが、本研究では、北部を形成する火山体の形成史およびマグマ組成変化について報告を行う。

噴出物は、概ね下位から、横倉山溶岩・観松平溶岩・地蔵山西方溶岩・熊野岳西方噴出物・熊野岳主山体噴出物・地蔵山東方アグルチネート及び溶岩・熊野岳山頂アグルチネートおよび溶岩・馬の背溶岩の8つに分けられる。横倉山、観松平溶岩、地蔵山西方溶岩は共に安山岩質溶岩からなる。熊野岳西方噴出物は、下部が安山岩質の火山礫凝灰岩・凝灰角礫岩・凝灰集塊岩、上部が安山岩質溶岩からなる。熊野岳主山体噴出物は、下部が安山岩質の溶岩と火砕岩の互層、上部が安山岩質の凝灰角礫岩・凝灰集塊岩からなる。地蔵山東方アグルチネートおよび溶岩と熊野岳山頂アグルチネートおよび溶岩は玄武岩質安山岩で、共に噴出中心近傍では約2mの大きさの火山弾を含む凝灰集塊岩およびアグルチネートからなり、遠方では溶岩が見られる。馬の背噴出物は玄武岩質安山岩の溶岩主体で、部分的に凝灰集塊岩が見られる。横倉山溶岩は現在の主稜線よりも西方に噴出中心が存在したと考えられ、それ以降の噴出中心は現在の熊野岳～地蔵山付近と考えられる。また、地蔵山東方アグルチネートおよび溶岩・熊野岳山頂アグルチネートおよび溶岩・馬の背溶岩では噴出中心に近くにアグルチネートが見られるのが特徴的である。

北部火山体を構成する噴出物は全て中間カリウムのカルクアルカリ系列に属す。但し、横倉山溶岩は他のものに比べて $K_2O$ が低いトレンドを示す。その他7ユニットの噴出物は $SiO_2$ 組成変化図で概ね同じトレンドに乗るが、下位の4ユニットは安山岩質であるのに対して上位3ユニットは玄武岩質安山岩が主体である。詳細に見ると一部の組成でユニット間に違いが見られる。安山岩質の4ユニットのうち、熊野岳主山体噴出物は熊野岳西方噴出物・観松平溶岩・地蔵山西方溶岩に比べてCr, Ni, Zr, Nb量は高く、Rb量は低い。また、馬の背噴出物は、MgO, Cr, Niに関し、他の噴出物が作るトレンドよりも高含有量側にプロットされる。

キーワード: 蔵王火山, 成層火山, 噴火史, マグマ進化

Keywords: Zao volcano, stratovolcano, eruption history, evolution of magma

## 伊豆大島千波観測点の多成分ひずみ計データの特性 Characteristics of data observed by multi-component strainmeter installed at Senba, Izu-Oshima

山本 哲也<sup>1\*</sup>; 安藤 忍<sup>1</sup>; 小久保 一哉<sup>2</sup>; 小林 昭夫<sup>1</sup>; 木村 一洋<sup>1</sup>  
YAMAMOTO, Tetsuya<sup>1\*</sup>; ANDO, Shinobu<sup>1</sup>; KOKUBO, Kazuya<sup>2</sup>; KOBAYASHI, Akio<sup>1</sup>; KIMURA, Kazuhiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Japan Meteorological Agency

気象研究所は、2013年2月に伊豆大島南西部の千波にボアホール型多成分ひずみ計を設置した。このひずみ計は、地殻変動による火山活動評価の研究に利用するとともに火山活動監視への活用を視野にいたした装置である。通常、ボアホールに埋設したひずみ計などでは、設置直後から観測値のドリフトが年単位の期間に渡って見られることが多いが、火山活動監視への有効活用を図るためには、観測値のドリフトやノイズレベルを、設置直後の初期の段階から適切に把握しておくことが重要である。この多成分ひずみ計の設置後約1年間のデータについて調査を行ったので報告する。

この多成分ひずみ計では、4つのセンサーが水平面内で45度ずつ異なる方位に配置されており、それぞれの方位の線ひずみを測定している。各センサーによる観測データには、半日もしくは1日程度の周期の潮汐によるとみられる500 nano-strainにおよぶ変化が顕著であるとともに、長期的な変動もみられる。水平面内で独立なひずみ成分は3成分であることから、このひずみ計は冗長度を持っている。それを利用して観測データの1時間平均値について評価を試みたところ、潮汐が顕著な周期帯について4成分の観測値が整合的であり、この帯域では信頼しうるひずみ変化を観測しているとみられる。それに対して長期的な変動については、6ヶ月で4micro-strainに及ぶ成分間の不整合がある。不整合の原因は特定の成分にある可能性が高いが、現在の段階ではどの程度火山性地殻変動をとらえているのか判断するのが困難である。なお、周期半日より短い変動は、2-3 nano-strain変動が見られる程度であり、これが短周期側の観測精度と考えられる。

キーワード: 伊豆大島, 火山活動監視, ひずみ計, 地殻変動

Keywords: Izu-Oshima, Monitoring of active volcano, Strainmeter, Ground deformation



## 伊豆大島火山のマグマ蓄積期における重力変化 Gravity changes during magma accumulation period in Izu-Oshima volcano

鬼澤 真也<sup>1\*</sup>; 高木 朗充<sup>1</sup>; 福井 敬一<sup>2</sup>; 安藤 忍<sup>1</sup>  
ONIZAWA, Shin'ya<sup>1\*</sup>; TAKAGI, Akimichi<sup>1</sup>; FUKUI, Keiichi<sup>2</sup>; ANDO, Shinobu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁地磁気観測所

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, JMA, <sup>2</sup>Kakioka Magnetic Observatory, JMA

気象研究所では、伊豆大島火山のマグマ蓄積過程の解明および次期噴火の前駆過程の検出を目指し、2004年3月より重力の繰り返し観測を実施している。ここでは、観測に使用している重力計スケールファクターの補正とともに、得られた重力変化の特徴について示す。

観測には LaCoste & Romberg D 型#109, Scintrex CG3M #454, Scintrex CG5 #033 の計 3 台の相対重力計を使用している。測定点は、海岸沿いから山頂部まで、最大で約 180 mgal の重力差があり、複数の重力計で測定した場合、スケールファクターの個体差のために重力差に系統的なずれが生じることが予想される。また、Scintrex CG3M については、いくつかの先行研究にてスケールファクターに時間変化が生じていることが報告されてきた。しかし、使用している重力計のスケールファクターの影響についてこれまで十分に吟味されていない。

スケール検定を目的とした測定は 2012 年に開始したため、これ以前の測定データに関しては絶対値としての補正は困難であるが、キャンペーン観測時に同時に測定したデータから重力計間の相対的な関係は確かめることができる。D#109 による測定結果は比較的安定した結果が得られていることから、D#109 を基準とした CG3M#454 および CG5#033 の相対的なスケールを推定した。この結果、CG3M#454 については、スケールが明瞭に時間変化していることが認められた。また CG5#033 についても 2010 年に生じた故障の前後でスケールがステップ状に変化しているが、この量は修理に伴いメーカーが実施したパラメータ変更でほとんど説明がつく。このほか、D#109 と CG5#033 との比較からどちらか一方あるいは両方のスケールの非線形性を示唆する結果が得られた。現時点では断定的なことは言えないが、測定レンジの狭い D#109 にて生じている可能性が考えられ、今後、吟味していく予定である。

上述の相対的スケール補正後のデータから系統的な重力変化が認識される。2008 年 7 月から 2010 年 6 月にかけての 2 年間で、麓に対して標高の高い観測点での重力値が経年的に増加する結果が得られ、この変化量は最大で約 100 micro-gal にも達する。空間分布からは地殻変動源が推定されているカルデラ北部付近に中心があるように見えるが、仮にこの期間に観測されている地殻変動で説明しようとしても、振幅、位相ともに全く合わない。また、この期間に数 cm~10cm 程度の潮位の経年変化が見られるが、この程度の変化では山麓、山頂との間に 100 micro-gal に達する重力変化を作り出すことは困難である。一方、降水量の変化に対応している様子も見え、海水準上の不飽和層内の水分量の増加が一因かもしれない。ここで仮に地殻変動や環境要素の影響を全く考慮せずに、原因を質点の質量増加に押しつけて位置・質量増加を推定してみると、地殻変動観測で推定されるようにカルデラ北部の海水準下 3 km に推定され、質量増加量は  $1.8 \times 10^8$  ton にも達する。この量は伊豆大島におけるいわゆる大規模噴火でのマグマ噴出量に匹敵し、にわかには受け入れ難い。マグマ活動を適切に把握していくためにも、重力計特性の個体差の検証とともに降水等の影響の評価を進めていく必要がある。

キーワード: 伊豆大島火山, 重力変化, 地殻変動

Keywords: Izu-Oshima volcano, gravity change, ground deformation

## 次の伊豆大島噴火における無人観測ロボット活用のための準備活動 Preparation for the practical use of unmanned observation robots in the next Izu-Oshima eruption

佐伯 和人<sup>1\*</sup>; 市原 美恵<sup>2</sup>  
SAIKI, Kazuto<sup>1\*</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学 理学研究科, <sup>2</sup> 東京大学 地震研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka Univ., <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

火山噴火の際には、噴火直後から避難完了に至る短期間に刻々と変化する状況を観測し、短期の状況予測を避難誘導に活かす事が重要である。1986年の噴火では爆発的な噴火が発生し、カルデラ底やカルデラの外など思いもかけない地点での活動となった。そのため、噴火地点には近寄ることができず、噴火現象の科学的理解や災害軽減のための貴重なデータを調査観測する機会を逸した。また、全島避難の際には、住民に噴火の状況が伝わらず、溶岩流によって岡田-元町間の道路が断たれているといった誤った情報が流れた。伊豆大島では、先の噴火から20年以上が経過し、次の噴火の準備をする必要のある時期となっている。このような状況を次の噴火時に改善するために、噴火時に即応できる新しい観測ロボットの開発と観測体制の確立が必要である。このような考えのもと、発表者は2009年より伊豆大島無人観測ロボットシンポジウムを始めた。シンポジウムの目的は、火山学や宇宙工学や防災など様々な分野で無人観測ロボットを開発している研究者を大島に集め、野外実証試験と情報交換の機会を提供し、ロボットの開発と観測体制の確立を加速させることである。これまでの5年間に、多数の参加者が集まり、実証試験を行った。2009年度は9つの研究グループからUGV8台、UAV2機が、2010年度は5つのグループからUGV5台、UAV2機が、2011年度は9つのグループからUGV13台、UAV3機が、そして2012年度は10のグループからUGV13台、UAV6機が参加した。2013年度には大会直前に伊豆大島が台風27号で被災し、一般公開イベントは中止となったが、6グループからUGV5台、UAV1機が実証試験を行った。また、2013年度からは、東京大学地震研究所の特定共同研究Bの援助も受けはじめた。さらに、2013年度から島民の協力による火山モニターカメラの設置も始めている。これまでの成果と、今後の展望について発表する。今年度のシンポジウムの詳細は以下のURLを参照していただきたい。(http://www.volcano-robot.org/index.html) また、伊豆大島モニターカメラには以下のURLでアクセス可能である。(http://www.volcano-robot.org/oshima\_camera/monitor\_top.php)

キーワード: 伊豆大島, 無人観測ロボット, ロボット, 三原山  
Keywords: Izu-Oshima, unmanned observation robot, robot, Miharayama

## 地殻変動観測から推定される三宅島火山の圧力源について Pressure sources of Miyakejima volcano estimated from crustal deformation

福井 海世<sup>1\*</sup>; 松島 健<sup>1</sup>; 及川 純<sup>2</sup>; 渡邊 篤志<sup>2</sup>; 奥田 隆<sup>3</sup>; 小澤 拓<sup>4</sup>; 宮城 洋介<sup>4</sup>; 河野 裕希<sup>4</sup>  
FUKUI, Miyo<sup>1\*</sup>; MATSUSHIMA, Takeshi<sup>1</sup>; OIKAWA, Jun<sup>2</sup>; WATANABE, Atsushi<sup>2</sup>; OKUDA, Takashi<sup>3</sup>; OZAWA, Taku<sup>4</sup>; MIYAGI, Yosuke<sup>4</sup>; KOHNO, Yuhki<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山観測研究センター, <sup>2</sup>東京大学地震研究所, <sup>3</sup>名古屋大学地震火山研究センター, <sup>4</sup>防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>SEVO, Kyushu University, <sup>2</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>3</sup>EVRC, Nagoya University, <sup>4</sup>NIED, Japan

三宅島火山は 2000 年の噴火以降山体の収縮が続いていたが、2006 年ごろから山体深部の膨張を示す地殻変動が継続していることが報告されており (気象庁, 2013), 現在は次の噴火に向けた準備過程にあると考えられる。三宅島島内では国土地理院・気象庁・海上保安庁・防災科学技術研究所の観測によって火山活動の監視が続けられているが、地殻変動観測点は限られており、2000 年の噴火以降の正確なマグマ蓄積モデルは得られていない。

本研究では、九州大学・東京大学・名古屋大学・防災科学技術研究所と共同で 2011 年より三宅島島内で毎年夏季に稠密な観測点を増設し GPS 観測を実施している。空間分解能の向上のため毎年新しい観測点を増築しており、2013 年にはこれまで観測点のなかった山頂火口の縁に 2 点新設した。2013 年現在で 21 点の観測網を展開している。

この観測データと諸機関でこれまで独自に解析されてきた定常 GPS 観測データを集約・統合処理を行うことで、2011 年 9 月～2013 年 9 月の 2 年間の島内の精密な地殻変動を測定した。その結果、島の南部には膨張、山頂部には収縮の傾向が見られた。また、圧力源モデルの推定から、火口直下浅部 (海面下 0.3km) のシル状収縮源、島南部の深さ 4～7km のダイク状の膨張源、および深部 (海面下 13km) の球状膨張源が確認された。Ozawa & Ueda (2011) は、2006 年～2010 年の合成開口レーダーのデータ解析から山頂火口直下にシル状収縮源を推定しており、解析期間は異なるものの収縮源の位置や体積変化率は本研究の結果と調和的である。また、従来から推定されていた深部球状膨張源のみでは、この期間の観測結果を説明することが出来ない。深部の球状膨張源から新たにダイク状の膨張源にマグマの供給が始まったと考えられる。今後は、特に南部の観測網をより密にして詳細な地殻変動を把握し、膨張源の監視を行っていく必要がある。

謝辞: 本研究においては、国土地理院、気象庁、海上保安庁の各機関より GPS データの提供を受けた。GPS データ処理には RTKLIB (高須他, 2007) を使用した。東京都総務局からは三宅島火山水準測量成果の提供を受けた。地殻変動解析には MaGCAP-V (気象研究所地震火山研究部, 2008) を使用するとともに、使用方法についての丁寧な指導を受けた。図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用した。本研究は東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けた。ここに記して感謝する。

キーワード: GPS, 三宅島, 地殻変動, 火山, マグマだまり

Keywords: GPS, Miyakejima, Crustal deformation, Volcano, Magma chamber

## 小笠原硫黄島ミリオンダラーホール火口2012-2013年噴火の噴出物 The products of 2012-2013 mud eruption event at Million Dollar Hole crater, Ioto volcano

長井 雅史<sup>1\*</sup>; 棚田 俊收<sup>1</sup>; 上田 英樹<sup>1</sup>; 小林 哲夫<sup>2</sup>  
NAGAI, Masashi<sup>1\*</sup>; TANADA, Toshikazu<sup>1</sup>; UEDA, Hideki<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Tetsuo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所 地震・火山防災研究ユニット, <sup>2</sup> 鹿児島大学理学部  
<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Kagoshima University

硫黄島南西部のミリオンダラーホール火口では2012年2月7~9日頃から2013年4月11日にかけて、爆発的な噴火が数回発生した。この間の経緯と噴出物の性状は以下のようにまとめられる。

2012年2月7~9日頃の噴火では、北北西-南南東方向に配列した数個の噴出孔から、泥状の火山灰が噴出した。主要な噴出口は南南東側の既存の火口(直径25m, 深さ10m程度)内の噴出孔A, 北北西の既存の浅い火口地形(直径30m程度)の中央に生じた噴出孔C, 両者の間におそらく新たに形成された噴出孔B(噴出孔名は気象庁による)である。層厚は各火口近傍で30~40cmであった。火山灰の分布は不規則な形状をしており、各噴出孔から方向性をもってジェット状に放出されたものとみられる。その後、小規模な噴煙活動や泥状火山灰のイベント的な放出が続いた。

2013年2月17-18日の噴火は最も規模が大きく、噴出孔A,Bの位置から噴出した火山灰が西側に降下堆積した。火口縁での層厚は1~3mである。弾道放出されたと思われる噴石や人工物は噴出孔から最大220m程度まで到達した。噴火後、噴出孔A,Bは単一の火口(直径35m, 深さ17m程度)となっており、さらに噴出孔Cを中心に直径40m程度の範囲で地表の陥没が始まった。

2013年4月11日の噴火では、噴出孔C付近で噴火が発生し、火山灰が南側に降下堆積した。噴出孔縁での最大層厚は45cmである。噴石の弾道放出が目撃されたが、分布限界は求められていない。噴出孔Cは噴出孔Aと接合し、火口は全体として繭型(長径60m, 深さ17m)となった。その後は平穏な状態で推移している。

一連の噴火で放出された噴出物は泥状の火山灰で、樹木や火口内壁にへばりついており、湿った状態で噴出・堆積した。いずれもスメクタイト・カオリン鉱物からなる熱水変質粘土を主体とするが、石質岩片・結晶片のほかに様々な変質程度の軽石状・黒曜岩状の火山ガラス片も大量に含んでいる。また、戦後火口に遺棄されたと伝えられる兵器類の鉄片や人造のガラス片も含まれている。弾道放出されたと考えられる噴石は凝灰質砂岩・凝灰岩・変質した粗面安山岩等からなる。

各噴火の噴出物は色調や粘土含有量の違い、浸食面や乾裂面の存在によって区別できる。噴出量を推定すると2012年7~9日頃の噴火は約800m<sup>3</sup>, 2013年2月17-18日の噴火は約11,000m<sup>3</sup>, 2013年4月11日の噴火は約2,000-4,000m<sup>3</sup>の火山灰を噴出したと推定される。合計すると14,000~16,000m<sup>3</sup>程度となる。一方、今回の陥没による火口拡大量は10,000~15,000m<sup>3</sup>程度であり、噴出量とほぼ等しい。

一連の噴火は、熱水溜り周辺の変質岩と火道~噴出孔付近の未~弱変質の凝灰岩等の既存物質を吹き飛ばした水蒸気爆発と考えられる。これは2011年から2012年5月にかけて生じた島内の急速な地殻変動に関連してミリオンダラーホール火口地下の熱水活動も活発化したことを示している。

キーワード: 火砕物, 堆積構造, 表面現象, 噴火記録

Keywords: tephra, depositional structure, surface phenomena, eruption record



## 小笠原諸島, 西之島火山における 2013 年の噴火 2013 eruption of Nishinoshima volcano, Ogasawara islands, Japan

伊藤 弘志<sup>1\*</sup>; 小野 智三<sup>1</sup>; 笹原 昇<sup>1</sup>; 野上 健治<sup>2</sup>  
ITO, Koji<sup>1\*</sup>; ONO, Tomozo<sup>1</sup>; SASAHARA, Noboru<sup>1</sup>; NOGAMI, Kenji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup>Japan Coast Guard, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

西之島火山は小笠原諸島に属する玄武岩～安山岩からなる海域火山であり, 伊豆-小笠原弧の火山フロント上に位置する。1973年には西之島南東沖の海底で噴火が始まり, 火口の移動や山体の消失を繰り返しながら新島が形成され, 拡大成長を続けた。活動は1974年5月に停止したが, 6月には漂砂によって西之島旧島と新島は接合した。その後, 1990年頃まで浸食や漂砂堆積による著しい地形変化をうけた。

2013年11月20日, 海上自衛隊の航空機により, 西之島の南東海上で噴煙があがっているのが観測された。直ちに行われた海上保安庁の観測では, 噴火地点には既に新島が形成されており, 激しいマグマ水蒸気爆発が繰り返されていることが明らかになった。翌日21日もマグマ水蒸気爆発の発生と山体の成長が認められたが, 22日からは噴火様式はマグマ噴火(ストロンボリ式噴火)に移行し, また東側山腹からの溶岩流出が始まった。その後, 溶岩流出口は東側山腹から西側山腹へ移行し, 溶岩流がそれぞれ東西に向けて広がったほか, マグマ水蒸気爆発によって形成された山体中央の大きな火口内には火砕丘が発達した。この火砕丘の火口からは常時青白い火山ガスが放出され, 時折爆発的に溶岩片が周囲に飛び散っているのが観察される。また, 12月24日には中央の火口の北側に新たに火口が出現し, 盛んに噴煙をあげ始めた。これらの火口は, 1973年に活動した火口とほぼ同じ位置に存在する。2月3日には, 島の面積は約0.4平方キロメートルになった。

新島はほぼ溶岩流のみから形成されており, 周囲の噴火前の水深はほぼ一定であったと考えられるので, 島の成長速度はマグマ供給レートをほぼ反映していると考えられる。航空機から撮影された空中写真を元にした新島の面積増加速度は溶岩の流出開始以来ほぼ一定であり, マグマ供給レートも同様にほぼ一定に保たれていると思われる。

今回の噴火活動がいつから始まったのかは分からないが, 地球観測研究センターが公開している人工衛星データを用いた海面水温や海面放射輝度の画像からは, 11月7日には西之島の南方海上に, 温度が高く周囲の海水と色の異なる領域が見られ始めている。遅くとも11月7日には, 変色水の湧出などの火山活動が始まっていたといえる。

今後どのくらい活動が続くのかは分からないが, 2月上旬においてはまだ活発な活動を続けており, 沈静化の兆しは見られない。

キーワード: 西之島火山, 火山島, 伊豆-小笠原弧, マグマ水蒸気爆発, ストロンボリ式噴火, 海域火山

Keywords: Nishinoshima volcano, volcanic island, Izu-Ogasawara arc, phreatomagmatic eruption, Strombolian eruption, maritime volcano

## 最近の阿蘇山の火山活動について The recent volcanic activities of Mt. Asosan

加藤 幸司<sup>1\*</sup>; 長門 信也<sup>2</sup>; 松末 伸一<sup>2</sup>; 平松 秀行<sup>2</sup>  
KATO, Koji<sup>1\*</sup>; NAGATO, Shinya<sup>2</sup>; MATSUSUE, Shinichi<sup>2</sup>; HIRAMATSU, Hideyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地震火山部火山課, <sup>2</sup> 福岡管区気象台

<sup>1</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>Fukuoka District Meteorological Observatory

最近の阿蘇山の火山活動は、比較的落ち着いた状態で経過しているが、2011 年 5 月及び 2014 年 1 月にはごく小規模ながらも噴火が発生するなど、時折火山活動の高まりがみられている。本発表では、主に気象庁の観測網で観測されたデータを既知の研究成果と比較するなどして、最近の阿蘇山の火山活動について考察したので報告する。

阿蘇山では、2013 年 9 月上旬から中旬にかけて連続微動の振幅レベルがわずかではあるが増大し、振幅レベルが低下したのちの 9 月下旬には、やや高周波な火山性地震が増加しだし、それに伴って中岳第一火口直下浅部の膨張を示す地殻変動(京大,2013)が観測された。その後、噴火は発生せず、火山活動はいったん落ち着いたかにみえたが、2013 年 11 月頃から湯だまり量が減少しだし、2013 年 12 月頃から再び連続微動振幅が増大し、二酸化硫黄放出量も増加するなど、活動は再び高まりだした。1 月に入って微動の振幅レベルは下がったが、2014 年 1 月 13 日に噴煙高度数百 m のごく小規模な噴火が発生した。噴火はすぐにおさまり、その後、火山活動は表面上は静穏に経過していたが、1 月下旬に再びやや高周波の火山性地震が増加しだし、1 月 27 日には再びごく小規模ながらも噴火が発生した。この一連の活動で、福岡管区気象台は、2013 年 12 月 27 日に火口周辺警報を発表し、噴火警戒レベルを 1 から 2 に引き上げた。

一連の活動で観測された連続微動及びやや高周波の火山性微動の震源は中岳第一火口直下浅部と推定される。Yamamoto(1999)などによると、中岳第一火口直下浅部には、クラックとそこから火口へつながる火道があると推定されている。今回みられた活動は、この付近の活動がなんらかの原因で高まったことが推定される。

## 阿蘇火山火口近傍の重力変動と降水の重力寄与 Gravity variation near the crater of Aso volcano and gravity contribution of precipitation

早河 秀章<sup>1\*</sup>; 鍵山 恒臣<sup>1</sup>; 大倉 敬宏<sup>1</sup>; 吉川 慎<sup>1</sup>

HAYAKAWA, Hideaki<sup>1\*</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>1</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

阿蘇火山の活動的火山口近傍における連続重力測定から火山口近傍の重力変動を調査した。火山活動の静穏な時期において火山口近傍の重力変動は、雨水の降下浸透と地下約 100m に位置する透水層からの地下水流出による水質量移動が占有的であることがわかった。

解析には阿蘇火山第 1 火山口から南西に約 1000m 離れた地点の地下 30m にある本堂観測坑道に設置された超伝導重力計 CT-200 の時系列データを使用した。解析期間は 1998 年 2 月から 2001 年 1 月の 3 年間である。この期間の阿蘇火山は非常に火山活動の静穏な時期であり、活動指標となる中岳第 1 火山口の湯だまりは常に全面湯だまりの状態を維持していて、干上がりや火山灰噴出は観測されなかった。重力測定値から潮汐と気圧応答を除いた重力変動は、毎年梅雨後の 7~8 月に 20~40 micro Gal 上昇し、その後緩やかに減少する季節変化が占有していた。また秋の多雨の後に 10 micro Gal 程度の重力上昇を示すなど月々の降水に応じた複雑な変化も持ち合わせていた。

降水が重力変動に影響することは知られているが、阿蘇火山火口近傍でその詳細を調べた例はない。そこで本研究では、貯留関数型の物理モデルであるタンクモデルを用いて、地下への雨水の降下浸透と地下透水層による地下水流出を計算した。モデルへの入力は、気象庁阿蘇山測候所の降水量を使用した。ただしソーンズウェイト法を用いて簡易的に得た蒸発量の長期間月別平均を考慮して土壌浸透量を減らしている。タンクモデルの流入・流出差から地下の水体积変化を得て、超伝導重力計を中心とした南北 1400m、東西 1400m、地下 200m までの地下領域の水体积変化に対応する密度変化から水質量移動の重力寄与を求めた。解析期間中は火山活動による重力変化はないと仮定して、重力寄与が出来るかぎり測定された重力変動と一致するように透水層の深度とタンクのパラメータである流出抵抗を経験的に決めた。

プレリミナリーな結果であるが、モデル計算から得られた水質量移動による重力寄与は、地下 100m まで雨水が鉛直方向に降下浸透し、100~110m に位置する地下水層から水平方向に流出する条件の場合に、測定された重力変動と良く一致した。この場合のモデル計算値と重力変動値は相関係数 0.9 の高い相関を示した。またモデル計算値と重力変動値の RMS は、各々 10.5 micro Gal, 11.4 micro Gal、そして両者の差分の RMS は 4.8 micro Gal であった。モデル計算値はやや過剰評価となった。この差異は、モデル計算が線形であるのに対し、実際の降水の土壌浸透や地下水流動は非線形であることが大きいと考えられる。しかし重力変動の特徴は十分に再現しており、差分の RMS の 3 sigma まで考慮して 14.4 micro Gal の精度で重力変動値を説明できる。従って火山活動による重力変化がない場合は、地表から地下 110m の間の比較的表層の水質量移動が、火山口近傍における重力変動の主成分であると推測される。

計算モデルの入力は実質的に降水量だけなので任意の期間の水質量移動を計算することができる。今回の計算では地下 30m における重力寄与を求めたが、これを地表に換算することで、長期間実施されている繰り返し重力測定で得られた火山口近傍の重力測定値に対する降水影響の補正に用いることができる。また、重力寄与を求めた領域の東端は中岳第 1~4 火山口の西縁であるので、透水層の東端から流失する水の一部は湯だまりへの地下水流入と考えることができる。降水のピークは梅雨期 6~7 月の約 1 ヶ月間であるが、地下水流動は梅雨の後、その年に応じて数ヶ月間続く緩やかなピークを形成していた。これは湯だまり水位の季節変動と一致する。湯だまりへの地下水流入可能量の時間変動を見積ることが可能になるかもしれない。

キーワード: 阿蘇火山, 重力, 水質量移動, 降水, 地下水, 超伝導重力計

Keywords: Aso volcano, Gravity, Water mass movement, Precipitation, Groundwater, Superconducting gravity meter

## 阿蘇火山中岳第一火口における 2012 年以降の熱活動の特徴 Thermal activities of the Nakadake first crater at Aso volcano, Japan -Unusual heat discharge events in 2012-2014-

寺田 暁彦<sup>1\*</sup>  
TERADA, Akihiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup> Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

阿蘇火山中岳第一火口は、非噴火期を通じて常に 200 MW を超える放熱活動を長期間にわたって継続している国内有数の火山である。同火口は非噴火期に湯だまりと呼ばれる火口湖が形成されており、湖水蒸発という形で熱エネルギーを大気へと放出している。2006 年以降、赤外カメラと水温観測ブイを組み合わせた信頼性の高い水温データに基づき、湖面放熱量の推定が可能となっている。

2006 年から 220 MW 前後で長期安定していた湖面放熱量は、2012 年 3~5 月に 600 MW を超えた。同時期、火口湖水位が約 5 m 減少したことが気象庁により計測されている(福岡管区気象台, 2013)。水位減少率は -9 cm/day に達し、これは 2006-09 年の静穏期に観測された最大値 -2.7 cm/day の約 4 倍に相当する。数値計算の結果、この時の水位減少は、湖底からの熱供給率増大により、湖面蒸発量が増加したことが原因と考えられる。また、湖水溶存成分分析によれば、シリカ濃度が 2011 年 12 月以降は明瞭に増加し、特に 2012 年 3 月には、湯だまりとしては過去最高の 580 mg/L が得られた。これは、地下浅部熱水系の温度が上昇したことを示唆する。その一方で、地震活動の顕著な高まりは認められなかった。

その後、火口湖水量は増減しながら少ない状態で推移し、放熱率計測が難しい状態となった。2013 年 9 月以降は火口湖がほぼ消滅し、湖底噴出した火山ガスは、湖水の関与を殆ど受けずに大気へと放出される状態に移行した。このため、水平風で棚引く噴煙の形状に基づいて放熱量を推定する方法を用いて、第一火口からの放熱量推移を検討した。噴煙解析に用いる映像は、気象庁福岡管区気象台が阿蘇火山博物館に設置している監視カメラで得られたものである(許諾番号: 福気業第 183 号, 263 号)

解析の結果、地震活動が低調かつ SO<sub>2</sub> 放出量も以前と同程度の時期については、200-300 MW 前後の放熱量が算出された。この値は、火口湖観測で見積もられた非噴火期の典型値と矛盾しない。気象庁によれば、2013 年 9 月や 2013 年 12 月~2014 年 1 月にかけて、地震活動の顕著な活発化とともに、SO<sub>2</sub> 放出量として 2000 t/d を超える値が観測された。特に 2014 年 1 月には少量の火山灰噴出も確認された。噴煙解析の結果、これらの時期の放熱量は 800-1000 MW 前後と推定された。静穏期と比較すれば、この値は SO<sub>2</sub> 増加量比と調和的である。すなわち、噴煙量の増減は、地下水蒸発量ではなくマグマからの脱ガス量の増減を反映しているものと推定される。

謝辞 データ取得にあたり、福岡管区気象台の後小路義弘氏、長門信也氏のご助力を頂きました。ここに記して深く感謝します。

キーワード: 放熱量, 阿蘇火山, 火口湖, 噴火

Keywords: heat discharge rate, Aso volcano, hot crater lake, eruption



## 2014 年阿蘇火山活動活性化に伴う浅部比抵抗の時間変化について The temporal changes of the shallower resistivity structure associated with a small eruptions at Aso Volcano, 2014.

宇津木 充<sup>1\*</sup>; 鍵山 恒臣<sup>1</sup>; 早河 秀章<sup>1</sup>; 井上 寛之<sup>1</sup>

UTSUGI, Mitsuru<sup>1\*</sup>; KAGIYAMA, Tsuneomi<sup>1</sup>; HAYAKAWA, Hideaki<sup>1</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto Univ.

阿蘇火山中岳第一火口では、これまでの研究から地下熱水分布に関する詳細な情報が得られている。例えば Kanda et al.(2008) による高密度 AMT 観測からは第一火口直下に低比抵抗域が局在する事が明らかになり、ここに熱水だまりが存在するとするモデルが提案されている。ところで近年、中岳火口では一時的に火山活動が活発化しすぐに終息する、という現象がしばしば生じている。こうした活動に伴う火山性流体の供給量変化により、この熱水だまりの領域が時間変化する事が期待される。こうした変化を浅部比抵抗構造の時間変化として捉える為に、本研究では ACTIVE 観測システム (Utada et al.,2007) を用いた繰り返し電磁探査を中岳火口周辺で行っている。この観測では第一火口の北北西約 1km から人工電流を送信し、その応答として生ずる磁場を中岳第一火口の北、西、南西側と第三火口の計 4 点で観測している。

阿蘇火山中岳第一火口では 2013 年 9 月に、ガス放出量の急激な増加、火山性地震の回数の急増といった火山活動の活発化が見られた。これを受け気象庁の噴火警戒レベルが 2011 年小噴火以来 2 年ぶりに 2 へ引き上げられた。その後 10 月には噴火レベルは 1 へ引き下げられたが活動度の活発化により 12 月末に再度噴火レベル 2 に引き上げられ 2014 年 1 月には小規模噴火が確認された。この後火口からの火山灰放出は断続的に続いている。我々はこの活動の期間を挟む 2013 年 9 月から ACTIVE 観測システムを用いた繰り返し電磁探査を行っている。本発表ではこれらの観測結果を示すと共に、この結果から示唆される比抵抗構造の時間的な変化、及び地下熱水系の状態変化についての考察結果を示す。

キーワード: 比抵抗, 阿蘇火山

Keywords: resistivity structure, Aso volcano

## 阿蘇火山で観測された長周期地震活動の活発化を伴う地殻変動について Crustal deformation associated with increase in VLP events activity in Aso Volcano

大倉 敬宏<sup>1\*</sup>; 吉川 慎<sup>1</sup>; 井上 寛之<sup>1</sup>  
OHKURA, Takahiro<sup>1\*</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>1</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学火山研究センター

<sup>1</sup> AVL, Kyoto Univ.

はじめに

近年の阿蘇火山では、1989年-1993年の噴火以来、マグマを放出するような噴火活動は生じていない。しかし、2005年、2009年および2011年に小規模噴火が発生するなど、静穏期から本格的な活動期に移行する段階を迎えているとも考えられる。

このような状況のもと、2013年9月および12月に阿蘇火山の噴火警戒レベルが1から2に引き上げられ、2014年1-2月には小規模な噴火が発生したとされている。

我々は、2013年9月のレベル上昇前および2014年1月の小噴火後に、長周期地震活動の活発化をともなう明瞭な歪み変化と傾斜変化を火口近傍でとらえたので報告する。

観測坑道について

京都大学火山研究センターでは、1987年以降、中岳第一火口から南西に約1km離れた地点の地下30mにある観測坑道で地震観測や地殻変動観測などを実施してきた。この坑道は等辺長約25m、斜辺長約35mの直角二等辺三角形の形状を有し、坑道内にはインバル棒伸縮計3成分、水管傾斜計2成分、広帯域地震計が設置されている。伸縮計および傾斜計のデータは、22bit, 1秒サンプリングでA/D変換されたのち、リアルタイムで火山研究センターに転送されている。

阿蘇火山の長周期地震

阿蘇火山では、その静穏期においても、中岳火口直下から西斜め下方に伸びた亀裂状の火道を震動源として、卓越周期15秒の微動（長周期地震）が発生している（Yamamoto et al., 1999）。マグマ溜まりから放出される火山ガスが、火口直下の深さ1.5kmにある帯水層で熱水反応を起こし、火口直下の深さ1-2kmに圧力源を形成しガスを一時的に溜める。そして、その溜まったガスが火口に抜けるときに起こる非常にゆっくりとした振動が長周期微動の発生源だと考えられている。さらにこの圧力源は、1994年に頻発した水蒸気爆発の数分前に急激に膨張し、圧力を一時的に溜めていた事も明らかになっている（Kaneshima et al., 1996, Kawakatsu et al., 2000）。

観測された変動とその変動源

2013年9月23日より活発化した地震活動は、24および25日に2000回を超える火山性地震が観測されるに至り、噴火警戒レベルが2に引き上げられた（気象庁、2013）。この地震活動に先立ち、23日の15:00頃より歪み変化が観測されはじめた。火口方向に設置された伸縮計で観測された変動は当初伸びを示していたが、24日00:00頃に縮みへと逆転し、26日06:00頃にピークとなった（1マイクロ strain）。この歪み変化の逆転は、中岳第一火口直下にMogiソースを仮定した場合、約1.2km以深の膨張源がそれより浅い部分へ移動したことで説明は可能である。しかし、Mogiソースの膨張では、火口方向が沈降する傾斜変動が説明できない。そこで、長周期地震の振動源である亀裂状火道（クラック）の開口による地殻変動をOkada(1992)にしたがって計算し、観測された変動と比較した。その結果、深さ約3kmで始まった開口が、上部へと移動することで、観測された歪み変化と傾斜変化を定性的には説明できることがわかった。

2013年9月、2014年1月のいずれの場合も、二酸化硫黄の放出量が一時的に増大した観測されている。したがって、観測された地殻変動は、地下深部のマグマだまりから供給される火山ガスの量が一時的に増加し、クラックを膨張させたことにより、引き起こされたものと解釈することができる。

キーワード: 阿蘇火山, 地殻変動, 長周期地震, 火山ガス, 火道

Keywords: Aso Volcano, Crustal deformation, VLP events, Volcanic gas, Conduit

## 噴煙中に含まれる微量気体成分の安定同位体を指標に用いた活動的火山における噴気の遠隔温度推定 Remote temperature sensing on fumaroles in active volcanoes using stable isotopes of trace gases in volcanic plume

小松 大祐<sup>1\*</sup>; 角皆 潤<sup>1</sup>; 中川 書子<sup>2</sup>  
KOMATSU, Daisuke<sup>1\*</sup>; TSUNOGAI, Urumu<sup>1</sup>; NAKAGAWA, Fumiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University

### 【はじめに】

活動的火山の一つである阿蘇火山中岳第1火口の南壁噴気地帯では、1993年から気象庁などによる赤外放射温度計を用いた表面温度測定がなされているが、その温度は最高でも500度程度である。また低い時には最高温度が100度を下回るなど、明瞭な時間変化も観測されている。一方、同噴気地帯では赤熱現象が頻繁に観測されており、噴気温度は赤外放射温度計によって得られた表面温度よりはるかに高温となっている可能性が指摘されている。実際一部の高解像度の赤外放射温度計を用いた観測で、最高800度程度の表面温度が観測されたこともあるが (Saito et al., 2005)、そこでもやはり明瞭な時間変化が観測されている (Furukawa, 2010)。他方、噴気プルームのCO/CO<sub>2</sub>組成やH<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O組成、SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S組成などの遠隔観測から、同噴気ガスは800度前後の平衡温度を示すことが明らかになったが (Mori and Notsu, 2008; Shinohara et al., 2010)、この平衡温度には有意な時間変化は認められていない。我々は2010年に火山ガスプルーム中のH<sub>2</sub>の水素同位体比から噴気中のH<sub>2</sub>の水素同位体比を推定し、これを温度に換算することで噴気温度を遠隔から推定する水素同位体遠隔温度測定法 (HIReTS: Hydrogen Isotope Remote Temperature Sensing) を利用して、同噴気地帯の噴気温度を866±96度と推定した (Tsunogai et al., 2011)。本研究では2013年11月までに合わせて7回の観測を行い、より正確な噴気温度を推定するとともにその時間変化を明らかにすることを試みた。さらにプルーム試料のCO<sub>2</sub>にも着目し、同様の方法論によって異なる指標から噴気温度を推定し、より正確な温度推定を目指した。

### 【方法】

プルーム試料の採取は2010年3月から2013年11月まで7回行った。いずれも噴気地帯まで直線で150-300m程度の火口壁の上から、各回14-26試料のプルーム試料を内容積300mLの真空ガラス容器に大気圧まで分取して持ち帰り、連続フロー型質量分析システムを用いてH<sub>2</sub>濃度および水素安定同位体組成を分析し、噴気ガス中のH<sub>2</sub>の水素同位体比と噴気温度を推定した。2013年11月の2回の観測についてはH<sub>2</sub>と同様にプルーム試料のCO<sub>2</sub>の酸素同位体を分析し、同様の方法論によって異なる指標から噴気温度を推定した。

### 【結果・考察】

噴気プルーム中のH<sub>2</sub>濃度は、対流圏H<sub>2</sub>のバックグラウンド濃度に近い0.51 ppmvから最高9.75 ppmvまで幅広く分布し、平均でも1.5 ppmvと高いH<sub>2</sub>濃度を示した。噴気プルーム中のH<sub>2</sub>濃度と水素同位体比の関係はいずれも明瞭な二成分混合線を示し、噴気ガス中のH<sub>2</sub>の水素同位体比を10 permil程度の小さなばらつきで推定することが出来た。ここから島弧火山のマグマ水の値 (-24±7 permil vs VSMOW) を噴気ガス中のH<sub>2</sub>Oの水素同位体組成として用い、同位体平衡から求めた噴気温度は838~929度と推定できた。また、噴気プルーム中CO<sub>2</sub>濃度はバックグラウンド濃度に対して最大20%の濃度異常を検出でき、同様の方法論によって噴気温度は600度以上と推定できた。安定同位体を指標に用いた噴気の遠隔温度推定により、同噴気は赤外放射温度計を用いた観測表面温度の長期変化や赤熱の有無とは無関係に、噴気ガスの平衡温度に近い高温状態を保ちつつ、100度程度の有意な時間変化があることが分かった。

キーワード: 火山ガス, 二酸化炭素, 水素, 安定同位体, 同位体交換平衡, 遠隔温度測定

Keywords: fumarolic gases, carbon dioxide, molecular hydrogen, stable isotopes, isotopic exchange equilibrium, remote temperature sensing

## 新燃岳2011年噴火の3日前に発生した奇妙な地震・空振・地殻変動現象 Strange seismic, infrasonic, and geodetic phenomena observed 3 days before the 2011 eruption of Shinmoe-dake volcano

市原 美恵<sup>1\*</sup>; 及川 純<sup>1</sup>; 武尾 実<sup>1</sup>  
ICHIHARA, Mie<sup>1\*</sup>; OIKAWA, Jun<sup>1</sup>; TAKEO, Minoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Shinmoe-dake volcano started its climatic events on January 26 at 14:49. Some precursory phenomena have been found in petrologic studies. The ash from a phreatic eruption on January 19 contained fresh pumice fragments indicating ascent of new magma to a shallow depth (Miyabuchi et al., 2013; Suzuki et al., 2013). Petrologic analyses of the eruption products from the climatic events showed evidences of magma mixing in two stages before the eruptions; Suzuki et al. (2013) estimated the times of the first and second mixing to the eruption as >14 days and 0.7-15 hours, respectively, while Tomiya et al. (2013) conclusively proposed 0.4-3 days and several hours, respectively, and suggested that the first mixing likely triggered the eruption.

On the other hand, no clear precursory signals have been identified in geophysical observations. Considering the above petrologic studies, we reexamined the seismic, infrasonic, and geodetic data in a few weeks to the eruption, and particularly focused on a sequence of strange phenomena on January 23, three days before the eruption. It was the only notable phenomena recognized in several days to the eruption, but has not been reported elsewhere.

Nakada et al. (2013) referred to the JMA report (2012) that volcanic tremor was first recorded at 01:27 on 19 January and continued from the 19 January afternoon to the morning of 23 January. In fact, the tremor started to be recorded at stations around the summit of Shinmoe-dake at 12:45 on 18 January and increased significantly after the phreatic eruption at 01:27 on the 19th. If there was any sign indicating rise of new magma to the shallow depth before the phreatic eruption, the tremor could be the candidate.

On January 23, there was a clear infrasound signal continuing from 4:11 to 4:53 with an amplitude about 1 Pa and a sharp peak frequency at 1.8 Hz. The events was nearly aseismic and the regional seismic stations recorded infrasound shaking of the ground. The bad weather condition prohibited visual observation to see if any surface activity accompanied. At 6:00, the tremor power increased at stations on the north flank while it decreased at a station on the west flank, indicating some change of the source. The tremor power decreased from 8:00 to 8:30, stayed at the low level until 13:15, and then recovered to the previous level by 14:00. It was more distinct at stations close to the summit of Shinmoe-dake; the power decrease was more than an order of magnitude at the nearest station, SMN, 700 m from the summit. After the recovery the tremor stayed nearly same levels until the small eruptive event on the 26th before the main event. During the quiescent period of the tremor, gradual tilt up toward the summit was detected by a broadband seismometer at station SMN. Although, seismic activity except the tremor was low around the days, the quiescent period had more seismic events including relatively low-frequency ones.

Although causal relations among these events or their relation to the magma mixing are totally unclear, the sequence of phenomena on January 23 is potentially important to understand the processes leading to the climatic events of the Shinmoe-dake eruption.

キーワード: 噴火, 微動, 空振, 前駆減少, 傾斜

Keywords: Eruption, Tremor, Infrasound, Precursor, Tilt



## 気象レーダーによる 2011 年新燃岳噴火の噴煙の高さと空振データの関係 Relationship between Infrasound Signals and Plume Heights by the JMA's Weather Radar, the Shinmoe-dake 2011 Eruption

高木 朗充<sup>1\*</sup>; 新堀 敏基<sup>1</sup>; 山本 哲也<sup>1</sup>; 福井 敬一<sup>2</sup>  
TAKAGI, Akimichi<sup>1\*</sup>; SHIMBORI, Toshiki<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Tetsuya<sup>1</sup>; FUKUI, Keiichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 地磁気観測所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute, <sup>2</sup> Kakioka Magnetic Observatory

2011 年 1 月 26~27 日に霧島山新燃岳で発生した連続的な噴火では、気象レーダーによって火山噴煙のエコーが詳細に捉えられている (新堀他, 2013)。そのエコー頂高度を精査し、噴煙の高さと空振データの関係の考察を開始したので報告する。

火山噴煙からの反射エコー頂高度は、主として種子島と福岡の気象ドップラーレーダー (Cバンド) の合成と、鹿児島空港気象ドップラーレーダー (Cバンド) の 2 つがある。後者は空港周辺の気象観測という目的から 15dBZ 程度の閾値 (足切り) が設けられているものの、観測時間の間隔は約 5 分であり前者の 10 分よりも高分解能である。よって、本解析には鹿児島空港レーダーを用いた。鹿児島空港レーダーは 16 の仰角に対する PPI 観測を 5.3 分かけて行い、ボリュームスキャンする (非悪天時の空域モード)。これらの仰角データから定高度水平断面 (CAPPI) データを 5.3 分に 1 回作成する。ここでは時刻精度を高めるため各仰角のスキャン時刻にまで戻ることとし、エコー最頂部の仰角高度のスキャン時刻を秒位まで求めた。

一方、噴煙の高さはマグマ噴出率とべき乗関係にあると考えられ、Sparks(1997) は規模の大きな噴火の事例をもとに、噴煙の高さに対する噴出率のべき数は 0.259 であることを示した。噴出率は空振積分波形と比例関係にある (高木他, 2013) とし、エコー頂高度は噴煙の高さを示すとして、新燃岳噴火中のデータからエコー頂高度と空振積分値のべき乗関係を求めた。その結果、新燃岳火口から南東 3.1km の空振観測点 (KITK) のデータでは、べき数は 0.55 と求めた。その時の残差を最も小さくする空振データの遅延時間と時間窓を求めたところ、エコー検知時刻より 4 分早く、それから前 6 分間の空振データの場合であることがわかった。

これらの結果は噴煙の高さや上昇速度に支配されている可能性もあり、更に時間的に高分解能なエコー頂を測定できれば、噴煙のダイナミクスを空振データでモニタリングできる可能性がある。他の観測点データも含め、さらなる精査が必要である。

### 謝辞

鹿児島 DRAW の解析には、田中恵信氏・鈴木修氏により気象研究所で開発され、山内洋氏・佐藤英一氏らにより改良された「Draft」を使用しました。この場を借りてお礼申し上げます。

キーワード: 噴煙高度, 気象レーダー, 空振, 新燃岳

Keywords: plume height, weather radar, infrasound, Shinmoe-dake

## 2013 年 8 月 18 日桜島昭和火口噴火にともなう九州を伝播した長周期地震波 Long-period seismic waves propagating over Kyushu as associated with the Sakurajima eruption of August 18, 2013

池田 絢美<sup>1</sup>; 久家 慶子<sup>1\*</sup>; 風間 卓仁<sup>1</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>  
IKEDA, Ayami<sup>1</sup>; KUGE, Keiko<sup>1\*</sup>; KAZAMA, Takahito<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>Dept. Geophysics, Kyoto University, <sup>2</sup>NIED

桜島火山の昭和火口は、2006 年に 58 年ぶりに活動を再開し、現在、年 1000 回以上の噴火を起こしている。中でも、2013 年 8 月 18 日 16 時 31 分の噴火は、昭和火口史上極めて大規模な噴火であり、噴煙の高度は約 5000m に達した。本研究では、この噴火時に九州全域にわたって伝播した長周期地震波を基盤的地震観測網 (F-net、Hi-net) で捉え、その特徴を調べた。

噴火に伴って、長周期地震動が、広帯域地震観測網 F-net によって、奄美大島から九州全域にわたる広い範囲で観測された。周期 5 秒以上の長周期の地震波が卓越しており、九州南部から約 2.75km/s のみかけ速度で伝播するようすが見られる。波は 3 成分いずれでも確認できる。この長周期に卓越する地震波は、より稠密な観測点をもつ Hi-net 傾斜計データにおいても見ることができた。桜島に最も近い始良観測点 (AIRH) で最も早い時刻に観測され、F-net で観測されたものと同様のみかけ速度で遠方の観測点へ伝播していったことから、この長周期の地震波は桜島から伝播したものと考えられる。桜島昭和火口を震央として、F-net と Hi-net で観測された水平 2 成分のデータを、radial 成分と transverse 成分に回転したところ、長周期地震波の伝播は、radial 成分と transverse 成分のいずれでも明瞭にみることができた。波のみかけ速度は、radial 成分に比べて transverse 成分で若干はやく、transverse 成分、radial 成分にみられる振動は、Love 波、Rayleigh 波と思われる。

桜島の過去の噴火において同様の長周期地震波が観測されるか、F-net のデータを調べた。2006-2013 年の 5057 噴火のうち、噴煙量・高度と沈降容量の値が大きい 43 噴火について調べたところ、2013 年 8 月 18 日噴火以外にも、南岳火口噴火を含む 5 噴火で長周期地震波の伝播をみつけた。ただし、この 5 噴火でみられた長周期地震波の伝播は、火口からの距離 150-331km までであり、2013 年 8 月 18 日噴火時ほど遠方まで確認できるものはなかった。8 月 18 日の噴火が長周期地震波の励起に長けていた可能性がある。一方、長周期地震波の出現と、噴煙量・高度や沈降容量との間に、明瞭な関係は見いだせなかった。

2013 年 8 月 18 日噴火に伴った長周期地震波は、radial 成分だけではなく、transverse 成分においても顕著に揺れていた。これは 2013 年 8 月 18 日の噴火に限らず、F-net で長周期地震波の伝播が確認できた、南岳火口噴火を含む 5 噴火でもみられた。これまで、桜島南岳火口噴火の力学モデルとして、等方膨張や鉛直方向にのびる円筒の収縮が主張されてきた (Uhira and Takeo, 1994; Tameguri et al., 2002)。しかし、これら等方膨張や鉛直円筒の収縮では Love 波が励起されない。本研究でみつけた Love 波と思われる transverse 成分の揺れを説明するモデルについて、今後検討が必要と考えられる。

## 繰り返し海底地震観測による桜島火山周辺のVT地震活動域と上部地殻3次元地震波速度モデルとの比較 Comparison between areas of VT earthquakes around Sakurajima Volcano and a 3-D velocity model of the upper crust

八木原 寛<sup>1\*</sup>; 平野 舟一郎<sup>1</sup>; 宮町 宏樹<sup>1</sup>; 高山 鉄朗<sup>2</sup>; 市川 信夫<sup>2</sup>; 為栗 健<sup>2</sup>  
YAKIWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; HIRANO, Shuichiro<sup>1</sup>; MIYAMACHI, Hiroki<sup>1</sup>; TAKAYAMA, Tetsuro<sup>2</sup>; ICHIKAWA, Nobuo<sup>2</sup>; TAMEGURI, Takeshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター  
<sup>1</sup>GSE, Kagoshima Univ., <sup>2</sup>SVRC, DPRI, Kyoto Univ.

桜島火山では、火山活動に伴うVT地震が周辺海域下においても発生する(Hidayati, et al., 2007)。周辺海域下で発生する微小なVT地震を検出し、その震源精度を向上させるためには、既設の陸上地震観測に加えて、海底地震計(Ocean Bottom Seismograph, 以下OBSと記す)を用いた観測が不可欠である。著者らは2009年以降、OBSを桜島火山の周辺海域の同一位置に繰り返し投入し、2~3ヵ月長の自然地震観測を5回実施した。本講演では、これまでのOBS観測で得られた、桜島火山の周辺海域下のVT地震の活動域についてまとめる。さらに、VT地震の活動域についての知見を得るために、VT地震の震源分布とトモグラフィ解析による上部地殻内3次元速度モデルと比較した。

これまで実施したOBS観測で得られたVT地震活動について、その活動域は次のようにまとめられる。1) 若尊カルデラ下でepisodicに浅発VT地震が発生する。そのほとんどは深さ5km以浅で発生する。2) 桜島北東海域(若尊カルデラ~桜島東部にかけての領域)の深さ5~10kmにVT地震が発生する。地震数は少ないものの、定常的な活動の可能性はある。3) 始良カルデラの西側半分下ではVT地震の発生は認められない。

一方で著者らは、九州中南部の広域地震観測網データ(米良・他, 2013)を用い、桜島火山周辺の上部地殻3次元地震波速度モデルの暫定解を求めた。本解析の結果が信頼できる深さ範囲はおよそ5~12kmと推定される。深さ6km以浅では、鹿児島湾奥部の若尊カルデラ付近がLow-Vp(5.3~5.4 km/s), Low-Vs(3.0~3.1 km/s)である。6km以深では、深くなるにつれて低速度のピークが、より南西側(桜島火山側)に位置する傾向が認められる。深さ10kmにおいて、低速度のピークは、桜島北東沖(新島付近)下に位置し、Vp=5.4~5.5 km/s, Vs=3.1~3.2 km/sである。これらの特徴の他、深さ6km以浅及び深さ12km以深においては、桜島南岸から桜島南方海域にかけて領域に広がるLow-Vsが際立つ。

5回のOBS観測のうち、湾奥部の3観測点全てでデータを取得できた3回のOBS観測で得られたVT地震と3次元速度分布を比較した。その結果、VT地震は高速度領域と低速度領域の間の中間的な速度の場で発生する。加えて、低速度領域のピークの直上でも発生することが分かった。高速度領域や低速度領域が相対的に歪の集中しにくい領域であることを示唆するかもしれない。また低速度のピークの直上でのVT地震発生は、火山性流体の存在による間隙流体圧の増加や応力変化を反映することが考えられる。

キーワード: 桜島火山, VT地震, 3次元地震波速度モデル

Keywords: Sakurajima Volcano, Volcano-tectonic earthquakes, Three-dimensional seismic velocity model



## 桜島火山における反復地震探査 (2013年) Repetitive seismic survey 2013 in Sakurajima Volcano.

筒井 智樹<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 中道 治久<sup>2</sup>; 為栗 健<sup>2</sup>; 八木原 寛<sup>4</sup>; 大湊 隆雄<sup>5</sup>; 菅井 明<sup>3</sup>; 大島 弘光<sup>6</sup>; 三浦 哲<sup>7</sup>; 山本 希<sup>7</sup>; 市來 雅啓<sup>7</sup>; 野上 健治<sup>8</sup>; 武尾 実<sup>5</sup>; 市原 美恵<sup>5</sup>; 及川 純<sup>5</sup>; 山中 佳子<sup>9</sup>; 大倉 敬宏<sup>2</sup>; 安部 祐希<sup>2</sup>; 清水 洋<sup>10</sup>; 山下 裕亮<sup>10</sup>; 宮町 宏樹<sup>4</sup>; 小林 励司<sup>4</sup>; 味喜 大介<sup>2</sup>; 山本 圭吾<sup>2</sup>; 前川 徳光<sup>6</sup>; 平原 聡<sup>7</sup>; 渡邊 篤志<sup>5</sup>; 奥田 隆<sup>9</sup>; 堀川 信一郎<sup>9</sup>; 松廣 健二郎<sup>9</sup>; 園田 忠臣<sup>2</sup>; 関 健次郎<sup>2</sup>; 吉川 慎<sup>2</sup>; 平野 舟一郎<sup>4</sup>; 渡邊 幸弘<sup>3</sup>; 碓井 勇二<sup>3</sup>; 小林 宰<sup>3</sup>; 池田 啓二<sup>3</sup>; 長門 信也<sup>3</sup>; 小枝 智幸<sup>3</sup>

TSUTSUI, Tomoki<sup>1\*</sup>; MASATO, Iguchi<sup>2</sup>; NAKAMICHI, Harushisa<sup>2</sup>; TAMEGURI, Takeshi<sup>2</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>4</sup>; OHMINATO, Takao<sup>5</sup>; SUGAI, Akira<sup>3</sup>; OSHIMA, Hiromitsu<sup>6</sup>; MIURA, Satoshi<sup>7</sup>; YAMAMOTO, Mare<sup>7</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>7</sup>; NOGAMI, Kenji<sup>8</sup>; TAKEO, Minoru<sup>5</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>5</sup>; OIKAWA, Jun<sup>5</sup>; YAMANAKA, Yoshiko<sup>9</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>2</sup>; ABE, Yuki<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>10</sup>; YAMASHITA, Yusuke<sup>10</sup>; MIYAMACHI, Hiroki<sup>4</sup>; KOBAYASHI, Reiji<sup>4</sup>; MIKI, Daisuke<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Keigo<sup>2</sup>; MAEKAWA, Tokumitsu<sup>6</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>7</sup>; ATSUSHI, Watanabe<sup>5</sup>; OKUDA, Takashi<sup>9</sup>; HORIKAWA, Shinichiro<sup>9</sup>; MATSUHIRO, Kenjiro<sup>9</sup>; SONODA, Tadaomi<sup>2</sup>; SEKI, Kenjiro<sup>2</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>2</sup>; HIRANO, Shuichiro<sup>4</sup>; WATANABE, Yukihiko<sup>3</sup>; USUI, Yuji<sup>3</sup>; KOBAYASHI, Tsukasa<sup>3</sup>; IKEDA, Keiji<sup>3</sup>; NAGATO, Shinya<sup>3</sup>; KOEDA, Tomoyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 気象庁, <sup>4</sup> 鹿児島大学, <sup>5</sup> 東京大学, <sup>6</sup> 北海道大学, <sup>7</sup> 東北大学, <sup>8</sup> 東京工業大学, <sup>9</sup> 名古屋大学, <sup>10</sup> 九州大学

<sup>1</sup> Akita University, <sup>2</sup> Kyoto University, <sup>3</sup> Japan Meteorological Agency, <sup>4</sup> Kagoshima University, <sup>5</sup> University of Tokyo, <sup>6</sup> Hokkaido University, <sup>7</sup> Tohoku University, <sup>8</sup> Tokyo Institute of Technology, <sup>9</sup> Nagoya University, <sup>10</sup> Kyushu University

本発表では桜島火山で実施された第6回目の反復地震探査による地震波反射構造変化の追跡とともに、観測点間引きによる効果についても考察する。桜島火山は九州南部鹿児島県に位置する日本国内でもっとも活動度の高い火山である。桜島火山では火山活動にともなう地下構造変化の検出と評価を目的として、2008年以降毎年反復地震探査が実施されている。2013年は中道他(本大会発表)の観測の一環として反復反射法探査測線の第6回目を実施された。

火山活動に伴う地下構造変化の検出は、火山活動の本質であるマグマなどの流体物質の地下における振舞いへの直接のアプローチであり、地下構造変化の評価は火山活動の展開を理解する上で重要な情報をもたらす可能性がある。さらに地下における物質移動量や滞留量の評価にまで展開することによって、防災上重要な火山活動のタイムラインを予測する鍵になることが考えられる。また地下構造変化の検出手法は継続的に実施可能でなければならない。

本講演では最新の構造変化について報告する予定である。これまでも本合同学会で反復地震探査とその成果について報告してきた。反復地震探査は桜島北岳の北山腹と東山麓とにそれぞれ1本ずつの測線が設定され、4.5Hzのセンサーによる約250点の臨時観測点を展開して観測が実施されてきた。先行する5回の実験の成果として、桜島北岳中腹測線では年とともに地震波反射パターンの変化が認められることが明らかになり、桜島地下の地震波反射応答が年とともに変化していると解釈されてきた。地震波反射応答変化は北岳北山腹測線で明瞭に検出され、桜島北東部地下の4.9キロ深と北岳北山腹地下の8キロ深で継続的に変化が起きていることがわかった。

また2013年実験で実施された観測点間引きの効果についても考察を行う。2012年までの実験では桜島北岳北斜面と東麓とにそれぞれ1測線ずつ約250点からなる観測網を展開していたが、2013年の人工地震実験ではこれまでより74観測点で桜島北岳北斜面測線のみを実施した。観測点間引きによる効果の検討は今後の持続的な実験の実施のために必要なことである。

なお、本観測は参加機関の供出した機材の他、京都大学防災研究所からも機材の貸与を受けて観測を実施した。

キーワード: 桜島火山, 反射法地震探査, 地下構造の時間変化, 制御地震

Keywords: Sakurajima Volcano, Reflection seismology, Dynamic structure, Controlled source seismology



## 2013 年桜島人工地震探査の概要と 2008 年実施探査との比較 Active source seismic experiment in and around Sakurajima volcano in 2013 and comparison with the experiment in 2008

中道 治久<sup>1\*</sup>; 筒井 智樹<sup>2</sup>; 為栗 健<sup>1</sup>; 井口 正人<sup>1</sup>; 八木原 寛<sup>3</sup>; 大湊 隆雄<sup>4</sup>; 菅井 明<sup>5</sup>; 大島 弘光<sup>6</sup>; 三浦 哲<sup>7</sup>; 山本 希<sup>7</sup>; 市來 雅啓<sup>7</sup>; 野上 健治<sup>8</sup>; 武尾 実<sup>4</sup>; 市原 美恵<sup>4</sup>; 及川 純<sup>4</sup>; 山中 佳子<sup>9</sup>; 大倉 敬宏<sup>1</sup>; 安部 祐希<sup>1</sup>; 清水 洋<sup>10</sup>; 山下 裕亮<sup>10</sup>; 宮町 宏樹<sup>3</sup>; 小林 励司<sup>3</sup>; 味喜 大介<sup>1</sup>; 山本 圭吾<sup>1</sup>; 前川 徳光<sup>6</sup>; 平原 聡<sup>7</sup>; 渡邊 篤志<sup>4</sup>; 奥田 隆<sup>9</sup>; 堀川 信一郎<sup>9</sup>; 松廣 健二郎<sup>9</sup>; 園田 忠臣<sup>1</sup>; 関 健次郎<sup>1</sup>; 吉川 慎<sup>1</sup>; 平野 舟一郎<sup>3</sup>; 渡邊 幸弘<sup>5</sup>; 碓井 勇二<sup>5</sup>; 小林 宰<sup>5</sup>; 池田 啓二<sup>5</sup>; 長門 信也<sup>5</sup>; 小枝 智幸<sup>5</sup>

NAKAMICHI, Haruhisa<sup>1\*</sup>; TSUTSUI, Tomoki<sup>2</sup>; TAMEGURI, Takeshi<sup>1</sup>; IGUCHI, Masato<sup>1</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>3</sup>; OHMI-NATO, Takao<sup>4</sup>; SUGAI, Akira<sup>5</sup>; OSHIMA, Hiromitsu<sup>6</sup>; MIURA, Satoshi<sup>7</sup>; YAMAMOTO, Mare<sup>7</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>7</sup>; NOGAMI, Kenji<sup>8</sup>; TAKEO, Minoru<sup>4</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>4</sup>; OIKAWA, Jun<sup>4</sup>; YAMANAKA, Yoshiko<sup>9</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>1</sup>; ABE, Yuki<sup>1</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>10</sup>; YAMASHITA, Yusuke<sup>10</sup>; MIYAMACHI, Hiroki<sup>3</sup>; KOBAYASHI, Reiji<sup>3</sup>; MIKI, Daisuke<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Keigo<sup>1</sup>; MAEKAWA, Tokumitsu<sup>6</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>7</sup>; WATANABE, Atsushi<sup>4</sup>; OKUDA, Takashi<sup>9</sup>; HORIKAWA, Shinichiro<sup>9</sup>; MATSUHIRO, Kenjiro<sup>9</sup>; SONODA, Tadaomi<sup>1</sup>; SEKI, Kenjiro<sup>1</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>1</sup>; HIRANO, Shuichiro<sup>3</sup>; WATANABE, Yukihiko<sup>5</sup>; USUI, Yuji<sup>5</sup>; KOBAYASHI, Tsukasa<sup>5</sup>; IKEDA, Keiji<sup>5</sup>; NAGATO, Shinya<sup>5</sup>; KOEDA, Tomoyuki<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 秋田大学, <sup>3</sup> 鹿児島大学, <sup>4</sup> 東京大学, <sup>5</sup> 気象庁, <sup>6</sup> 北海道大学, <sup>7</sup> 東北大学, <sup>8</sup> 東京工業大学, <sup>9</sup> 名古屋大学, <sup>10</sup> 九州大学

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>Akita University, <sup>3</sup>Kagoshima University, <sup>4</sup>University of Tokyo, <sup>5</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>6</sup>Hokkaido University, <sup>7</sup>Tohoku University, <sup>8</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>9</sup>Nagoya University, <sup>10</sup>Kyushu University

### 1. はじめに

2006 年の桜島昭和火口の噴火再開後, 2008 年に爆発的噴火が発生し, 2009 年には年間 578 回発生した. その後 2010 ~2011 年は年間 1000 回, 2012 年は 900 回, 2013 年は 800 回を超えた. ここ 2 年で回数は減少しているが昨年 8 月 18 日の噴煙高 5 km の噴火など規模の大きい噴火の割合が増えている. また, 始良カルデラから桜島へのマグマ供給経路が明らかになりつつあり, 始良カルデラの膨張は 2013 年現在も継続している (井口・他, 2013; 山本・他, 2013). 昭和火口の噴火が活発化する前の 2008 年 11 月に桜島および始良カルデラの浅部構造解明を目的として人工地震探査が実施された (井口・他, 2009). そして, P 波速度構造推定により始良カルデラ中央部の深さ 1.5~3 km と桜島直下の 1~2 km に低速度域の存在が指摘された (Miyamachi et al., 2013). 2009 年より桜島にて反射法探査が毎年繰り返し実施されてきており, 反射位相の変化が検出され, マグマ供給路における流体存在量の変化として解釈された (Tsutsui et al., 2013; 筒井・他, 2013). そこで, 桜島および始良カルデラの地下構造の時間変化検出を目的として人工地震探査を 2013 年 12 月に実施した.

### 2. 2013 年桜島構造探査観測実施概要

2013 年 12 月 1 日 ~7 日の日程にて本探査を繰り返し反射法探査 (筒井・他, 2014) と同時に, 国立大学と気象庁から 50 名の参加者にて実施された. データ収録には本探査と反射法探査ともにデータロガー白山工業 LS-8200SD(500Hz サンプリング)を用いた. 本探査では 2008 年探査と同じ 2Hz 上下動地震計 (Sercel L-22D) を用いて, アダプターコネクタを経由にてロガーに接続した. ロガーは 2008 年探査 (白山工業 LS-8000SH, 250Hz サンプリング) と異なるが, 同時並行観測にて同じ波形が収録できることを事前確認した. 発破時刻を含め夜間 9 時間連続観測が行われ, 爆発的噴火に伴う地震動と火山性微動も記録した. 島内外 6 箇所が発破 (薬量 200 kg か 300 kg) が 2008 年探査とほぼ同一場所で 12 月 5 日未明に行われた. 地下構造の時間変化を検出するには発破点と観測点の位置の再現性が高いのが望ましい. 発破点については水平位置の差が小さい順に 2.4 m (S1), 5 m (S5), 15 m (S4), 50 m (S2), 62 m (S6), そして 204 m (S3) であった. S3 を除く発破にて波形の再現性が高かった. 観測点 280 で 2008 年の観測点位置の再現性に試みた. 2008 年の観測点写真による位置同定を優先して, 再現状況を以下の基準でランク付けして再現状況を示す. ランク● (163 点): 写真を基にして同一場所に設置. ランク○ (90 点): 簡易 GPS による測位精度内にて同一場所に設置. ランク N (27 点): ランク●・○以外. つまり, 観測点全体の 9 割にて 2008 年と同一場所に設置することができた.

### 3. 2008 年と 2013 年の波形比較と相互相関

S3 を除く発破の同一設置観測点 (ランク●および○) と桜島火山観測所の 7 定常観測点のデータについて 2008 年と 2013 年の波形を比較することで構造の時間変化の検出を試みる. なお, 同一設置観測点のうち 2008 年もしくは 2013 年の探査において地震計の不具合あったもしくはノイズレベルが高い 16 点観測点は解析対象から外した. 2008 年と 2013 年の同一設置観測点について発破地震動波形についてサンプリングを 250Hz に統一してバンドパスフィルタ (2-8Hz) を施して P 波初動を含む 15 s のウィンドウで相関計数を計算した. 過半数の観測点にて相関が 0.8 以上であるが, 北岳・南

SVC55-P26

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 1 日 18:15-19:30

岳・昭和火口周辺と桜島南東部では 0.4-0.6 と低い。この傾向は島外発破点と島内発破点に共通して見られた。よって、比較的浅部の構造が時間変化していることが示唆される。一方、昭和火口に比較的近い観測点については火山性微動の影響による相関変化の可能性も捨てきれない。

**【桜島反復地震探査グループ参加機関】**

北海道大学大学院理学院，秋田大学大学院工学資源学研究科，東北大学大学院理学研究科，東京大学地震研究所，東京工業大学火山流体研究センター，名古屋大学大学院環境学研究科，京都大学大学院理学研究科，京都大学防災研究所，鹿児島大学大学院理工学研究科，気象庁地震火山部，気象庁仙台管区气象台，気象庁福岡管区气象台，気象庁鹿児島地方气象台

キーワード: 人工地震探査, 時間変化, 火山活動, 噴火, 桜島火山, 始良カルデラ

Keywords: active seismic experiment, temporal change, volcanic activity, eruption, Sakurajima volcano, Aira caldera

## 桜島火山におけるアクロスを用いた能動的モニタリング観測報告 3 - Active monitoring by using ACROSS in Sakurajima volcano - observation report 3 -

宮町 宏樹<sup>1\*</sup>; 有門 那津美<sup>1</sup>; 八木原 寛<sup>1</sup>; 山岡 耕春<sup>2</sup>; 渡辺 俊樹<sup>2</sup>; 國友 孝洋<sup>2</sup>; 井口 正人<sup>3</sup>; 為栗 健<sup>3</sup>; 三ヶ田 均<sup>3</sup>; 竹中 博士<sup>4</sup>; 清水 洋<sup>5</sup>; 生田 領野<sup>6</sup>

MIYAMACHI, Hiroki<sup>1\*</sup>; ARIKADO, Natsumi<sup>1</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>1</sup>; YAMAOKA, Koshun<sup>2</sup>; WATANABE, Toshiki<sup>2</sup>; KUNITOMO, Takahiro<sup>2</sup>; IGUCHI, Masato<sup>3</sup>; TAMEGURI, Takeshi<sup>3</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>3</sup>; TAKENAKA, Hiroshi<sup>4</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>5</sup>; IKUTA, Ryoya<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学, <sup>2</sup> 名古屋大学, <sup>3</sup> 京都大学, <sup>4</sup> 岡山大学, <sup>5</sup> 九州大学, <sup>6</sup> 静岡大学

<sup>1</sup>Kagoshima University, <sup>2</sup>Nagoya University, <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>Okayama University, <sup>5</sup>Kyushu University, <sup>6</sup>Shizuoka University

In 2012, in order to realize quantitative monitoring of magma transport process, we deployed the ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) vibrator system composed of two vibrators in the site that is 3.6 km apart from the northwest of the Minamidake crater of Sakurajima.

On September 2012, we have started the full-scale operation under synchronized control of two vibrators with a frequency modulation, in which the modulation period is 50 seconds and the frequency range is 5 to 15 Hz, to produce broad frequency range of signal: one vibrator 'SKR1' with a signal frequency range of 7.510Hz +/- 2.50Hz and the other 'SKR2' with the range of 12.505Hz +/- 2.50Hz. The signal from the ACROSS source is routinely monitored with more than 20 permanent seismic stations in and around Sakurajima volcano. Five temporal seismic stations are also deployed to increase the spatial coverage of monitoring. The signals recorded at the seismic stations are deconvoluted with the source function to obtain the transfer function between the source and the receivers.

In this report, we estimated the daily transfer functions for the SKR2 vibrator at each station by every 5 days stacked data during a whole period (400 days from September 19, 2012 to October 23, 2013) of the operation. It is obviously found that these daily transfer functions vary temporally. To detect quantitatively the temporal variation of the transfer functions, we analyzed the variation of the transverse component (Tt) of the transfer functions at 7 seismic stations located in Sakurajima Island as follows:

(1) We analyzed the transfer function obtained at temporal seismic station 'GOMI' located at about 50m apart from the ACROSS source to verify the stability of power of the seismic waves generated by the ACROSS source. According to the result, we rejected the transfer function evaluated during a period of the unstable power condition from a whole period of the operation.

(2) We visually inspected arrival times and amplitudes for the specific phases in the transfer functions at each station during the period of the stable power condition of the ACROSS, and obtained the quantitative temporal variation for the specific phases.

(3) On a simple assumption that the specific phases are SH waves (the transverse component of the transfer functions), we presumed the depth range where each specific phase propagated in the 5 horizontally layered model simplified from the results of the exploration seismic experiment (Miyamachi et al., 2013).

(4) We compared the temporal variation of the specific phases with activity of volcanic eruptions by JMA, the temporal change of the N-S and E-W horizontal distances (GPS data) in Sakurajima Island, and the temporal change of strain at the HAR station measured by Kyoto University.

In the presentation, we will show the observation results in detail. This ACROSS research project in Sakurajima volcano is still in a pioneering stage, and we have plans in the future to continue our project.

キーワード: 桜島火山, アクロス

Keywords: Sakurajima volcano, ACROSS

## 桜島火山および始良カルデラ周辺域の地盤上下変動：2013年10月・11月実施の水 準測量結果 Vertical ground deformation in Sakurajima volcano and around Aira caldera: results of leveling survey in Oct.-Nov. 2013

山本 圭吾<sup>1\*</sup>; 松島 健<sup>2</sup>; 吉川 慎<sup>3</sup>; 大倉 敬宏<sup>3</sup>; 横尾 亮彦<sup>3</sup>; 相澤 広記<sup>2</sup>; 井上 寛之<sup>3</sup>; 三島 壮智<sup>3</sup>; 内田 和也<sup>2</sup>; 園田 忠  
臣<sup>1</sup>; 関 健次郎<sup>1</sup>; 小松 信太郎<sup>1</sup>; 堀田 耕平<sup>3</sup>; 高橋 温志<sup>3</sup>; 豊福 隆史<sup>4</sup>; 浅野 晴香<sup>4</sup>; 成田 次範<sup>4</sup>  
YAMAMOTO, Keigo<sup>1\*</sup>; MATSUSHIMA, Takeshi<sup>2</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>3</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>3</sup>; YOKOO, Akihiko<sup>3</sup>;  
AIZAWA, Koki<sup>2</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>3</sup>; MISHIMA, Taketoshi<sup>3</sup>; UCHIDA, Kazunari<sup>2</sup>; SONODA, Tadaomi<sup>1</sup>; SEKI, Kenjiro<sup>1</sup>  
; KOMATSU, Shintaro<sup>1</sup>; HOTTA, Kohei<sup>3</sup>; TAKAHASHI, Atsushi<sup>3</sup>; TOYOFUKU, Takashi<sup>4</sup>; ASANO, Haruka<sup>4</sup>; NARITA,  
Tsugunori<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 九州大学大学院理学研究院, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>4</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Graduate School of Sci-  
ence, Kyoto University, <sup>4</sup>Geospatial Information Authority of Japan

桜島火山では、2006年6月から始まった昭和火口における噴火活動が近年激化し、2010年以降は、年間に800回を超  
える爆発的噴火が発生する状況が続いている。平成21年度より開始された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計  
画」における課題「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」の一環として、桜島火山  
周辺において水準測量を行ってきたが、これらに引き続き2013年10月および11月に桜島火山および始良カルデラ周辺  
域において一等水準測量の繰返し観測を実施した。本講演では、この測量結果について報告し、最新の桜島火山の活動  
に伴う地盤上下変動について議論する。

2013年10月・11月に水準測量を実施した路線は、桜島内では海岸線に沿って桜島を一周する桜島一周道路路線、西  
部山腹のハルタ山登山路線及び北部山腹の北岳路線、また桜島外ではBM.2469(旧鹿児島県庁)からBM.2474および  
BM.J(大崎鼻)間の鹿児島湾西岸路線、BM.2500(桜島口)からJ.2797(亀割峠)間の鹿児島湾東岸路線およびJ.2797か  
らBM.2785(曾於市)間の曾於路線であり、総延長は約117kmである。これらの路線を、大学合同測量班(期間:2013  
年11月5日~22日)と国土地理院(期間:2013年10月25日~11月7日及び11月13日~26日)とで分担して測量を  
行った。鹿児島湾東岸および曾於路線における水準測量は、2007年10月-12月の測量から約6年ぶりの実施であった。

桜島内の路線および鹿児島湾東岸・曾於路線については桜島西岸の水準点S.17を、またこれらとは独立している鹿児  
島湾西岸路線についてはその南端にあるBM.2469をそれぞれ不動点(基準)とし、各水準点の比高値を前回の2012年  
11月・12月および2007年10月-12月に行われた測量結果と比較することで、2012年11月・12月から2013年10月・  
11月の期間および2007年10月-12月から2013年10月・11月の期間における地盤上下変動量を計算した。その結果、  
これらの期間において、始良カルデラを中心とした地盤の隆起が確認される一方、桜島中心部付近では地盤の沈降が確  
認された。茂木モデルに基づき、上下変動量データから圧力源の位置を求めると、どちらの期間についても始良カルデ  
ラ中央部地下に増圧源が、また桜島中央部直下に減圧源が推定された。

これらの結果は、始良カルデラ地下のマグマ溜りに関してマグマの貯留が継続して進行していることを示している。一  
方で、桜島直下のマグマ溜りに関してはマグマの放出量が增大する傾向となってきたことを示唆しており、近年の  
昭和火口における噴火活動の活発化を反映したものであると考えられる。

キーワード: 桜島火山, 始良カルデラ, 精密水準測量, 地盤上下変動

Keywords: Sakurajima volcano, Aira caldera, precise leveling survey, vertical ground deformation



## GPS 連続観測データから明らかにした2006年以降の桜島火山の圧力源移動 Movement of pressure source at Sakurajima volcano after 2006 revealed by continuous GPS observation data

堀田 耕平<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 大倉 敬宏<sup>1</sup>; 山本 圭吾<sup>2</sup>  
HOTTA, Kohei<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Keigo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University

桜島火山の火山活動に伴う地盤上下変動は主に精密水準測量により検出され、始良カルデラ下約 10 km (主圧力源) と南岳山頂火口直下約 4 km (副圧力源) で膨張・収縮を繰り返す 2 つの圧力源によって引き起こされていると解釈されてきた (江頭, 1989, 京都大学防災研究所年報)。桜島の主圧力源があるとされる始良カルデラ周辺の地盤は、1993 年以降沈降から隆起に転じ、現在まで継続している。一方、桜島で連続 GPS 観測が開始された 1995 年ごろ以降では、1999 年未の南岳山頂噴火活動活発化が顕著であり、2006 年 6 月には昭和火口の噴火活動が始まった。我々は、これらに先立って急激な膨張が検出された時期の地盤変動を 1 圧力源で近似することで、圧力源が始良カルデラから桜島北岸付近の深さ 6~8 km に近づくことを指摘した (堀田ほか, 2013, 京都大学防災研究所年報)。これは、始良カルデラ下の主圧力源と山頂火口直下の副圧力源が膨張し、見かけ上圧力源が桜島に近づいたものと考えられる。2006 年に噴火活動が始まった昭和火口では、2009 年以降噴火活動の多い状態が続いている。本研究では、2006 年以降の GPS データを解析し、昭和火口噴火活動に伴うマグマの移動過程を推定した。

桜島火山観測所の GPS 連続観測点のデータと国土地理院の GEONET データを用い、GIPSY-OASIS II ver.6.1.2 の PPP-AR 解析を行って各観測点の日々の座標値を計算した。2006 年以降、2009 年春までは目立った変動は見られないが、2009 年春ごろから地盤変動の膨張・収縮量が増加している。

ここで、最も顕著な変動率が検出された 2011 年 10 月~2012 年 3 月の期間に着目した。まず、この期間全体の平均的な 2 圧力源の位置を遺伝的アルゴリズムで探索したところ、始良カルデラ下深さ 8.3 km (圧力源 A) と桜島下深さ 2.9 km (圧力源 B) にそれぞれ増圧源が決まった。次に、始良カルデラ下の主圧力源の体積変化量と桜島下の副圧力源の位置および体積変化量を、圧力源の決定精度がよく、圧力源の変化も十分捉えられると考えられる 4 ヶ月の時間窓を設定して 10 日ずつずらしていくことで探索した。この場合、主圧力源の位置は過去の研究でも概ね 2011 年 10 月~2012 年 3 月の期間全体の平均的な圧力源 A の位置に決まっていることから、この平均的な位置で固定した。時間窓 1 (2011/10/1~2012/1/31) から 6 (2011/11/21~2012/3/20) にかけては、副圧力源は北岳付近から徐々に桜島北部に近づき、それに伴って深さは 3.1 km から 6.3 km、体積変化量は  $+0.44 \times 10^6 \text{ m}^3$  から  $+2.39 \times 10^6 \text{ m}^3$  といずれも増加する傾向にあったが、時間窓 7 (2011/12/1~2012/3/31) で南岳下深さ 3.5 km に移動し、体積変化量は  $+0.27 \times 10^6 \text{ m}^3$  にまで減少した。時間窓 6・7 の中間に時間窓 6-2 (2011/11/26~2012/3/25) を設定して探索したところ、副圧力源は時間窓 6 と 7 の副圧力源のほぼ中間にあたる北岳付近の深さ 4.8 km に位置した。桜島北部にある GPS 観測点では、2011 年 12 月下旬ごろ変動パターンが変化しており (例えば、FUTG 観測点では桜島西部の SVOG 観測点に対する北向きの変位が 12 月下旬ごろに停止した)、桜島では 2011 年 12 月から噴火活動が活発化していることから、この時期に始良カルデラから桜島へのマグマの移動があった可能性がある。

キーワード: 桜島火山, 始良カルデラ, 地盤変動, GPS, 茂木モデル  
Keywords: Sakurajima volcano, Aira caldera, ground deformation, GPS, Mogi's model

相对重力データに対する陸水擾乱補正の重要性：桜島火山を例に  
The importance of hydrological disturbance corrections for relative gravity data: A case study at Sakurajima Volcano

風間 卓仁<sup>1\*</sup>; 山本 圭吾<sup>2</sup>; 福田 洋一<sup>1</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>  
KAZAMA, Takahito<sup>1\*</sup>; YAMAMOTO, Keigo<sup>2</sup>; FUKUDA, Yoichi<sup>1</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Kyoto Univ., <sup>2</sup>DPRI, Kyoto Univ.

An empirical water balance model was created to correct for hydrological disturbances in relative gravity data repeatedly measured at Sakurajima Volcano, southern Japan. This study aims to quantitatively monitor gravity signals due to magmatic activities of Sakurajima Volcano, and we here present the first applied results of the empirical model. The hydrological disturbances were simply calculated by the product of the instant gravity response to unit precipitation and land water storage, which were estimated using digital topography and observed meteorological data. The calculated hydrological disturbance was consistent with the observed absolute gravity data at Harutayama Station from 2010 to 2011 within 8 micro-gal (1 [micro-gal] = 1 E-8 [m/s<sup>2</sup>]), which was smaller than the typical accuracy of relative gravity measurements (~10 micro-gal). In addition, after we subtracted (i.e., corrected) the calculated disturbances from the measured relative gravity data at Sakurajima Volcano, the average amplitude of the corrected gravity changes during 2007-2009 was reduced by 90 % compared with that of the original gravity data. Since gravity changes have been measured using both absolute and relative gravimeters at volcanic areas these days, hydrological disturbance corrections should be applied to the relative gravity data, not only to the absolute one. By sophisticating the effects of spatiotemporal variations in precipitation, evapotranspiration, and infiltration capacity, this model will enable us to robustly monitor long-period and wide-spread gravity variations associated with volcanic activities.

キーワード: 桜島火山, 重力変化, 陸水擾乱, 相对重力測定, 絶対重力測定, 浸透能

Keywords: Sakurajima Volcano, gravity change, hydrological disturbance, relative gravity measurement, absolute gravity measurement, infiltration capacity

## 諏訪之瀬島火山における二酸化硫黄放出率の自動観測と地震観測との比較 Automated sulfur dioxide flux observation at Suwanosejima volcano, Japan, and comparing to seismic data

森田 雅明<sup>1\*</sup>; 森 俊哉<sup>1</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 西村 太志<sup>3</sup>  
MORITA, Masaaki<sup>1\*</sup>; MORI, Toshiya<sup>1</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東大院理, <sup>2</sup> 京大防災研, <sup>3</sup> 東北大院理

<sup>1</sup>Geochem. Res. Center, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto Univ., <sup>3</sup>Dept. Geophys., Tohoku Univ.

Suwanosejima is a remote volcanic island located about 240 km south-southwest of Kagoshima city, Kyushu Island, Japan. This volcano has been erupting very frequently since early-1950s, and is one of the most active volcanoes in Japan. Previous studies on sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) flux measurement of Suwanosejima are very limited and reported that daily average SO<sub>2</sub> flux from this volcano ranged about 5–15 kg/s [Mori et al., 2004; Hirabayashi et al., 2005]. Therefore, we conducted automated SO<sub>2</sub> flux measurement at Suwanosejima volcano to understand SO<sub>2</sub> flux variation with long-term observation at Suwanosejima volcano and to evaluate a relation between SO<sub>2</sub> flux and seismic data.

We developed automated SO<sub>2</sub> flux measurement system to conduct automated observation in such a remote island. The power consumption of the scanning instrument was significantly improved compared to that in the previous studies. The observation was conducted for January 21, 2013–May 7, 2013 (Period I) and November 5, 2013–the present (Period II). The observation system has been working without any trouble for more than 200 days in total showing robustness of the developed system.

SO<sub>2</sub> flux was calculated with a corrected differential optical absorption spectroscopy method for radiative dilution effect [Mori et al., 2006; Kern et al., 2009]. In the observation period of over 200 days, SO<sub>2</sub> flux was calculated for 40 days. The average SO<sub>2</sub> flux in the total observation period was 13.4 kg/s, which ranged from 5.9 kg/s to 34.5 kg/s. The average and the standard deviation in Period I were 16.9 kg/s and 6.2 kg/s, and those in Period II were 14.0 kg/s and 5.7 kg/s, respectively.

Since previously reported SO<sub>2</sub> flux in 2000s [Mori et al., 2004; Hirabayashi et al., 2005] were not corrected for the dilution effect, these values might be significantly underestimated. The average and the standard deviation of uncorrected SO<sub>2</sub> flux for the dilution effect in this study were 9.7 kg/s and 4.3 kg/s. This range was comparable to the range of the previous studies in 2000s. Considering above, SO<sub>2</sub> flux range has been stable since at least 2000s.

Surface and seismic activities in Period I (January 21–May 7, 2013) significantly differed from those in Period II (November 5, 2013–the present). Period I was in a continuous volcanic tremor period (September 2012–July 2013), and Period II was in an intermittent explosions and volcanic tremors period. In contrast to the surface and seismic activities, SO<sub>2</sub> flux variations in Period I and II were almost in the same range. This implies that degassing rate of magma for these two periods were similar. Therefore, the difference of surface and seismic activities which was observed in these periods needs to be explained considering the stable degassing magma rate.

キーワード: 火山ガス, 二酸化硫黄, 放出率, 諏訪之瀬島, 自動観測, 地震観測

Keywords: Volcanic gas, Sulfur dioxide, Flux, Suwanosejima volcano, Automated observation, Seismic data

## 高周波地震波振幅の解析から推定されるタール火山（フィリピン）の浅部S波減衰領域とマグマシステム Shallow active magma body beneath Taal Volcano Island, Philippines

熊谷 博之<sup>1\*</sup>; Lacson Rudy<sup>2</sup>; 前田 裕太<sup>1</sup>; Figueroa Melquiades<sup>2</sup>; 山品 匡史<sup>3</sup>; Bornas Ma. Antonia<sup>2</sup>  
KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; LACSON, Rudy<sup>2</sup>; MAEDA, Yuta<sup>1</sup>; FIGUEROA, Melquiades<sup>2</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>; BORNAS, Ma. antonia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学環境学研究科, <sup>2</sup>フィリピン火山地震研究所, <sup>3</sup>高知大学理学部  
<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup>Kochi University

フィリピンのタール火山は歴史的に活発な噴火活動を繰り返し起こし、多くの人的・物的被害を周辺地域に与えてきた (Torres et al., 1995)。タール火山の監視を強化するために、JST-JICA の SATREPS プロジェクトにより、広帯域地震計・空振計・GPS・磁力計を用いたリアルタイム観測網が2010年11月に設置された。この観測網によりタール火山で発生した火山構造的 (VT) 地震が観測されている。これらの地震について高周波地震波振幅を用いた震源決定 (ASL) 手法を用いた震源位置と初動走時による震源位置を比較した結果、両者に大きな差が生じるイベントが存在することが分かった。この差を生じさせた要因について解析を行った結果、タールの火山島の東側斜面直下にS波を強く減衰させる領域が推定された。本発表ではその解析結果を示すとともに、この減衰領域には脱ガスを起こしているマグマが存在すると解釈できることを示す。

Kumagai et al. (2013) に基づき ASL 法を用いてタール火山で2011-2013年に発生したVT地震の震源決定を行った。この手法はS波の等方輻射の仮定に基づき、高周波 (7-12 Hz) の地震波振幅を用いて震源位置を推定する。S波の等方輻射は、地震波の散乱による伝播の効果によって成り立っていると解釈されている。1次元速度構造と均質非弾性構造 ( $Q = 50$ ) のモデルを用いて ASL 法による震源決定を行った。初動走時の震源決定は、1次元速度構造モデルを用いて差分法に基づく走時計算を用いた手法 (Benz et al., 1996) により行った。

ASL 法による震源位置と初動走時による震源位置を比較した結果、両者に大きな差がある地震が存在し、それらはタール湖にある火山島の東側で発生していた。このような特定の領域のみで発生する差は、局所的な構造の異常に原因があると推定される。ASL 法は速度構造には影響を受けにくい (Kumagai et al., 2013)、減衰の大きい領域を仮定することで説明できるかを検討した。火山島の周辺にグリッドノードを配置し、各ノードで直方体を仮定した  $Q$  の小さい領域を設定した。直方体の各辺と  $Q$  の値を変化させ (その周辺は  $Q = 50$  で固定)、それぞれの  $Q$  モデルに関して、差分法によるパルス幅の計算 (Tomatsu et al., 2001) から地震波の減衰量を推定し、ASL 法による震源再決定を行った。

その結果、火山島東斜面の直下に  $Q = 10$  の領域を設定することで、ASL 法と初動走時による震源位置の差を大きく減少できることが分かった。この結果は、S波を強く減衰させる領域の存在を示しており、この領域には流体の存在が示唆される。この減衰領域は、活発な噴気帯の直下に位置しており、さらにGPS観測から推定された圧力源 (Bartel et al., 2003) の上にある。また電磁気探査から推定された低比抵抗領域 (Yamaya et al., 2013) と一致している。さらにタール火山で1993年に行われた人工地震探査から推定された減衰領域 (Nishigami et al., 1994) とも非常に良い一致を示している。以上のことから、タール火山島の東側斜面直下に見られるS波を強く減衰させる領域は、マグマ火道の最上部で脱ガスを起こしているマグマであると解釈できる。さらにそのようなマグマが20年以上にわたって定常的に存在していた可能性を示唆している。

Bartel et al., JGR, 108, 2475, 2003.  
Benz et al., JGR, 101, 8111-8128, 1996.  
Kumagai et al., JVGR, 257, 57-71, 2013.  
Nishigami et al., Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., 44, 123-138, 1994.  
Tomatsu et al., GJI, 146, 781-794, 2001.  
Torres et al., Eos, 76, 241-248, 1995.  
Yamaya et al., JVGR, 75:729, 2013.



## ロコン火山における爆発地震の初動部分の解析 Waveform analysis on initial phases of explosion earthquakes at Lokon-Empung volcano, Indonesia

山田 大志<sup>1\*</sup>; 青山 裕<sup>1</sup>; 西村 太志<sup>2</sup>; 八木原 寛<sup>3</sup>; 中道 治久<sup>4</sup>; 及川 純<sup>5</sup>; 井口 正人<sup>4</sup>; ムハンマド ヘンドラスト<sup>6</sup>; ヤサ  
スパルマン<sup>6</sup>

TAISHI, Yamada<sup>1\*</sup>; AOYAMA, Hiroshi<sup>1</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>2</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>3</sup>; NAKAMICHI, Haruhisa<sup>4</sup>; OIKAWA, Jun<sup>5</sup>; IGUCHI, Masato<sup>4</sup>; MUHAMAD, Hendrasto<sup>6</sup>; YASA, Suparman<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 鹿児島大学大学院理工学研究科, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 東京大学地震研究所, <sup>6</sup> インドネシア火山地質防災センター

<sup>1</sup>Faculty of Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>3</sup>Faculty of Sci., Kagoshima Univ., <sup>4</sup>DPRI, Kyoto Univ., <sup>5</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>6</sup>CVGHM, Indonesia

ブルカノ式噴火に代表されるような、短時間の物質放出現象に伴って火山近傍で観測される地震動は、爆発地震と呼ばれている。爆発地震の発生機構については、巨視的には鉛直下向きのシングルフォースやクラック等の体積変化などで説明されている。一方で、より細かい時間スケールで爆発地震の初動部分に着目すると、火道深部での爆発地震の励起が火道浅所の爆発（物質の放出現象）に先行するという観測事例が桜島火山や浅間山で報告されている。噴火に先行して発生するこの初動部の励起は、地下における爆発の初期過程であると考えられ、噴火の発生過程を理解する上で注目すべき現象であると言える。ところがこの爆発地震の初動部分に対する研究は、桜島や諏訪之瀬島火山で行われている数例に限られ、研究例が非常に少ない。そこで本研究ではブルカノ式噴火が頻繁に発生しているインドネシアのロコン火山において、地震、空振、地殻変動の三つの項目に関して臨時観測を行い、爆発地震の初動部分の解析と、桜島火山、諏訪之瀬島火山における爆発地震の初動部分との比較検討を行った。

観測データからは、爆発地震の初動部分の励起が火口での空振の励起に比べて先行していることが読み取れた。またロコン火山の爆発地震の初動部は、振動軌跡の方向より火口もしくは火口直下の領域から到来していることが明らかとなった。初動部分は全方位に押しのパルスである P 相の到来から始まり、振幅の大きな引きの D 相が続く。本研究では火口から離れた観測点の地震波形においても明瞭に記録されている D 相に注目し、発震機構についての解析を行った。解析では山体地形を考慮した 3 次元有限差分法によって計算した合成波形を用い、D 相のメカニズム、震源時間関数、地震モーメントの大きさ、震源の深さの推定を行った。

解析の結果、多くのイベントにおいて、ランプ型の震源時間関数を仮定し、火口から深さ約 1 km の位置における円筒収縮を発震機構とする組み合わせで最適解が得られた。推定された地震モーメントや爆発地震、空振の規模より、ロコン火山のブルカノ式噴火の規模は桜島火山と諏訪之瀬島火山の中間程度と見積もられた。先行研究では、D 相の規模と地表で励起される空振の強さについて、桜島ではあまり相関はみられず、諏訪之瀬島火山では強い相関が見られるという不一致が指摘されていた。本研究で推定した D 相の地震モーメントと空振の最大振幅の間には、諏訪之瀬島火山と桜島火山の中間程度の弱い相関が見られる。これら 3 つの火山では、この相関が強い火山ほど D 相の震源の深さが浅い傾向にある。本研究では、従来あまり議論されてこなかった火道の深部から浅部への圧力擾乱について、震源の深さが影響する可能性があるという、新たな結果を提示することができた。

キーワード: ブルカノ式噴火, 爆発地震

Keywords: Vulcanian eruption, Explosion earthquake

## インドネシア, シナブン火山の最近の噴火活動 Recent eruptive activity at Sinabung Volcano, Northern Sumatra, Indonesia

中田 節也<sup>1\*</sup>; 吉本 充宏<sup>2</sup>; Zaenudin Ahkmad<sup>3</sup>; 鈴木 由希<sup>1</sup>; 外西 奈津美<sup>1</sup>; 高木 菜都子<sup>1</sup>; Hendrasto Mochammad<sup>3</sup>; 井口 正人<sup>4</sup>; 大倉 敬宏<sup>5</sup>

NAKADA, Setsuya<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Mitsuhiro<sup>2</sup>; ZAENUDIN, Ahkmad<sup>3</sup>; SUZUKI, Yuki<sup>1</sup>; HOKANISHI, Natsumi<sup>1</sup>; TAKAGI, Natsuko<sup>1</sup>; HENDRASTO, Mochammad<sup>3</sup>; IGUCHI, Masato<sup>4</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>3</sup> インドネシア火山地質災害軽減センター, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所, <sup>5</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Grad. Sch. Sci., Hokkaido Univ., <sup>3</sup>CVGHM, Indonesia, <sup>4</sup>Disaster Res. Inst., Kyoto Univ., <sup>5</sup>Grad. Sch. Sci., Kyoto Univ.

インドネシア, 北スマトラに位置するシナブン火山は, 2010年8月, 9月に有史以来初めての水蒸気爆発を起した。その後, 2013年9月に入って再びマグマ水蒸気爆発が開始し, 同年11月にかけて, 噴煙高度が5kmに達する激しい噴火活動続けた。11月中旬からは火山灰中にマグマ物質の混入が認められ, 11月23日のブルカノ式噴火では北東部に軽石が放出された。また, この噴火では噴煙が崩壊して小規模な火砕流が発生した。12月上旬から, 噴火活動は見かけ上は停滞したものの, 中旬にかけて低周波地震が起こるようになり, 山頂部の膨張が加速していた。山頂火口の崩壊に続き, 12月下旬から山頂火口に溶岩が出現し始めた。山頂火口の溶岩はドーム状に成長し, 12月30日から南東斜面へ崩落し始め, 火砕流となって南東斜面を流れ下った。溶岩ドームは崩落を繰り返しながらも成長し南東斜面の上を伸び, 1月下旬には水平距離1kmを超す溶岩流となった。溶岩の崩落は一日数十回程度の発生を続けている。2月1日の崩壊で発生した火砕流の流走距離は4.5kmで, 山頂から5km以内の危険区域に入域していた地域住民15名が犠牲となった。

現在, 発生している噴火活動は, 9-10世紀の火山活動と, 場所や規模も含めて, 酷似した噴火である。また, 雲仙普賢岳やカリブ海モンセラート島のスプリエールヒルズ火山とも酷似した噴火であり, 溶岩流の形成と崩壊による火砕流発生が, 比較的長期にわたって継続するものと考えられる。

2013年から噴火を繰り返しているマグマの組成は, 11月23日噴火の軽石や1月11日に回収された火山灰中の溶岩片の分析結果によると, 9-10世紀の噴火(SiO<sub>2</sub> 59-60%)と似た角閃石安山岩(SiO<sub>2</sub> 58-59%)であり, 後者に比べてやや珪酸分に乏しい。

キーワード: インドネシア, シナブン, 火山噴火, 火砕流, 溶岩流, 角閃石安山岩

Keywords: Indonesia, Sinabung, volcanic eruption, pyroclastic flow, lava flow, hornblende andesite

## 高温高压下における U, Th, Nd, Sm の金属鉄-ケイ酸塩間元素分配と熱的、化学的リザーバーとしての地球コア

### Metal-silicate partitioning of U, Th, Nd, Sm at high P-T: Implications for heat and chemical budget in the core

野村 龍一<sup>1\*</sup>; 廣瀬 敬<sup>1</sup>; 木村 純一<sup>2</sup>; 常 青<sup>2</sup>

NOMURA, Ryuichi<sup>1\*</sup>; HIROSE, Kei<sup>1</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>2</sup>; CHANG, Qing<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球生命研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>ELSI, Titech, <sup>2</sup>IFREE, JAMSTEC

The excess abundance of siderophile elements in the mantle has been proposed that the core was equilibrated with the mantle at ~3500 K, ~30GPa and  $fO_2 \sim \Delta IW-1$  at the Earth's formation (e.g. Righter, 2011 EPSL). Much more severe condition (>6500 K) is supposed immediate aftermath the moon-forming giant impact based on the study of numerical simulation (e.g. Canup, 2012 Science). The occurrence of high-temperature equilibrium between the core and the mantle evoked that the early core had once incorporated heat-genic radionuclides (U, Th) and rare earth elements (e.g. Nd, Sm), which are known as highly lithophile elements, suggesting profound implications for the thermal history (Nimmo, 2007 Treatise on Geophysics) and early-formed geochemical reservoirs (e.g. sub-chondritic  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , Boyet and Carlson, 2005 Science).

However, partitioning of these elements between liquid metal and silicate melt has been investigated only up to 20 GPa and 2500 K using multi-anvil apparatus (Malavergne et al., 2007 GCA). Here, we extended pressure and temperature conditions up to 138 GPa and 5200 K at  $\Delta IW-2-1$  using laser-heated diamond cell (LH-DAC) and field emission-type electron probe microanalyzer (FE-EPMA, JXA-8530F, JEOL) and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS, Kimura and Chang, 2012 JAAS). K (4wt%) and trace elements (U, Th, Nd, Sm, Hf, W, Pb) doped pyrolitic gel, and pure iron were used as starting materials. Iron-free pyrolitic gel was used as a thermal insulator. After high P-T experiments using LH-DAC, recovered samples were analyzed by FE-EPMA and LA-ICP-MS for major and trace elements, respectively. Fe and Mg were used as internal standards for metal and silicate, respectively for LA-ICP-MS. The diameter of ablated area was about 10  $\mu\text{m}$ , small enough to measure each (silicate melt/liquid metal) phase.

The results are summarized as follows;

(1) Partition coefficient of U and Th are  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  at 3500-4000 K and  $\Delta IW-1$  to -1.5, resulting in 0.02-0.2 ppb (<0.03 TW) U and 0.08-0.8 ppb (<0.04 TW) Th into the core assuming that the abundance of U and Th are 22 and 83 ppb in the Earth's mantle (McDonough and Sun, 1995). Total <0.1 TW (present-day) heat flow in the core has negligible effect on the thermal history of the Earth with <50 K change in the initial temperature at core-mantle boundary (Nimmo, 2007 ToG).

(2) The ratio of partition coefficients,  $D_{Nd}(\text{metal/silicate})/D_{Sm}(\text{metal/silicate})$ , was always unity despite of large temperature dependence for each D, suggesting that the core could not be a candidate for an early-formed (with sub-chondritic  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) hidden reservoir.

## 下部マントル鉱物-メルト間の元素分配

### Element partitioning between mantle minerals and melt under deep lower mantle condition

舘野 繁彦<sup>1\*</sup>; 坂田 周平<sup>2</sup>; 平田 岳史<sup>2</sup>; 廣瀬 敬<sup>3</sup>

TATENO, Shigehiko<sup>1\*</sup>; SAKATA, Shuhei<sup>2</sup>; HIRATA, Takafumi<sup>2</sup>; HIROSE, Kei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学・地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 京都大学・地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 東京工業大学・地球生命研究所

<sup>1</sup>Dept. Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Dept. Earth & Planetary Sciences, Kyoto University, <sup>3</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

Melting is a primary mechanism of chemical evolution of our planet. Earth's mantle would have been completely molten due to moon-forming giant impact, leading to a global magma ocean. Resultant fractional crystallization by secular cooling progressively induced the chemical evolution of the Earth. As a consequence, remnant silicate melt left at the present day at the base of the mantle is a possible explanation for the seismically observed ultralow-velocity zones (ULVZs). The knowledge of melting phase relations and element partitioning between mantle minerals and partial melt is crucial to understand the chemical evolution in the early Earth and the nature of ULVZs. However, melting experiments under the middle to deep lower mantle conditions are quite limited.

Here we carried out the melting experiments on KLB-1 peridotite and basalt to deep lower mantle conditions up to 179 GPa by a combination of laser-heated diamond-anvil cell experiments and chemical analyses of recovered samples. Textural characterization and chemical analysis on major and minor elements were made by a field-emission-type electron microprobe (FE-EPMA). Trace element abundances were determined by a laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). Typical crater diameter was 2 or 5  $\mu\text{m}$  by using ArF Excimer laser.

Results shows that the liquids phase was  $\text{MgSiO}_3$ -perovskite at least above 34 GPa and further to post-perovskite in KLB-1 peridotite. The Fe-Mg distribution coefficients ( $K_D$ ) between perovskite/post-perovskite and melt decreased considerably with increasing pressure, leading to strong Fe-enrichment in partial melts. It supports dense partial melts in a deep lower mantle, which migrate downward to the core mantle boundary (CMB). Furthermore,  $\text{CaSiO}_3$ -perovskite (CaPv) was found to be a liquids phase under whole lower mantle condition in MORB bulk composition. We then investigated the minor/trace element partitioning between CaPv and melt in basaltic composition. Partition coefficient of alkali elements such as Na and K increases with increasing pressure. In particular, potassium, known as highly incompatible element, become compatible with pressure, whose partition coefficient exceeded the unity at 90 GPa. Although pressure effect on  $D_{Sm}$  and  $D_{Nd}$  was not found even to 80 GPa,  $D_{Sm}/D_{Nd}$  decreases with increasing pressure and will reach to the unity at around 100 GPa. Our results shows that Sm and Nd was equally partitioned to partial melt and residual solids upon fractionation of CaPv from primordial deep magma ocean. This has profound implications for the origin of the super-chondritic  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  for all terrestrial rocks.



## 高圧下における FeO-SiO<sub>2</sub> 系の融解関係と沈み込んだ縞状鉄鉱層の行方 Melting relation on FeO-SiO<sub>2</sub> system at high pressure and the fate of the subducted banded iron formations

加藤 千恵<sup>1\*</sup>; 野村 龍一<sup>1</sup>; 廣瀬 敬<sup>2</sup>; 三宅 亮<sup>3</sup>; 大石 泰生<sup>4</sup>

KATO, Chie<sup>1\*</sup>; NOMURA, Ryuichi<sup>1</sup>; HIROSE, Kei<sup>2</sup>; MIYAKE, Akira<sup>3</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学地球生命研究所, <sup>3</sup> 京都大学大学院地球惑星科学専攻, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, <sup>4</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Subduction of banded iron formations (BIFs) may have played a significant role on the evolution of the core-mantle boundary (CMB) region and the chemical stratification at the topmost core. Almost all of the BIFs that had been deposited on the seafloor must have been subducted into the mantle and only a small portion was left at the surface today. Because of their high density, BIFs may have fallen down toward the CMB region. The amount of subducted BIFs is estimated to be  $2 \times 10^8$  km<sup>3</sup>, which roughly matches with the total volume of the ultra-low velocity zones (Dobson and Brodholt, 2005, *Nature*). BIFs would be composed mainly of FeO and SiO<sub>2</sub> in the lower mantle because its oxidation state is close to iron-wustite buffer. We have performed melting experiments on FeO-SiO<sub>2</sub> system by laser-heated diamond-anvil cell technique at 25 - 140 GPa. FE-EPMA and FIB-SEM chemical analysis and observation of the texture of the recovered samples revealed that the liquidus phase was SiO<sub>2</sub> when starting from Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> fayalite, and compositions of the quenched melt suggested that the composition of the eutectic point was extremely FeO-rich (<0.6 wt% SiO<sub>2</sub>). The solidus curve was constrained by observing the existence or no-existence of tiny quenched melt pools in each recovered samples. The solidus temperature at CMB pressure was 3,100 to 3,300 K that were lower than the solidus of pyrolite and the geotherm (Nomura et al., 2014, *Science*). These results imply that when the BIFs reach the CMB, they generate FeO-rich liquid that would be mixed with the basal magma ocean (Labrosse et al., 2007, *Nature*). This liquid would form a thin layer spread along CMB and react with the topmost core. Silicon content in liquid iron varies inversely to the oxygen fugacity when equilibrium with silicate melt (Ricolleau et al., 2011 *EPSL*). Assuming silicon-rich bulk core, exchange of silicon and oxygen would occur between the topmost core and FeO-rich silicate melt. This mechanism may account for the seismic wave speed anomaly observed at the topmost core which is thought to be honor to chemical stratification (Helffrich and Kaneshima, 2010 *Nature*; Buffett and Seagle, 2010 *JGR*).

## LA-MC-ICP-MSを用いたガラスと鉱物のNd同位体スタンダードレス測定 Standardless determination of Nd isotope ratios in glasses and minerals using LA-MC-ICP-MS

木村 純一<sup>1\*</sup>; 青 常<sup>1</sup>; 川畑 博<sup>2</sup>  
KIMURA, Jun-ichi<sup>1\*</sup>; QING, Chang<sup>1</sup>; KAWABATA, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 高知大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Kochi University

We investigated an appropriate instrumental setup for a laser-ablation multiple-collector inductively coupled plasma mass spectrometer (LA-MC-ICP-MS) and found that a reduced oxide setting allowed accurate and precise analysis of Nd isotope ratios in samples with or without concomitant interfering elements. We used an Aridus II solution/excimer laser dual-intake system. The ICP interface used normal sample and skimmer cones with torch shield switched off and an additional large interface rotary pump. The setting accomplished reduced oxide levels  $\text{NdO}^+/\text{Nd}^+ 0.01\text{--}0.05\%$ , without significant sacrifice of the instrumental sensitivity ( $\sim 70\%$ ). Oxide molecular ions for the lighter elements were negligible and accurate internal mass bias corrections were achieved for both Sm and Nd using isotopic ratios derived from thermal ionization mass spectrometry measurements. This report reveals a novel setup that requires no external mass bias corrections (standardless analysis) for Sm and Nd isotope analyses by both solution- and LA-MC-ICP-MS methods. Solution analysis of La Jolla Nd standard gave a  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratio of  $0.511860 \pm 0.000026$ , which is in excellent agreement with the reference value (relative deviation (RD) = +6 ppm). JMC Nd standard solution yielded a  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratio of  $0.512216 \pm 0.000044$  (RD = -14 ppm) while a Sm-doped JMC solution showed  $0.512211 \pm 0.000030$  (RD = -23 ppm). For LA analyses, the observed ratios and RDs were  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511921 \pm 0.000013$  (RD = -12 ppm) for NIST SRM 610 glass standard (430 ppm Nd/453 ppm Sm);  $0.512490 \pm 0.000018$  (RD = +14 ppm) for Durango apatite (1121 ppm Nd/147 ppm Sm);  $0.512200 \pm 0.000009$  (RD = -26 ppm) for Fish Canyon Tuff sphene;  $0.512232 \pm 0.000003$  (RD = +65 ppm) for EDR monazite; and  $0.512890 \pm 0.000147$  (RD = +34 ppm) for groundmass of a St. Helena lava (22.7 ppm Nd/ $\sim$ 5.01 ppm Sm). All measurements were in good agreement with the reference values. Examinations on Sm/Nd elemental fractionation have also been made and we confirmed that this was originated from the ICP interface region rather than at laser ablation site.

キーワード: LA-MC-ICP-MS, Nd 同位体, ガラス, 鉱物  
Keywords: LA-MC-ICP-MS, Nd isotope, glasses, minerals

## 氷多結晶体の粒界拡散の可視化 ~氷の塑性流動則の解明に向けて~ Grain boundary diffusion of polycrystalline ice $I_h$ under confining pressure of 100 MPa

野口 直樹<sup>1</sup>; 久保 友明<sup>2\*</sup>; Durham William<sup>5</sup>; 清水 以知子<sup>4</sup>; 鍵 裕之<sup>3</sup>  
NOGUCHI, Naoki<sup>1</sup>; KUBO, Tomoaki<sup>2\*</sup>; DURHAM, William<sup>5</sup>; SHIMIZU, Ichiko<sup>4</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科応用化学専攻, <sup>2</sup> 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, <sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設, <sup>4</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>5</sup> マサチューセッツ工科大学地球大気惑星科学部

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Hiroshima University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Geochemical Laboratory, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>5</sup>Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology

Ice  $I_h$  is a primary constituent of surfaces of the icy Galilean satellites and ice sheets at the Antarctica. Thus understanding rheological behavior of ice  $I_h$  will contribute to better knowledge about the dynamics and tectonics of the surface of the icy satellites and ice sheets. Stress applied by the tidal deformation to the surfaces of the icy satellites was predicted to be very low, ~1 MPa (Sotin and Tobie 2004), and diffusion and grain-size-sensitive creeps probably control the deformation of the surfaces of the ice satellites. The deformation map under such a low stress condition can be constructed, based on two diffusion constants, grain boundary and volume diffusion coefficients, of polycrystalline ice  $I_h$ . The volume diffusion coefficient of ice  $I_h$  was determined from experiments using a single crystal of ice  $I_h$  (Ramseier 1967; Itagaki 1967), while the grain boundary diffusion coefficient has not been determined yet. Thus we carried out experiments to determine directly the grain boundary diffusion coefficient of polycrystalline ice  $I_h$ .

The diffusion couples have been composed of a pair of disks of pore-free polycrystalline  $H_2O$  and  $D_2O$  ices. The glass beads with a diameter of 2  $\mu m$  were doped in the diffusion couples to prevent the grain growth during diffusion experiments by Zener pinning effect. The volume fraction of the glass beads was approximately 1%. The diffusion experiments were carried out under the confining pressure of 100 MPa using a gas apparatus surrounded with a cryostat (Durham et al. 2001). Temperatures were set in the range from 235 K to 256 K. After keeping the diffusion couples in the deformation instrument for 20 ~94 hours, we shaved off thin sections from the diffusion couples. Two-dimensional diffusion profiles of the thin section were determined with micro-and imaging- Raman spectroscopes and a cryo-stage. The Raman mapping or Raman imaging measurements were carried out with keeping the thin sections at -90 °C. The concentration of deuterium can be determined from the relative intensity of Raman band of OH stretching mode to that of OD stretching mode using a quantitative curve. The two-dimensional distribution showed enrichment of deuterium at the grain boundaries near the  $H_2O/D_2O$  boundary. It indicates that grain boundary diffusion of ice  $I_h$  is rapid. The diffusion profiles obtained by the experiments enable to estimate the grain boundary diffusion coefficient of ice  $I_h$  which is essential to construct the deformation map.

キーワード: 氷, 拡散, 粒界拡散, 水素同位体, ラマン分光, レオロジー

Keywords: ice, diffusion, grain boundary diffusion, hydrogen isotope, Raman spectroscopy, rheology

## 先小御岳火山の微量元素及び Sr-Nd 同位体組成 Trace elements and Sr-Nd isotopic compositions of the pre-Komitake volcano

柴田 知之<sup>1\*</sup>; 吉本 充宏<sup>2</sup>; 藤井 敏嗣<sup>3</sup>; 中田 節也<sup>4</sup>

SHIBATA, Tomoyuki<sup>1\*</sup>; YOSHIMOTO, Mitsuhiro<sup>2</sup>; FUJII, Toshitsugu<sup>3</sup>; NAKADA, Setsuya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 京都大学地球熱学研究施設, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院, <sup>3</sup> 特定非営利活動法人 環境防災総合政策研究機構, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Institute for Geothermal Research, Kyoto University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Hokkaido University, <sup>3</sup>Crisis & Environment Management Policy Institute, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The chemical characteristics of magmas from pre-Komitake Volcano, which is a buried and old volcanic body beneath the northeastern flank of Mt. Fuji, show the differences to those of Mt. Fuji (Yoshimoto *et al.*, 2010). According to Yoshimoto *et al.* (2010), incompatible elements of former magmas increase with increasing SiO<sub>2</sub>, whereas those of later magmas increase at nearly constant SiO<sub>2</sub>. They emphasized that those changes of the magma chemistry at this area from 250 ka to recent may have occurred due to a change in regional tectonics around 150 ka, although this remains unproven. To elucidate this problem, geochemical study for the magmas from pre-Komitake is essential. Therefore, we analyzed trace element and Sr-Nd isotopic compositions of those magmas. The samples are selected from the entire group, which are classified by lithology and chemistry (Group 1-3, Yoshimoto *et al.*, 2010), and from 188-412m (core ERI-FJ2) and 426-624m (core ERI-FJ3) in depth. Trace elements are analyzed using by quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometer following by the method of Chang *et al.* (2003). Sr-Nd isotopic compositions are measured by thermal ionization mass spectrometer following by the procedure of Shibata *et al.* (2007) and Yoshikawa and Shibata (2003). The enrichments of LILE's, Pb and Sr, which are general characteristics of island arc magma (eg. Wood *et al.*, 1979), are observed from the analyzed samples in the primitive mantle normalized multi-element diagram. High Sr/Y ratios (70 in max.) and the weak positive Eu anomalies ( $Eu^* = [Eu]_N / ([Sm]_N/2 + [Gd]_N/2)$ ; N means chondrite normalized value) are also found from several samples. The Sr and Nd isotope ratios show the variations from 0.703320-0.703476, and 0.512885-0.513087, respectively.

The Sr-Nd isotopic compositions of pre-Komitake volcano show a similar range of Mt. Fuji presented by Nagai *et al.* (2004), indicating that those magmas can be generated from the same source materials. Although the variations of Sr isotope compositions are small, significant differences are found. Most of the samples show similar Nd isotope ratios, whereas few samples show lower significant differences. These observations can be explained by 1) difference of slab derived fluid and 2) different degrees of crustal contaminations. It is unlikely that Nd isotope ratio of slab derived fluid is changed, because it is difficult keeping isotopic heterogeneity during the deep processes. Crustal rocks, which have similar Sr-Nd isotope ratios of Tanzawa tonalities (Kawate, 1996), are the candidate producing the whole isotopic variation of pre-Komitake volcano. Therefore, we prefer the contributions of crustal materials to explain the Sr-Nd isotopic variations of pre-Komitake volcano. The Eu\* shows positive correlation with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. This may indicate the plagioclase accumulation contributed the magma genesis of pre-Komitake volcano, and cause the elevation of Sr/Y ratios.

This study is supported by fund for collaboration from Earthquake Research Institute, The University of Tokyo.

キーワード: 先小御岳, 微量元素, Sr-Nd 同位体, 富士山

Keywords: pre-Komitake, trace elements, Sr-Nd isotope



## HIMU – FOZO – PREMA の成因：極端な同位体組成の端成分と中間的な同位体組成を持つ端成分の違いに対する解釈 Geochemical connection between HIMU-FOZO-PREMA: link to chemical and water content variation in oceanic crust

下田 玄<sup>1\*</sup>; 小木曾 哲<sup>2</sup>  
SHIMODA, Gen<sup>1\*</sup>; KOGISO, Tetsu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 京都大学大学院人間・環境学研究科

<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>2</sup>Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Kyoto

One of fundamental concepts of the geochemistry is an existence of mantle reservoirs. Namely, isotopic composition of the ocean island basalts (OIBs) are explained by mixing of distinct and isolated reservoirs in the Earth (White, 1985; Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997; Stracke, 2012). In early research on the mantle reservoirs, the isotopic composition of OIBs was mainly explained by the mixing of depleted MORB mantle (DMM) and three enriched reservoirs, those are HIMU (high-u:  $u = 238\text{U}/204\text{Pb}$ ) EM1 (Enriched Mantle 1) and EM2 (Enriched mantle 2) whose isotopic compositions are enriched extremes. In addition to these reservoirs, importance of reservoirs whose isotopic compositions are common and intermediate has been pointed out, these are, FOZO (Focal Zone, Hart et al., 1992), C (common component; Hanan and Graham, 1996), PREMA (Prevalent Mantle, Zindler and Hart, 1986) and PHEM (Primitive Helium Mantle, Farley et al., 1992). Although the existences of these intermediate reservoirs are still in debated, the isotopic compositions of these reservoirs, in particular FOZO, have been frequently used to describe the isotopic distribution of OIBs. Therefore, elucidating the origin of these reservoirs should be important from the perspective of production of mantle heterogeneity (e.g., Hofmann, 1997; Stracke et al. 2005; Stracke, 2012).

To evaluate the origin of high-u (HIMU), focal zone; (FOZO) and Prevalent Mantle (PREMA), geochemical modeling was conducted from the perspective of chemical fractionation at mid-ocean ridges and subduction zones. For the modeling, MORB compositions from the Mid-Atlantic ridge are compiled for seven trace elements (Rb, Sr, Nd, Sm, Pb, Th and U) and used as representatives of oceanic crust compositions. Effect of chemical fractionation at a mid-ocean ridge is estimated based on magnesium number and frequency distribution. The results suggest that the chemical fractionation at a mid-ocean ridge can produce moderately depleted isotopic compositions those are suitable for PREMA if the age of recycled MORBs is 1-2 Ga. It may follow that subduction modification is unnecessary for the production of PREMA, suggesting the importance of recycling of dry MORBs. Dehydration process at a subduction zone can produce FOZO isotopic signatures if degree of dehydration is high (4 %) that may represent maximum amount of dehydrated water. Thus, FOZO-PREMA isotopic array can be explained by mixing between recycled strongly dehydrated and dry MORBs. Consequently, PREMA-FOZO arrays could be produced by mixing between dry and dehydrated MORBs. For the production of HIMU, U and Th enrichment during crystal fractionation at mid-ocean ridge and Pb depletion owing to removal of sulfur during subduction is required in addition to FOZO production condition. As sulfur content in MORBs should be controlled by degassing process at a mid-ocean ridge, key processes that can differentiate HIMU from FOZO may be magma evolution process at mid-ocean ridge.

キーワード: HIMU, FOZO, PREMA, OIBs, マントル端成分, リサイクル  
Keywords: HIMU, FOZO, PREMA, OIBs, recycling, mantle reservoirs

## 南鳥島レアアース泥の調査結果概要と今後の調査・研究計画 REY-rich mud deposits around Minamitorishima Island -General overview and future re- serach plan-

鈴木 勝彦<sup>1\*</sup>; 飯島 耕一<sup>1</sup>; 加藤 泰浩<sup>2</sup>; 藤永 公一郎<sup>2</sup>; 柏原 輝彦<sup>1</sup>; 中村 謙太郎<sup>2</sup>; 町田 嗣樹<sup>3</sup>; 野崎 達生<sup>1</sup>; 高谷 雄太  
郎<sup>2</sup>; 安川 和孝<sup>2</sup>; 大田 隼一郎<sup>2</sup>; 原口 悟<sup>2</sup>; 荒木 修平<sup>2</sup>; 劉 漢捷<sup>2</sup>; 西尾 嘉朗<sup>1</sup>; 白井 洋一<sup>1</sup>  
SUZUKI, Katsuhiko<sup>1\*</sup>; IIJIMA, Koichi<sup>1</sup>; KATO, Yasuhiro<sup>2</sup>; FUJINAGA, Koichiro<sup>2</sup>; KASHIWABARA, Teruhiko<sup>1</sup>; NAKA-  
MURA, Kentaro<sup>2</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>3</sup>; NOZAKI, Tatsuo<sup>1</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>2</sup>; YASUKAWA, Kazutaka<sup>2</sup>; OTA, Junichiro<sup>2</sup>;  
HARAGUCHI, Satoru<sup>2</sup>; ARAKI, Shuuhei<sup>2</sup>; LIU, Hanjie<sup>2</sup>; NISHIO, Yoshiro<sup>1</sup>; USUI, Yoichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学院工学系, <sup>3</sup> 早稲田大学創造理工学部

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>School Creative Sci. Engineering, Waseda Univ.

We report general overview and future reserach planof REY-rich deposits around Minamitorishima Island.

キーワード: レアアース泥, 南鳥島, 化学組成, 調査航海, 深海資源

Keywords: REY rich mud, Minamitorishima Island, chemical composition, research cruise, deep-sea mineral resource

## サブボトムプロファイラで見た南鳥島 EEZ におけるレアアース泥の分布と特徴 Distribution and characteristics of REY-rich mud in the Minamitorishima EEZ inferred by sub-bottom profiling

中村 謙太郎<sup>1\*</sup>; 町田 嗣樹<sup>2</sup>; 藤永 公一郎<sup>1</sup>; 加藤 泰浩<sup>3</sup>; 鈴木 勝彦<sup>4</sup>; 高谷 雄太郎<sup>3</sup>; 安川 和孝<sup>1</sup>; 大田 隼一郎<sup>1</sup>; 原口 悟<sup>1</sup>; 荒木 修平<sup>1</sup>; 劉 漢捷<sup>1</sup>; 宇佐美 諒<sup>1</sup>; 牧 亮太<sup>1</sup>; 飯島 耕一<sup>4</sup>; 西尾 嘉朗<sup>4</sup>; 白井 洋一<sup>4</sup>; 野崎 達生<sup>4</sup>; MR13-E02 Leg2 乗船者一同<sup>4</sup>; KR14-02 乗船者一同<sup>4</sup>

NAKAMURA, Kentaro<sup>1\*</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>2</sup>; FUJINAGA, Koichiro<sup>1</sup>; KATO, Yasuhiro<sup>3</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>4</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>3</sup>; YASUKAWA, Kazutaka<sup>1</sup>; OTA, Junichiro<sup>1</sup>; HARAGUCHI, Satoru<sup>1</sup>; ARAKI, Shuuhei<sup>1</sup>; LIU, Hanjie<sup>1</sup>; USAMI, Ryo<sup>1</sup>; MAKI, Ryota<sup>1</sup>; IJIMA, Koichi<sup>4</sup>; NISHIO, Yoshiro<sup>4</sup>; USUI, Yoichi<sup>4</sup>; NOZAKI, Tatsuo<sup>4</sup>; MR13-E02 LEG 2, Cruise members<sup>4</sup>; KR14-02, Cruise members<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東大・工・システム創成, <sup>2</sup> 早大・創造理工, <sup>3</sup> 東大・エネルギー・資源フロンティアセンター, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> Sys. Innovation, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> School Creative Sci. Engineering, Waseda Univ., <sup>3</sup> FRCER, Univ. of Tokyo, <sup>4</sup> JAMSTEC

In recent years, particular attention has been paid to the "REY-rich mud" (deep-sea sediment enriched highly in rare-earth and yttrium (REY)), because of its high potential as a REY resource. The REY-rich mud was originally reported from the central Pacific Ocean in 2011 (Kato et al., 2011). In January 2013, during KR-13-02 cruise, the mud was also discovered at southern part of the Minamitorishima within the Japanese exclusive economic zone (EEZ) (Kato et al., 2013; Fujinaga et al., 2013; Suzuki et al., 2013). Then, in the late 2013 and early 2014, we further conducted two more research cruises (MR13-E02 Leg2 and KR14-02 cruises) in the northern and eastern part of the Minamitorishima EEZ. During the cruises, we performed an acoustic survey using sub-bottom profiler (SBP), together with mud sampling by piston coring. In this presentation, we report the distribution and characteristics of the REY-rich mud in the northern and eastern part of Minamitorishima EEZ inferred by the SBP survey.

Keywords: rare-earth elements, REY-rich mud, Minamitorishima, EEZ, sub-bottom profiler

## 南鳥島 EEZ 北部に分布するレアアース泥の地球化学的特徴 Geochemical features of rare-earth elements and yttrium-rich mud from north region of Minamitorishima EEZ

藤永 公一郎<sup>1\*</sup>; 加藤 泰浩<sup>1</sup>; 中村 謙太郎<sup>2</sup>; 鈴木 勝彦<sup>3</sup>; 町田 嗣樹<sup>4</sup>; 高谷 雄太郎<sup>1</sup>; 安川 和孝<sup>2</sup>; 大田 隼一郎<sup>2</sup>; 原口 悟<sup>1</sup>; 荒木 修平<sup>2</sup>; 劉 漢捷<sup>2</sup>; 宇佐美 諒<sup>2</sup>; 牧 亮太<sup>2</sup>; 飯島 耕一<sup>3</sup>; 西尾 嘉朗<sup>3</sup>; 白井 洋一<sup>3</sup>; 野崎 達生<sup>3</sup>; MR13-E02 Leg2 乗船者一同<sup>3</sup>; KR14-02 乗船者一同<sup>3</sup>

FUJINAGA, Koichiro<sup>1\*</sup>; KATO, Yasuhiro<sup>1</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>2</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>3</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>4</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>1</sup>; YASUKAWA, Kazutaka<sup>2</sup>; OTA, Junichiro<sup>2</sup>; HARAGUCHI, Satoru<sup>1</sup>; ARAKI, Shuuhei<sup>2</sup>; LIU, Hanjie<sup>2</sup>; USAMI, Ryo<sup>2</sup>; MAKI, Ryota<sup>2</sup>; IIJIMA, Koichi<sup>3</sup>; NISHIO, Yoshiro<sup>3</sup>; USUI, Yoichi<sup>3</sup>; NOZAKI, Tatsuo<sup>3</sup>; MR13-E02 LEG2, Cruise members<sup>3</sup>; KR14-02, Cruise members<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター, <sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 早稲田大学創造理工学部環境資源工学科

<sup>1</sup>Frontier Research for Energy and Resources, University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Systems Innovation, University of Tokyo, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>Department of Resources and Environmental Engineering, Waseda University

Recently, deep-sea sediment enriched in rare-earth elements and yttrium (REY) (called REY-rich mud) has been reported from a central part of the Pacific Ocean (Kato et al., 2011). Due to its great potential as a completely new REY resource, the REY-rich mud attracts particular attention from a wide field of scientists and non-scientists. In 2013, we have discovered the deep-sea sediments that are extremely enriched in REY (~6,600 ppm) from the south region of the Minamitorishima within the Japanese exclusive economic zone (EEZ) (Kato et al., 2013; Fujinaga et al., 2013; Suzuki et al., 2013). In 2014, in order to investigate the detailed distribution of REY-rich mud in the EEZ of Minamitorishima, we further conducted research cruises (MR13-E02 Leg. 2 and KR14-02) in the north region of the Minamitorishima. Here, we report the distribution, mineral composition, and geochemical features of the REY-rich mud from the north region of the Minamitorishima EEZ.

Keywords: rare earth elements (REEs), REY-rich mud, Minamitorishima, deep-sea mineral resource



## 独立成分分析を用いた太平洋および南鳥島レアアース泥の地球化学データ解析 Independent component analysis to decouple geochemical components of REY-rich mud in the Pacific and Minamitorishima EEZ

安川 和孝<sup>1\*</sup>; 高谷 雄太郎<sup>2</sup>; 大田 隼一郎<sup>1</sup>; 藤永 公一郎<sup>1</sup>; 中村 謙太郎<sup>1</sup>; 加藤 泰浩<sup>2</sup>; 岩森 光<sup>3</sup>  
YASUKAWA, Kazutaka<sup>1\*</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>2</sup>; OTA, Junichiro<sup>1</sup>; FUJINAGA, Koichiro<sup>1</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>1</sup>; KATO,  
Yasuhiro<sup>2</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東大・工・システム創成, <sup>2</sup> 東大・エネルギー・資源フロンティアセンター, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Sys. Innovation, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> FR CER, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup> JAMSTEC

南東太平洋および中央北太平洋の深海底に広く分布する「レアアース泥」は、様々なハイテク産業に不可欠なレアアースを豊富に含み、新たな海底鉱物資源として有望視されている (Kato et al., 2011). 2013 年には、KR13-02 航海により、日本最東端の南鳥島周辺海域でも海底面下 10 m 以浅にレアアース泥の存在が確認された (藤永ほか, 2013; 鈴木ほか, 2013). この南鳥島周辺海域のレアアース泥は、我が国の独自開発が可能な排他的経済水域 (EEZ) 内に存在し、かつ太平洋の他の海域で確認されていたレアアース泥の最高濃度 (2,230 ppm) を大きく上回る約 6,600 ppm という極めて高い総レアアース濃度をもつことで、大きな注目を集めている。

Kato et al. (2011) は、深海底堆積物中でレアアースの濃集に寄与している成分を推定するために、独立成分分析を用いてレアアース泥を含む太平洋の深海底堆積物の全岩化学組成データを解析した。その結果、生物源 Ca および生物源 Si にそれぞれ富む傾向を示しレアアースを希釈する独立成分と、Fe および Al にそれぞれ富む傾向を示しレアアースの濃集に関与する独立成分の計 4 成分が抽出された。このうち、レアアースが特に濃集する傾向を示した Al に富む独立成分については、主要元素組成の類似性から遠洋性粘土に通常含まれる phillipsite が端成分と考えられた。しかしながら、文献値から想定される phillipsite 自身のレアアース濃度では観測される全岩堆積物中のレアアース濃度を説明できない。そのため Kato et al. (2011) は、レアアースを濃集した別の鉱物が phillipsite の凝集体に取り込まれることで、phillipsite が堆積物中のレアアース濃集に寄与していると解釈した。その後、放射光を用いた XAFS 測定および  $\mu$ -XRF 元素マッピングにより、堆積物中でレアアースと直接結合しているのは apatite であることが示された (戸田, 2013; Kashiwabara et al., 2014).

こうした経緯をふまえ、本研究では、太平洋広域および南鳥島周辺 EEZ から得られた深海底堆積物の包括的な化学組成データセットに対し、独立成分分析を適用してその起源成分の再解析を実施した。また、レアアース濃集に寄与する独立成分をより正確に解釈するため、堆積物中の phillipsite および apatite それぞれの単体をもつ化学組成を LA-ICP-MS で分析し、新たに端成分として用いた。本発表では、これらの結果について報告する。

キーワード: 深海底堆積物, レアアース, 独立成分分析

Keywords: deep-sea sediment, REE, independent component analysis

## 南鳥島 EEZ 内におけるレアアース泥の構成鉱物の特徴およびその成因への示唆 Mineralogical features of REY-rich mud in EEZ around Minamitorishima and implications for its genesis

大田 隼一郎<sup>1\*</sup>; 高谷 雄太郎<sup>2</sup>; 藤永 公一郎<sup>2</sup>; 安川 和孝<sup>1</sup>; 中村 謙太郎<sup>1</sup>; 町田 嗣樹<sup>3</sup>; 原口 悟<sup>1</sup>; 加藤 泰浩<sup>2</sup>  
OTA, Junichiro<sup>1\*</sup>; TAKAYA, Yutaro<sup>2</sup>; FUJINAGA, Koichiro<sup>2</sup>; YASUKAWA, Kazutaka<sup>1</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>1</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>3</sup>; HARAGUCHI, Satoru<sup>1</sup>; KATO, Yasuhiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学工学系研究科システム創成学専攻, <sup>2</sup> 東京大学工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター, <sup>3</sup> 早稲田大学創造理工学部環境資源工学科

<sup>1</sup>Department of Systems Innovation, University of Tokyo, <sup>2</sup>Frontier Research Center for Energy and Resources, University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Resources and Environmental Engineering, Waseda University

The KR13-02 cruise was conducted in the southern part of the Minamitorishima to explore rare-earth elements and yttrium-rich mud (REY-rich mud) within Japanese Exclusive Economic Zone (EEZ) on January 2013. During the cruise, seven sediment cores were successfully collected. The results of bulk sediment analyses showed that one of the cores (PC05) has an extremely REY-concentrated layer with 6,596 ppm total REY (Kato et al., 2013; Suzuki et al., 2013) which is three times higher than the maximum concentration in the mud previously reported for the eastern South and central North Pacific Ocean (2,230 ppm; Kato et al., 2011). In addition to REY, P concentration in the layer is also noticeably high (Kato et al., 2013; Suzuki et al., 2013), suggesting that Ca phosphate (apatite) is mainly responsible for the REY-enrichment in the layer, as in the case for the mud presented in other areas (Kashiwabara et al., 2014). However, factors contributing the extreme enrichment of REY, which in turn might provide important insights into the genesis of REY-rich mud, are still uncertain. In the present contribution, we report mineralogical features of Minamitorishima REY-rich mud including the extremely REY-concentrated layer and discuss about its genesis.

キーワード: レアアース, レアアース泥, 深海底鉱物資源

Keywords: rare-earth elements (REEs), REY-rich mud, deep-sea mineral resource

## MORB 気泡中のヘリウム・ハロゲン組成 Helium and halogen compositions in MORB vesicles

鹿児島 渉悟<sup>1\*</sup>; 高畑 直人<sup>1</sup>; 佐野 有司<sup>1</sup>  
KAGOSHIMA, Takanori<sup>1\*</sup>; TAKAHATA, Naoto<sup>1</sup>; SANO, Yuji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

ハロゲン元素の海底火山からの脱ガス様式はよく分かっていない。我々は海嶺からのハロゲンの放出量を制約するために MORB の気泡に含まれるヘリウム・ハロゲン組成を決定した。世界中の 8 か所 (東太平洋海嶺の 13oN-17oS; 大西洋中央海嶺の 15oN-37oN; 中央インド洋海嶺の 24-25oS) で採取された試料を NaOH または NH<sub>3</sub> 溶液中に投入し、液体窒素の温度で溶液を凍結させた状態で破碎して気泡中の揮発性物質を抽出した。そしてヘリウムの同位体組成を希ガス用質量分析計 VG-5400 で、フッ素・塩素の含有量をイオンクロマトグラフィー ICS2100 で測定した。さらにガラス部分のフッ素・塩素濃度を二次イオン質量分析計 NanoSIMS で測定した。

気泡中の <sup>3</sup>He 濃度は  $(4.5 \pm 2.1) \times 10^{-15}$  mol/g, F/<sup>3</sup>He 比と Cl/<sup>3</sup>He 比は  $(1.4 \pm 0.5) \times 10^6$ ,  $(2.9 \pm 0.6) \times 10^7$  と得られた。そしてこれらの比と既知の <sup>3</sup>He 放出量 530 mol/y から、フッ素・塩素の放出量として  $(7.1 \pm 2.8) \times 10^8$  mol/y,  $(1.5 \pm 0.4) \times 10^{10}$  mol/y が得られた。これらは海嶺からの放出量の下限值として考えられる。なぜならばフッ素・塩素のガラス中含量は気泡中含量に対してそれぞれ 7000 倍以上, 100 倍以上であり、海洋地殻中のこれらの元素の一部が海洋中へと溶け出すだけで放出量が大きく上がってしまうからである。気泡中とガラス中の F/Cl 比の差はフッ素・塩素の気泡-ガラス間における分配係数の違いを反映しており、これらの元素の海嶺における脱ガス様式には大きな違いがあると考えられる。また MORB に対して希ガス化法 (中性子を照射して試料中のハロゲンを希ガスへと変換し、それらの希ガスの同位体分析を行うことで元のハロゲン組成を決定する手法) を行った研究 [1] の結果から、気泡中の Br/Cl 比と I/Cl 比は  $(1.8 \pm 0.1) \times 10^{-3}$ ,  $(5.4 \pm 0.1) \times 10^{-5}$  と計算された。これらの値は同研究で報告されている固体ガラス中の元素の存在比とほぼ同じであり、このことは海底の玄武岩質マグマにおける塩素・臭素・ヨウ素の気泡-ガラス間の分配係数が似ていることを示している。Br/Cl 比、I/Cl 比および本研究で得られた塩素の放出量を基に、臭素・ヨウ素の海嶺からの放出量は  $(2.7 \pm 0.8) \times 10^7$  mol/y,  $(8.3 \pm 2.4) \times 10^5$  mol/y と計算された。これらは <sup>3</sup>He の放出量に対して間接的に規格化することで得られた初めての臭素・ヨウ素の海嶺における放出量の推定値であり、塩素と同じ理由で下限値であると考えられる。本研究の手法と希ガス化法とを組み合わせることで、同一試料を分析することで、ハロゲン元素の固体地球内部からの脱ガス様式・物質循環について新たな展望が得られるだろう。

参考文献: [1] Kendrick et al. (2012) GCA 81, 82-93.

キーワード: 中央海嶺玄武岩, ヘリウム, ハロゲン, 放出量, 物質循環

Keywords: Mid-ocean ridge basalt, Helium, Halogen, Flux, Geochemical cycle

## 生駒山地における白亜紀深成複合岩体のマグマプロセス Magmatic process of Cretaceous plutonic complex in Ikoma mountains, SW Japan

小泉 奈緒子<sup>1\*</sup>; 奥平 敬元<sup>1</sup>; 小川 大介<sup>1</sup>  
KOIZUMI, Naoko<sup>1\*</sup>; OKUDAIRA, Takamoto<sup>1</sup>; OGAWA, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪市立大学 院理  
<sup>1</sup> Osaka City University

生駒はんれい岩類は、大阪府と奈良県の県境に位置する生駒山地に分布する白亜紀の深成岩体で、本邦における最大規模の苦鉄質岩体である。生駒はんれい岩類には、野外における観察から周囲に分布する中間質岩類と成因的に密接な関係が認められる(生駒山地領家帯研究グループ, 1986など)。このため、本研究ではこれらを生駒はんれい複合岩体として、岩石学的記載、全岩化学組成分析、鉱物化学組成分析を行い、そのマグマプロセスについて考察した。

生駒はんれい複合岩体の岩相は、(1)斜長石キュームレイト(Pl cumulate)、(2)普通角閃石?斜長石キュームレイト(Hbl-Pl cumulate)、(3)普通角閃石はんれいノーライト(Hbl gabbronorite)の3タイプに分けられる。Pl cumulateは中粒で、斜長石を集積鉱物として含み、それらの粒間には斜長石の他に角閃石や輝石などが見られる。Hbl-Pl cumulateは細粒で自形から半自形の斜長石および角閃石を集積鉱物とする。また、Hbl gabbronoriteは細流から中粒で、Hbl-Pl cumulateから遷移的に変化する。

生駒はんれい複合岩体における全岩化学組成は、SiO<sub>2</sub>含有量44-63wt.%の組成範囲を示す。しかし、SiO<sub>2</sub>含有量50wt.%前後を境として、SiO<sub>2</sub><50wt.%においては、他の主要および微量元素に対するSiO<sub>2</sub>含有量の変化が小さいが、SiO<sub>2</sub>>50wt.%では、SiO<sub>2</sub>含有量は各成分と共に大きく変化する。Pl cumulate および Hbl-Pl cumulate は主に SiO<sub>2</sub> < 50wt.%の領域に含まれ、Hbl gabbronorite は主に SiO<sub>2</sub> > 50wt.%の領域に含まれる。

Pl cumulateに含まれる自形性の良い斜長石は、An<sub>91-83</sub>付近に組成ピークを持ち、この斜長石の組成は、全岩化学組成におけるPl cumulateのトレンドの端成分にほぼ一致する。また、斜長石のモード組成と全岩組成におけるCaO含有量には相関が見られることから、このことから、Pl cumulateの組成トレンド形成においては斜長石の集積過程による寄与が示唆される。モデル計算を行った結果、SiO<sub>2</sub>含有量約50wt.%の組成を出発物質として、最大70%程度の斜長石の集積によって全岩組成トレンドの再現が可能であることが明らかになった。Pl cumulateは岩体内でも標高の高い場所に分布しており、全岩組成におけるCaO含有量と標高に弱いながらも正の相関が見られることから、マグマだまりにおける斜長石の集積場所を反映していると考えられる。一方で、Hbl-Pl cumulate および Hbl gabbronorite に含まれる斜長石は、バイモーダルな組成を示し、これらはAn<sub>70-75</sub>付近に最大のピークを、そしてAn<sub>85-90</sub>付近に小さなピークを持つ。このことから、生駒はんれい複合岩体における斜長石の晶出には少なくとも2つの段階があったこと、そして、Anに富む斜長石が集積したPl cumulateの形成後にHbl-Pl cumulate および Hbl gabbronorite が形成されたことが示唆される。しかし、Hbl-Pl cumulateについては、角閃石と斜長石の集積作用のみで全岩組成トレンドを再現することは困難であり、その形成過程については更なる検討が必要である。

82Maにおける生駒はんれい複合岩体のSr同位体初生値とSiO<sub>2</sub>含有量の間には、弱い相関が認められる。このことから、生駒はんれい複合岩体の形成時に苦鉄質マグマと、より珪長質でSr同位体初生値の高い物質との混合があったことが示唆される。生駒はんれい複合岩体周辺には、同時代に活動した花崗岩類が分布しており、これらの岩体の全岩化学組成は、生駒はんれい複合岩体のSiO<sub>2</sub>>50wt.%における組成トレンドの珪長質側の延長線上に位置する。しかし、モデル計算の結果、これらの岩体のSr同位体初生値は、混合の珪長質端成分として考えるには低すぎるということがわかった。従って、生駒はんれい複合岩体は、同時代の花崗岩類よりも高いSr同位体初生値を持つ地殻物質と混合していたと考えられる。

【文献】生駒山地領家帯研究グループ(1986)地球科学, 40, 102?114.

キーワード: 領家帯, マグマプロセス, 結晶集積  
Keywords: Ryoike belt, Magmatic process, cumulate, accumulation



## 阿蘇火山火砕流堆積物中のアパタイトの揮発性元素組成 Volatile compositions of apatite grains from pyroclastic flow deposits of Aso volcano

道久 真理絵<sup>1\*</sup>; 小木曾 哲<sup>1</sup>  
DOKYU, Marie<sup>1\*</sup>; KOGISO, Tetsu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学人間・環境学研究所

<sup>1</sup> Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

本研究では、メルトインクルージョンの分析によりメルトの含水量が推定されている阿蘇火山火砕流堆積物中のアパタイトを分析し、アパタイトの OH 量とメルトの含水量との関係性について検討した。

地球の水は、表層や内部において生命活動やマントルダイナミクスなどに大きな影響を及ぼしている。そのような地球の水の起源の解明のためには、初期地球内部の水の量を明らかにすることが重要である。初期地球内部の水の量について知る手がかりとして、地球最古の鉱物である西オーストラリア・ジャックヒルズ変礫岩中のジルコンが包有する初生的なアパタイトがある。アパタイトはその結晶中に揮発性元素 (F, Cl, OH) を持つため、ジャックヒルズのアパタイト包有物から初期地球内部の水についての情報が得られることが期待される。しかし、アパタイトの OH 量からメルトの含水量を推定する際に必要となるアパタイト-メルト間の OH の分配についての知識は不十分であるため、これを明らかにすることを本研究の目的とする。

本研究の試料である阿蘇火山火砕流堆積物は、マフィック試料とシリシク試料があり、長石中のメルトインクルージョン組成の分析によって含水量はマフィックメルト>シリシクメルトであると推定されている。新たに試料からアパタイトを取り出して EPMA で分析した結果、1 試料中のアパタイトの Cl 濃度はほぼ一定である一方、F 濃度に幅があった。これは F と OH とが交換関係にあることを示している。また、アパタイトの OH 量とメルトの含水量は逆相関を示した。

この原因として、メルト中の Ca が F と化合物をつくり、アパタイトへの F の分配を妨げたということが考えられる (Mathez and Webster, 2005)。メルトの Ca 濃度はマフィック試料で約 3.34wt%，シリシク試料で約 1.44wt% であり、マフィックメルトの方が Ca 濃度が高かったため、F のアパタイトへの分配が強く阻害され、代わりに OH がアパタイトへ分配された可能性がある。

また、メルト組成を推定するために分析したメルトインクルージョンの含水量は、実際はメルト組成を反映していなかったということも考えられる。メルトインクルージョン中には気泡が多く存在し、気泡が多い試料ほど含水量は低いという傾向がみられる。すなわち、メルトインクルージョン中の水は気泡として抜けてしまっており、メルト組成よりも含水量を低く見積もっている可能性がある。また、斜長石の組成幅やメルト組成、温度から計算されたメルトの含水量はマフィック試料で 4.1-7.7wt%，シリシク試料で 4.1-5.7wt% で、マフィックメルトの方が含水量が多かったと見積もられている (Kaneko et al., 2007)。よって、実際はアパタイトの OH 量とメルトの含水量は正の相関関係である可能性がある。

1 試料中の F 濃度と OH 濃度に幅がある原因については、脱ガスに伴う F-OH の交換反応や結晶分化作用の進行によるメルト組成の変化を反映していると考えられる。

本研究の結果として、阿蘇火山火砕流堆積物中のアパタイトの OH 量とメルトの含水量は逆相関を示し、1 試料中の F 濃度と OH 濃度に幅があるということがわかった。今後メルトの含水量を推定したデータの信頼性や、メルト中の Ca やその他の元素がアパタイト-メルト間の揮発性元素分配に与える影響などを検討していく必要がある。

キーワード: アパタイト, 水, 揮発性元素, 初期地球, マグマ

Keywords: apatite, water, volatile component, the early Earth, magma

## 天然多結晶ダイヤモンド（カルボナド）のオスmium同位体比測定の試み Measuring osmium isotopic composition of natural polycrystalline diamond (carbonado) and implications for its origin

白石 智子<sup>1\*</sup>; 仙田 量子<sup>2</sup>; 鍵 裕之<sup>1</sup>; 角野 浩史<sup>1</sup>; 鈴木 勝彦<sup>2</sup>

SHIRAISHI, Noriko<sup>1\*</sup>; SENDA, Ryoko<sup>2</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>1</sup>; SUMINO, Hirochika<sup>1</sup>; SUZUKI, Katsuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域  
<sup>1</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth and Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The origin of natural polycrystalline diamond, carbonado, has long been enigmatic. Carbonado is characterized as high porosity, no genetic relations to kimberlites, light carbon isotope ratio, and lack of mantle-derived mineral inclusions. Based on these observations, several hypotheses about the origin of carbonado have been proposed: transformation of subducted organic carbon into diamond in a cold slab (Robinson, 1978); shock metamorphism of organic carbon by meteorite impact (Smith and Dawson, 1985); radiation-induced diamond formation by spontaneous fission of uranium in crustal environment (Ozima *et al.*, 1991); formation in an interstellar environment (Garai *et al.*, 2006); crystallization from C-O-H fluid in cratonic upper mantle (Ishibashi *et al.*, 2012). However, no conclusive evidence has been provided to settle a controversy about the origin of carbonado. In this study, we first tried to measure Os isotopic composition of carbonados collected from placer deposits in the Central African Republic in order to identify its origin.

Natural samples have a wide variety of Os isotopic ratios,  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ , depending on their origin because  $^{187}\text{Re}$ , the parent nuclide of radiogenic  $^{187}\text{Os}$ , is a mildly incompatible element during mantle melting whereas Os is a strongly compatible element.  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  ratio of upper continental crust ranges from 1.0 to 1.4 (Peucker-Ehrenbrink and Jahn, 2001), whereas that of primitive upper mantle is about 0.13 (Meisel *et al.*, 1996). Os isotopic ratio of the micro diamond crystal itself can reflect the environment where diamond grains crystallized. Carbonado is a porous aggregate of micrometer-size diamond crystals and original chemical characteristics of the grain boundaries could be heavily altered after the diamond growth.

This study was designed to determine Os isotopic ratios within diamond crystals of carbonados and in the grain boundaries separately. Two-step sample chemical leaching was carried out by Carius tube method (Shirey and Walker, 1995). First, carbonado samples were crushed to submillimeter grains and were sealed in a Carius tube with spike solutions and inverse aqua regia ( $\text{HCl} + 3 \text{HNO}_3$ ). The solution was heated at 220 °C for 24 hours. This procedure was for extract Os in the grain boundaries. Second, the residue of solid samples was heated in a vacuum chamber to convert diamond to graphite. A graphitized sample was decomposed in acid solution in the same way as the first leaching process. The second process was to extract Os within diamond grains. Osmiums in the both solutions were purified with the solvent extraction (Cohen and Waters, 1996) and microdistillation (Roy-Barman, 1993). Osmium isotopic compositions of the samples were determined using thermal ionization mass spectrometry (TIMS). Blank levels of Carius tubes and inverse aqua regia solutions prepared from several chemical reagents were checked. As a result, a quartz glass tube was found to have the lowest blank level compared with other glass tubes made from borosilicate glass.

In the presentation, we will report preliminary results of Os isotopic ratios of the carbonado, which have the potential for a decisive evidence to close the debate on the origin of carbonado.

Keywords: carbonado, TIMS, Os isotope, diamond

## ZnTiO<sub>3</sub> の高温高压相転移 High-pressure high-temperature phase transitions in ZnTiO<sub>3</sub>

阿部 航平<sup>1\*</sup>; 糞谷 浩<sup>1</sup>; 赤荻 正樹<sup>1</sup>  
ABE, Kohei<sup>1\*</sup>; KOJITANI, Hiroshi<sup>1</sup>; AKAOGI, Masaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学習院大学理学部

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Gakushuin University

ペロブスカイト型 MgSiO<sub>3</sub> は下部マントルの主要構成鉱物であると考えられている。MgSiO<sub>3</sub> は、22-24GPa、1400-1800 °C でイルメナイト型からペロブスカイト型に相転移する。イルメナイト型 MgSiO<sub>3</sub> のアナログ物質であるイルメナイト型 ZnTiO<sub>3</sub> は、約 20-25 GPa で ZnO + TiO<sub>2</sub> に分解する (Ito and Matsui, 1979)。しかし、その相関係は詳細に調べられていなかった。そこで、本研究では ZnTiO<sub>3</sub> の高温高压下での相関係を決定した。

出発物質のイルメナイト型 ZnTiO<sub>3</sub> は、ZnO と TiO<sub>2</sub> をモル比 1:1 で混合し、800 °C で 32 時間加熱することにより合成した。川井型 6-8 マルチアンビル高压発生装置を用い、出発試料を 13-35 GPa、1000-1400 °C の条件で 1-2 時間保持後、急冷回収した。回収した試料について、粉末 X 線回折法を用いて相の同定を行った。

15-20 GPa、1000-1400 °C で実験した回収試料は、LiNbO<sub>3</sub> 型構造であった。イルメナイト型と LiNbO<sub>3</sub> 型の相境界線は  $P(\text{GPa}) = 19.9 - 0.0038T(^\circ\text{C})$  と決定された。イルメナイト型 FeTiO<sub>3</sub> は、約 15 GPa 以上でペロブスカイト型に転移し、減圧過程で LiNbO<sub>3</sub> 型となり、イルメナイトとペロブスカイトの相境界線は負の勾配を持つ (Ming et al., 2006)。一般的に、イルメナイト型からペロブスカイト型への転移では 2 価陽イオンの配位数が 6 から 8 へ増加するため、正のエントロピー変化となる。このため、相境界線は負の勾配を持つ。一方、LiNbO<sub>3</sub> 型の 2 価陽イオンは 6 配位であり、仮に LiNbO<sub>3</sub> 型構造が安定だとしたとき、予想される相境界線の勾配は正となる。したがって、FeTiO<sub>3</sub> と同様に、ZnTiO<sub>3</sub> は高压下でペロブスカイト型であったものが、減圧過程で LiNbO<sub>3</sub> 型に転移したと考えられる。

約 20 GPa 以上で行われた実験の回収試料は、ウルツ鉱型 ZnO と  $\alpha$ -PbO<sub>2</sub> 型 TiO<sub>2</sub> であった。ペロブスカイト型と ZnO+TiO<sub>2</sub> の相境界線は  $P(\text{GPa}) = 9.5 + 0.010T(^\circ\text{C})$  と決定された。ZnO は約 6 GPa でウルツ鉱型から塩化ナトリウム型に転移し (Kusaba et al., 1999)、TiO<sub>2</sub> は約 17 GPa で  $\alpha$ -PbO<sub>2</sub> 型からバデレアイト型に転移する (Tang and Endo, 1993)。そのため、分解相の安定領域では、ZnO と TiO<sub>2</sub> はそれぞれ塩化ナトリウム型とバデレアイト型で存在すると考えられる。

キーワード: ZnTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, ペロブスカイト, 高压

Keywords: ZnTiO<sub>3</sub>, Perovskite, LiNbO<sub>3</sub>, High pressure

## Quantitative multi-element imaging of geological materials by femto-second LA-ICP-MS Quantitative multi-element imaging of geological materials by femto-second LA-ICP-MS

常青<sup>1\*</sup>; 木村 純一<sup>1</sup>

CHANG, Qing<sup>1\*</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Elemental mapping analysis of geological materials using X-ray related methods (EPMA, XRF) or SIMS suffers from insufficient sensitivity and poor quantification. LA-ICP-MS has advantages of high sensitivity and less matrix effect, therefore has been developed for elemental and isotopic imaging analyses over the last decade. However, quantification problem by this method remains unsolved because of the lack of a suitable sampling volume correction method and necessity of matrix-matched standard. This work presents multi-element imaging/mapping analysis of orthopyroxene and plagioclase minerals by femto-second LA-ICP-MS using a novel normalization process. Laser sampling volume is corrected for by analyzing ten major elements (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) followed by normalization of the analyzed total sum to 100 wt% to obtain correction factor. This correction method is free from any external analysis (e.g., EPMA) for at least one internal standard element (e.g. Ca), and can be applied for both spot and line scanning LA mode. This allows LA-ICP-MS method standalone and liberates from errors inherited from any local heterogeneity of the samples picked up differently by the different analytical techniques used. Use of USGS basalt glass as a standard eliminates matrix effect in the levels less than 10% RD for these silicate minerals. Two-dimensional elemental distribution images of 43 elements were acquired from 4-6 μm depth of the sample surface with a ~40 μm lateral resolution. An area of 500×500 μm can be scanned simultaneously for 43 elements in less than 2.3 hours. Trace elements in silicate minerals can be imaged at sub-ppm concentration level, while major elements were mapped at sub-percent concentration.

Key words: femto-second LA-ICP-MS, elemental mapping, minerals



## 海洋電磁探査法データ処理における仮想領域法の適用性の研究 Applicability of fictitious domain method in data processing of marine CSEM exploration

楠田 溪<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
KUSUDA, Kei<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

在来型化石資源の代替としてメタンハイドレート (MH) が有望視されており、その探査手法として、電磁探査の一種である海洋 CSEM 探査が注目されている。近年、電磁場解析に仮想領域を用いることで、電磁場の伝播を高速で計算できる手法が提案されており (Mittet, 2010)、順計算の高速化手法として用いられてきた。しかしながら、波動場である仮想領域内での電磁場解析は、拡散場における実領域での電磁場解析よりも MH 層からの応答が向上すると考えられる。そこで本研究では、仮想領域の概念がメタンハイドレートの海洋 CSEM 探査における観測データ解析に応用できると考え、3次元 FDTD 法による数値シミュレーションにより検証した。その結果、実領域での受信波形では海水中を伝播する電磁場と海底下を伝播する電磁場の分離が困難であったのに対して、仮想領域ではそれらが分離できたため、MH 応答の識別性が向上することがわかった。次に、実領域から仮想領域への変換に関しても試みた。本研究では、特異値分解を利用して変換を行った。その結果、仮想領域内での MH 層の感度は、実領域よりも約 2 倍程度向上することがわかった。

キーワード: 電磁探査, 仮想領域, メタンハイドレート

Keywords: CSEM, Fictitious wave domain, methane hydrate

## 地表磁場成分を用いた電磁マイグレーションによる地下比抵抗構造の可視化 Subsurface imaging with EM migration of magnetic fields from multiple frequencies

兵藤 大祐<sup>1\*</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
HYODO, Daisuke<sup>1\*</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院  
<sup>1</sup> Kyoto University

These days, the supply of water is facing a crisis due to the dramatic growth of population, industrialization, etc. As a result, the groundwater demand is becoming more and more stronger than before. Electrical prospecting is a method usually attempted for groundwater exploration, but setting the observation equipment in desert regions, where water shortage is a serious problem, causes us difficulty using this method there, since there is nothing that assures electrical contact between electrode and the earth. In these circumstances, some other methods that do not require any contact of electrode are needed. VLF or ULF is the method that satisfies the condition. However, none of these methods could provide information necessary to locate groundwater and it is strongly necessary to locate water head of survey areas. There is some shortcomings in the present processing of these VLF and ULF data. In this study, the phase-shift method, which is used in seismic migration, is applied to the horizontal magnetic components with multiple frequencies in order to image subsurface resistivity structures to locate groundwater. The survey is conducted more easily and shortly, if only the magnetic sensors above the surface are enough for estimating the structures. As in the seismic migration, both upward/downward imaging and the exploding reflector concepts can be applied to the horizontal magnetic components. The synthetic data examples show that the migration method is effective for imaging the conductive anomaly. However, it is necessary to select appropriate frequency bands in order to estimate correct subsurface structures. We conclude that this technique gives an approximate resistivity structures quickly and that the migration of magnetic components is expected to provide information on the subsurface. This method is also useful for geological interpretations and for an initial model of the more complicated inversion method.

キーワード: 電磁探査, マイグレーション, 見掛比抵抗構造  
Keywords: electromagnetic exploration, migration, apparent resistivity structure

## 海洋CSEM法フォワード計算への粒子法の適用 Application of particle method to forward modeling of marine controlled-source electro- magnetic survey

今村 尚人<sup>1\*</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>  
IMAMURA, Naoto<sup>1\*</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Kyoto University, Graduate School of Engineering

A new marine controlled-source electromagnetic (MCSEM) forward simulation is presented in this study. The benefit of the method is the better treatment of complicated seafloor topography and/or buried structures than before. Here, we focused on the moving particle semi-implicit (MPS) method. In our method, the Maxwell's equations are discretized with particle arrangement without grid structure, which is usually used in finite-difference method (FDM). Each particle denotes the three components of electromagnetic fields at each particle. MPS method has some advantages over the other methods such as finite-element method (FEM), FDM, integral method (IE), etc. An obvious advantage of this approach is a numerical model that can flexibly form arbitrary topography shapes. Although FEM is sometimes employed to treat the topographic structure, especially for MCSEM, pre-process for creating grid or mesh structures require a time-consuming procedure especially in three-dimensional cases. A second advantage is that the three components of electric field and electric current as well as magnetic field and source are defined at the same location of every particle, while not at the same location in the case of Yee's grid.

We tested our three dimensional MCSEM forward simulation using the particle method and confirmed that the accuracy of the forward simulation with the simple tilted layered model would be improved. Our forward modeling results show the accuracy sufficient to discuss with the analytical results. The local and arbitrary refinement of particle is conducted to obtain more accurate result using the same model. The local refinement is applied only near the transmitter and receiver dipoles. The accuracy of MPS becomes higher in the local refinement than in the use of isodiametric particles. Our results suggest that the method using MPS with locally refined particles is useful for the forward simulation of electromagnetic field with arbitrary topography in the MCSEM modeling.

Keywords: Marine controlled-source electromagnetic, Forward simulation, Particle method

透水係数、比貯留係数及び流動電位係数分布推定のための自然電位分布逆解析手法の研究  
Simultaneous inversion of self-potential for estimating hydraulic parameters and streaming current coefficient

尾崎 裕介<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
OZAKI, Yusuke<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University

In this study, we develop an inversion scheme for the simultaneous estimation of hydraulic conductivity, streaming current coefficient and specific storage, using transient self-potential (SP) data. SP is a natural electrical potential, which is thought to be caused by subsurface fluid flow through the electro-kinetic coupling. Recently, several SP measurements are performed during pumping tests to characterize the parameters of the aquifer. Almost of all SP analysis methods are adaptable to the static SP data, but a huge amount of the transient SP data is not used efficiently. Therefore, we develop an inversion scheme for the analysis of transient SP data. The electrical conductivity, streaming current coefficient, hydraulic conductivity and specific storage are parameters effectively influencing the SP profile on the surface, and can be solved in the inversion. The distribution of electrical conductivity structure can be used if the electrical resistivity tomography (ERT) or other EM measurements are performed with the SP measurement. We employ the relationship between hydraulic conductivity and streaming current coefficient to decrease the number of estimating model parameters, and to enable the simultaneous estimation of hydraulic conductivity and streaming current coefficient. First in this study, we check the sensitivities of the hydraulic conductivity and specific storage obtained at different times. The sensitivities of the hydraulic conductivity and specific storage are different with respect to the phase. The simultaneous inversion of hydraulic conductivity and specific storage from the transient SP profile is turned out possible from the difference in phase. Finally, we apply our inversion scheme to a synthetic SP profile, and reconstruct the subsurface structure of hydraulic conductivity, streaming current coefficient and specific storage simultaneously. As a result, our inversion technique allows us to obtain the hydraulic parameters from SP data on the ground surface, although the conventional hydraulic tomography strongly relies on the borehole data.

Keywords: Self potential, Inversion, Time domain, Hydraulic conductivity, Specific storage, Streaming current coefficient



粒子法による複雑な自由表面を有する岩石の破壊進展解析  
Numerical study for failure behavior of rock masses including complex free-surfaces using a particle method

武川 順一<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>  
TAKEKAWA, Junichi<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科  
<sup>1</sup> Kyoto Univ.

Failure of rock mass including complex free surfaces is of importance in many engineering and scientific fields. This paper applied an advanced discretization approach to simulate quasi-static failure of rock mass within a Hamiltonian particle method (HPM) framework. In HPM, a free surface is introduced in a simple way, just by removing or ignoring outer particles. This potential can be developed to discretize numerical models including complex free surfaces without the increment of time for pre-processing. In the present study, we developed the numerical simulator based on HPM with a staggered particle technique for simulating brittle failure and AE activities in rock mass with incorporating the elasto-plastic damage model. We, first, conducted uni-axial compressive tests for validating the effectiveness of our approach. Next, we adopted rectangular and circular disc specimens with a hole as complex free surface models. Our numerical results had good agreement with those from laboratory experiments. This suggests that HPM would be a method to simulate failure behavior of rock mass without time-consuming pre-processing.

キーワード: 粒子法, 破壊進展挙動, 岩石  
Keywords: particle method, failure behavior, rock mass

## MPS 法による MT 法フォワード計算 Forward calculation of Magnetotelluric responses with MPS method

谷 昌憲<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
TANI, Masanori<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

地表面の地形によって観測される MT レスポンスが変化する問題について、地形の影響を考慮できる Forward 計算手法の開発した。地形の変化は観測される MT レスポンスに影響を与え、見かけ比抵抗や位相が変化することが知られている (例えば、[Wannamaker, P., et. al., (1986)])。つまり、地形の影響を考慮せずに地形を水平面であると仮定し解析した場合、本来は存在しない偽像を作ることや本来の異常体の構造を歪めてしまう可能性が有る。

特に、頻繁に MT 法観測が用いられる環境として地熱地帯や断層帯などがある。そのような環境は局所的な比抵抗異常体が存在すると同時に急峻な地形を有する地域であることが多い。そのような環境での MT 法による地下の可視化をより精度よく行うためには地形が観測される MT レスポンスに対して与える影響を考慮する必要がある。しかしながら、現在 3次元法インバージョンでは地形の影響を考慮し解析を行った例は少ない。これは 3次元 MT 法インバージョンにおいて MT レスポンスを計算するために有限差分法が主に用いられていることが理由であると考えられる。有限差分法では計算格子状において電場、磁場をそれぞれ格子の辺上で定義するため地形のような、なだらかに変化する形状を扱うことは容易ではない。一方で、2次元及び3次元 MT 法において、地形の影響を計算した研究も存在する [Nam, M. J., et.al., (2008)]。これらの研究では地形を容易に扱うことのできる有限要素法を用いて MT レスポンスを計算している。しかしながら 3次元 MT 法インバージョンに有限要素法を適用することは計算コストの点で難しい。このような現状を踏まえ、本研究では地形の再現性および計算コストの両立を目指し MPS (moving particle semiimplicit) 法を用いて MT 法レスポンスの Forward 計算手法の開発を行った。本研究では地形を考慮できる 2次元 MT 法、TE モード及び TM での MT レスポンスの計算手法を開発した。

キーワード: MT 法, MPS 法

Keywords: Magnetotelluric, MPS, topography

## 格子ボルツマン法を用いたシリカスケール成長に係る流体物理学的シミュレーション研究

### Fluid-physical simulation of silicate scale formation using lattice Boltzmann method

水島 諒大<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>

MIZUSHIMA, Akihiro<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

Scaling behavior has an important role in various geosciences fields. For example, precipitation of silica can cling to pipes and wells, and prevent the geothermal power generation. Silica precipitation strongly affects the circulation of hydrothermal systems by changing the permeability structure, which is related to the nucleation of seafloor massive sulphide. Self-sealing is of importance in the understanding of long-term radionuclide mobility and the safety of deep geological repositories of radioactive waste.

The deposition of amorphous silica is controlled probably by many processes. There have been a number of experimental studies made on the chemical kinetics of silica deposition as a function of the degree of super-saturation. However scaling estimated by the simple chemical precipitations cannot explain the measured features in laboratory and field experiments. On the other hand, a high rate of deposition could be found where fluid flow stagnates. Although it has been empirically observed that the fluid flow structure can influence silica scaling, relatively little research have been conducted to investigate hydrodynamic effect on silica scaling. The aim of this work is to evaluate the importance of both chemical kinetic and hydrodynamic effects on silica scale growth with a method of numerical simulation.

Here using the lattice Boltzmann method, we calculated velocity, temperature and concentration of dissolved silica in the 2D parallel plate channel and predicted the silica deposition of both chemical kinetic and hydrodynamic deposition processes. The laboratory results by Hosoi and Imai (1982) can be as the reference. We also predicted the silica deposition along the channel with sudden expansion of width. For the latter case, the similar field example in the production pipes of the geothermal well was reported (Mercado et al., 1989).

In our numerical simulations, the silica deposition predicted by the kinetic process has the magnitude extremely lower than the amount of laboratory experiment, but shows the similar magnitude if the hydrodynamic process is considered for scaling. In addition, at the another channel model with the sudden expansion scaling predicted by the hydrodynamic process can explain the observed feature at the geothermal well.

It is found that consideration of the simple kinetics process solely is not sufficient for explanation of the real silica deposition. Therefore, we emphasize the importance of hydrodynamic effect on silica scaling. To predict the silica deposition more quantitatively, an advanced-simulation including behaviors of colloid silica particles in flow.

Keywords: scale prediction, silica scaling, kinetics, hydrodynamics, the lattice Boltzmann method

水圧破碎法の適用時における固体・流体連成問題の個別要素法シミュレーション研究  
Distinct element method for solid-fluid coupled interaction in the application of hydraulic fracturing

長曾 真弥<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
NAGASO, Masaya<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University

The hydraulic fracturing is of great interest in many scientific and engineering fields in hydraulic fracturing, such as the hot dry rock geothermal power(HDR). However, the natural fractures have significant influence on the nucleation and growth of fractures created in hydraulic fracturing. In addition, the viscosity of fluid used in hydraulic fracturing also influences the geometry of hydraulically created fractures. Although the influence of both natural fracture and fluid viscosity has been intensively investigated on the distribution of hydraulic fractures, none of the studies has dealt with natural fractures and fluid viscosity at the same time and the interaction between them has not been revealed yet. We, therefore, performed a series of numerical simulations for hydraulic fracturing in naturally fractured rock using a 2D flow-coupled DEM code to examine the influence of the fluid viscosity on the interaction between hydraulic and natural fractures. In this study, a low viscosity fluid of 0.1 m<sup>2</sup>/s and a high viscosity fluid of 100.0 m<sup>2</sup>/s are used. Our model is a square block with a borehole at the center under a stress field whose maximum and minimum stresses are 10 and 5 MPa, respectively. We apply the hydraulic pressure to the borehole wall, and observe how induced hydraulic fracture would propagate in the presence of a single natural fracture located adjacent to the borehole. The viscosity of fluid and the angle between the maximum stress direction and fracture orientation are the parameters of the numerical simulation. The results show that the lower the oblique intersection angle is, the less linearly the induced fracture crosses the pre-existing fracture. However, when a high viscosity fluid is used, the interruption of natural fractures decreases and the induced fracture tends to go straight along the direction of maximum compression. Our numerical example implies that high viscosity fluid could be used in hydraulic fracturing to reduce the influence of a natural fracture when the hydraulic fracture intersects the pre-existing fracture with certain angles .

Keywords: hydraulic fractureing, viscosity, natural fracture, discrete element method



## 弾性波を用いた見かけの粘性変化 Numerical simulation for apparent viscosity change under oscillating boundary condition using lattice Boltzmann method

植田 隆太<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
UEDA, Ryuta<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Kyoto University

Unsteady fluid dynamics in Newtonian and non-Newtonian fluid is the main concern of aeronautical engineering, mechanical engineering, chemical engineering, resource engineering and civil engineering. It is also true to the oil industry because the amount of oil production in the world is decreasing recently, it is of importance to seek the technological development for enhanced oil recovery (EOR) in place in the subsurface. Recently, many laboratory experiments and field tests have been performed such as water, gas, chemical, or thermal injections to attempt the enhancement of oil production. Seismic stimulation is known as one of the EOR methods and unsteady flow problem. Numerous observations show that seismic stimulation of oil reservoir may improve oil production. However, for effective usage of seismic EOR, we need to understand the characteristics of changing apparent viscosity under oscillating solid-phase. In this study, we attempt to demonstrate the apparent viscous change in laminar flow under oscillating boundary condition with the models of single pore throats and porous media.

We use Lattice Boltzmann method (LBM) describing Boltzmann equation. We use 2-dimensional 9-velocity (2d9v) model to simulate 2-dimensional incompressible viscous flow. We assume that the background pressure difference between inlet and outlet is constant. The flow is generated by a constant pressure difference.

We discuss the apparent viscosity of a single pore throat and porous media.

First, we discuss four characteristics of an incident elastic wave: amplitude, frequency, angle, and pressure disturbance (P wave). The characteristics of amplitude, frequency and angle are largely related with the amount of changing apparent viscosity. The flux increases under cases with large amplitude, high frequency, and large angle (S wave) of incident to the wall. On the other hand, the pressure disturbance (P wave) is not effective for changing apparent viscosity. We then discuss the possibility of changing apparent viscosity in terms of fluid properties. Wall oscillation can cause improving relative permeability. So, if the rock has water wettability, the oil flux largely increase with wall oscillation. After that, we examine the possibility of changing apparent viscosity in terms of pore scales or shapes under the oscillating boundary condition with LBM. The models of single pore throat consists of two half pore and one pore throat. The models of porous media consist of several pore spaces connected by pore throats from one pore to the others. The shapes of single pore throats are also largely related with changing apparent viscosity. The apparent viscosity decreases with increasing length of the pore throats and radius of the pore throats, and with decreasing width of the pore throats and large pore radius. Comparing single pore throat model and porous media model, we find the apparent viscosity change in porous media models cannot be replaced by linear combination of the apparent viscosity changing in single pore throat models.

Our numerical results imply: i) the flow resistance under oscillating condition increases because the velocity difference between the wall and the center of flow is larger than that in steady flow, ii) the effect of the advection term in oscillating boundary condition is larger than that in steady flow, iii) fluid extrusion is generated by partial pressure gradient near the wall and pore throat, and iv) the oscillating boundary may cause improving pressure loss.

Keywords: Lattice Boltzmann method, Unsteady flow, Seismic EOR, Apparent viscosity, Pore throat scale

## 地震波散乱現象を用いた延性領域の応力変化推定 Estimation of stress change in ductile part of the crust inferred from seismic scattering

岡本 京祐<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
OKAMOTO, Kyosuke<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

In the past, stress field in the subsurface has been measured by various techniques. For example, the borehole-breakout, the stress release method, the hydraulic fracturing, the strain gauge buried in the ground are used to measure the stress field after costly drilling the subsurface. Beside the techniques requiring direct access to the subsurface, the stress field is also measured indirectly. The Electro Distance Meter, the Global Positioning System, etc. are used to measure a surface deformation in time, from which the subsurface stress change is estimated. However, the estimated stress change in the subsurface is largely affected by near-surface inhomogeneities. Thus, information on the stress field should be obtained from other indirect techniques.

Here, we focus on seismic scattering wave, particularly the coda-Q value, to measure spatial and temporal variations of subsurface stress field. The coda-Q, derived from the attenuation of coda envelope, is perceived to be an indicator of the inhomogeneity in the subsurface. Meanwhile, it has been proposed that the coda-Q has a proportional relationship with the magnitude of stress using a numerical simulation. In this study, we hypothesize that the coda-Q, obtained from seismic waves traveling over a wide range of the crust, indicates stress change in a deep subsurface. At first we numerically calculate a relationship between the coda-Q and the magnitude of stress using a homogeneous crustal model, and show that the coda-Q systematically increases against the magnitude of the stress. Then we confirm the relationship using a heterogeneous numerical model, which has a low velocity zone near the surface. It is revealed that the coda-Q indicates the magnitude of the stress change in the deep subsurface, beneath the inhomogeneity, while the surface strain distribution is largely affected by the low velocity zone near the surface. For the next step, using real seismic data acquired at the regions of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake and the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake, we examine whether the coda-Q indicates stress change in the deep subsurface. The stress change estimated from the coda-Q corresponds with the theoretical one in the ductile part, calculated by a fault model acquired by a seismic wave analysis, whereas the estimated stress change does not correspond with the inferred one from GPS measurement. It means that the coda-Q can indicate stress change in the deep subsurface, which could give more accurate investigation than the GPS measurement.

キーワード: 地震波散乱, 応力変化, 延性領域, 不均質

Keywords: seismic scattering, stress change, ductile, heterogeneity

## 人工震源による震動実験を想定した二次元波動伝搬シミュレーションによる、不均質媒質と地表の影響の時間変化モニタリング 2D simulation of seismic wave propagation for time lapse monitoring of heterogeneous structure and near-surface effects

上村 彩<sup>1\*</sup>; 笠原 順三<sup>1</sup>; 村瀬 圭<sup>1</sup>; 田澤 教<sup>1</sup>; 西山 英一郎<sup>1</sup>; 久保田 隆二<sup>1</sup>; 藤本 理<sup>1</sup>; 大村 猛<sup>1</sup>; 野口 静雄<sup>1</sup>; 大沼 寛<sup>1</sup>  
KAMIMURA, Aya<sup>1\*</sup>; KASAHARA, Junzo<sup>1</sup>; MURASE, Kei<sup>1</sup>; TAZAWA, Oshie<sup>1</sup>; NISHIYAMA, Eiichiro<sup>1</sup>; KUBOTA, Ryuji<sup>1</sup>; FUJIMOTO, Osamu<sup>1</sup>; OHMURA, Takeshi<sup>1</sup>; NOGUCHI, Shizuo<sup>1</sup>; OHNUMA, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 川崎地質株式会社

<sup>1</sup> Kawasaki Geological Engineering Co.,Ltd.

CO<sub>2</sub>の地中貯留やEORなどを行う際の時間変化モニタリング手法として、地震波アクロスを用いる方法が検討されている。しかし地表震源の場合、地中の不均質媒質や地表付近の影響を受けることが多い。本研究では人工震源による震動実験を想定した二次元波動伝搬シミュレーションを実施した。シミュレーションのための地下構造として、地表付近に堆積層を持ち、地中に空洞(不均質媒質)がある地震波速度構造モデルを作成した。震源の深さは、人工震源を想定した地表震源と、自然地震を想定した深部震源の2種類とした。震源は地表震源の場合は上下加震シングルフォース、深部震源の場合はP波爆発型震源とし、どちらも15Hz、0-位相のリッカーウェーブレットを用いた。深部震源の場合は、遠方の自然地震を想定して、15Hzだけでなく2Hz、0-位相のリッカーウェーブレットも用いた。地震観測点は地表アレーおよび坑井内地震計とした。坑井内の地震計は、震源車による実際の震動実験では地中2点(深さ70m、200m)としたが、本シミュレーションでは地表アレーと同様のアレーとした。実験目的はシミュレーションを用いて、震源の深さ、構造の不均質、表層の影響を評価することである。

シミュレーション結果では、空洞帯のあるところで地震波がわずかに減衰した。これは、もし観測波形に減衰が見られた場合に、震源からその観測点までの経路上に空洞帯のような不均質構造がある可能性を示している。

地中に空洞帯のある地震波速度構造モデルを用いた地震波形シミュレーションでは、空洞帯による地震波の散乱が出現し、空洞帯が二次的な震源となることがわかった。

地表震源を用いた場合のシミュレーション結果をみると、地中に設置した地震計は、地表に設置した地震計より不均質構造による散乱波の振幅が大きくなり、不均質構造の時間変化モニタリングに適していると言える。

地表震源を用いた場合のシミュレーション結果をみると、水平動地震計は、上下動地震計より不均質構造による散乱波の振幅が大きくなり、不均質構造の時間変化モニタリングに適していると言える。

自然地震を想定した深部震源(15Hz, 2Hz)を用いた場合のシミュレーション結果でも、空洞帯による散乱が出現した。広範囲の地中構造をみるためには自然地震観測が役立つだろう。

電磁式地震波震源を用いたグリーンタフ層での数日間の地震波形変化のタイムラプス試験観測  
A time lapse test of seismic waveform changes during several days at the green tuff area in Japan using a seismic vibrator

笠原 順三<sup>1\*</sup>; 久保田 隆二<sup>1</sup>; 金井 豊<sup>1</sup>; 田澤 教<sup>1</sup>; 藤本 理<sup>1</sup>; 上村 彩<sup>1</sup>; 西山 英一郎<sup>1</sup>; 村瀬 敬<sup>1</sup>; 野口 静夫<sup>1</sup>; 大村 猛<sup>1</sup>; 大沼 寛<sup>1</sup>; 羽佐田 葉子<sup>2</sup>  
KASAHARA, Junzo<sup>1\*</sup>; KUBOTA, Ryuji<sup>1</sup>; YUTAKA, Kanai<sup>1</sup>; TAZAWA, Oshie<sup>1</sup>; FUJIMOTO, Osamu<sup>1</sup>; KAMIMURA, Aya<sup>1</sup>; NISHIYAMA, Eiichiro<sup>1</sup>; MURASE, Kei<sup>1</sup>; NOGUCHI, Shizuo<sup>1</sup>; OHMURA, Takeshi<sup>1</sup>; OHMURA, Hiroshi<sup>1</sup>; HASADA, Yoko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>川崎地質株式会社, <sup>2</sup>大和探査株式会社, <sup>3</sup>東京海洋大学

<sup>1</sup>Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., <sup>2</sup>Daiwa Exploration and Consulting Co. Ltd., <sup>3</sup>Tokyo University of Marine Science and Technology

CCS や EOR やシェールガスなどにおいて地下状態の変化を常時監視するようなタイムラプスモニタリングは大変有用と考えられる。著者等はアクロス震源を用い、サウジアラビアの揚水状でタイムラプス観測を行っている。

しかし、サウジアラビアのアクロスは長期観測を目指しているため装置の移動は容易では無い。そこでより簡便な移動式電磁場イブレータを用いタイムラプスの試験を行った。

観測は 2kmx3km の広さの国内グリーンタフ地域で夜間の 12 時間の観測を 5 日間行った。2 カ所の坑内地震計と 104 カ所の短周期地震計を用いた。10~50Hz を 100 秒間でスイープした。

一時間で 100 秒間のデータを 32 個スタックし S/N を向上した。1 時間のデータでも 2km の距離まで明瞭な波形を見ることができる。一日 12 時間のスタック波形を比較し残差波形を作った。残差波形から微少は波形の変化をみることができ。これらから、慎重な震源の取り扱いをすれば移動型の電磁震源でもある程度地下のタイムラプス研究の使う事が出来るだろう。

キーワード: タイムラプス, アクロス, 地震学的手法, 残差波形, バイブレータ震源, グリーンタフ

Keywords: time lapse, ACROSS, seismic method, residual waveforms, vibrator source, green tuff



## A Reflectivity Guided Elastic Full Waveform Inversion A Reflectivity Guided Elastic Full Waveform Inversion

JAMALI HONDORI, Ehsan<sup>1\*</sup> ; MIKADA, Hitoshi<sup>2</sup> ; GOTO, Tada-nori<sup>2</sup> ; TAKEKAWA, Junichi<sup>2</sup>  
JAMALI HONDORI, Ehsan<sup>1\*</sup> ; MIKADA, Hitoshi<sup>2</sup> ; GOTO, Tada-nori<sup>2</sup> ; TAKEKAWA, Junichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JGI, Inc., <sup>2</sup>Kyoto University

<sup>1</sup>JGI, Inc., <sup>2</sup>Kyoto University

Full Waveform Inversion (FWI) of seismic reflection data has become a common technique for producing subsurface images based on local minimization of least squares misfit between observed data and calculated model. Usually, an initial model that is close to the global solution of the problem is needed to obtain satisfactory results without being trapped in a local minimum of the misfit function. Due to the limitations in quantity of the observed data, e.g. using seismic traces from surface receivers to make an image of earth model, the full waveform inversion problem is ill-posed and underdetermined. The problem becomes even worse when dealing with elastic waveforms which require increased number of model parameters, i.e. P wave velocity, S wave velocity, density etc. In order to overcome this problem, inserting a priori model information in to the inversion process helps the algorithm to converge to a solution in the vicinity of the global minimum. This kind of information could be included in the gradient of the misfit function by adding model terms, when using conjugate gradient method to iteratively update the model parameters.

On the other hand, producing reliable velocity model is a key for successful Pre Stack Depth Migration (PSDM) of seismic data. Assuming an available depth section of seismic reflection data, e.g. by time to depth conversion of time migrated section, we estimate the P wave velocity from seismic section by first extracting reflectivity and then using Gardner equation (Gardner 1974) as stated by Hondori et. al 2013. This will produce a P wave velocity model which is used in full waveform inversion as a priori information. Our frequency domain elastic full waveform inversion is developed using finite difference method and perfectly matched layers are used on the boundaries of the computational area. A preconditioned conjugate gradient method is used together with improved pseudo Hessian matrix for updating the model parameters. At each iteration the gradient is calculated using adjoint state method, and then  $l_2$  norm of the model term is added to the gradient to constrain the inversion. We suggest that this method not only improves the full waveform inversion results, but also resulting FWI models provide a good velocity model for pre stack depth migration of seismic data.

### References

Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density: the diagnostic basics for stratigraphic traps: *Geophysics*, **39**, 770-780.

Hondori, E. J., Mikada, H., Goto, T.N, Takekawa, J., 2013, A random layer-stripping method for seismic reflectivity inversion: *Exploration Geophysics*, **44**, 70-76.

キーワード: Full Waveform Inversion, Frequency Domain, Elastic, Reflectivity  
Keywords: Full Waveform Inversion, Frequency Domain, Elastic, Reflectivity

## 3次元電磁誘導探傷法を用いた金属探傷 3D-FDFD simulation for high resolution eddy-current testing method

斉藤 拓也<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
SAITO, Takuya<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科  
<sup>1</sup> Kyoto University

The applicability and the feasibility of eddy-current testing method for the measurement of wall thinning and surface crack of steel structure have been practically confirmed by field and laboratory experiments. Where and how large the cracks would be are roughly understood by this method. However, it is difficult to estimate the exact size and shape of them. For more accurate inspections, there has been a growing demand to quantitatively evaluate the cracks. Therefore, we have developed a numerical simulator for the high accuracy eddy-current method. Eddy-current method measures excitation magnetic and induced magnetic fields, the latter of which is caused by the eddy-current in the inspecting material. In order to calculate induced magnetic field deformed by the cracks, we used three-dimensional finite-difference frequency domain technique to solve Maxwell's equations numerically. As a simulation model, two-layer structure consisting of seawater and steel plate including cracks is used. We simulated a variety of cracks to estimate characteristic of the induced magnetic field, and compared the results in terms of what kind of difference in the induced field would appear. As a result, the effect of surface cracks of steel plate on receiving magnetic field intensity was confirmed as follows: the induced magnetic field intensity increases near the edge of cracks and decays above the cracks with the distance to the edge. The deeper and wider cracks are, the more the magnetic field intensity becomes attenuated. Due to the limitation of our simulation schemes, the response of magnetic field intensity whose detectable scale of cracks was no smaller than mm order. We are introducing a method that could allow us to confirm much finer detectability.

キーワード: 非破壊検査, マクスウェル方程式, 渦電流, 数値計算  
Keywords: NDI, Maxwell's equations, Eddy Current, numerical simulation

## フルウェーブを用いた坑井間トモグラフィーによる弾性定数推定法の研究 Elastic parameter estimation in full waveform well-to-well tomography

寺西 慶裕<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>

TERANISHI, Keisuke<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学工学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Engineering, Kyoto university

Seismic full-waveform inversion (FWI) method has been used to estimate velocity and density structures in the subsurface. The waveform analysis is a powerful tool to investigate the properties in the areas of interest, and the importance to use the waveform is widely recognized in the seismic explorations. As the wave propagation is influenced by elastic parameters,  $V_p$ ,  $V_s$ , density, it is necessary to include these parameters in FWI (Virieux and Operto 2009). However, there are few previous studies dealing with density as a parameter in the application of elastic FWI. Density is usually estimated using an empirical formula such as Gardner's relationship (Gardner et al., 1974), or is fixed to a constant value. Almost all elastic FWI studies have neglected the influence of approaches how density parameter is estimated. The objective of this study is to investigate how difficult the estimation of density structure is, and propose a new approach to overcome the problem. We employ 2D numerical simulations in order to investigate the important factor in the inversion of density structure. Our results show that it is difficult to estimate density structure because density structure is less sensitive to waveform than  $V_p$  and  $V_s$ . Therefore, we hypothesize that the simultaneous inversion of  $V_p$  and density structures, using a selected dataset can improve the accuracy of the FWI. For testing this hypothesis, various ways for estimation of  $V_p$ ,  $V_s$  and density using different datasets and approaches. We conclude that  $V_p$  and density structures should be estimated simultaneously in the elastic FWI, in which P-wave data separated from the seismic records is used as the input data.

Keywords: full-waveform, tomography, density

## 減衰Q値による流体境界層の推定 Estimation of fluid contact in terms of attenuation

石倉 一樹<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
ISHIKURA, Kazuki<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 工学研究科

<sup>1</sup>Kyoto University graduate school of engineering

Sonic logging has been widely used for many years to acquire physical properties of formations in the vicinity of hydrocarbon reservoirs. When gaseous phase exists in the formation fluid, the compressional waves traveling through the formation could be strongly attenuated due to low bulk modulus of gas in the fluid, while the shear waves are not. For acquiring physical properties of fluid in the formation, Biot physics or poroelastic analysis would be the best method. Among the available technologies, quality factors based on the Biot's equation could be used. Although the Biot's theory considers the viscous attenuation induced at the interface between pore wall and fluids, the intrinsic attenuation caused by the internal friction in the matrix is ignored.

In the present study, adding the intrinsic attenuation we investigate if we take the effect of the viscous attenuation from the acquired quality factor, and then, on the basis of the result, if we estimate the fluid contact (e.g. gas-oil contact and oil-water contact). We employ a 2D finite-difference scheme to simulate seismic wave propagation in a poroelastic medium. The intrinsic attenuation is included in our model using a filter for frequency-independent quality factor (constant-Q). We then achieve the results of compressional and shear wave in our numerical simulations. Our results show that on compressional and shear waves, obtained the quality factors different from each other. We acquire the effect of the viscous attenuation by subtracting the quality factor of shear wave from the quality factor of compressional wave. We conclude that the effect of viscous attenuation is extracted and the gas-oil contact is estimated.

Keywords: Q, attenuation, poroelastic, Biot, sonic logging



## 遷移領域の存在する流体境界面に対する AVO インバージョン AVO waveform inversion for estimating the fluid contact with fluid transition zone

岩城 裕之介<sup>1</sup>; 三ヶ田 均<sup>1\*</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
IWAKI, Yunosuke<sup>1</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1\*</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

The fluid distribution in the hydrocarbon reservoir affects waveforms acquired in reflection seismic method. A reflected wave changes its waveform at the transition zone of the interface of two different fluids as a function of volume fraction of the two. AVO is in general used to estimate the difference in the P and S wave velocities for the interfacing two media at the interface without any assumptions on the existence of the transition zone. The consideration of the effect of the volume fraction of a fluid to the other in the waveform could be a key for evaluating the fluid mixture around the fluid contact in the reservoir. Therefore, we try to use the waveform directly to estimate fluid distribution in the transition zone that has not been done in the practice of AVO.

In our research, we consider the effects of the transition zone at a gas-water contact (GWC) in a horizontally stratified medium on seismic waveforms. The numerical simulation reveals that the fluid distribution of transition zone distorts the seismic waveform both in amplitude and in phase. Then we use the difference in amplitude and in phase for estimating some necessary parameters expressing the fluid-mixture. We apply a waveform inversion method to the fluid substitution problems to see if the method is applicable to estimate the fluid contact with the transition zone, while the conventional AVO only utilizes the amplitude derived from observed data. Our numerical approach uses full waveform and the results imply the advantages in the estimation of the parameters including the thickness of the transition zone under that assumption of linear trend in the volume fraction in a contrast porosity condition. We suggest that the phase information should be used simultaneously for the inversion process to get the closer contact image.

## 電磁波散乱を利用した微小球を含む遮熱塗料の輻射熱抑制効果 The insulation effects caused by the scattering of electromagnetic waves by fine spheres against insolation heating

堀江 潤<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>; 谷口 清<sup>2</sup>; 芦田 譲<sup>3</sup>

HORIE, Jun<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>; TANIGUCHI, Kiyoshi<sup>2</sup>; ASHIDA, Yuzuru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学, <sup>2</sup> 西日本高速道路エンジニアリング, <sup>3</sup> 環境・エネルギー・農林業ネットワーク

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>West Nippon Expressway, <sup>3</sup>NPO EEFA

The temperature of materials rises when they are exposed to the sunlight (insolation heating). Insolation heating could be suppressed when the materials are coated with paint admixed with fine silica spheres (insulating paint). By coating buildings' walls and roofs with such paint, the temperature in the subjacent rooms could be kept lower than by coating with regular one. The temperature of the former could be enough low so that no air-conditioning becomes necessary even in the mid summer. These phenomena are well known in a practical manner and have been widely utilized. However, the cause of the phenomena has hardly been analyzed theoretically yet. Moreover, micron-scale ceramic spheres have been known as the best commixture than the other metallic commixture of the same size. Theoretical analysis would greatly enhance the effects of the suppression of insolation heating. We focus on the light scattering by fine spheres under the assumption that the scattering of lights, i.e., electromagnetic waves, attributes to suppression of insolation heating and that the imaginary part of scattering coefficients of the spheres is a key to explain the observed phenomena. In this study, we therefore consider commixture sphere materials to be (i)silica, (ii)aluminum and (iii)copper, distributed in a paint layer coating an iron material, and calculate transmission, reflection and absorption coefficient using the Monte Carlo ray tracing method based on the Mie theory. Using these coefficients, the rise in temperature of surface of the iron layer would be estimated. We finally investigate how the structure of the paint attributes to the insulating effects.

We assume three layers: air, paint, and iron, and commixed fine spheres in the paint layer using Distinct Element method (DEM). A number of photons vertically incident to the paint at random position from the air. We then count the number of photons that reaches the iron to estimate the intensity of the transmitted wave, and count the number of photons that are absorbed by spheres to estimate the intensity of the absorbed wave energy. Fresnel Equations are used to identify photons' behavior stochastically using a random number. Moreover, Mie theory is used to calculate the radiation pattern of scattering at each sphere when a photon incident to the sphere. As a result, it is estimated that the transmission coefficient would be less than 0.1 for the commixture material of silica whose radius is smaller than ca. 0.7 micrometers. On the other hand, the transmission coefficient could be much less than 0.1 if we use conductive spheres. However, in the latter case, the absorption coefficient would be approximately 0.5, which could cause the rise in temperature of the spheres and the paint.

We estimate the rise in temperature of iron layer using coefficients calculated above. Near-infrared radiation of the sunlight is assumed to be the incident wave. As a result, whereas the temperature would be 63 degrees Celsius if no paint is coated. On the other hand, the temperature would be suppressed to 39, 59 or 56 degrees Celsius, respectively, if we use silica, aluminum or copper spheres of the same radii of 0.5 micrometers. The metallic commixture could lower the temperature rise but the absorption of the energy seems deteriorate the efficiency of the insulation.

In conclusion, silica is one of ideal material for insulating paint in contrast with conductive ones such as aluminum and copper, mainly due to the absorption phenomena of electromagnetic waves by spheres.

キーワード: ミー散乱, モンテカルロ・レイトレーシング, 遮熱塗料, 球, 電磁波散乱

Keywords: mie scattering, monte Carlo Ray-tracing, insulating paint, sphere, electromagnetic scattering

## FCM クラスタリングを用いた重力・磁気探査データのジョイントインバージョン Three-dimensional joint inversion of gravity and magnetic anomalies using fuzzy c-means clustering

寺西 陽祐<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>; 多田 良平<sup>2</sup>

TERANISHI, Yosuke<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>; TADA, Ryohei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院, <sup>2</sup> 国際石油開発帝石株式会社

<sup>1</sup>Kyoto University, <sup>2</sup>INPEX CORPORATION

The gravity and magnetic surveys have been widely carried out over the years, especially for the exploration of metallic mineral deposits and geothermal resources. These intensity data of gravity and magnetic fields could be acquired in much quicker and simpler ways than the other geophysical or geological surveys. The inversion of such potential field data, however, has been known as a non-uniqueness problem expressed in the Green's equivalent layer theory. Because of this problem, gravity and magnetic data have no inherent resolution in depth. We, therefore, would like to develop a way to make use of high exploration efficiency that takes the advantages of the convenience to conduct gravity and magnetic surveys.

We present a 3D joint inversion method to estimate two physical parameters, density and magnetization of subsurface materials. In the method, we introduce the fuzzy c-means (FCM) clustering technique in our joint inversion algorithm to consider the petrophysical relation between density and magnetization of subsurface materials. The fuzzy c-means clustering technique we introduce does not necessitate any empirical equations but deals with a linear combination of the influence from multiple clusters given a piece of data to belong to plural clusters in the parameter space formed by the petrophysical parameters. Adding the simple FCM clustering scheme, we introduced the smoothness constraint to a weight for membership to each clusters, instead of the conventional smoothness constraint to model parameters. Numerical studies using synthetic data indicate the effectiveness of FCM clustering in the joint inversion: the joint inversion results using gravity and magnetic data sets show higher accuracy and resolution than the individual ones.

As the field example, we focus on submarine volcanoes located at Mozambique Channel, because the world-class gas fields were discovered around that area and it is necessitated to estimate structure of submarine volcanoes near gas fields. We apply our inversion method to the real field gravity and magnetic data of the submarine volcanoes at Mozambique Channel. We conclude that our joint inversion method gives the reliable and detailed density/magnetization structures inside the submarine volcanoes in terms of the gravity and magnetic anomalies.

キーワード: ジョイントインバージョン, 重力, 磁気, 海底火山

Keywords: joint inversion, gravity, magnetic, submarine volcano

## 孔隙水圧変化による応力分布と亀裂進展 Stress field and fracture propagation due to the change of injection pressure

大久保 蔵馬<sup>1\*</sup>; 三ヶ田 均<sup>1</sup>; 後藤 忠徳<sup>1</sup>; 武川 順一<sup>1</sup>  
OKUBO, Kurama<sup>1\*</sup>; MIKADA, Hitoshi<sup>1</sup>; GOTO, Tada-nori<sup>1</sup>; TAKEKAWA, Junichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科  
<sup>1</sup> Kyoto University

Hydraulic fracturing is an indispensable scheme to stimulate fluid production in hydrocarbon reservoir development in conjunction with various well testing methods such as drill stem, buildup tests, etc. In recent years, it is also well known that hydraulic fracturing plays a major role in the development of shale oil or gas reservoirs.

The extension length and the orientation of fractures induced by hydraulic fracturing are strongly influenced by the crustal stress field under which any reservoirs are located. Therefore the propagation of fractures is controlled by the regional stress field. It is, in general, necessary to get some understanding of regional stress field before the application of hydraulic fracturing as well as acquiring the rock physical properties of reservoir formations.

However, hydraulically induced fractures may not be created as planned and could cause some environmental issues such as pollution, induced seismicity, etc. It is, we think, very important to estimate how fractures are induced under various crustal conditions to cope with unexpected behavior of fracture propagation.

We focused the effects of the in-situ stress on the stress field around the pre-existing fracture and the fracture propagation with both steady and non-steady hydraulic pressure conditions. To simulate failures in crustal materials under the complicated stress field, we use an extended finite element method (X-FEM) in this study, which can retrieve the stress distribution affected by fractures effectively and estimate the fracture propagation based on linear elastic fracture mechanics (LEFM). Numerical simulations are conducted for a 2D elastic medium having a borehole and a pre-existing fracture. We put the pre-existing fracture around the borehole initially and simulate the propagation of this fracture by applying the hydraulic pressure. The velocity of fracture propagation and the interval of the stress recovery from the stress drop caused by the propagation are set uniformly for the kinetic simulation.

We first simulate the fracture propagation around the borehole under different steady hydraulic pressures with regional stress field. Then we try to see how the fracture could propagate with the non-steady hydraulic pressure during the propagation.

We confirmed that the orientation of the fracture propagation converges to that of the principal stress. Moreover, the convergence speed could be inversely related to the hydraulic pressure. We also found the time delay of the influence of the hydraulic pressure change to the fracture propagation with non-steady hydraulic pressure condition.

From the results of our numerical simulations, we would like to have two conclusions. First, the curvature of the fracture trace depends on hydraulic pressure, but no matter how the fluid pressure is, the orientation of fracture propagation converges to that of principal stress. Second, the transition of the stress field involves the time delay, which leads to the delayed response of the fracture propagation in the non-steady hydraulic pressure condition.

When we develop a hydrocarbon reservoir using hydraulic fracturing, the orientation of maximum in-situ principal stress and the fluid pressure for fracturing should be quantitatively taken into account for the environmental safety and for the stimulation efficiency. It might be also necessary to consider the time delay of the transition of the stress due to the non-steady hydraulic pressure.

キーワード: 水圧破碎, 亀裂進展, 拡張有限要素法, 初期地圧  
Keywords: Hydraulic fracturing, Fracture propagation, X-FEM, Stress field



## Estimation of the Dispersion Curve for Soil Layers with Lateral Heterogeneity Using Continuous Wavelet Transform Estimation of the Dispersion Curve for Soil Layers with Lateral Heterogeneity Using Continuous Wavelet Transform

TSAI, Pei-hsun<sup>1\*</sup>  
TSAI, Pei-hsun<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology

<sup>1</sup>Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology

The MASW method is the normal method regarding surface wave testing, but it requires 12 or more receivers to measure the phase velocity for statistical redundancy. Therefore, the SASW method has potential for use because only two receivers are required. A time-frequency domain analysis is used to extract a dispersion image of Rayleigh waves and select a dispersion curve from the seismic signals of two receivers during surface wave testing. The signals are transformed by continuous wavelet transform, and the products of the transformed signals of the two receivers are summed at the same slowness over the intercept time to construct a dispersion image. This method is unnecessary empirical judgment in the unwrapping of phases and a significant number of receivers. To examine the applicability of the method on evaluating the dispersion curve for soil layers with lateral heterogeneity, three synthetic examples and an experience example of surface wave testing are discussed. The method is applicable for extracting a dispersion image for lateral heterogeneity soil layers. A high-resolution dispersion image is generated in this study by increasing the interval of the receivers. The result of the experience example was in accordance with that of the borehole data.

キーワード: Dispersion curve, Continuous wavelet transform, Lateral heterogeneity

Keywords: Dispersion curve, Continuous wavelet transform, Lateral heterogeneity

## Issues and Countermeasures for the Geophysics Investigation of Contaminated with Chlorinated Hydrocarbon

### Issues and Countermeasures for the Geophysics Investigation of Contaminated with Chlorinated Hydrocarbon

LIU, Hsin-chang<sup>1\*</sup> ; LIN, Chih-ping<sup>1</sup> ; WANG, Tzu-pin<sup>2</sup> ; DONG, Tian-xing<sup>3</sup>  
LIU, Hsin-chang<sup>1\*</sup> ; LIN, Chih-ping<sup>1</sup> ; WANG, Tzu-pin<sup>2</sup> ; DONG, Tian-xing<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Disaster Prevention and Water Environment Research Center, National Chiao Tung Univ., <sup>2</sup>Chien Hsin University of Science and Technology, <sup>3</sup>APOLLO TECHNOLOGY CO., LTD.

<sup>1</sup>Disaster Prevention and Water Environment Research Center, National Chiao Tung Univ., <sup>2</sup>Chien Hsin University of Science and Technology, <sup>3</sup>APOLLO TECHNOLOGY CO., LTD.

Environmental geophysics survey has the advantages of survey rapidly, high resolution result and less affected by the surface topography and objects. It is suitable to either a wide range of general survey or a small-scale precise survey. Recently, non-invasive technologies such as geophysical technology have been introduced to provide the plane and space information of pollution in subsurface by integrating few bore-hole data. The most common used geophysical technologies are ground-penetrating radar method (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). The electrical resistivity tomography (ERT) is one of the most widely used geophysical methods in geological, hydro-geological, and geo-environmental investigations. This study would first discuss how DNAPL and its soluble-phase components invade into the low permeable layer based on the field observation. Then, the importance of geophysical technology is introduced with comparing to the limitations of bore-hole investigation. Last, the case studies on using geophysical technologies including geophysical well logging are introduced to snapshot the complex profile of DNAPL distribution for improving future application.

キーワード: Geophysical survey, Electrical Resistivity Tomography, Borehole Radar  
Keywords: Geophysical survey, Electrical Resistivity Tomography, Borehole Radar

## レーザーひずみ偏差計の開発～温度依存ノイズの低減 Development of a laser strain gradiometer and reduction in its thermal noise.

出口 雄大<sup>1\*</sup>; 新谷 昌人<sup>1</sup>  
DEGUCHI, Takehiro<sup>1\*</sup>; ARAYA, Akito<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### 1. スロー地震

地震は断層のせん断すべりであり、破壊伝播速度がおよそ一定なため、断層面の縦方向、横方向、およびすべり量がそれぞれ破壊の継続時間に比例し、地震モーメントが時間の3乗に比例するスケールリング則に従う。このような通常の地震の他に、近年スロー地震が見つかった。これは、長期的スロースリップや短期的スロースリップ、深部低周波微動や超低周波地震といった現象の総称であり、これらは通常の地震と同様にせん断すべりであるが、よりゆっくりとしたすべりであることがわかっている（詳しくはレビュー論文 [Beroza et al, 2011] を参照）。これらは地震モーメントが時間に比例する ( $M_0=CT$ ) スケールリング則をもつ同一のメカニズムの現象であるという仮説が立てられている [Ide et al, 2007]。

### 2. スロー地震の観測における問題点

スロー地震が発見されているが、スケールリング則から予想される継続時間が200秒～1日のスロー地震は観測の報告がない。その理由を調べるため、スロー地震のシグナルと背景地面振動の理論計算を行ったところ、加速度計や、ひずみ計・傾斜計の一点の観測では、背景地面振動の影響で観測できないことが分かった。

### 3. スロー地震の観測の取り組み例

背景地面振動や機器のノイズの影響を減らす一つの方法として、多点での観測を組み合わせることが考えられる。この方法で継続時間が1日未満のスロースリップの観測に迫っている先行研究として、産総研歪傾斜地下水压統合解析 [Itaba et al, 2009] が挙げられる。

### 4. ひずみ偏差の計測

変位の空間二階微分（これをひずみ偏差と呼ぶことにする）を直接測定できれば、一点の観測でも継続時間1日未満のスロー地震の信号が検出されると計算された。観測の障害となっている背景地面振動の波長は、スロー地震の震源までの距離（例えば50km）や震源域の大きさ（数km～数10km）よりもだいぶ大きいため、空間スケールの小さい現象を強調するとスロー地震を観測しやすくなる。そして、空間微分は空間スケールの小さい現象を強調する効果があるので、変位の空間二階微分であるひずみ偏差を直接測定できればスロー地震が観測できるという計算結果が得られた。

### 5. レーザーひずみ偏差計の開発状況

レーザー干渉計を用いてひずみ偏差を直接測定する装置を試作した。数十メートル規模の機器を、観測所の地面に設置する前に、地震研究所鋸山観測坑内の大気圧下で機器のノイズを測定したところ、周期10秒以上では、 $10^{-5}$  Hzでおよそ  $10^{-12}$  [m<sup>2</sup>s] でパワーが  $1/f^2$  となるスペクトルを持つノイズが見られた。これは、気圧変化により、干渉計の非対称性によって生じる基線の光路差が変化したことが原因だと分かった。次に、実験室で干渉計の部分真空装置に入れたところ、周期10s～10000sの帯域でノイズが1/10程度に減少したが、今度は  $1/f$  のスペクトルを持つノイズが卓越していた。光路差をなくす調整をすることによってこのノイズは低減され、このノイズの原因は、使用している2縦モード安定化型レーザーの周波数の揺らぎであると推定した。周期が5000秒以上では、 $1/f^0$  のスペクトルの大きなノイズが残っていて、このノイズの大きさは周期20000s以上では以前と変わらない大きさだった。このノイズは、時間領域と周波数領域で、光学定盤の温度変化と概形としては同じ波形であった。そのため、このノイズは温度変化による光学素子や光学定盤の熱膨張が原因となっていると推定した。このノイズがひずみ偏差としては基線長の二乗に反比例して減少すると仮定した場合、継続時間10000秒のスロー地震の信号をノイズに埋もれずに捉えるのに必要な基線長は300m以上と試算された。今回は、このノイズを低減するため光学定盤を支える支柱をセラミック製にし、熱伝導を抑えて温度変化を少なくした場合の、干渉計のノイズについて解析し、今後の機器開発について説明する。

キーワード: レーザー干渉計, ひずみ計, ひずみ偏差計

Keywords: laser interferometer, strainmeter, strain gradiometer

## ICTを用いたケーブル式小型地震津波観測システムと設置計画 Compact Ocean Bottom Cabled Seismic and Tsunami Observation System Using ICT and Installation Plan

篠原 雅尚<sup>1\*</sup>; 山田 知朗<sup>1</sup>; 酒井 慎一<sup>1</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>; 金沢 敏彦<sup>2</sup>

SHINOHARA, Masanao<sup>1\*</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>1</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>; KANAZAWA, Toshihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The Pacific plate is subducting below the northeastern Japan islands arc. The 2011 Tohoku earthquake occurred at the plate boundary between the Pacific plate and the landward plate below landward slope of the Japan Trench. In 1996, Earthquake Research Institute (ERI), University of Tokyo had installed seismic and tsunami observation system using seafloor optical fiber in the off-Sanriku area. The continuous real-time observation has been carried out since the installation. The system observed seismic waves and tsunamis generated by the 2011 Tohoku earthquake, and the data from the system are indispensable to estimate accurate position of the source faults and the source process of the 2011 event. However, the landing station of the system was damaged by huge tsunami 30 minutes after the mainshock, and the observation is discontinued. Because the data from the real-time system on seafloor are important, we decide to restore the existing system and install newly developed Ocean Bottom Cabled Seismic and Tsunami (OBCST) observation system off Sanriku for additional observation and/or replacement of the existing system. In this paper, we present a system of the new OBCST in detail, and installation plan.

Until 2010, we had already developed and installed the new compact Ocean Bottom Cabled Seismometer (OBCS) system near Awashima-island in the Japan Sea. After the installation, the OBCS system is being operated continuously and we have continuous seismic data for more than 3 years at the present. The new OBCST system for off-Sanriku area is based on this system, and is characterized by system reliability using TCP/IP technology and down-sizing of an observation node using up-to-date electronics. The new OBCST has three accelerometers as seismic sensors. Signals from accelerometers are 24-bit digitized with a sampling rate of 1 kHz and sent to a landing station using standard TCP/IP data transmission. A precise pressure gauge is also equipped as a tsunami sensor. The tsunami data with a sampling rate of 1ms are also transmitted by TCP/IP protocol. In addition, an observation node can be equipped with an external port for additional observation sensor instead of a pressure gauge. Additional sensors on seafloor are supplied the power using Power over Ethernet technology. Clock is delivered from the GPS receiver on a landing station using simple dedicated lines. In addition, clocks in observation nodes can be synchronized through TCP/IP protocol with an accuracy of 200 ns (IEEE 1588). The data will be stored on the landing station and sent to ERI in the real-time. A simple canister for tele-communication seafloor cable is adopted for the observation node, and has diameter of 26cm and length of about 1.3m. This small size of the canister has an advantage for burying the system below seafloor.

At the present, we are producing the observation nodes of the new OBCST. The new system has three observation nodes; two have three-component seismometer and a pressure gauge, one has seismometers and an external port by using the PoE technology. We have a plan to connect a pressure gauge and hydrophone via the PoE external port of the third observation node. Total length of the practical system is approximately 100 km and an interval of the observation node is about 30 km. We have a plan to install the practical system in 2015.

Keywords: Cabled ocean bottom seismometer and tsunami gauge, Sanriku, Japan Trench, seafloor observation



## 昭和基地から国際地震センターへの験震データ：1967年以降の長期変動 Long-period duration of the teleseismic events reported to ISC from Syowa Station since 1967

金尾 政紀<sup>1\*</sup>  
KANAO, Masaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所  
<sup>1</sup> National Institute of Polar Research

南極昭和基地で記録された遠地地震の空間分布と時間推移をもとに、震源パラメータの深さ依存性やマグニチュード検知レベルの推移の原因について考察した。その結果、マグニチュード下限の時間推移（特に季節変化）に対して、気象データ等の環境パラメータとの関連性が指摘できた。特に、南極大陸周辺を覆う海氷の面積・厚さの年周変化が、南大洋起源の波浪ノイズを軽減する効果の増減に寄与するため、地震検知率の年周変動に密接に関係していると推測される。さらに、国際地震センター（ISC）に集積された1967年以降の長期間データからは、過去半世紀のグローバルな地震活動や、基地の観測システム向上による影響が含まれている可能性が高い。南極大陸の他のデジタル地震観測網（FDSN）の観測点と比較しても、昭和基地における長期間の験震数の漸次的増加は有意なものと思われる。

キーワード: 昭和基地, 遠地地震, 検知率, モニタリング観測, グローバル網  
Keywords: Syowa Station, teleseismic events, detection capability, monitoring observation, global network

## GLISN 日本隊によるグリーンランド氷床上での地震観測 (2011-2013), および 2014 年の観測計画 Seismic observation on Greenland Ice Sheet by the Japanese GLISN team (2011-2013), and a plan for the 2014 season

豊国 源知<sup>1\*</sup>; 金尾 政紀<sup>2</sup>; 東野 陽子<sup>3</sup>; 姫野 哲人<sup>4</sup>; 坪井 誠司<sup>3</sup>  
TOYOKUNI, Genti<sup>1\*</sup>; KANAO, Masaki<sup>2</sup>; TONO, Yoko<sup>3</sup>; HIMENO, Tetsuto<sup>4</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学・理・予知セ, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構, <sup>4</sup> 成蹊大学  
<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku Univ., <sup>2</sup>NIPR, <sup>3</sup>JAMSTEC, <sup>4</sup>Seikei Univ.

グリーンランド氷床は地球規模の気候変動に伴って融解が進行している。近年、氷床融解の過程で末端部の氷河が移動する際に、「氷河地震」と呼ばれる地震動が発生することが知られるようになり、地震観測による氷床モニタリングに関心が集まっている。2009年に発足した「グリーンランド氷床の地震モニタリング観測網 (Greenland Ice Sheet Monitoring Network, GLISN)」は、氷床モニタリングを目的として、11ヶ国の国際共同で広帯域地震観測網を展開するプロジェクトである。観測網は氷床上や露岩域に新設された観測点と、既存の定常観測点を合わせて成り立っており、現在33点が運営されている。

日本は GLISN 発足時からの参加国として、毎年観測隊を派遣している。2011年には、米国と共同で氷床上に観測点「ICESG」(北緯 69° 5'32.05", 西経 39° 38'50.89", 標高 2900 m) を新設した。2012年には、ICESGに加えて、氷床上の観測点1点 (DY2G) と露岩の観測点1点 (NUUK) のメンテナンスを行った。2013年には、氷床上に11泊してICESGとDY2Gのメンテナンスを行ったほか、氷床上最北端の観測点 NEEM の観測支援にも従事した。本発表では、日本隊の3年間の活動と、これらの観測点から得られた地震波形データの初期的な解析結果を報告したのち、2014年の観測計画を紹介する。

GLISN 日本隊の活動は、科研費 (課題番号 24403006) により運営されている。

キーワード: グリーンランド, 氷河地震, GLISN 観測網  
Keywords: Greenland, glacial earthquake, GLISN network

## 広域観測網監視システムの構築と運用 Development and Operation of Wide-area Observation Monitoring (WONM) System

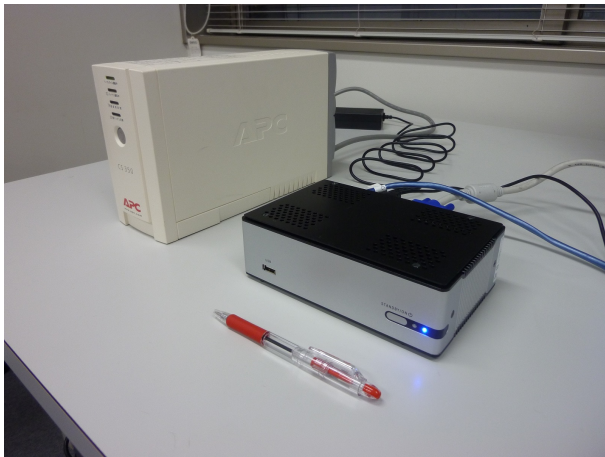
村田 健史<sup>1\*</sup>; 長妻 努<sup>1</sup>; 山本 和憲<sup>1</sup>; 渡邊 英伸<sup>1</sup>; 鶴川 健太郎<sup>2</sup>; 村永 和哉<sup>2</sup>; 鈴木 豊<sup>2</sup>  
MURATA, Ken T.<sup>1\*</sup>; NAGATSUMA, Tsutomu<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Kazunori<sup>1</sup>; WATANABE, Hidenobu<sup>1</sup>; UKAWA, Kentaro<sup>2</sup>;  
MURANAGA, Kazuya<sup>2</sup>; YUTAKA, Suzuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 株式会社 セック

<sup>1</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>2</sup>Systems Engineering Consultants Co., LTD.

NICT サイエンスクラウドは、情報通信研究機構が2010年より構築を進めている科学研究専用のクラウドシステムである。NICT サイエンスクラウドは地球規模での地球環境観測および宇宙環境観測データ収集機能およびインターネット公開データ収集機能を有している。特に、地球規模の観測拠点の一元的な監視とデータ伝送のために、広域観測網監視(WONM)システムを開発した。WONMシステムでは、北極域(アラスカ)、赤道域、南極域(昭和基地)など全17観測拠点を本システムで運用している。また、本システムをクラウド監視にも利用し、約200台のNICTサイエンスクラウド上のサーバとスイッチの等の機器の監視も行っている。したがって、世界中に設置されている100を超える観測拠点にも利用できると思われる。(筆者らは、1000を超える観測拠点でも運用が可能であると考えている。)

WONMは、利便性向上のために小型サーバ(アプライアンス)を準備している。小型サーバには必要なアプリケーションが事前に設定しており、観測拠点に設置・パラメータ設定を行った後に観測装置からデータが保存されるストレージをマウントするだけで、NICTサイエンスクラウドにより監視およびデータ伝送が始まる。この仕組みはデータの種類の依存しないため、様々な地球観測網への応用が期待できる。本発表では、WONMシステムの基本機能について紹介する。さらにこれをNICTサイエンスクラウド上で実装し、地球環境および宇宙環境観測データを収集した実績とその有効性について議論する。



## エンベロープ波形を利用した火山性地震の震源決定法の開発—三宅島B型地震への適用— Development of hypocenter location method using envelopes: Application to B-type earthquakes at Miyakejima volcano

内田 東<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>2</sup>; 中原 恒<sup>2</sup>; 山里 平<sup>1</sup>; 藤田 英輔<sup>3</sup>  
UCHIDA, Higashi<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>2</sup>; NAKAHARA, Hisashi<sup>2</sup>; YAMASATO, Hitoshi<sup>1</sup>; FUJITA, Eisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 気象庁, <sup>2</sup> 東北大院・理・地球物理, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup>Geophysics, Science, Tohoku University, <sup>3</sup>NIED

火山では、実体波読み取りによる震源決定が困難な地震がしばしば多数観測される。2000年噴火後のガス放出期の三宅島においても、構造性地震(A型地震)やP波S波が読み取れるB型地震も少数ながら観測されるものの、およそ9割はP波S波の立ち上がりが不明瞭なB型地震に分類される。これらの実体波到達時の読み取りができない場合には、複数の観測点での地震波の相関を利用する方法や、地震波振幅の大きさの空間分布を利用する方法などがあるが、定常観測網への適用や精度に課題がある。近年、Obara(2002)は、プレート境界面付近で発生する初動の不明瞭な深部低周波微動の震源を推定するために、エンベロープ相関法を提案した。この手法では、観測点ごとに地震波形のエンベロープを合成し、それらの相互相関によって観測点間のS波到達時刻差を見積ることで震源を推定する。この手法を、三宅島の火山性地震に適用した結果、実体波到達時刻読み取りによる結果と比べると、エンベロープ相関法では震源分布が全体的に南東へ約0.5-1kmずれた(Uchida et al., 2013 IAVCEI)。これは、エンベロープ相関法では、すべての観測点でエンベロープ形状が同じだと仮定していること、散乱など地震波伝播にともなうエンベロープ拡大を考慮していないこと、さらにエンベロープ形状のサイト特性を考慮していないことに問題がある。そこで本研究では、目視によるS波到達時刻の読みとりが可能な一部の地震を利用して、この問題点を解決する改良エンベロープ相関法を開発した。この手法は、S波到達時刻の不明な地震波形のエンベロープとS波到達時刻が対応付けられた参照イベントのエンベロープの相互相関を計算することで、不明なS波到達時刻を推定し、震源を推定するものである。参照イベントは、それぞれの観測点のエンベロープ形状が、震源決定するイベントとできるだけ相似になるよう選択されることが望ましい。そこで、目視によるS波到達時刻の読みとりが可能な一部の地震(参照イベント候補)と震源決定するイベントそれぞれで連結エンベロープを作成し、その連結エンベロープの相関係数が高い順に参照イベントを選択する。ここで連結エンベロープとは、各観測点のエンベロープ波形を、開始時刻を揃えて等しい時間窓長で切り出し、それらをあらかじめ決めた観測点順で並べて時間軸方向に連結したものである。連結エンベロープ波形の相似性が高いことは、観測点間のエンベロープ波形の立ち上がり時間差や相対的な振幅比がほぼ同じで、震源決定するイベントと参照イベントで震源が近接していることを意味する。三宅島でP波、S波の読み取りが行えた114個のA型地震および31個のB型地震を参照イベントの候補とし、1049個のB型地震にこの手法を適用した。連結エンベロープの相関係数が0.9以上となる最大で8個の参照イベントを選び、それぞれの参照イベント毎に各観測点のS波到達時刻を推定しデータとした。複数の参照イベントを使うのは、多数のS波到達時刻を使うことによって震源パラメータの推定誤差を小さくするためである。その結果、三宅島で観測されたB型地震の71%の震源を推定できた。震源は、主火口の位置に近い山頂カルデラ内部南側の深さ約0-2kmに推定された。A型地震は、カルデラ南側から西側にかけて分布し、一部、B型地震の発生域と重なることが分かった。さらに、実体波読み取りによる結果と比較することでその精度を検証した結果、改良エンベロープ相関法では、従来のエンベロープ相関法(Obara, 2002)の場合に比べると水平偏差の大きさが10分の1に減少し、系統的な震源位置のずれがほぼ解消された。この改良エンベロープ相関法は、標準的な火山観測網に適用できるので、より多くのB型地震の震源の推定が可能となり、火山活動の監視や火山性地震の発生過程の解明に役立つことが期待される。

キーワード: 震源決定, エンベロープ相関, 三宅島

Keywords: hypocenter determination, envelope correlation, Miyakejima volcano



## 南極・昭和基地における遠地地震の検知能力の年周変化 The annual variation in the teleseismic detection capability at Syowa Station, Antarctica

岩田 貴樹<sup>1\*</sup>; 金尾 政紀<sup>2</sup>  
IWATA, Takaki<sup>1\*</sup>; KANAOKI, Masaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 極地研究所

<sup>1</sup>The Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

昭和基地における過去約20年間の遠地地震に対する検知能力には、年周変化がみられることが指摘されている [Kanao et al., 2012a, 2012b]。その主たる原因としては、南極大陸周辺における海水の面積・厚さが冬期に増大することが、周辺海域における海洋波浪(脈動)の発生を抑圧し、その結果として地震計のノイズレベルが季節変化すること [Grob et al., 2011; 金尾・他, 2012c] が考えられる。

これは、気象・海氷などの環境パラメータが地震検知能力に影響を与えることを意味する。但し、Kanao et al. [2012a, 2012b] は、検知した地震のマグニチュード ( $M$ ) の下限に着目して、上述の年周変化を指摘しており、環境パラメータと地震検知能力との関係を詳らかにするには、まず、地震検知能力の年周変化を定量化することが必要である。以上のことを踏まえ、本研究では、以下のような解析を行った。

用いたデータは、Kanao et al. [2012a, 2012b] が扱ったものと同じ、昭和基地において検知された1987年から2007年までの遠地地震カタログである。扱った地震の数は、 $M$ が決まっていなかったものを除いた19,044個である。また、検知能力の年周変化を調べることが目的であることから、データは1年ごとに分割し、重ね合わせたものを解析した。

地震検知能力の定量化には、Ogata & Katsura [1993] のモデルを改良して用いた。このモデルでは、Gutenberg-Richter (GR) 則 [Gutenberg & Richter, 1946] と、ある  $M$  における地震の検知率との積により、観測された全地震の  $M$  が従う確率分布を表現する。但し、本研究で用いたカタログの  $M$  は実体波マグニチュード ( $M_b$ ) であるため、いわゆる  $M$  の飽和がみられる。このことを考慮し、通常の GR 則ではなく、最大地震の  $M$  をパラメータとして含むよう GR 則を改良したもの [Utsu, 1974] を用いた。ある  $M$  における地震検知率は、Ringdal [1975] をはじめとする過去の研究例 [e.g., Ogata & Katsura, 1993; Iwata, 2008, 2012, 2013a, 2013b] に従い、正規分布の累積密度関数で表すこととする。この定式化により、地震検知率が50%となる  $M$  に相当するパラメータ  $\mu$  が導入され、このパラメータにより、地震検知能力を定量的に表すことが出来る。

そして、地震検知能力の時間(年周)変化、即ち  $\mu$  の時間変化を、Iwata [2013a, 2013b] とほぼ同様の手法により推定した。これは、各地震の起きた時刻を節点とする線形スプラインで  $\mu$  の時間変化を表し、その変動が滑らかなようになるような制約を課しつつ、 $\mu$  の値を最適化するいわゆるベイズ平滑化に基づく推定手法である。

解析の結果を以下に簡単にまとめる。まず ABIC [Akaike, 1980] に基づくモデル比較を行ったところ、 $\mu$  の年周変化が「ない」としたモデルの ABIC の値に比べ、「ある」としたモデルのそれは54.9小さくなった。このことから、検知能力の年周変化は非常に有意と言える。また、推定された  $\mu$  の年周変化は12月下旬に最大値(最も検知能力が悪い)を、8月中旬に最小値(最も検知能力が良い)を持ち、両者の差は約0.13であった。 $\mu$  の年周変化が最大・最小となる時期は、昭和基地において観測された平均気温記録が最大・最小となる時期とほぼ一致しており、環境パラメータと地震検知能力との関係が確認された。

### 参考文献

- Akaike, 1980, in *Bayesian Statistics* (eds. J. M. Bernardo et al.), 143-165.
- Grob et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11302, doi:10.1029/2011GL047525.
- Gutenberg & Richter, 1944, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185-188.
- Iwata, 2008, *Geophys. J. Int.*, 174, 849-856.
- Iwata, 2012, *Res. Geophys.*, 2, 24-28.
- Iwata, 2013a, 167-184, in *Earthquake Research and Analysis: New Advances in Seismology* (ed. D' Amico, S.).
- Iwata, 2013b, *Geophys. J. Int.*, 194, 1909-1919.
- Kanao et al., 2012a, 1-20, in *Seismic Waves: Research and Analysis* (ed. Kanao, M.).
- Kanao et al., 2012b, *Inter. J. Geosci.*, 3, 809-821.
- 金尾・他, 2012c, *月刊地球*, 34, 491-499.
- Ringdal, 1975, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1631-1642.
- Ogata & Katsura, *Geophys. J. Int.*, 113, 727-738.
- Utsu, 1974, *J. Phys. Earth*, 22, 71-85.

キーワード: 地震検知率, 年周変化, 南極, 昭和基地, ベイズ統計, 統計地震学

---

STT57-P01

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

Keywords: earthquake detection capability, annual variation, Antarctica, Syowa Station, Bayesian statistics, statistical seismology

## 水圧波砕による誘発地震の検出に向けた地震波形の検出 Towards Detection of Hydraulic Fracturing Induced Earthquakes Using Neural Network

金 亜伊<sup>1\*</sup>; 飯田 周平<sup>1</sup>; 藤原 了<sup>2</sup>  
KIM, Ahyi<sup>1\*</sup>; IIDA, Shuhei<sup>1</sup>; FUJIHARA, Satoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横浜市立大学, <sup>2</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ  
<sup>1</sup>Yokohama City University, <sup>2</sup>Itochu Techno-Solutions Corporation

資源開発において水圧波砕技術が用いられる事が多々あるが、その波砕の様子は通常ルーチン的に観測され、貯留層内の微小地震の広がりを実時間で把握する事が可能である。しかし、これらの地震が貯留層内でガスの流路となるフラクチャーの形成、成長とどのような関係があるのかは明らかになっていない。近年の研究（例えば Das and Zoback, 2011）では、通常の誘発地震とは違って、限られた周波数帯のみに顕著に現れる低周波地震に類似した波形が検出された例もある。このような低周波地震のメカニズムを解明することは上記の疑問を解決するために重要な事であると考えられるが、現時点では低周波地震の観測例は非常に少ない。本研究ではより多くの観測データから誘発地震と低周波地震のデータを得るため、ニューラルネットワークを用いた波形検出法の有効性を検証した。数値実験では入力データに地震波形、ガウシアン関数、ノイズを用い、未知データを入力した結果、ノイズの最大振幅がシグナルの最大振幅の 30% ほどになっても波形検出に問題のないことが示された。また未知データ数、SN 比に関わらず、教師データの数はある一定まで増やすと、それ以上増やしても結果はあまり変わらない事がわかった。これは膨大な観測データに対しても少ない教師データで解析が進められる可能性が示唆される。今後は低 SN 比下における連続データからターゲットとなる波形を検出するために、ウィンドウ幅の取り方などを改良して行く予定である。

キーワード: ニューラルネットワーク, 波形検出, 水圧波砕, 低周波地震, 地震波

Keywords: Neural Network, Waveform detection, Hydraulic fracturing, Low frequency earthquake, Seismic Waveform

## F-net 広帯域地震計の定常ノイズ特性 Background noise characteristics of F-net broadband seismograms

木村 武志<sup>1\*</sup>; 村上 寛史<sup>2</sup>; YANO Tomoko Elizabeth<sup>1</sup>; 木村 尚紀<sup>1</sup>; 風神 朋枝<sup>1</sup>; 松本 拓己<sup>1</sup>  
KIMURA, Takeshi<sup>1\*</sup>; MURAKAMI, Hiroshi<sup>2</sup>; YANO, Tomoko elizabeth<sup>1</sup>; KIMURA, Hisanori<sup>1</sup>; KAZAKAMI, Tomoe<sup>1</sup>; MATSUMOTO, Takumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>ADEP

防災科学技術研究所が運用する広帯域地震観測網 F-net は日本全国 73 観測点からなり、各観測点では STS-1/2 や CMG-1T/3T などの広帯域地震計が稼働している。また、2013 年末からは STS-2.5 の稼働も開始している。これらの地震計は温度や気圧変化の影響を避けるため、長さ 30-50 m の横坑内に設置されている。得られたデータはすべて Web ページで公開されているほか、AQUA システム (Matsumura et al., 2006) などの様々な即時自動解析に用いられている。この様なデータの品質を継続的に評価することは、観測網の運用・地震などの地殻活動のモニタリング・各種自動解析にとって重要となる。本研究では、F-net データの品質を評価するために、その定常ノイズ特性を推定した。

McNamara & Buland [2004] の手法に従い、F-net 連続波形データのパワースペクトル密度 (PSD) の確率密度分布 (PDF) を用いて、定常ノイズ特性を評価した。1996-2013 年の 1 秒サンプルのデータに対して、1 日長 (50% オーバーラップ) のデータを順次取り出し、加速度の PSD を計算した。1 日長のデータは 75% オーバーラップの 13 個のセグメント (6 時間長) に分割して計算した PSD の平均を 1 日分の PSD とした。得られた 1 日分の PSD は周期で 1/8 octave 間隔、パワーで 1 dB 間隔の bin に振り分けた。

得られた PDF から各観測点・各周期での PSD の最頻値を計算し、各周期でその最小値をとることにより F-net 全体の標準ノイズモデルを得た。USA 内の観測網に対して同様の手法により得られた標準ノイズモデル (McNamara & Buland, 2004) と比較すると、周期 4 秒と 40 秒の周辺で、F-net のモデルの方が 5 dB 程度高かった。F-net の標準モデルは基本的に STS-1 により決まっており、STS-2 では周期 200-800 秒でそれよりも 5 dB 程度高かった。また、CMG-1T/3T についてはそれぞれ周期 30-2000 秒で 15 dB、100-2000 秒で 10 dB 程度高い。

近年 F-net では地震計に対する温度変化の影響を軽減するために、発泡スチロール製のカバーを地震計に設置している。このカバーにより、多くの STS-2 の上下動成分について、周期 500 秒より長周期帯域で約 5 dB のパワーの低下が見られ、この様な長周期帯域でのノイズ低減に有効である。

キーワード: 定常ノイズ特性, 広帯域地震計, F-net

Keywords: background noise, broadband seismometer, F-net



## 気象研における長期型自己浮上式海底地震計の整備と不具合対策 Long-term ocean-bottom seismometers in MRI/JMA and some related problems

平田 賢治<sup>1\*</sup>; 対馬 弘晃<sup>1</sup>; 山崎 明<sup>1</sup>; 勝間田 明男<sup>1</sup>; 前田 憲二<sup>1</sup>; 馬場 久紀<sup>2</sup>; 松原 忠泰<sup>3</sup>; 伊藤 立也<sup>3</sup>; 杉田 智也<sup>3</sup>; 堀 克博<sup>4</sup>; 白子 剛史<sup>4</sup>

HIRATA, Kenji<sup>1\*</sup>; TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1</sup>; YAMAZAKI, Akira<sup>1</sup>; KATSUMATA, Akio<sup>1</sup>; MAEDA, Kenji<sup>1</sup>; BABA, Hisatoshi<sup>2</sup>; MATSUBARA, Tadayasu<sup>3</sup>; ITOU, Tatsuya<sup>3</sup>; SUGITA, Tomoya<sup>3</sup>; HORI, Katsuhiko<sup>4</sup>; SHIRAKO, Takeshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 東海大学海洋学部, <sup>3</sup> 株式会社東京測振, <sup>4</sup> 日油技研工業株式会社

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, JMA, <sup>2</sup>School of Marine Science and Technology, Tokai University, <sup>3</sup>Tokyo Sokushin, <sup>4</sup>NiGK Corporation

気象研究所は、海上保安庁海洋情報部が我が国周辺の大陸棚調査に活用してきた(株)東京測振製の短期観測型 OBS (型式: TOBS-24N) を平成 18 年度に 30 台譲り受けた。これら TOBS-24N は、平成 23 年度および平成 24 年度各年で 4 台ずつ、2 年間で合計 8 台の、既存の OBS ガラス球内部のレコーダーを低消費電力型レコーダーに改造し、気象研究所として初めて最長 1 年間の長期観測が可能な長期型 OBS (TOBS-24NL) を整備した。低消費電力化は、これ以前に JAMSTEC により実施されたものと同様に、電源の低電圧化・AD 変換素子の低消費電力化・記録媒体の低電力化によってなされた。

平成 23 年 11 月気象庁観測船凌風丸 RF11-10 次航海においてこれらの長期型 OBS 4 台を房総半島沖に設置した。平成 24 年 9 月に同じく凌風丸 RF12-07 次航海においてこれら 4 台の回収と新たに 4 台の長期型 OBS の設置をしようとしたところ、出港前の確認では正常動作していた 4 台の設置用の長期型 OBS の音響トランスポンダが出港してまもなく、不規則な間隔で自発的に音を発振するなど動作不良に陥っていることがわかった。また、回収を試みた長期型 OBS 4 台のうち 2 台の音響トランスポンダから応答を確認することができず回収することができなかった。回収した 2 台の長期型 OBS は良好な記録が得られていることを確認した。

音響トランスポンダの動作不良については、RF12-07 次航海終了直後、動作不良のトランスポンダをメーカーに送り返し原因究明をおこなった。その結果、(1) 夏場の高温環境下と冬場の低温環境下にさらされる保管場所で OBS を保管したため、OBS 音響トランスポンダの送受波器 (逆鍋型形状のチタン製容器内にオイルで充たされた音響素子を収納) の内部にオイルの収縮による隙間が生じていた可能性があること、さらに、(2) 船のエンジン主機や発電機による振動ノイズによって、送受波器容器内部にキャピテーション現象が生じ、音響性能を劣化させた可能性があること、の 2 つが原因であろうと推測された。これに基づき次の 2 つの対策案が考えられた; (a) 音響トランスポンダ電子回路の再調整と送受波器のオーバーホールを行う。(b) 船体振動の影響を低減するため免震マットの上に OBS を搭載する。これらの有効性を検討するために室内実験が行われ、この 2 つの対策が有効であることを示唆する実験結果が得られた。その後、気象庁観測船啓風丸航海 2 航海および啓風丸 1 航海を用いた現場確認試験の結果、これらの対策が有効であることが確かめられた。

キーワード: 長期, 地震観測, 海底地震計, 不具合対策

Keywords: long-term, seismographic observation, ocean-bottom seismometer, measure for a glitch

## 海底圧力計 (Paroscientific depth sensor) の傾斜による測定値の変化について Value change of ocean bottom pressure gauge (Paroscientific depth sensor) by inclination of the sensor

尾形 尚樹<sup>1\*</sup>; 佐藤 利典<sup>1</sup>; 山田 知朗<sup>2</sup>; 篠原 雅尚<sup>2</sup>  
OGATA, Naoki<sup>1\*</sup>; SATO, Toshinori<sup>1</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>2</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba Univ., <sup>2</sup>ERI, Univ. Tokyo

### はじめに

Paroscientific 社の depth sensor を用いた海底圧力計は、海底での上下変動を捉えるために最近様々な場所で使用されている (例えば、稲津 他、2012)。この圧力計の観測誤差は 0.5hPa 程度 (水圧換算で約 5mm) (例えば、河野 他、2012) であり、海底下の地震や房総沖などの大規模なスロースリップの観測に有効であると考えられている。しかし、このセンサーは、センサーの姿勢を変化させると、センサー位置変化以上の測定値の変化をしてしまうということが知られている。これは、地震時の地殻変動による海底圧力計の傾斜によって、正しい観測ができない可能性を示している。そこで本発表では、圧力計の傾斜による測定値の変化を計測し、観測誤差と傾斜範囲について議論する。

### 測定と結果

使用したセンサーは、Paroscientific 社の intelligent depth sensor 8CB2000-I である。測定は、空中でまずセンサーを真下に向けてセットし、次にセンサーを設定した傾斜角度にする。観測値が安定したのち、再びセンサーを真下に向けてという操作を行い、真下を向いている時と傾斜している時の値の差を取った。この測定の際、センサーを傾ける時には、ゆっくり傾けないと傾斜後測定値がばらばらということが分かった。数十秒かけて変化させることにより安定した観測値が得られた。また、得られた観測値に対して球面調和関数を用いたフィッティングを行った。

測定の結果、傾斜による測定値の変化は、10 度の傾きで約 2 hPa、20 度で約 6 hPa、30 度で約 12 hPa と傾きが増すにつれて大きくなった。また、測定値の変化は真下に対して対称ではなく、真下より 15 度ほど傾いた点を中心に变化している結果となった。また、傾斜に対する測定値の再現性は、標準偏差 0.3hPa の範囲になることもわかった。これより、観測誤差 0.5 hPa 以内になるには、海底圧力計が水平に着底した場合 (センサーが真下を向く場合)、± 5 度以内の傾斜変化となることが分かった。海底圧力計が傾いて着底した場合は、許容範囲は狭くなり、例えば 20 度傾いた場合は ± 2 度ほどになる。

キーワード: 圧力計, 傾斜補正, Paroscientific 社 depth sensor

Keywords: Pressure gauge, inclination correction, Paroscientific Depth Sensor

## 地震波自動処理システムの性能評価 (2) Evaluating performance of automatic earthquake detection and location system for the nationwide seismic network(2)

中山 貴史<sup>1\*</sup>; 平原 聡<sup>1</sup>; 河野 俊夫<sup>1</sup>; 中島 淳一<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>; 海野 徳仁<sup>1</sup>; 長谷川 昭<sup>1</sup>; 堀内 茂木<sup>2</sup>; 堀内 優子<sup>2</sup>  
NAKAYAMA, Takashi<sup>1\*</sup>; HIRAHARA, Satoshi<sup>1</sup>; KONO, Toshio<sup>1</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>; UMINO, Norihito<sup>1</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>1</sup>; HORIUCHI, Shigeki<sup>2</sup>; HORIUCHI, Yuko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 株式会社ホームサイスマメータ

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Home Seismometer Corporation

The number of seismic stations has tremendously increased by many temporary seismic networks recently deployed in various areas, in addition to dense routine seismic networks such as the nationwide Kiban seismic network. Effective automatic earthquake detection and location system is anticipated, because the ability of data processing is limited. Manually picking P- and S-wave arrival times etc. from a huge amount of seismic waveform data observed by such many seismic stations is considerably time consuming work.

Horiuchi et al. (2012, 2013) have developed such an automatic seismic waveform processing system. This system was set up at Tohoku University on December 2012, and automatic detection and location processing of the nationwide seismic network data has been operating since then. The system can detect and locate many earthquakes which are difficult to be located by the routine processing based on manual pickings. However, sometimes earthquakes cannot be correctly discriminated by the system: for example, when more than two earthquakes occur almost simultaneously. In order to consider the application of automatic earthquake detection and location system to the actual seismic network, we need to know its performance.

Nakayama et al. (2013) tried to evaluate performance of this earthquake detection and location system for the application to the nationwide seismic network. Results showed that the automatic system could detect and locate earthquakes about 1.5 times more than those in the JMA unified catalogue. The automatic system extended the lower limit of the detection capability to much smaller magnitude range than that by the JMA unified catalogue. The evaluation also showed that S-wave arrival times picked by the automatic system were systematically delayed by ~0.05-0.1 sec compared with those by the manual pickings of the unified catalogue. Based on this performance evaluation, Horiuchi et al. (2014 this meeting) have tried to improve the system by developing a new algorithm to better pick S-wave arrivals.

We have evaluated performance of this presently improved automatic processing system by using the waveform data for the same period as those in the previous evaluation. Results show that the systematic delay of S-wave arrivals by the automatic pickings is considerably improved and the difference in S-wave arrivals between the new automatic system and the unified catalogue has become nearly the same as that between the manual pickings by Tohoku University and those in the unified catalogue. This indicates that the S-wave arrival times, as well as P-wave arrival times, picked by the automatic system almost stand comparison with those by the manual picking. Moreover, the evaluation shows that the new system also improved the rate of correct discrimination of earthquakes: the percentage of events that were missed to be correctly located decreased from 19% to 14% (most of these events are those located in and around the Izu-Bonin Islands and the Ryukyu Islands), and the percentage of events that were incorrectly defined as earthquakes decreased from 3.1% to 2.5%. This is because of the improvement of algorithm to correctly discriminate more than two earthquakes that occurred nearly simultaneously.

キーワード: 地震波初動自動検測, 地震波自動処理システム, 性能評価

Keywords: automatic arrival time picking, automatic event detection and location system, performance evaluation

## GNSS データを使った W-phase 解析 W-phase analysis with 1Hz GNSS data

上野 寛<sup>1\*</sup>; 勝間田 明男<sup>1</sup>; 川元 智司<sup>2</sup>; 矢萩 智裕<sup>2</sup>; 宮川 康平<sup>2</sup>

UENO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KATSUMATA, Akio<sup>1</sup>; KAWAMOTO, Satoshi<sup>2</sup>; YAHAGI, Toshihiro<sup>2</sup>; MIYAGAWA, Kohei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Geospatial Information Authority of Japan

気象庁では国内外の広帯域地震波形記録を用いて、W-phase 解析を行っている。現在、地震発生後最短 6 分で W-phase 解を求めることが出来、その解及びモーメントマグニチュードは津波予報のグレード変更もしくは解除を行うための情報の一つとして利用している。しかし、W-phase 解析で積分して用いている広帯域地震記録は、特に大地震の際の発生場所近傍では不安定になることが多く、W-phase 解析に使用することが難しい場合がある。一方、直接変位を記録する GNSS データは、積分処理する必要がなく、安定した変位記録として利用できることが期待される。

今回、国土地理院が運用している 1Hz GNSS データを用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震、2003 年十勝沖地震の M8 以上の地震について、W-phase 解析を行ってみた。より近くの安定した変位データを用いることによる、W-phase 解析の時間短縮と使用する周波数帯域毎の解の安定性について、検討を行った。

キーワード: W-phase 解析, GNSS, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: W-phase analysis, 1Hz GNSS data, Great Tohoku earthquake



## 余震の自動イベント検出処理の開発(2) Automated event identification of aftershocks(2)

勝間田 明男<sup>1\*</sup>  
KATSUMATA, Akio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所  
<sup>1</sup> Meteorological Research Institute, JMA

地震発生直後に余震分布の特徴を自動処理により把握することを目的として、連発する余震を自動的に震源決定する処理の開発を行っている。東北地方太平洋沖地震では、余震活動が非常に活発であり、地震波の相の明瞭な立ち上がりに基づいた手法では、規模の大きな地震であっても十分なデータの検出ができない場合があった。そのような事態にもイベントの発生のみは検出可能な手法を検討している。この発表では改良を施した震源推定法について説明する。

以下のようなエンベロープのピーク振幅と時刻のみに基づく処理方式を試みている。

- リアルタイム伝送されてくる地震波形に、高周波を強調するフィルターを施す。
- フィルター処理後の波形からエンベロープを求める。
- エンベロープのピーク時刻、最大振幅の情報を取り出す。
- エンベロープの最大振幅・その時刻について、整合的な震源を推定する。

以前には、震源を推定する上で、震源時・緯度・経度・深さ・規模の5次元空間における大域探索法(SCE-UA法)を用いた直接的探索を行っていた。しかし、制限をかけずに5次元空間を探索すると、ノイズのうち振幅・時刻について整合的なものを選び出してくることが多く、適正な解とならない場合が大半である。また、振幅のピークに注目するという点で当方法はSSA(Source-scanning algorithm: Kao and Shan, 2004)に共通する面もあるが、SSAにおいてはかならずしも分解能の高い結果が得られない場合がある。

ここでは複数点で同時に振幅レベルが上がったグループをまず探し、更にその中で最大のS/Nを持つものを選び出す。そのデータ時刻・振幅について整合的なデータ群を探すようにした。広い範囲から最適解を直接探すのではなく、信頼できるデータを軸にして探索範囲を最初から制限している。深さについては固定とし、震央距離・方位角を変化させて、軸となるデータに整合的なデータが多くなる位置を探す方法を試みている。ここでは、震源時は震央距離を定めることにより決まり、規模は振幅と震央距離から決まってくる。

S/N比の大きさに基づいて、軸とするデータを選ぶ場合にノイズが選んでしまう例が多い。しかし、ノイズについては整合的なデータがあまりないため、地震とはみなされない。地震として認定されたデータやノイズとみなされたデータについては、順次処理対象からはずしてゆき、残されたデータについて基準を満たすデータ群がなくなるまで処理をおこなうようにしている。

現在のところ、散発的に発生する地震的なイベントの分離とデータ数の多い震源の推定はできている。データ数の少ない場合については、適正な震源が推定できなかつたりする場合があり、検討を行っている。

本調査には、独立行政法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、独立行政法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び独立行政法人海洋開発研究機構のデータを利用している。

キーワード: 震源の自動処理, 地震波形のエンベロープ

Keywords: automated seismic event identification, envelop of seismic wave

## 下北半島周辺における微小地震観測網の構築 Construction of the seismic observation network around Shimokita Peninsula

関根 秀太郎<sup>1\*</sup>; 澤田 義博<sup>1</sup>; 笠原 敬司<sup>1</sup>; 佐々木 俊二<sup>1</sup>; 田澤 芳博<sup>1</sup>; 矢島 浩<sup>1</sup>  
SEKINE, Shutaro<sup>1\*</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>1</sup>; KASAHARA, Keiji<sup>1</sup>; SASAKI, Shunji<sup>1</sup>; TAZAWA, Yoshihiro<sup>1</sup>; YAJIMA, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(公財) 地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction

はじめに

東北北部～北海道南部地域における微小地震の観測点分布は、その南部では防災科研 Hi-net や大学等の観測点が比較的密に配置されており、ある程度高い精度で微小地震活動の把握が可能と言える。しかしながら、下北半島や津軽半島を含む青森県北部地域では比較的観測点の密度が薄く観測点の間隔が広い。このため、特に、地震発生層の上限の深さや地震の活動を他地域と同様の解像度で把握するには十分ではないと考えられる。そこで、この地域における震源決定の高精度化を図るとともに、各種解析と合わせて地震活動の常時モニタリングを行うことにより、当該地域における地震活動地震発生メカニズムの解明の為に、下北半島および津軽半島周辺に高密度の微小地震観測網を設置する事とした。ここでは、この観測網の概要について述べる。

観測網の概要

本観測網は、平成 25 年度に 20 点、平成 26 年度に 16 点の合計 36 観測点で構成されており、各観測点は既存の観測網も含めて 10km 程度になるように配置されている。各地震観測点では、極微小地震から大地震まで対応できるよう、Lennartz の 3 成分速度計（固有周期 1 秒）と日本航空電子のサーボ加速度計（最大± 2G）を組み合わせた高ダイナミック孔中地震計を深さ 20m 程度のボアホール孔底に設置する。データは白山工業社製の LS-7000XT により 100Hz サンプリングで収録され、観測点からリアルタイムで地震予知総合研究振興会の本部に送信され、東大地震研、JDX-net を介して、全国の地震観測網ネットワークに送信される。既に平成 25 年度分の観測点は 12 月末から観測を始めており、2015 年 1 月 16 日から配信を開始した。この観測網により得られたデータは、周囲の他機関の観測点を加えて、観測網周辺の詳細な速度・減衰構造および断層帯の地震活動等について有用なデータが得られるものと期待される。なお、1 月分について、震源決定を行ったところ、気象庁一元化処理震源に対して、2 倍程度の震源が決定された。

キーワード: 地震観測網, 下北半島

Keywords: seismic observation network, Shimokita Peninsula

## 地熱資源ポテンシャル評価を目指した空中物理探査 Regional Airborne Survey for the Evaluation of Geothermal Potential in Japan

島田 忠明<sup>1\*</sup>; 高井 克己<sup>1</sup>; 三宅 一弘<sup>1</sup>; 久谷 公一<sup>1</sup>; 當舎 利行<sup>1</sup>  
SHIMADA, Tadaaki<sup>1\*</sup>; TAKAI, Katsumi<sup>1</sup>; MIYAKE, Kazuhiro<sup>1</sup>; HISATANI, Koichi<sup>1</sup>; TOSHA, Toshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

<sup>1</sup> Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

2012年8月の法律改正により、石油天然ガス・金属鉱物資源機構に地熱資源の開発を促進する業務が追加となった。この業務は、地熱開発事業者が実施する地質構造調査における助成、探査段階における出資、開発における債務保証、自主的な調査による情報提供、技術開発がある。その自主的な調査の一環として、広域的な空中物理探査を実施することとした。この調査により、地熱開発事業者が新規の地熱資源調査に着手する際に参考となる基礎的なデータの提供ができることになる。

地熱資源の多くは山岳地域にあり、その多くは国立・国定公園に指定されていることが多い。空中物理探査は、現地へのアクセスが困難な地域や地表の改変許可を得るのが困難な地域において物理探査データが取得できる有効な調査手法である。最新の技術である重力偏差法探査（Gravity Gradiometer method）および時間領域電磁探査（Time-Domain Electromagnetic method）の手法によって、地熱資源ポテンシャル評価の基礎的な情報である地質構造の把握を主な目的として空中物理探査を行うこととした。

重力偏差法探査は重力勾配計を用いた探査手法で、重力ポテンシャルの二次微分値を直接測定する。通常重力探査に比べ、高分解能で地下構造を把握することが可能である。一方、時間領域電磁探査は、周波数領域電磁探査と比べ地下の比抵抗の変化に敏感であるという利点から高精度な測定が期待できる。また、使用する測定機器の仕様から探査深度数百メートル程度を期待している。

ただし、空中重力偏差法探査および時間領域空中電磁探査とも、国内での実績がまだないことから、手法の検証も含め、既往調査が多く行われている地域を対象に実施することとなった。

実際に空中物理探査を行うには、計測機器を航空機に搭載することになる。今般の探査では固定翼機ではなく、ヘリコプターに計測機器を搭載することとした。なお、航空機に計測機器を搭載するには、改造の許可を航空局より受ける必要がある。この手続きに時間を要し、電磁探査は実施できなかったが、重力探査は実施することができた。

2013年10月から11月に九州のくじゅう地域および霧島地域において空中重力偏差法探査のみ実施した。くじゅう地域では測線長約2,200km、霧島地域では測線長約500kmのデータを取得することができた。この空中物理探査の内容について報告する。

現地の調査にあたり、地元自治体および関係機関の各位に協力をいただいた。ここに謝意を表する。

キーワード: 空中物理探査, 地熱, 重力, 重力探査, 電磁探査

Keywords: airborne survey, geothermal resources, gravity, gravity survey, electromagnetic survey



## 空中電磁探査技術を活用した深層崩壊の予測技術に関する研究 Study on the prediction of the deep catastrophic landslide using the Airborne Electromagnetic Survey

河戸 克志<sup>1\*</sup>; 木下 篤彦<sup>2</sup>; 高原 晃宙<sup>2</sup>; 一色 弘充<sup>2</sup>; 石塚 忠範<sup>2</sup>; 奥村 稔<sup>1</sup>; 内田 浩一<sup>1</sup>

KAWATO, Katsushi<sup>1\*</sup>; KINOSHITA, Atsuhiko<sup>2</sup>; TAKAHARA, Teruyoshi<sup>2</sup>; ISSHIKI, Hiromitsu<sup>2</sup>; ISHIZUKA, Tadanori<sup>2</sup>; OKUMURA, Minoru<sup>1</sup>; UCHIDA, Koichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大日本コンサルタント株式会社, <sup>2</sup> 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム

<sup>1</sup> Nippon Engineering Consultants Co., LTD., <sup>2</sup> Public Works Research Institute

平成23年台風12号による紀伊半島の災害をはじめとして、近年、深層崩壊による災害が多発している。深層崩壊による被害としては、崩壊そのものによって被害も大きなものになるが、河道が閉塞し天然ダムが形成された場合には決壊により下流域に大きな被害が生じるおそれもある。このため、深層崩壊によるリスクを評価するための様々な取り組みが行われている。特に国土交通省は、平成22年に過去に深層崩壊が発生した箇所での第四紀隆起量と地質に着目した深層崩壊推定頻度マップを公表するとともに、平成24年には深層崩壊溪流レベル評価マップ及び深層崩壊跡地密度マップを公表している。今後は想定しうる深層崩壊対策をハード・ソフトの両面から実施するため、斜面スケールでのリスク評価が求められている。斜面スケールでのリスク評価手法として、これまでレーザ計測による微地形要素の抽出などが主流であったが、最近になって空中電磁探査がクローズアップされている。空中電磁探査のメリットとして、深層崩壊に関連する地質境界が明らかとなる可能性があること、地下の水文特性が明らかとなる可能性があること、などが挙げられる。一方で、地質境界の比抵抗値や地下水の賦存箇所の決定方法が明確でないなどの不確定要素もある。本研究では、これまでに空中電磁探査が実施された深層崩壊発生箇所を対象に、空中電磁探査、地質調査、水文調査等の結果を整理し、深層崩壊の発生のおそれがある箇所での鉛直方向の比抵抗パターンの特徴や、深層崩壊のすべり面となる可能性の高い地質境界での比抵抗値のしきい値の設定方法について検討を行った。

研究対象は、別府田野川流域(約4.4 km<sup>2</sup>)、富士川流域(約3.7 km<sup>2</sup>)、姫川流域(約15.2 km<sup>2</sup>)、熊野川流域(約10.1 km<sup>2</sup>)の4地域である。これらの地域は、いずれも深層崩壊の発生実績があり、かつ空中電磁探査による広域調査が実施されている。なお、別府田野川流域・富士川流域・熊野川流域の地質は四万十帯の砂岩・頁岩であり、姫川流域の地質は火山岩類が優勢である。

本研究では、先ず、空中電磁探査による地域ごとの比抵抗特性について検討した。対象地域に出現する比抵抗値の範囲は、別府田野川流域と富士川流域では1~400 Ω・mであるのに対し、姫川流域では1~1,200 Ω・m、熊野川流域では1~2,400 Ω・mを示し、地質や地域によって比抵抗値の分布に差があることが分かった。一方、深層崩壊の発生のおそれがある箇所での地表から深部への鉛直方向の比抵抗パターンに着目すると、低比抵抗から高比抵抗に変わるパターン、高比抵抗から低比抵抗に変わるパターン、高比抵抗から低比抵抗に変わりさらに高比抵抗に変わるパターンの3パターンがあることが分かった。このことから、鉛直方向に比抵抗値が変化する深度が深層崩壊の基底部となる可能性がある。別府田野川流域、富士川流域、姫川流域ではボーリング調査が実施され、ボーリングコアの観察から風化部と新鮮部の地質境界が認定されている。この地質境界に対応する比抵抗値は、別府田野川流域では100 Ω・mが、富士川流域では70 Ω・mが、姫川流域では500 Ω・m、680 Ω・m、1,000 Ω・mであった。

これらのことから、比抵抗値の出現頻度や地質境界に該当する比抵抗値は、地域や地質によって異なることが確認された。したがって、空中電磁探査を実施する際には代表箇所でもボーリング調査を併せて実施し地質と比抵抗値の関係を整理した上で深層崩壊のリスク評価を実施する必要がある。

なお、熊野川流域の深層崩壊箇所では、尾根から谷部に連続する低比抵抗ゾーンや鉛直方向の低比抵抗ゾーンが共通して確認され、水文調査結果による地下水状況と一致している。このことから、今後、深層崩壊に関連する比抵抗構造についてもデータを蓄積し、深層崩壊の発生のおそれがある箇所の抽出方法、崩壊深・土砂量の推定方法を検討していきたいと考えている。

キーワード: 空中電磁探査, 深層崩壊

Keywords: Airborne Electromagnetic Survey, deep catastrophic landslide



## 空中電磁探査技術を活用した火山体における大規模崩壊予測技術に関する研究 Study on the prediction of the large landslides of the volcanoes using the Airborne Electromagnetic Survey

木下 篤彦<sup>1\*</sup>; 高原 晃宙<sup>1</sup>; 一色 弘充<sup>1</sup>; 石塚 忠範<sup>1</sup>; 大平 知秀<sup>2</sup>; 大森 徹治<sup>3</sup>; 山根 宏之<sup>3</sup>; 荒井 健一<sup>4</sup>; 清野 耕史<sup>5</sup>; 辻岡 秀樹<sup>6</sup>

KINOSHITA, Atsuhiko<sup>1\*</sup>; TAKAHARA, Teruyoshi<sup>1</sup>; ISSHIKI, Hiromitsu<sup>1</sup>; ISHIZUKA, Tadanori<sup>1</sup>; OODAIRA, Tomohide<sup>2</sup>; OMORI, Tetsuji<sup>3</sup>; YAMANE, Hiroyuki<sup>3</sup>; ARAI, Kenichi<sup>4</sup>; KIYONO, Koji<sup>5</sup>; TSUJIOKA, Hideki<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム, <sup>2</sup> 国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所, <sup>3</sup> 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所, <sup>4</sup> アジア航測株式会社, <sup>5</sup> 大日本コンサルタント株式会社, <sup>6</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup>Public Works Research Institute, <sup>2</sup>Fukushima River and National Highway Office, <sup>3</sup>Fuji Sabo Office, <sup>4</sup>Asia Air Survey Co., Ltd., <sup>5</sup>Nippon Engineering Consultants Co., Ltd., <sup>6</sup>OYO Corporation

活動が活発な火山の下流域では常に土砂災害が発生する危険性がある。特に豪雨時に大規模な山体崩壊が発生した場合には崩壊土砂が土石流化し下流域で土砂堆積や氾濫により大きな被害が発生する恐れがある。これまで例えば深層崩壊地などで空中電磁探査を用いて風化土層厚を推定する手法が提案されている。一方で、豪雨時等に崩壊の可能性がある斜面を予測するには、崩壊面を推定する手法を確立すること、斜面における水文過程を推定すること、等が必要であるが、現在のところこれらについて十分に検討されているとは言い難い状況である。そこで本研究では吾妻山、富士山を事例とし、空中電磁探査を実施し併せて実施した地質調査や水質調査の結果から崩壊面の推定手法及び水文過程を予測する手法について検討を行った。

本研究では、まず、吾妻山、富士山において、地形・地質の特徴、土砂災害の実績、火山活動履歴等の文献調査を行った。次に現地調査を行い、大規模土砂移動に関連した土質構造の確認、土砂移動の原因となる熱水変質状況の確認、湧水・温泉湧出状況の確認を行った。これらの結果を参考にして空中電磁探査のエリア等を検討した。探査対象は山体の頂部や代表的な火口が含まれ、大規模な崩壊が起こりうる 15° 以上の勾配を含むエリアとした。探査エリアは吾妻山が約 18km<sup>2</sup>、富士山が約 120km<sup>2</sup>であった。空中電磁探査の結果は深度ごとに平面的に整理するとともに火口や地下水位が高い箇所等土砂災害の発生が予想される箇所については測線を引いて深度方向の比抵抗値も縦断的に把握できるように 2 次元的に整理した。これらの低比抵抗値結果を従来の地形・地質の調査結果と照らし合わせ空中電磁探査の結果との適合性を検証した。また、さらに詳細に空中電磁探査の結果の適合性を確認する目的で、吾妻山では周辺の 10 溪流で水文・水質調査を行った。調査項目は、流量・電気伝導度・pH・水温・イオン状シリカ濃度などであった。また、富士山では、空中電磁探査による比抵抗値と地質との関係を調べる目的でボーリング調査も実施した。

これらの調査結果から、火山地域で空中電磁探査を用いることにより、地質区分をおよそ推定できること、地下の水文状況を把握できることが分かった。このことから、空中電磁探査を用いれば豪雨時に崩壊する可能性がある斜面をおよそ予測することが可能である。一方で、空中電磁探査のみであると崩壊深や崩壊土砂量などを詳細に推定することはできない。これらを推定するには、空中電磁探査の結果から危険な箇所を推定すること、その箇所でボーリング調査や地上での物理探査を実施すること、水質・水文調査を実施することなどその他の調査を実施することによって空中電磁探査の結果を補足する必要がある。今後はモデル的にいくつかの火山で空中電磁探査を含む調査を実施し、データを蓄積していくことにより火山地域での崩壊危険箇所の推定技術、崩壊深・土砂量の推定手法を確立していきたいと考えている。

キーワード: 空中電磁探査, 大規模崩壊, 火山

Keywords: airborne electromagnetic survey, large landslide, volcano

## 空中磁気測量データ解析にもとづくトンネル地質構造とその検証 Verification of the tunnel geological structure based on the helicopter-borne magnetometry data analysis

岡崎 健治<sup>1\*</sup>; 伊東 佳彦<sup>1</sup>  
OKAZAKI, Kenji<sup>1\*</sup>; ITO, Yoshihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 土木研究所寒地土木研究所  
<sup>1</sup>CERI, PWRI

### 1. はじめに

トンネル建設では、地質工学情報の精度向上が、工程管理や事前のリスク回避にとって重要である。特に、付加体のような複雑な地質地域では、より正確な情報がトンネル建設において求められる。筆者らは、北海道東部の付加体堆積物分布地域の山岳トンネルを対象に空中磁気探査を実施し、地表踏査やボーリング調査など事前の地質調査結果と、その後のトンネル掘削で明らかとなった地質情報を比較検討することで本調査地域における適用性を明らかにしたので報告する。

### 2. 調査概要

調査地は北海道東部における山岳地帯である。調査対象トンネルは、延長910m、最大土被り厚さ150mの道路トンネルである。トンネルの地質は、付加体堆積物である緑色岩類、火山砕屑性堆積岩、ハイアロクラスタイト、枕状溶岩、チャート、石灰岩（以上、仁頃層群）ならびに正常堆積物である白亜系の主に礫岩および砂岩（佐呂間層群）からなる。また、調査地周辺では、付加体形成時およびその後の構造運動で形成されたと考えられる断層破砕帯が多数発達する。

空中磁気探査では調査範囲の相対的な磁力強度分布を求めた。トンネル地山の地質構造は、計測した磁気データをもとにMag2dc (Cooper, 2003) によって推定した。この事前調査で推定した地質モデルを、実際のトンネル建設で判明した地質状況と比較し、本調査手法のトンネル地質調査への適用性について検討した。なお、検討に先立ち、磁気データが示す基本的な情報を把握するため、特定の磁気異常体を設定して、その角度、傾斜、幅、深さ位置および帯磁率の違いによる磁気異常体の検出の違いや傾向について確認した。

### 3. 調査結果

北海道の付加体地域のトンネル地山を対象に空中電磁探査を行い、他の地質調査結果と比較検討し、トンネル地質調査における適用性を明らかにした。

1) 空中磁気探査によって求めた磁気強度分布と地表踏査などで推定した地質構造から逆解析により地質モデルを構築した。対比にあたっては、岩石サンプルでの磁気強度計測結果を参考に、高い磁気強度は佐呂間層群の堆積岩、断層が発達する水冷破砕岩、塊状玄武岩の分布箇所、低い磁気強度はチャートや石灰岩の分布箇所であると推定してモデルを構築した。

2) 事前に構築した地質モデルを、トンネル掘削直前の先進ボーリングのコア調査結果を対比したところ、地質モデルは概ね対応していることが判明した。

本地域での検討の結果、空中磁気探査による磁気強度の分布は、地質の分布状況を検討するために有効であり、また、事前に構築した地質モデルは、概略的な検討に活用できることがわかった。これらの岩石の分布をトンネルの掘削前に把握することができれば、地質に起因する問題点を検討するための情報として有効といえる。

キーワード: 空中磁気探査, 磁気異常, 付加体, 道路トンネル

Keywords: helicopter-borne magnetic survey, magnetic anomalies, accretionary complex, road tunnel

## 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波浸水域の磁気構造 Magnetic structure of the tsunami inundation area of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

大熊 茂雄<sup>1\*</sup>; 上田 匠<sup>1</sup>; 中塚 正<sup>1</sup>; 光畑 裕司<sup>1</sup>; 神宮司 元治<sup>1</sup>; 内田 利弘<sup>1</sup>  
OKUMA, Shigeo<sup>1\*</sup>; UEDA, Takumi<sup>1</sup>; NAKATSUKA, Tadashi<sup>1</sup>; MITSUHATA, Yuji<sup>1</sup>; JINGUUI, Motohara<sup>1</sup>; UCHIDA,  
Toshihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質調査総合センター

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

仙台平野南部地域および福島県松川浦地域の2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波浸水域では、津波浸水の影響を評価することを主目的に2012年6月に空中電磁探査を実施している。その際、地下の比抵抗分布に対応した電磁応答の測定(電磁探査)とは別に、高感度空中磁力計により地磁気全磁力の測定(磁気探査)も行っている(Okuma et al., 2013)。電磁探査による可探深度は当該地域において高々100m程度である一方、磁気探査ではより深部の調査も可能であり、対象とする物性は異なるものの地下構造解釈の点で相補的な利用が見込める。そこで、今回観測した地磁気全磁力データの処理と解析を行ったので、この結果について発表する。

空中磁気探査は電磁バードの中央に収容されたセシウム磁力計センサーにより、空中電磁探査と同様に10Hzのサンプリング周期で実施された。調査地域には、住宅地や工場、沿岸域の臨時ゴミ集積場、焼却場などがあり、これらに伴う人工的な磁気異常も観測されている。加えて、今回観測磁気データに通常の処理を行ったところ、いわゆるHerringbone effectと呼ばれる矢筈模様の磁気異常が検出された。これは、機体磁気による影響と考えられ、約20nT程度の方位誤差が認められた。この誤差は、当該地域が概ね磁気異常の静穏域であることから、決して無視できない大きさである。磁気センサーを収容した電磁バードは機体から30m下方につり下げられているものの、使用した機体が比較的磁気ノイズが大きいことで知られているAS350B3であったため、その影響が地磁気に重畳して観測されたものと考えられる。

機体磁気の影響を軽減するため、日変化補正、IGRF残差計算を行った後、拡張交点コントロール法(Nakatsuka and Okuma, 2006)を観測地磁気データに適用し、滑らかな観測面上の全磁力異常図を作成した。この結果、機体磁気による方位誤差の影響が軽減され、以降通常の磁気異常の解析が可能となった。

磁気図を参照すると、仙台平野南部地域では、磁気異常は人工起源と考えられるものを除くと、割山山地の白亜紀花崗岩類露出地域において分布する高磁気異常が顕著である。付近では、高磁化率( $10^{-2}$  SI以上)の花崗岩試料が採取されており(日本列島基盤岩類物性DB:PB-Rock21)、当該花崗岩が磁気異常源と推定される。一方、沿岸部の鳥の海南方および牛橋河口北方において、長波長の高磁気異常が各々分布する。これらの高磁気異常は帯状に南西方に延び、割山山地の高磁気異常に連続しているように見える。したがって、沿岸部の高磁気異常源としては花崗岩の可能性がある。

一方、松川浦地域では、松川浦の北東端付近において高磁気異常が分布する。当該地域には磁気異常源と考えられる露頭は分布しない。しかし、付近で行われた温泉ボーリングの結果、深度約300m付近で花崗岩に到達し、その磁化率が高い( $10^{-2}$  SI以上; PB-Rock21)ことから、当該の花崗岩体が磁気異常源であると推定される。

上述のように、当該地域の磁気異常は孤立型の磁気異常源を想定できるものではなく、高磁性の基盤岩類の隆起に対応するようなものであるため、磁気異常源の構造を推定するために、3Dイメージング(Nakatsuka and Okuma, 2013)を適用した。予備的な解析の結果、割山山地において南北性のほぼ直立した高磁性の構造がイメージングされた。また、仙台平野南部沿岸部において高磁化強度域が解析され東方に向かって深度が浅くなることが分かった。一方、松川浦地域では松川浦の北東端で顕著な高磁化強度域が解析され、その深度は温泉ボーリングで確認された花崗岩の賦存深度と調和的であった。

キーワード: 空中電磁探査, 津波, 地下水環境, 空中磁気探査, 磁気構造, 基盤

Keywords: airborne EM survey, tsunami, groundwater environment, aeromagnetic survey, magnetic structure, basement



## 無人ヘリによる新燃岳における繰り返し空中磁気測量 Repeated aeromagnetic surveys in Shinmoedake volcano, Japan, by using an unmanned helicopter

小山 崇夫<sup>1\*</sup>; 金子 隆之<sup>1</sup>; 大湊 隆雄<sup>1</sup>; 渡邊 篤志<sup>1</sup>; 武尾 実<sup>1</sup>; 柳澤 孝寿<sup>2</sup>; 本多 嘉明<sup>3</sup>

KOYAMA, Takao<sup>1\*</sup>; KANEKO, Takayuki<sup>1</sup>; OHMINATO, Takao<sup>1</sup>; WATANABE, Atsushi<sup>1</sup>; TAKEO, Minoru<sup>1</sup>; YANAGISAWA, Takatoshi<sup>2</sup>; HONDA, Yoshiaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, <sup>3</sup> 千葉大学環境リモートセンシング研究センター  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

After the 2011 eruptions of Shinmoedake volcano in Japan, we conducted three repeated aeromagnetic surveys around this area, by using an autonomously driven unmanned helicopter. Shinmoedake volcano had sub-Plinian eruptions in the end of January 2011 and its vent was filled by uprising intrusive lavas. After that, some Vulcanian eruptions followed, and then volcanic activities were decreasing gradually up to the beginning of April 2011.

After these events, we conducted aeromagnetic surveys in the end of May 2011, the beginning of November 2011, and the end of October 2013. The Yamaha RMAX-G1 unmanned helicopter was used for our surveys, which was usually used to spray the agricultural chemicals to fields, and can make flights following the programmed tracks within about 1 m precision. Availability of precise flights are a great advantage for repeated surveys in order to detect easily the changes of circumstances, such as, geomagnetic changes due to volcanic activities by measuring at the same positions. Almost 85 km flights in total were made in every survey with a flight speed of about 10 m/s. Flight heights above the ground were almost kept in 100 m.

As the result of some data processing, we clearly detected the change of the magnetic fields around the vent of Shinmoedake, which has a kind of a dipolar pattern with positive changes in South and negative changes in North. This indicates a region around the vent got magnetization due to cooling. The intrusive lava is supposed to be the source of magnetization, and  $2.0 \times 10^7$  Am<sup>2</sup> magnetization of lava is evaluated at the second survey (0.5yr) and  $4.8 \times 10^7$  Am<sup>2</sup> is evaluated at the third survey (2.5yr), compared with the first survey. This means the magnetizing rate is almost related to a square root of the elapsed time and it leads to an implication that the lava cooling is dominantly made gradually by thermal diffusion, not by other cooling processes such as thermal convection. The common thermal diffusivity of rocks, however, is too small by one order of magnitude to explain this cooling rate, and intrusion of water in lava, say, rainfall water, may play an important role to raise the effective thermal diffusivity to make the lava cool.



## L1 正則化によるスパース推定法を用いた磁場 3 次元構造イメージング The 3D magnetic imaging using the L1 regularization and variable selection procedure.

宇津木 充<sup>1\*</sup>  
UTSUGI, Mitsuru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto Univ.

近年、重力・磁場などのポテンシャルデータから 3 次元の地下構造を求める為の解析手法がいくつか提案されている。それらの中にはスパースな解を求める為の制約を課した解析手法が用いられている (例えば Portniaguine and Zhdanov, 1999、Silva et al., 2007)。一般に重力や磁場のポテンシャルデータから地下構造を求めた場合、その非一意性から滑らかな、従って実際の構造をぼかしたような unfocused な解が得られてしまう。上記の解析方法は、データを再現できるよりシンプルな解 (即ち少ない非ゼロの説明変数) が得られるような制約を課し、結果解像度の高い解を得ようとするものである。ところで近年、Lasso (Tibshirani, 1995) と呼ばれるスパース推定法が注目され機械学習、画像解析やゲノム情報解析などの分野で用いられている。この方法は線形回帰に L1 罰則項を加えた罰則付き最適化を行うことで疎な (多くの係数が真に 0 となる) 解を求めるための方法である。Lasso では選択でき得る (非ゼロな) 解の次元が観測データの次元以下に制約されるが、これに L2 正則化項を加え  $p > n$  問題にも適用できるようにしたのが Elastic Net (Zou and Hastie, 2005) である。本研究ではこうしたスパース推定法を磁化構造解析に適用した結果を報告する。

キーワード: ポテンシャル, 地球磁場, 磁化構造, L1 正則化法  
Keywords: potential, geomagnetism, magnetic structure, L-1 norm regularization

## 無人航空機磁気探査をもとにしたデセプション島北部の磁化構造 Magnetic structure of the north part of Deception Island based on the aeromagnetic survey by a small unmanned airplane

坂中 伸也<sup>1\*</sup>; 船木 實<sup>2</sup>; 東野 伸一郎<sup>3</sup>; 中村 教博<sup>4</sup>; 岩田 尚能<sup>5</sup>; 小原 徳昭<sup>6</sup>; 桑原 幹夫<sup>7</sup>  
SAKANAKA, Shin'ya<sup>1\*</sup>; FUNAKI, Minoru<sup>2</sup>; HIGASHINO, Shin-ichiro<sup>3</sup>; NAKAMURA, Norihiro<sup>4</sup>; IWATA, Naoyoshi<sup>5</sup>; OBARA, Noriaki<sup>6</sup>; KUWABARA, Mikio<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 九州大学, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 山形大学, <sup>6</sup> ロボティスタ, <sup>7</sup> RC サービス  
<sup>1</sup> Akita Univ., <sup>2</sup> NIPR, <sup>3</sup> Kyushu Univ., <sup>4</sup> Tohoku Univ., <sup>5</sup> Yamagata Univ., <sup>6</sup> Robotista, <sup>7</sup> RC Service

Aerial magnetic survey was carried out in the part of the flight project of the autonomous unmanned aerial vehicles (UAV). The project was incorporated with National Institute of Polar Research (Japan), Korea Polar Research Institute, Chile Antarctic Institute, Bulgarian Antarctic research and Spanish Antarctic team. Magnetic anomaly data were acquired over the northern part of Deception Island (within South Shetland islands) in Bransfield Strait. It was the first time to succeed to get the geophysical data by a long-flight unmanned aerial vehicle (UAV) in the area of Antarctica as already reported by our team. Due to the severe weather the flight was canceled over the southern half of the Deception Island and its surrounding sea area.

The flight altitude is about 780m averaged. The main survey lines are directed east-west and the intervals of the lines are about 1000m. Longest length of the main survey line is about 18km. Probably due to the unstable attitude of the UAV body by strong wind, some east-west lines are shortcutted regardless of pre-programmed 18km length courses. The flight courses were overlapped on the survey lines along the latitude of 62 degree 53 minute and the longitude of -60 degree 28 minute. On these lines each direction of the flight is opposite. Some unnatural unduration was seen around overlapped lines. These kinds of unduration are occurred due to the difference of the observed magnetic field on each line. These differences have to be corrected, now we have the tolerable data for estimate the structure of the Deception Island.

Outstanding high magnetic anomaly is recognized over the eastern peak of the island. Preparing topographic digital data of the Deception Island and bathymetric data on surrounding sea area, we estimated the distribution and the intensity of magnetization.

キーワード: 南極, デセプション島, 無人航空機, 磁気探査, サウスシェトランド諸島

Keywords: Antarctica, Deception Island, Unmanned Aerial Vehicle, Magnetic Survey, South Shetland Islands

## Three dimensional inversion for the Grounded Electrical-Source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) data Three dimensional inversion for the Grounded Electrical-Source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) data

ABD ALLAH, Sabry<sup>1\*</sup> ; MOGI, Toru<sup>1</sup> ; KIM, Hee<sup>2</sup> ; FOMENKO, Elena<sup>3</sup>  
ABD ALLAH, Sabry<sup>1\*</sup> ; MOGI, Toru<sup>1</sup> ; KIM, Hee<sup>2</sup> ; FOMENKO, Elena<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>2</sup>Departments of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea, <sup>3</sup>Nova Scotia Community College, Halifax, NV, Canada

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>2</sup>Departments of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea, <sup>3</sup>Nova Scotia Community College, Halifax, NV, Canada

Previous studies conducted by the Grounded Electrical-Source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) have shown that, this system is a promising method for modelling 3D resistivity structures in coastal areas, in addition to inaccessible area such as volcano, mountainous area covered by deep forest. To expand the application of the GREATEM system in the future for studying hazardous wastes, sea water incursion, geothermal exploration and hydrocarbon exploration, a 3D-resistivity modelling that considers large lateral resistivity variations is required in case of large resistivity contrasts between land and sea in surveys of coastal areas where 1D resistivity model that assumes a horizontally layered structure might be inaccurate. In this abstract we present the preparation for developing a consistent three dimensional electromagnetic inversion algorithm to calculate the EM response over arbitrary 3D conductivity structure using GREATEM system. In forward modelling the second order partial differential equations for scalar and vector potential are discretized on a staggered-grid finite difference method (Fomenko and Mogi, 2002, Mogi et al., 2011). In the inversion method the 3D model discretized into a large number of rectangular cells of constant conductivity and the final solution is obtained by minimizing a global objective function composed of the model objective function and data misfit. To deal with a huge number of grids and wide range of frequencies in air borne datasets, a method for approximating sensitivities is introduced for the efficient 3-D inversion. Approximate sensitivities are derived by replacing adjoint secondary electric fields with those computed in the previous iteration. These sensitivities can reduce the computation time, without significant loss of accuracy when constructing a full sensitivity matrix for 3-D inversion, based on the Gauss-Newton method (Han, N. et al., 2008).

Firstly, we started testing the algorithm in the frequency domain electromagnetic response of synthetic model considering a 3D conductor embedded in uniform half space. In the second step we tested more complex synthetic model, considering vertical contact between two different high and low resistivity quarter-spaces and a conductor embedded in a high resistive quarter-space. Frequency-domain computation is executed at frequencies of five equal logarithm spacings in one decade in the frequency range of  $(10^5-10^{-2})$  Hz. After the computation, we transformed into time domain using FFT and compared forward value with inverted value. The inverted results in case of the simple model, appear to highlight a conductive zone of potential interest within the resistive region. In addition, in case of two quarter spaces model, it was able to reveal the clear resistivity contrast between the two quarters spaces and highlight a conductive zone within the high resistive quarter space. Both of the forward and inverted models have almost the same EM response which can confirm the accuracy of the inverted method. The next step for preparing this algorithm will be using the field data from previous GREATEM surveys to demonstrate this technique

キーワード: 3D EM inversion, GREATEM, Numerical approximations, Airborne Electromagnetic  
Keywords: 3D EM inversion, GREATEM, Numerical approximations, Airborne Electromagnetic

## 移動体用重力探査システムにおけるデータ解析手法に関する研究 An Advanced Method of Data Analysis for Gravity Exploration System on a Mobile Vehicle

小倉 祐美子<sup>1</sup>; 松田 滋夫<sup>2</sup>; 横井 勇<sup>3</sup>; 須田 治夫<sup>3</sup>; 木間 貞治<sup>3</sup>; 盛川 仁<sup>1\*</sup>; 佐伯 昌之<sup>4</sup>; 鈴木 拓也<sup>4</sup>; 駒澤 正夫<sup>5</sup>  
OGURA, Yumiko<sup>1</sup>; MATSUDA, Shigeo<sup>2</sup>; YOKOI, Isamu<sup>3</sup>; SUDA, Haruo<sup>3</sup>; KIMA, Sadaharu<sup>3</sup>; MORIKAWA, Hitoshi<sup>1\*</sup>;  
SAEKI, Masayuki<sup>4</sup>; SUZUKI, Takuya<sup>4</sup>; KOMAZAWA, Masao<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東工大 総理工, <sup>2</sup> クローバーテック株式会社, <sup>3</sup> 株式会社東京測振, <sup>4</sup> 東京理科大学, <sup>5</sup> 応用地質株式会社

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Clover Tech. Inc., <sup>3</sup>Tokyo Sokushin Co.,Ltd., <sup>4</sup>Tokyo University of Science, <sup>5</sup>OYO Corporation

A model of ground structure is very important to estimate earthquake ground motions. Gravity survey is one of exploration methods. We can estimate ground structure by using information of gravity anomaly which comes from heterogeneous density structure of the ground. Generally speaking, there are high correlation between density and velocity structure of the ground. Thus, the gravity survey is comparatively easier than other exploration method to estimate the ground structure, so that it is very suitable for the aspect of the seismic hazard projection.

For gravity survey, spring-type relative gravimeter is usually used. This type of gravimeter can provide accurate data, however, it is very expensive and difficult to handle. Furthermore, it takes much time to obtain adequate data. We, thus, began to develop a simple and inexpensive sensor which can measure gravity anomaly on a moving vehicle, such as air, land, and sea vehicles, that is, airplanes, motor vehicles, and ships. In a case where a gravimeter is used with a moving vehicle, we may survey the gravity over larger area in shorter time than using conventional survey techniques.

Generally, the gravity should be measured with resolution of 10 micro Gal at least for survey to estimate ground structure. However, the signal obtained from sensor is contaminated by various noise such as vibration of a moving vehicle etc. This means that a sensor with high resolution and large dynamic range is required. This is difficult to realize because resolution and dynamic range are conflicting requirement. To solve this problem, we have developed a sensor with a new feedback system, which has high resolution and large dynamic range. The performance of this sensor is examined in this study, and we also propose a technique of data processing based on the combination of second order blind identification (SOBI) and Hilbert Huang transform (HHT) technique. For this two different type of observations are carried out.

First, we set the sensor statically in a tunnel to confirm whether the sensor can respond to the gravitational effects caused by earth tides. From this observation, it is found that the sensor is affected by atmosphere. The effect is can be removed by applying second order blind identification (SOBI).

Second, the ship survey is carried out. Through a technique of data processing based, the observed data provide quite good agreement with theoretical gravity in phase and period of the signal.

Keywords: gravity survey, Hilbert-Huang Transform, Second Order Blind Identification



## 山間部における高分解能 TerraSAR-X の地形補正済み画像を用いた DEM の精度評価 DEM accuracy evaluation in mountain area by utilizing topographic corrected products of high-resolution TerraSAR-X data

野中 崇志<sup>1\*</sup>; 岡島 裕樹<sup>1</sup>; 塚原 弘一<sup>1</sup>  
NONAKA, Takashi<sup>1\*</sup>; OKAJIMA, Yuki<sup>1</sup>; TSUKAHARA, Koichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 株式会社パスコ  
<sup>1</sup> PASCO CORPORATION

近年、商用目的の高解像度合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR) の開発、及びそれに伴い災害時の被災箇所、水稲作付け地、森林等の地図作成をはじめとする様々な分野での利用検討が行われている。衛星データによる地図作成に関して、画像からの地物の判読特性や画像の位置精度が重要となるため、高解像度 SAR データでもこれらに関する基礎的研究が行われている。

TerraSAR-X 衛星群は商用目的の SAR 衛星の 1 つであり、2007 年の 6 月の打ち上げ以降、全世界のデータを順調に取得している。更に 2010 年には併用機の TanDEM-X が打ち上げられ、現在は 2 機で均一で高精度の全世界の陸域の数値標高モデル (Digital Surface Model, DEM) 用のデータを取得している。TerraSAR-X はいくつかの処理レベルがある。他の光学データや GIS と重ね合わせることができることから Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC) は地図投影済み、かつ DEM による地形補正済みの強度データである。一方で、Single Look Slant Range Complex (SSC) はアジマス-スラントレンジ方向に 2 軸を有する地図投影前の複素データであり、インターフェロメトリ、偏波解析等で使用されている。

TerraSAR-X 衛星の幾何精度に関する既往研究では、SSC プロダクトの精度は 1m 以下であることが示されているが、ユーザによく使用されている EEC プロダクトは、実データによる詳細の精度評価結果の報告がなされていない。そこで、著者らはこれまで平坦地において、衛星と同期した反射板を使用した実験により、TerraSAR-X の EEC プロダクトの幾何精度の評価を行ってきた。その結果、SRTM の DEM を使用したとき数 m の精度を満たしていることを示した。またレンジ方向の幾何精度と DEM の精度、及び入射角のモデルを構築し、平坦地でモデルの精度を評価したところ、モデルの精度は 1m 程度であることを明らかにした。

本研究では、本モデルを山間部の TerraSAR-X データに適用し、オルソ化に使用した DEM の精度を評価することを目的とする。使用した 2 つの TerraSAR-X データは、異なる入射角を持ち、撮影モードは高分解能 SpotLight モード (分解能は約 2 m) である。一方、使用する DEM はメッシュサイズが 30m の ASTER、及び 90m の SRTM より生成されたものである。また検証用の参照データとして、一定の精度 (地図情報レベル 2500) を満たす航空写真を使用した。

まず検証点として TerraSAR-X 画像と航空写真画像の両方から確認できる道路の交差点と道路の湾曲部を中心に合計 25 点選択した。そして 25 地点における TerraSAR-X と航空写真の位置較差の平均値、標準偏差、及び RMS (Root Mean Square) 誤差を X 方向、Y 方向、及び X-Y 平面において示した。次に山間部のデータにモデルの適用を検討した。オルソ補正を行うレンジ方向が X 方向とほぼ合致するため、X 方向の較差の標準偏差の要因をオルソ補正における誤差と考えて、DEM の誤差を推定した。最後に平坦地と山間部の結果を基に本研究を総括する。

キーワード: 幾何精度, TerraSAR-X, 地形補正, ASTER, SRTM

Keywords: Geometric accuracy, TerraSAR-X, topographic correction, ASTER, SRTM

## 台風26号による伊豆大島土砂災害の観測 Pi-SAR-L2 observation of the landslide caused by Typhoon Wipha on Izu Oshima island

渡辺 学<sup>1\*</sup>; 段 理紗子<sup>2</sup>; 本岡 毅<sup>1</sup>; 大木 真人<sup>1</sup>; 島田 政信<sup>1</sup>  
WATANABE, Manabu<sup>1\*</sup>; DAN, Risako<sup>2</sup>; MOTOHKA, Takeshi<sup>1</sup>; OHKI, Masato<sup>1</sup>; SHIMADA, Masanobu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> リモートセンシング技術センター  
<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>RESTEC

On October 16, 2013, Typhoon Wipha struck Izu Oshima island, and a large-scale landslide was induced by the heavy rain. Six days after the disaster, Pi-SAR-L2 observation was carried out in four different observation directions (L203201?L203204). One Pi-SAR-L observation (L03801) was carried out before the disaster on August 30, 2000 in same observation direction of L203201. The observation data were used to determine which parameters and directions are preferable to detect landslide areas. Several full polarimetric parameters, including Sigma<sub>0</sub>, polarimetric coherence, four-component parameters, and eigenvalue decomposition parameters were obtained using PolSARPro and a self-produced programs. As pointed out by Shimada et al. [1], the change of the land cover from a forest before the disaster to bare soil after the disaster was well detected by the coherence between HH and VV. In addition to this parameter, the eigenvalues and four-component decomposition parameters have the potential to detect landslide areas. The data from observations of the bottom to the top of the landslide detect the landslide well, whereas the observation of the opposite side are not as useful.

Soil from the landslide intruded into the town areas, but none of the full polarimetric parameters show any significant difference between the landslide-affected town areas and the unaffected areas.

[1] Masanobu Shimada, Manabu Watanabe, Noriyuki Kawano, Masato Ohki, Takeshi Motooka, and Yutaka Wada, Detecting Mountainous Landslides by SAR polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X band SARs, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2014, 12, No.ists29, pp. Pn9-Pn15.

Keywords: Full polarimetry, SAR, disaster

## JERS-1 および ALOS/PALSAR による海岸汀線の時系列評価 Shoreline change analysis using JERS-1/SAR and ALOS/PALSAR amplitude images

朝香 智仁<sup>1\*</sup>; 岩下 圭之<sup>1</sup>; 工藤 勝輝<sup>1</sup>; 青山 定敬<sup>1</sup>; 杉村 俊郎<sup>2</sup>

ASAKA, Tomohito<sup>1\*</sup>; IWASHITA, Keishi<sup>1</sup>; KUDOU, Katsuteru<sup>1</sup>; AOYAMA, Sadayoshi<sup>1</sup>; SUGIMURA, Toshiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 日本大学, <sup>2</sup> リモートセンシング技術センター

<sup>1</sup>Nihon University, <sup>2</sup>Remote Sensing Technology Center of Japan

Aerial photo analysis and bathymetric survey are commonly conducted to investigate the actual conditions and temporal variation in beach transformation. In recent years, satellite-based optical imagery has been more widely used to evaluate coastal erosion. However, defining shoreline edges using optical imagery is difficult because the sand under seawater near the shoreline can often be seen through clear water. On the other hand, synthetic aperture radar (SAR) imagery can be used to interpret the boundary between a sandy beach and seawater; this is possible because the incident radio waves are not transmitted through water, and SAR images can be compared to trace the shoreline. In this work, we examine the potential of shoreline change analysis by using Japanese Earth Resources Satellite 1 (JERS-1)/SAR and Advanced Land Observing Satellite/Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS/PALSAR) amplitude images. We consider Kuji-kurihama beach in Chiba Prefecture as our test site; along this beach, the shoreline is almost perpendicular to the SAR antenna beam orientation for the descending orbit.

We propose a three-step automated shoreline-tracing method to assess the temporal variation of the shoreline in the study area; the HH-polarized JERS-1/SAR amplitude image captured on February 22, 1993, and the HH-polarized ALOS/PALSAR amplitude image captured on May 20, 2010 were used for this purpose. In our method, a shoreline is traced as vector data. In the first step, edge pixels in SAR images are identified by using the Laplacian of a Gaussian filter. In the second step, unwanted edge pixels are masked on the basis of a discriminant analysis in which candidate shoreline edge pixels are estimated by using statistical information within a moving window. The criteria for identifying shoreline edge pixels is decided on the basis of previously gathered data, the backscattering average, and the standard deviation, in the training area (30 by 10 pixels) encompassing the sea, shoreline, and land. In the third step, shoreline vector data are generated from continuous candidate shoreline edge pixels by an automated shoreline-tracing algorithm.

The results were verified in two ways. We first verified the location of the shoreline edge in the SAR amplitude images by overlaying multispectral images acquired on dates close to the acquisition dates of the earlier mentioned JERS-1/SAR data and ALOS/PALSAR data: the JERS-1/Optical Sensor (OPS) color composite image acquired on May 3, 1993, and the ALOS/Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2) color composite image acquired on January 8, 2011, were used for this analysis. Next, we calculated the statistical information of the backscattering data in the JERS-1/SAR and the ALOS/PALSAR amplitude images for our selected training area. It is noteworthy that the backscattering average and standard deviation in the shoreline training area is a unique than anything training area.

Our proposed method reproduces the temporal variation of the shoreline by using JERS-1/SAR and ALOS/PALSAR amplitude images. However, a part of the shoreline extracted using the JERS-1/SAR amplitude image was inaccurate. The speckle noise in the JERS-1/SAR amplitude image and the low spatial resolution of the raw data may have caused these errors. In our future work, we intend to improve the algorithm for JERS-1/SAR data and accumulate backscattering information of shoreline edge areas using SAR amplitude images.

キーワード: 後方散乱係数, 海岸浸食

Keywords: backscattering, beach erosion

## 航空機搭載合成開口レーダー PiSAR2 による立山の氷河観測-序報- Glacier observations by airbourne synthetic aperture radar, PiSAR2, at Tateyama, Japan

古屋 正人<sup>1\*</sup>; 福井 幸太郎<sup>2</sup>; 杉山 慎<sup>3</sup>; 澤柿 教伸<sup>4</sup>

FURUYA, Masato<sup>1\*</sup>; FUKUI, Kotaro<sup>2</sup>; SUGIYAMA, Shin<sup>3</sup>; SAWAGAKI, Takanobu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学研究院, <sup>2</sup>立山カルデラ砂防博物館, <sup>3</sup>北海道大学低温科学研究所, <sup>4</sup>北海道大学環境科学研究院  
<sup>1</sup>Hokkaido University, Graduate School of Science, <sup>2</sup>Tateyama Caldera Sabo Museum, <sup>3</sup>Institute of Low Temperature Science,  
<sup>4</sup>Hokkaido University, Graduate School of Environmental Science

Fukui and Iida (2012) reported that three snowy gorges at Tateyama, Japan, were flowing at a rate of 10-30 cm/month and hence could be identified as glaciers. Fukui and Iida's observations are based on ground-based GPS observations. Because glacier flow velocity data sets are one of the fundamental physical quantities to better understand the dynamics, conventional geodetic techniques have been applied, and the measurement accuracy has significantly improved. However, due to the severe environment and logistic problems, SAR-based velocity mapping has been performed with successful results at large glaciers and ice sheets over the past decades. The velocity mapping technique is so called pixel-offset (or feature) tracking. Thus, applying the same technique to the fore-mentioned newly discovered glaciers, we should also be able to detect the spatial distribution of glacier velocities. However, the presently available satellite-based SAR data set does not have enough spatial resolutions to resolve the velocities. In this regard, the 30-cm resolution of Pi-SAR2 seems promising to perform the pixel-offset tracking. Here we report the first observation images of the Japanese glaciers acquired by Pi-SAR2, and will discuss the preliminary report of velocity mapping.

キーワード: 合成開口レーダー, 氷河, 立山

Keywords: SAR, glacier, Tateyama



## 多周波数 SAR による氷床-棚氷域モニタリング Monitoring of Ice sheet marginal zone using multi-frequency SAR data

山之口 勤<sup>1\*</sup>; 土井 浩一郎<sup>2</sup>; 中村 和樹<sup>3</sup>; 青木 茂<sup>4</sup>

YAMANOKUCHI, Tsutomu<sup>1\*</sup>; DOI, Koichiro<sup>2</sup>; NAKAMURA, Kazuki<sup>3</sup>; AOKI, Shigeru<sup>4</sup>

<sup>1</sup> (一財) リモート/センシング技術センター, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 日本大学, <sup>4</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>1</sup>Remote Sensing Technology Center of Japan, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Nihon University, <sup>4</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Environment of Antarctic continent and ice sheet marginal zone is quite important for understanding the mass balance of ice, formation of deep ocean water and other cryospheric phenomena. Previous study showed the usefulness of SAR data to understand what is happen on the boundary area between ice sheet and ice shelf by SAR data analysis, and achieved the mapping of ice sheet surface velocity mapping. In recent, many kinds of satellite equipped SAR sensor plan to launch and these data are available through the scientific Research Announcement (RA) or Announcement of Opportunity (AO).

Based on these facts, this study focuses on the use of multi-frequency SAR data for ice sheet marginal zone monitoring. Especially, we focus on the use of InSAR analysis for grounding line extraction, ice flow velocity mapping by offset tracking, and understanding the image feature difference through the interpretation of X-, C- and L- band SAR data. We use X-band data by TerraSAR-X, C-band data by ENVISAT and ERS-1/2, and L-band data by ALOS/PALSAR data. Then, we will try to describe the applicability and prospectives of ALOS-2 / PALSAR-2 data

TerraSAR-X data were provided by DLRs' AO project (Proposal No. HYD1808), ERS-1/2 and ENVISAT data were provided by ESA Cat-1 AO project, (project C1P.7657) and ALOS/PALSAR data were provided by Research Announcement by JAXA PI project (PI No. P1418002).

キーワード: 氷床, 多周波数, SAR

Keywords: Ice sheet, multi-frequency, SAR

## ポラリメトリ SAR データによる地表粗度・比透磁率・比誘電率の算定法とその応用 Evaluation of surface roughness, magnetic permeability and dielectric permittivity using polarimetric SAR data

小池 克明<sup>1\*</sup>; 増田 貴之<sup>1</sup>; サエプロ アセプ<sup>2</sup>; 浦井 稔<sup>3</sup>; 大村 誠<sup>4</sup>; 土井 浩一郎<sup>5</sup>

KOIKE, Katsuki<sup>1\*</sup>; MASUDA, Takayuki<sup>1</sup>; SAEPULOH, Asep<sup>2</sup>; URAI, Minoru<sup>3</sup>; OMURA, Makoto<sup>4</sup>; DOI, Koichiro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>2</sup> バンドン工科大学, <sup>3</sup>(独) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, <sup>4</sup> 高知県立大学文化学部, <sup>5</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Eng., Kyoto Univ., <sup>2</sup>Bandung Institute of Technology, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>4</sup>Dept. Cultural Studies, Univ. Kochi, <sup>5</sup>National Institute of Polar Research

合成開口レーダ (SAR) リモートセンシングは全天候型であり、マイクロ波の干渉処理で地殻変動が抽出できるという利点がある。最近では、地表物質の後方散乱強度が偏波ごとに異なるという原理に基づくポラリメトリ SAR も広く応用されている。しかし、ポラリメトリ SAR の用途は画像分類などに限られており、地表物性を評価するまでには至っていない。そこで、本研究では地質の同定や土壌含水率推定の観点から、Saepuloh *et al.* による手法 mdPSAR (magnetic permeability and dielectric permittivity from Polarimetric Synthetic Aperture Radar) を用い、HH・VV・HV の 3 偏波 SAR データから地表粗度、比透磁率、比誘電率を導き出すことを試みた。

mdPSAR では、最初に地表粗度を HV モードの後方散乱係数と地形のフラクタル性を仮定した実験式 (Campbell and Shepard, 1996) から求める。次に、Small Perturbation Model (Fung and Chen, 2010) という後方散乱係数モデルを用い、これと HH と VV の 2 偏波データとが一致するように、非線形最適化法の一つである Nelder-Mead Simplex 法によって比透磁率と比誘電率を算定する。

2008 年 10 月 25 日と 2009 年 4 月 27 日に取得された ALOS PALSAR データを用い、鳥取砂丘周辺に mdPSAR を適用した。その結果、計算モデルと実データとの差は HH, VV モードともに平均で 1% 程度と小さく、シーンにわたる誤差の分布は比較的平坦であった。2 シーンの砂丘部の比誘電率は 13.4, 10.6 と得られ、これらは湿潤砂の値に調和的であるとともに、降雨後のシーンの方が高い値であった。また、砂丘部の比透磁率は周囲に比べて高く、これは磁鉄鉱を含む花崗岩の風化に砂が由来することを考えれば妥当といえる。このように mdPSAR の有効性が確かめられた。ただし、住宅地のような人工構造物の領域での誤差は 10% を超えるところもあり、このような HH モードの強い地表物に対する地表粗度の推定式の改良が必要である。

mdPSAR を南極昭和基地付近の PALSAR データにも適用しており、露岩域と雪氷域の分布、氷の融解状態、クレバス地形の発達などを地表粗度と比誘電率の時間-空間変化によって明らかにすることを目指している。

### 文 献

Campbell, B.A., Shepard, M.K. (1996) Lava flow surface roughness and depolarized radar scattering, *J. Geophys. Res.*, v. 101 (E8), 18941-18951.

Fung, A.K., Chen, K.S. (2010) *Microwave Scattering and Emission Models for Users*, Artech House, Norwood, MA.

Saepuloh, A., Urai, M., Koike, K., Sumantyo, J.T.S.: An advanced technique to identify surface materials on an active volcano by deriving magnetic permeability and dielectric permittivity from polarimetric SAR data, *IEEE Geosci. & Remote Sens. Lett.* (under review)

キーワード: ALOS PALSAR, 偏波モード, 後方散乱係数, 非線形最適化, 鳥取砂丘

Keywords: ALOS PALSAR, polarization mode, backscattering coefficient, nonlinear optimization, Tottori sand dunes

## ALOS/PALSARによる新全球森林・非森林マップ(2007-2010) New Global Forest/Non-Forest Maps from ALOS PALSAR data (2007-2010)

島田 政信<sup>1\*</sup>; 伊藤 拓弥<sup>2</sup>; 渡辺 学<sup>1</sup>; 本岡 毅<sup>1</sup>; ラジェシュ タパ<sup>1</sup>  
SHIMADA, Masanobu<sup>1\*</sup>; ITOH, Takuya<sup>2</sup>; WATANABE, Manabu<sup>1</sup>; MOTOOKA, Takeshi<sup>1</sup>; RAJESH, Thapa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> リモートセンシング技術センター

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>Remote Sensing Technology center of japan

宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)は、陸域観測衛星(Advanced Land Observing Satellite, ALOS)が2007年から2010年にかけて取得した全球PALSARデータを高精度処理して25m分解能の全球PALSARモザイク画像を作成した(1,2,3)。また、それらを用いて全球の森林・非森林マップを試験的に作成した(4)が、今回、PALSARモザイク画像を地域毎・年代毎に詳細に評価し、光学衛星(Google Earth画像)や現地データを参考とした分類を行い、新森林・非森林マップ(検証済み版)を作成した(5)。図1が2010年の森林・非森林マップである。森林・非森林マップは、森林土地利用の時間的な変化を把握し、陸域起源の地球温暖化の要因の特定や、Reducing the Emission from Deforestation and forest Degradation plus (REDD+)活動を推進する上で、非常に重要な基礎情報である。このマップは、3種類の検証データと比較した結果、約90%の精度を持つことが確認されている。

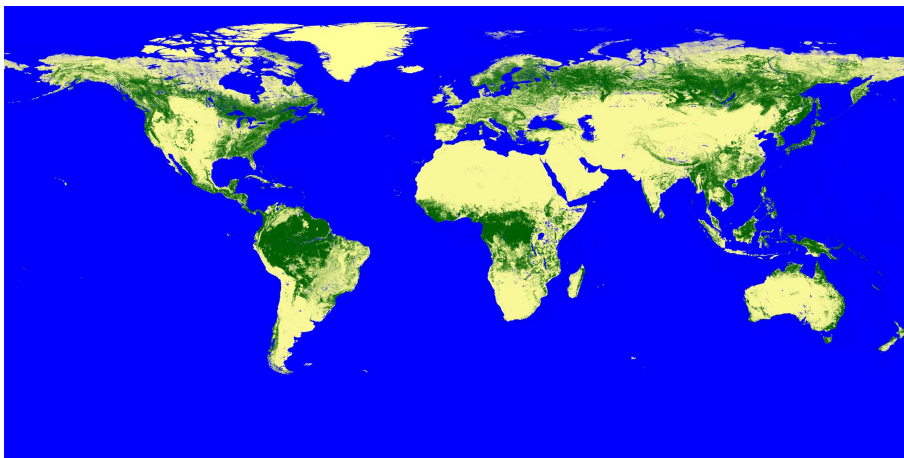
JAXAではL-band SARデータが森林解析に使用されることを期待し、50m分解能のデータ(PALSARモザイクデータ及び森林・非森林データ)公開することとした。上記精度は、無作為抽出での評価であり、森林の定義が国によって異なることを考慮すると更に改善の余地があり、今後時間をかけて精度向上を目指している。

### 参考文献:

- 1) K&Cモザイクホーム: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kc\\_mosaic/jkc\\_mosaic.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kc_mosaic/jkc_mosaic.htm)
- 2) PALSAR10mモザイク: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/guide/jpal\\_10m\\_mosaic\\_dl.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/guide/jpal_10m_mosaic_dl.htm)
- 3) M. Shimada and T. Otaki, "Generating Continent-scale High-quality SAR Mosaic Datasets: Application to PALSAR Data for Global Monitoring," IEEE JSTARS Special Issue on Kyoto and Carbon Initiative, vol. 3, Issue 4, 2010, pp.637-656.
- 4) 全球森林・非森林分類: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/guide/jforestmap\\_oct2010.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/guide/jforestmap_oct2010.htm)
- 5) M. Shimada, T. Itoh, M. Watanabe, T. Motooka, T. Shiraishi, T. Rajesh, and R. Lucas, 2013, New Global Forest/Non-Forest Maps from ALOS PALSAR data (2007-2010), Remote Sensing Environment, in review.

キーワード: 合成開口レーダー, 森林非森林, モザイク

Keywords: SAR, forest/non-forest, SAR mosaic



## 干渉／偏波 合成開口レーダの信号処理における最近の進展 Recent progress in InSAR and PolSAR signal processing

廣瀬 明<sup>1\*</sup>  
HIROSE, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>The University of Tokyo

本招待講演は、合成開口レーダ、特に位相や偏波を扱う合成開口レーダの分野での著者らのグループによるいくつかの新方式に焦点をおきながら、近年の信号処理技術の進展を概観する。これら技術分野は現在、災害把握・減災、水循環、地球温暖化などの重要社会課題の解決が期待され、一層注目を集めている。観測の機能や精度を上げるにあたり、複素ニューラルネットワークなどのレーダ物理に根ざした適応処理の枠組みが有効である。また位相アンラッピングの手法なども紹介・議論する。

キーワード: 合成開口レーダ, 干渉計則, 偏波計測, 複素ニューラルネットワーク, 位相アンラッピング, 位相特異性拡散法  
Keywords: synthetic aperture radar, interferometry, polarimetry, complex-valued neural network, phase unwrapping, Singularity-spreading phase unwrapping



## 2013年10月15日フィリピン・ボホール島の地震に伴う地殻変動 Uplift and reverse fault rupture of the 2013 Bohol earthquake (Mw 7.2), Philippines, revealed by SAR pixel offset analysis

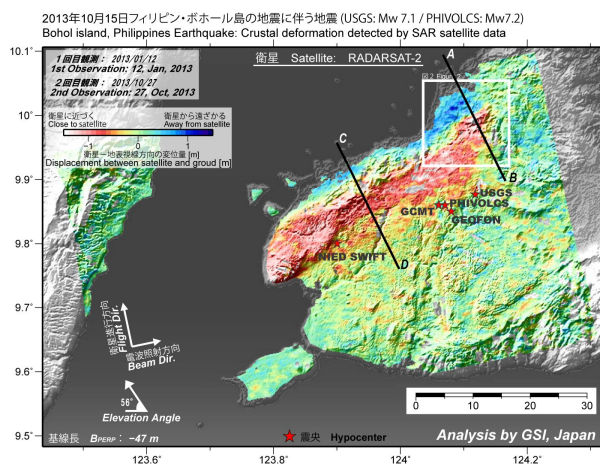
小林 知勝<sup>1</sup>; 飛田 幹男<sup>1\*</sup>  
KOBAYASHI, Tomokazu<sup>1</sup>; TOBITA, Mikio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院  
<sup>1</sup> GSI of Japan

本研究は、衛星 SAR データを用いて 2013 年 10 月 15 日に発生したフィリピン・ボホール地震 (死者 222 名) の地殻変動を検出し、その震源断層メカニズムを推定したものである。ピクセルオフセット法を用いた解析により、最大約 1 m を超える地殻変動が、島の北西部において、東北東-西南西の方向に、長さ約 50km の帯状に観測された。北東部には、長さ約 5km の変位の不連続が見られ、変位の跳びの量は最大約 2 m に達している。この付近では現地調査から地表地震断層が出現していることがわかっており、その結果と調和的である。観測された地殻変動データをもとに構築した矩形断層一様すべりの震源断層モデルから、東北東-西南西方向の走向をもつ長さ約 50km で傾斜角が約 60° の断層による逆断層すべりで観測された変位場はほぼ説明されることがわかった。さらに、散乱強度の変化を利用した解析 (加色混合法) による海岸線変化抽出を試みたところ、震源領域の西側にあたる Loon から Maribojoc にかけて約 10km の海岸線が海側に移動 (離水) したことがわかった。震源断層モデルから、この付近は周囲より大きな隆起 (約 1 m) が予想されており、加色混合法で得られた結果と調和的である。本地震においては、震源領域周辺に地殻変動観測データはなく、このような詳細な地震像は SAR 解析のみにより得られたものであることは特筆すべきことである。

キーワード: ボホール地震, 合成開口レーダー, 地殻変動, 内陸地震, SAR, RADARSAT-2

Keywords: Bohol earthquake, Crustal Deformation, Pixel offset analysis, uplift, SAR, RADARSAT-2



## ALOS/PALSAR 干渉画像の誤差評価 Estimate of error in ALOS/PALSAR interferograms

橋本 学<sup>1\*</sup>  
HASHIMOTO, Manabu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

四国地方は、沖合の南海トラフにおいてフィリピン海プレートが沈み込みを行い、顕著な地殻変動が生じている。GNSSの観測によると、西北西方向の水平変位が卓越し、南から北に向かう変動勾配があることが確かめられている。この変位場は、東西方向の変位に感度が高い人工衛星搭載型 SAR による観測に適している。この観察に基づいて、我々は四国を対象に平均変動速度を ALOS/PALSAR を用いて検出することを試みて来た。観測機会の多い北行軌道の画像を主に解析して来たが、観測時期によっては電離層擾乱による考えられる見かけの変動 (peak-to-peak で最大 4?50cm 程度) が認められるため、これらを目視により除去し、スタッキングを行なった。しかし、四国をほぼカバーする 4 パスの画像の解析結果を重ねると、明らかに東西に大きな変位速度勾配を持つ結果となり、GNSS の観測結果とあわない。また、中国地方でのパス間の不連続が顕著である。このため、依然系統誤差が残っていると考えられる。そこで、系統誤差がどの程度の大きさであり、そしてどのような空間分布を持っているのかを知るために、GNSS の変位と干渉画像の視線距離変化を直接比較し、その誤差評価を行なった。

手順は、次の通りである。

- (1) 特定の ALOS/PALSAR 画像ペアに対して、その撮像領域内に位置する GEONET 観測点を抽出し、マスター・スレーブ撮像期間の変位 3 成分を求め、視線距離変化に変換する。
- (2) 当該の干渉画像から、GEONET 観測点での視線距離変化を抽出する。
- (3) GEONET 観測局毎に GNSS 観測および干渉画像から得られた視線距離変化の差を計算する。
- (4) GEONET 観測局での視線距離変化の差を曲面で近似・内挿する。あわせて、平均・標準偏差や緯度・経度・標高依存性を調べる。
- (5) (4) で得られた近似曲面を観測干渉画像に加える。

例えば、パス 419 の 2010 年 4 月 11 日と 5 月 27 日のペアに GEONET の変位からは、46 日間ということもあり、ほとんど変動が期待されない。しかし、干渉画像には、四国において東西で  $\pm 20\text{cm}$  以上の視線距離変化が認められる。また、中国地方においても顕著な舌状の視線距離短縮領域が見られる。これに対して、この干渉画像に対する手順の (3) および (4) の結果は、GEONET 計算値から干渉画像を引いているので、正負逆転したパターンが得られる。干渉画像中には 36 点の GEONET 観測点があり、これらの観測点における視線距離変化の差の標準偏差を計算すると、7.8cm となる。平均は -1.7cm であるが、GEONET 観測点は ITRF2005、干渉画像はアンラップ時のサンプル点 (画像のほぼ中心) に相対的なものとなるため、平均そのものには意味はない。GEONET 観測点の緯度・経度・標高に対する視線距離変化の差を見ると、北緯  $34^\circ$  を境に緯度・経度に対して 2 つのグループに分けられ、明らかに線形関数では視線距離変化の差を近似することはできない。ここでは、GMT の Surface コマンドを用いて、近似・内挿した。最後に観測干渉画像に内挿した視線距離変化の差を足し合わせることで、補正干渉画像を得る。全体的に黄色くなり、GEONET の変位分布に沿うようになった。ただし、波長 20km 程度の変動は依然残っている。

その他のペアについても同じ手順で解析した。解析したペアについて視線距離変化の差に関して標準偏差を計算した。最も小さい標準偏差は 2009 年 1 月 6 日と 2 月 21 日のペアで 1.2cm、最大は 2010 年 5 月 27 日と 7 月 12 日のペアで 18.9cm である。24 ペア中、2cm 以下は 4 例、2-4cm は 7 例、4-6cm は 6 例、6-8cm は 3 例、8-10cm が 2 例、10cm 以上が 2 例となっている。中央値は 4.5cm となる。隣接するパス 418 (GEONET 観測点 30 点) では、解析した 26 ペアに対して、標準偏差の最小は 1.5cm、最大は 19.8cm、中央値は、4.7cm である。電離層擾乱も含めた PALSAR 干渉画像の持つ誤差評価として、一つの目安となるであろう。

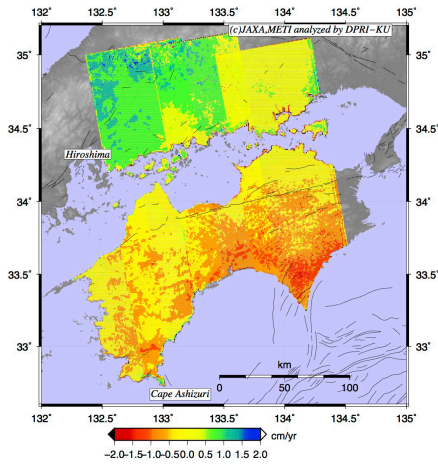
その他のパス (417, 418 および 420) にも同じ手順を適用し、四国全体をカバーする補正干渉画像を作成した (添付図)。概ね GEONET の変位場に整合的な結果が得られた。ただ、東端のパス 417 の補正干渉画像が、中国地方において隣のパス 418 と不連続が生じている。パス 417 では、垂直基線長の長いペアが他のペアより含まれる。垂直基線長が長い場合、山岳部において干渉性が低下することから、GEONET 観測点で視線距離変化が得られないことがある。その場合、平野のデータのみで補正せざるを得ず、系統的な誤差が残る結果となったと考えられる。

キーワード: 合成開口レーダー干渉法, PALSAR, だいち, 誤差, 地殻変動  
Keywords: SAR interferometry, PALSAR, ALOS, error, crustal deformation

STT59-10

会場:414

時間:4月29日 11:35-11:50



## 多偏波 SAR データを用いた PS-InSAR 解析手法の開発 Persistent scatterer SAR interferometry using multi-polarimetric SAR interferograms

石塚 師也<sup>1\*</sup>; 田村 正行<sup>1</sup>; 松岡 俊文<sup>1</sup>  
ISHITSUKA, Kazuya<sup>1\*</sup>; TAMURA, Masayuki<sup>1</sup>; MATSUOKA, Toshifumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Kyoto University

Persistent scatterer SAR interferometry (PS-InSAR) 解析は、複数の SAR データを用いて地表変動を推定する手法であり、これまでも非地震性地殻変動や火山、地盤沈下等の微小地表変動の推定に成果を挙げてきた。通常、PS-InSAR 解析には単偏波で取得された SAR データが用いられるが、近年は ALOS/PALSAR 等、多くの衛星搭載 SAR で多偏波による観測が行われており、今後も多偏波 SAR データの利用可能性は益々高まってくると考えられる。そのため、本研究では多偏波 SAR データを用いた PS-InSAR 解析手法を開発し、従来の単偏波 SAR データのみを用いて行われる解析と比べて、地表変動の推定精度が向上することを示す。

本研究では、複数の偏波で取得された SAR 干渉画像を同時に解析することで、独立に近いデータ数が増えるとみなすことができるため、地表変動推定精度が向上すると考えた。ただし、地表散乱体の誘電特性や形状に応じて各偏波に対する散乱特性が変化するため、SAR 干渉画像は偏波ごとに干渉度の低下に伴う位相ノイズ量が異なると考えられる。そのため、各ピクセルの位相ノイズ量に応じて偏波干渉画像ごとの相対的な重みを決定し、年間地表変動量の推定を行った。

本手法を ALOS/PALSAR の多偏波モードで観測されたデータに適用し、検証を行った。まず、HH-HH の干渉画像と VV-VV の干渉画像の両方を用いて解析を行った結果、HH-HH と VV-VV の干渉画像に対する重みはほぼ同等となった。すなわち、PS を有するピクセルでは HH 偏波と VV 偏波に対する位相ノイズ量はほぼ同じであると言える。一方で、HH-HH と HV-HV の干渉画像の両方を用いて解析を行った場合は、HH-HH の干渉画像の重みの方が大きい結果となった。これは、HH-HH 干渉画像は HV-HV 干渉画像に比べて、より干渉度の低下が少ないためと解釈できる。ただし、HH 偏波のみを用いて解析を行う場合と比べて、HH と HV 偏波両方を用いて解析を行うことで地表変動の推定精度が向上することが示された。

キーワード: PS-InSAR 解析, 地表変動, 偏波

Keywords: persistent scatterer SAR interferometry, surface deformation, polarimetry



## 広域 SAR 干渉解析のための GNSS 補正 Correction by GNSS data for wide area InSAR analysis

森下 遊<sup>1\*</sup>  
MORISHITA, Yu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院  
<sup>1</sup> GSI of Japan

SAR 干渉解析結果には、軌道決定誤差、対流圏遅延、電離層遅延などに起因する様々な誤差が含まれる。軌道決定誤差は系統的な軌道残存縞を生じさせる。対流圏誤差及び電離層誤差は、一般的に空間的波長が長く、局所的な解析結果には大きな影響はないが、広域を対象にした場合には致命的な誤差となり得る。

対流圏誤差については、数値気象モデルからその誤差量を定量的に推定し、低減する手法が開発されているが、数値気象モデルの空間・時間分解能の限界により、常に良好な低減処理結果が得られるわけではない。電離層誤差については、様々な補正手法が研究されているものの、現時点では有効な手法は確立されていない。特に L バンドは電離層誤差の影響を受けやすいことがわかっており、大きな課題となっている。軌道残存縞は、地表変動がないと想定される地域の位相を平坦にするように低減するのが一般的である。また、ある程度の密度の GNSS 連続観測点などにおける変動量データがあれば、それに適合させるようなバイリニア曲面等のパラメータを最小二乗的に推定し、補正することが可能である(飛田ほか, 2005; 福島・Hooper, 2011)。この GNSS 補正により、解析範囲全体に変動があるときでも高精度に軌道残存縞を除去することができる(Kobayashi et al., 2011)。しかし、広範囲を対象とした解析の場合、電離層誤差等の長波長の誤差の影響により、バイリニア曲面等の単純な面的モデルでは良好な補正結果が得られないことが多い。この問題を解決するため、スプライン補間等による補正手法も提唱されている(Fukushima, 2013)。

本発表では、散布データの自然な近傍内挿補間法を使用した GNSS 補正手法について報告する。本手法により、軌道残存縞だけでなく、電離層誤差や対流圏誤差などの長波長の誤差を低減することができる。また、処理手順を工夫することによって、従来のスプライン補間による GNSS 補正の課題であった変動量データの存在しない外挿部分も滑らかに補正することができる。本手法を ALOS/PALSAR データによる広域時系列解析に適用した結果、従来よりも長波長誤差の影響と考えられる位相変化が減少し、GNSS データ間隔よりも波長が短い位相変化を明瞭に検出することができた。

### 参考文献

飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005): 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 37-49.

福島洋, A. Hooper (2011): PS 干渉解析による 2004 年新潟県中越地震後の地殻変動, 測地学会誌, 57, 195-214.

Kobayashi, T., M. Tobita, T. Nishimura, A. Suzuki, Y. Noguchi and M. Yamanaka (2011): Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET data, Earth Planets Space, 63, 621-625, 2011.

Fukushima, Y. (2013): Correction of DInSAR noise using GNSS measurements, in proceedings of APSAR 2013, 2013.

キーワード: 干渉 SAR, GNSS  
Keywords: InSAR, GNSS

## 干渉 SAR の電離層補正に向けた、GPS-TEC による日本周辺の電離層擾乱の特性把握 Research on the characteristics of ionospheric disturbance around Japan by GPS-TEC for ionospheric correction to InSAR

中川 弘之<sup>1\*</sup>; 宗包 浩志<sup>1</sup>; 黒石 裕樹<sup>1</sup>; 神原 雅史<sup>2</sup>  
NAKAGAWA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; MUNEKANE, Hiroshi<sup>1</sup>; KUROISHI, Yuki<sup>1</sup>; KAMIHARA, Masashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院, <sup>2</sup> 株式会社 パスカリア  
<sup>1</sup>GSI of Japan, <sup>2</sup>Pascalina Co.,Ltd

干渉合成開口レーダー (干渉 SAR) では、電離層擾乱に伴う電波の遅延誤差により正確な地盤変動情報が抽出できない場合があることが問題となっている。国土地理院では 2013 年度より、GEONET の 2 周波観測データから得られる電離層電子密度 (TEC) に関する情報に基づいて、干渉 SAR に対して電離層補正を行う手法の研究を実施している。

初年度の 2013 年度は、日本とその周辺域における電離層擾乱現象の特性を把握するため、2000 年から 2011 年までの 12 年間を対象に、網羅的な調査を行い、電離層擾乱現象を特定し、特性把握をおこなった。また、特定された電離層擾乱の発生時のうちで、対応する ALOS PALSAR の干渉ペアがあるものについて電離層位相遅延差の推定画像を試作し、これを実際の SAR 干渉画像と比較を行った。本発表ではこのうち、前段の電離層擾乱の特性把握の結果について報告する。

まず、対象期間の GEONET の 30 秒データから、宗包 (2013) の手法により観測点毎に 30 秒間隔で、天頂方向の TEC、TEC の傾斜の北南成分および東西成分からなるモデルを推定した。その際、定数 3600 秒のハイパスフィルタをかけて低周波成分を除去した。

この GPS-TEC のデータを元に、対象期間に発生した電離層擾乱現象を同定し特性を分析した。その際に、個々の擾乱について詳細に検討して現象の同定や特性値の精度を高めるよりも、TEC の RMS などの指標をできるだけ活用して電離層擾乱現象の傾向を把握することを優先した。

手順は以下の通りである。まず、観測点毎の天頂方向の TEC の 1 時間の RMS が閾値以上となる電子基準点の数が一定数を超過している場合に電離層擾乱現象が発生していると見なし、その日時を抽出した。次に、それぞれの日時について (独) 情報通信研究機構の Web サイトに掲載されている「GEONET GPS 全電子数マップ」を目視し、マップのパターンに応じて、その時に発生している擾乱現象を、「伝播性電離層擾乱 (TID)」「プラズマバブル」「その他」に分類した。

その後、「TID」と「プラズマバブル」に分類された擾乱現象それぞれについて、開始時間と終了時間、現象の影響範囲とその時間推移等の特性を、観測点毎に計算した 10 分間の TEC の RMS に基づいて決定した。加えて、TID の波長やプラズマバブルの北端緯度など、現象の種類毎の特性値も推定した。これらを統計的にとりまとめることにより、対象期間における日本周辺の電離層擾乱現象の特性を明らかにした。

この調査の結果、対象期間中に 8,815 件の電離層擾乱現象を同定した。年次毎の件数は 2001 年の 967 件をピークにその後徐々に減少し、2007 年に 471 件と最小になり、その後再び増加傾向がみられた。この傾向は太陽活動周期と整合している。また、プラズマバブル、TID とともに太陽活動が活発な時に多く不活発な時に少ない傾向がみられた。

TID については、5 月~8 月の夏季に発生頻度が多い傾向がはっきりと見られた。また、ローカルタイムの 22 時を中心として前後 2 時間の間に集中して発生していることも明らかになった。プラズマバブルについては、ローカルタイムの日没後、夜半にかけて発生頻度が高かった。これらは先行研究の結果と整合的である。

### 参考文献

宗包浩志 (2013): GEONET データを用いた「だいち」 SAR 干渉画像の電離層補正手法の開発 (序報), STT57-09, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会

(独) 情報通信研究機構: GEONET GPS 全電子数マップ, <http://seg-web.nict.go.jp/GPS/GEONET/>

キーワード: 干渉 SAR, 電離層擾乱, TEC, GEONET

Keywords: InSAR, ionospheric disturbance, TEC, GEONET

## ALOS PALSAR を用いた時系列解析のダム外部変形計測への適用 APPLICATION OF DINSAR TIME SERIES ANALYSIS USING ALOS PALSAR TO EXTERIOR DEFORMATION MONITORING OF DAMS

本田 謙一<sup>1\*</sup>; 虫明 成生<sup>1</sup>; 佐藤 渉<sup>1</sup>; 佐藤 弘行<sup>2</sup>; 小堀 俊秀<sup>2</sup>; 佐々木 隆<sup>3</sup>; 山口 嘉一<sup>4</sup>; 清水 則一<sup>5</sup>  
HONDA, Kenichi<sup>1\*</sup>; MUSHIAKE, Naruo<sup>1</sup>; SATOH, Wataru<sup>1</sup>; SATOH, Hiroyuki<sup>2</sup>; KOBORI, Toshihide<sup>2</sup>; SASAKI, Takashi<sup>3</sup>  
; YAMAGUCHI, Yoshikazu<sup>4</sup>; SHIMIZU, Norikazu<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 国際航業株式会社, <sup>2</sup> 土木研究所, <sup>3</sup> 国土技術政策総合研究所, <sup>4</sup> ダム技術センター, <sup>5</sup> 山口大学

<sup>1</sup>Kokusai Kogyo Co., Ltd., <sup>2</sup>Public Works Research Institute, <sup>3</sup>National Institute for Land and Infrastructure Management, <sup>4</sup>Japan Dam Engineering Center, <sup>5</sup>Yamaguchi University

近年、ダム等大規模構造物の老朽化と安全管理が大きな課題となっている。日本国内にあるダムのうち 2020 年には 58%が建造から 50 年を超えるなどダムの老朽化も進んでおり、安全管理のための効率的な変位計測技術が求められている。また、地震などの災害時に構造物の被災状況を早期に把握するため、安全で迅速な変位計測技術が必要とされている。Differential Interferometric SAR (DInSAR) は広域の複数の構造物を一度に観測できることから、大規模構造物の安全管理に非常に有益である。

そこで本研究では、沖縄県の大保協ダムを対象として DInSAR のダムの外部変形計測への適用性を検討した。大保協ダムは 2006 年 12 月の完成と同時に GPS で外部変形計測を行っており、2010 年 12 月までに 114mm の変形が観測されている。そこで、同時期に観測している ALOS PALSAR の Ascending14 シーンと Descending14 シーンを用い、各軌道で DInSAR の時系列解析を行った。

GPS により計測された変位と比較した結果、最も変形の大きな点において、DInSAR の変位は GPS の変位の 70% から 80%の値が得られた。RMSE は約 1cm であり、解像度 10m の ALOS PALSAR データでも、数センチ程度の変位ならば DInSAR で計測できることが確認できた。また、時系列での変位の傾向もよく捉えており、DInSAR によるダムなどの大規模構造物の外部変形計測への利用可能性が示唆される。

キーワード: ダム, 外部変形計測, DInSAR, SBAS, GPS

Keywords: Dam, Exterior deformation monitoring, DInSAR, SBAS, GPS

## 国内の主要な活火山における干渉 SAR 時系列解析 Approach for monitoring ground deformation around the active volcanoes in Japan by InSAR time series analysis

三浦 優司<sup>1\*</sup>; 安藤 忍<sup>2</sup>; 中村 政道<sup>1</sup>  
MIURA, Yuji<sup>1\*</sup>; ANDO, Shinobu<sup>2</sup>; NAKAMURA, Masamichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁火山課, <sup>2</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Volcanological Division, JMA, <sup>2</sup> MRI

気象庁および気象研究所では、2007年から北方領土を含む日本全国の活火山周辺を対象に二時期の差分干渉 SAR 解析による火山活動に伴う地殻変動の検出を試み、火山噴火予知連絡会および各種学会などで報告を行ってきた。

近年、多量の SAR データを使用することにより、干渉性の低下、DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減する、干渉 SAR 時系列解析という手法が開発され、地殻変動の検出に多用されるようになってきている。今回、国内の主な活火山を対象に、ALOS 運用中に蓄積された複数の PALSAR データを用いて本手法を適用し、火山活動に伴う地殻変動の検出を試みた。

これまでに行った解析の結果、十勝岳、吾妻山、伊豆大島、三宅島、薩摩硫黄島等で GPS でも捉えられている火山活動に伴うと考えられる衛星視線方向の地殻変動が検出されたので、これらの詳細について報告する。

キーワード: 干渉 SAR 時系列解析, 地殻変動, ALOS/PALSAR, 活火山

Keywords: InSAR time series analysis, ground deformation, ALOS/PALSAR, active volcano



## PS-InSAR 解析を用いた八丁原地熱開発地域周辺の地表変動の解析 Surface displacement around Hachobaru geothermal field inferred from persistent scatterer SAR interferometry

石塚 師也<sup>1\*</sup>; 辻 健<sup>2</sup>; 松岡 俊文<sup>1</sup>; 藤光 康宏<sup>3</sup>; 西島 潤<sup>3</sup>  
ISHITSUKA, Kazuya<sup>1\*</sup>; TSUJI, Takeshi<sup>2</sup>; MATSUOKA, Toshifumi<sup>1</sup>; FUJIMITSU, Yasuhiro<sup>3</sup>; NISHIJIMA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院 工学研究科, <sup>2</sup> 九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所, <sup>3</sup> 九州大学大学院 工学研究院

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>2</sup>International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER), Kyushu University, <sup>3</sup>Faculty of Engineering, Kyushu University

地熱開発地域では、地下熱流体の流れに伴い、地表変動が発生することが知られている。これまでも水準測量や GPS 等の測地学的手法により、地熱開発地域の地表変動が推定されており、モニタリング技術としての有効性が示されてきた。近年では、persistent scatterer SAR interferometry (PS-InSAR) 解析により、従来よりも空間的に高密度に地表変動を推定することが可能になり、地熱開発のモニタリング技術としての有効性が示されつつある。本研究では、日本最大の地熱開発地域である八丁原地熱開発地域及び九重連山を含む周辺の地域に PS-InSAR 解析を適用し、地表変動量の推定と変動の特徴の考察を行った。解析には、2007 年 7 月から 2010 年 12 月間に ALOS/PALSAR によって取得された 18 シーンを用いた。

解析の結果、SAR データ取得期間において、地熱開発地域周辺では、年間約 15mm の衛星から遠ざかる向きの変動が起こっていることが推定された。また、この継続的な変動に加え、時間的に不規則な隆起や沈下も発生していると分かった。この不規則性の隆起や沈下は九重連山全体で発生していることから、九重連山の地表変動が地熱地域の地表変動に関係していると推測される。また、この継続的な変動は時間と共に徐々に減衰する傾向を示しており、今後も変動量は減衰すると推測される。さらに、変動域には明瞭な境界が見られており、変動域は断層によって定まっている可能性が示された。

キーワード: 地表変動, PS-InSAR 解析, 八丁原地熱地域

Keywords: surface displacement, persistent scatterer SAR interferometry, Hachobaru geothermal area

## 干渉SARによる東海地域の定常的な地殻変動解析 The Steady Crustal Deformation Analysis in Tokai region by InSAR

安藤 忍<sup>1\*</sup>; 岩切 一宏<sup>2</sup>; 青木 元<sup>2</sup>  
ANDO, Shinobu<sup>1\*</sup>; IWAKIRI, Kazuhiro<sup>2</sup>; AOKI, Gen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>MRI, <sup>2</sup>JMA

地表面の状態把握に優れたLバンド波長帯を有するALOS/PALSARは、干渉性が高く面的な地殻変動観測に有効である。

気象研究所では、静岡県掛川市から御前崎市周辺のALOS/PALSARデータを解析し、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う定常的な地殻変動の検出を試みた。変動の定常成分(時系列)を得るため、ここでは、撮像日間隔の異なる多数の画像ペアに対して干渉処理を行い、各干渉画像における衛星視線方向の変動量から、46日毎(衛星回帰日数)の平均変動量を計算した(スタッキング処理)。なお、明らかにノイズが重畳していると思われる干渉画像を除いてスタッキング処理を行った。スタッキング処理により、電離層等に起因したノイズの影響が低減され、変動検出精度の向上が期待できる。

解析したデータは、2007年1月~2010年10月の北行軌道(パス409, フレーム680)の23シーン, 2006年10月~2010年9月の南行軌道(パス60, フレーム2920)の19シーンである。垂直軌道間距離が約1km以下の北行軌道101ペア及び南行軌道79ペアについて干渉処理を行った。得られた干渉画像に対して電子基準点「掛川」を無変動地点としてアンラップ処理を行い、これに気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)による大気遅延補正を施して、全てのペアの衛星視線方向の変動量を求めた。各ペアの期間内で変動は一定と仮定した上で、46日毎の衛星視線方向の平均変動量を計算した。ペアによって撮像日の間隔が異なるため、平均処理に用いるサンプル数が異なるが、重み付けは行わなかった。

その結果、北行軌道の解析では、定常的な変動がほとんど見られなかった。一方この地域の変動への感度が高い南行軌道の解析では、御前崎付近を中心に衛星から遠ざかる定常的な変動が見られ、GNSSによる変動ベクトルと調和的な結果が得られた。

本解析で用いたPALSARデータの一部は、国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験(地震WG)に基づいて観測・提供されたものである。また、一部はPIXELで共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。PALSARに関する原初データの所有権は経済産業省及びJAXAにある。なお解析には、宇宙航空研究開発機構の島田政信氏により開発されたSIGMA-SARを使用させていただいた。なお、干渉画像の処理過程においては、国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)を使用し、結果の描画についてはGMTを用いた。ここに記してお礼申し上げます。

キーワード: SAR 干渉解析, 地殻変動, ALOS/PALSAR, 東海地域

Keywords: InSAR, Ground deformation, ALOS/PALSAR, Tokai region

## X-band SAR 衛星・Cosmo-SkyMed を利用した桜島のモニタリング Monitoring of Sakurajima Volcano using Cosmo-SkyMed

宮城 洋介<sup>1\*</sup>; 小澤 拓<sup>1</sup>; 島田 政信<sup>2</sup>  
MIYAGI, Yosuke<sup>1\*</sup>; OZAWA, Taku<sup>1</sup>; SHIMADA, Masanobu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

九州南部、鹿児島県に位置する桜島は、現在日本で最も活発な火山である。2006 年 6 月に昭和火口から再開した噴火活動は、2009 年以降、より活発になり、現在でもたびたび爆発的噴火を起こしている。また 2012 年 7 月 24 日には、南岳山頂火口でおよそ 1 年半ぶりに噴火が起こった。桜島における現在の噴火活動を理解し、今後の噴火活動を予測するためにも、定期的なモニタリングを行う必要がある。活動中の火山における現地観測は危険を伴うため、一般には困難であるが、人工衛星搭載のセンサを利用したリモートセンシング観測であれば、活動中の火山であっても定期的に、しかも広域を一度に観測することができる。とりわけ能動型のマイクロ波センサである合成開口レーダ (SAR) は、昼夜を問わず観測が可能で、雲や噴煙を透過し地上を観測することができる。このため、噴火活動中でも火口のモニタリングが可能であり、またその位相情報を利用した差分干渉解析 (DInSAR 解析) により面的な地殻変動の検出も可能となる。本発表では、イタリアの X-band SAR 衛星・COSMO-SkyMed (以下 CSK) によるデータを利用し、桜島南岳の火口の変化を検出した。また、DInSAR 解析も試みた。

キーワード: 合成開口レーダ, 桜島, 地殻変動  
Keywords: SAR, Sakurajima, Deformation

## TerraSAR-X (TanDEM-X)/DInSAR によって検出された霧島山・新燃岳の地殻変動 Volume Increase of Lava within the Kirishima, Shinmoe-dake Crater, Detected by TerraSAR-X/DInSAR

宮城 洋介<sup>1\*</sup>; 小澤 拓<sup>1</sup>; 小園 誠史<sup>2</sup>; 島田 政信<sup>3</sup>  
MIYAGI, Yosuke<sup>1\*</sup>; OZAWA, Taku<sup>1</sup>; KOZONO, Tomofumi<sup>2</sup>; SHIMADA, Masanobu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構  
<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

九州南部、鹿児島県と宮崎県の県境に位置する霧島山新燃岳は、2011 年 1 月に噴火活動を開始し、同年 9 月以来目立った噴火活動を起こしていない。噴火後の GPS 及び DInSAR 観測の結果、2011 年噴火に関係した主マグマ溜り（深さ 7.5-10km）への噴火後再充填に伴うと思われる広域の地殻変動が検出されたが、この地殻変動も同年 11 月頃から鈍化を始め、その後顕著な膨張は見られていない。しかし、ドイツの X バンド SAR 衛星・TerraSAR-X 及び TanDEM-X によるモニタリングを継続した結果、噴火活動及び広域の地殻変動が見られなくなった 2011 年 11 月以降、火口内溶岩表面がわずかずつではあるが隆起をしていることが明らかになった。異なる波長を持ち異なる軌道から観測したカナダの C バンド SAR 衛星・RADARSAT-2 のデータを用いた解析でもほぼ同様の結果が得られている。

検出された火口内溶岩表面の隆起は、すなわち火口内溶岩の継続的な体積増加を示していると考えられ、これは 2014 年 1 月現在継続中である。しかし隆起レート（体積増加レート）は徐々に低下し、2011 年 11 月には約 10cm/month であったが、2012 年 10 月以降 3-4cm/month 程度になった（図 1）。また 2013 年 6 月下旬、この火口内溶岩表面の隆起が停止したように見られたが、2013 年 7 月には隆起が再開した。観測された隆起量から計算されたこの間（2011 年 11 月～2014 年 1 月）の火口内溶岩の総体積増加量は、およそ  $8 \times 10^4 \text{m}^3$  と見積もられる。

TerraSAR-X（及び TanDEM-X）の 11 日間隔、もしくは RADARSAT-2 の 24 日間隔の SAR データペアを使った DInSAR 解析では、火口外側に顕著な地殻変動は検出されなかった。しかし、データペアの観測間隔を十分に長くとした DInSAR 解析の結果と、PSInSAR 解析の結果、それぞれ火口北側山腹に衛星-地面間の距離が遠ざかる地殻変動、すなわち沈降を含む地殻変動が検出された。これは火口地下浅部にある変動源（浅部ソース）の収縮によるものと考えられる。この浅部ソースとして Sill タイプのポイントソース [Okada, 1985] を仮定すると、最適解は火口地下約 700m に推定され、体積減少はゆらぎを伴いつつも継続している。これらのことから、火口内溶岩の体積増加は、火口地下浅部にあるソースから溶岩が徐々に流出していることが原因であると考えられる。

その主な駆動力は、2011 年噴火時に大量のマグマが供給されたことによる浅部ソース内の過剰圧であると考えられ、その後平衡状態へ移行する期間の溶岩の流出を見ているものと考えられる。また、仮にこの系が、浅部ソースと火口内溶岩の間だけで閉じているとすると、体積増加レートは減少し続けて 0 になり、火口外側の収縮の地殻変動も止まるはずだが、体積増加レートは 2013 年 8 月以降バラつきながらも  $50 \text{m}^3/\text{day}$  程度に落ち着いている。これはこの系が閉じていないことを示しており、深部ソースから浅部ソースへのマグマの供給が、微量ではあるが継続して行われていたと考えることができる。このマグマの供給が、浅部ソースから火口内へ溶岩を押し出す駆動力の一つとなっている可能性も考えられる。

TerraSAR-X 及び TanDEM-X によるモニタリングは今後も継続して行われる予定であり、本発表時点での最新のデータを用いた解析結果についても紹介する。

キーワード: 合成開口レーダ, 霧島山, 新燃岳, 地殻変動  
Keywords: SAR, Kirishima, Shinmoe-dake, Deformation



## PS-InSAR 法による伊豆大島の地殻変動の検出と火山性変動源の推定 Crustal deformation in Izu-Oshima Island detected by PS-InSAR analysis and estimation of volcanic deformation source

長谷川 雄一<sup>1\*</sup>; 田部井 隆雄<sup>2</sup>; 小澤 拓<sup>3</sup>  
HASEGAWA, Yuichi<sup>1\*</sup>; Tabei, Takao<sup>2</sup>; OZAWA, Taku<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高知大学大学院総合人間自然科学研究科, <sup>2</sup> 高知大学理学部, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Grad. School Int. Arts Sciences, Kochi Univ., <sup>2</sup>Fac. Science, Kochi Univ., <sup>3</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

伊豆大島の三原山では、過去 800 年間に合計 21 回噴火を繰り返している。最後の噴火は 1986 年に山頂カルデラ内部で発生している。定常的な火山活動を監視するために、時空間的に密な観測を行うのは重要である。しかし、山岳域に観測網を構築するのは容易ではない。本研究では、恒久散乱体干渉 SAR (PS-InSAR) 法による干渉時系列解析を行い、伊豆大島全体の変形を検出する。その結果をもとに地下にどのような変動源が存在しているかを推定する。解析には、2006 年 6 月～2011 年 2 月までに北行および南行軌道から撮影された ALOS/PALSAR 画像 40 枚を使用した。

北行軌道画像解析から 2007 年 10 月～2011 年 2 月の期間にカルデラ内部において衛星視線方向 (LOS) に距離が最大約 15cm 伸長するパターンが、南行軌道画像解析から 2007 年 1 月～2010 年 3 月の期間に同様の領域において距離が最大約 14cm 伸長するパターンが認められた。次に、島内 4ヶ所の GEONET 観測点における座標時系列を LOS 変位に変換し、干渉時系列解析結果と比較した。その結果、両者の差の RMS は 1.3～3.2cm の範囲に収まっており、干渉時系列解析結果は有意と判断される。また、GPS 時系列を基準として解析過程で取り除けなかった衛星軌道決定のずれに起因する系統的な誤差を軽減した。

両軌道画像解析から得た LOS 変位量を組み合わせ準上下成分と準東西成分に分解し、2007 年 9 月時点を基準とした累積変位量を求めた。その結果、カルデラ内部に 2007 年～2010 年までに沈降と隆起を繰り返し最終的に最大約 16cm となる沈降域が、島の東側沿岸部に同期間において最大約 11cm となる隆起域が得られた。準上下成分の結果を用いて、伊豆大島の変形を説明する圧力源モデルの推定を行った。島内全体の変形が等方的ではないため、水平位置と深さの異なる球状圧力源 (Mogi, 1958) を浅部と深部に 2つ設定した。両者の圧力源の水平位置と深さはグリッドサーチ法によって推定した。その結果、体積が増減を繰り返す圧力源がカルデラ内部西側の深さ 3.0～4.5km に、体積増加量が年間約 800 万 m<sup>3</sup> とほぼ一定の圧力源が三原山火口から北東方向に約 1km 離れた位置の深さ 6.0～9.0 km に求まった。また、準上下成分の結果と求めた体積変化量から算出される鉛直成分の残差より、カルデラ内部において両者の残差が大きくなっていることが判明した。したがって、深部のマグマ溜まりはマントルからのマグマの供給により膨張を続け、浅部のマグマ溜まりはカルデラ内部に広がる溶岩の荷重と深部マグマ溜まりからのマグマの供給によって収縮と膨張を繰り返していると考えられる。

キーワード: PS-InSAR 法, 時系列解析, 伊豆大島, 地殻変動, 火山性変動源

Keywords: PS-InSAR method, time-series analysis, Izu-Oshima Island, crustal deformation, volcanic deformation source

## 差分干渉合成レーダーによる南極宗谷海岸南部の氷流速度測定 Flow velocity measurements of ice streams in the southern part of Soya Coast, Antarctica, by DInSAR

白水 薫<sup>1\*</sup>; 土井 浩一郎<sup>2</sup>; 青山 雄一<sup>2</sup>  
SHIRAMIZU, Kaoru<sup>1\*</sup>; DOI, Koichiro<sup>2</sup>; AOYAMA, Yuichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 総合研究大学院大学, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>The Graduate University for Advanced Studies, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

差分干渉合成開口レーダーは南極大陸上の氷流の流速を測定するための有効な方法の一つである。本研究では、日本の衛星 ALOS/PALSAR で観測された L バンド (波長 23.6cm) SAR データに差分干渉合成開口レーダー手法 (Differential Interferometric SAR : DInSAR) を適用し、東南極宗谷海岸南部スカーレン周辺の氷流速度の測定を試みた。使用データは、2007 年 11 月 23 日から 2010 年 1 月 13 日の間に観測された 9 シーン (Path633, Row571-572) であり、地形縞除去のためにはデジタル地形モデル ASTER GDEM を用いた。

解析の結果、視線方向の流動速度は、最大で 3.5cm/day の速さであった。通常、露岩域においては変動が無いと考えられるが、得られた変動画像では、露岩において最大 37cm の変動が検出されており、見かけの変動と考えられ、解析における誤差を含むと考えられる。このことから、露岩上に表われる見かけの変動を氷流流速測定の誤差の見積りに用いることが出来ると考えられる。

本講演では、氷流の流速測定結果を示すとともに、流速測定に含まれる誤差評価について議論を行う。

キーワード: 差分干渉 SAR, 南極氷床, 氷流

Keywords: Differential Interferometric SAR, Antarctic ice sheet, ice stream

## 差分干渉合成開口レーダーによる北極域氷床の流動測定 Flow measurements of ice sheets in Arctic region by differential SAR interferometry

土井 浩一郎<sup>1\*</sup>; 山之口 勤<sup>3</sup>; 中村 和樹<sup>4</sup>; 白水 薫<sup>2</sup>  
DOI, Koichiro<sup>1\*</sup>; YAMANOKUCHI, Tsutomu<sup>3</sup>; NAKAMURA, Kazuki<sup>4</sup>; SHIRAMIZU, Kaoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 総合研究大学院大学, <sup>3</sup> リモートセンシング技術センター, <sup>4</sup> 日本大学工学部  
<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), <sup>3</sup>RESTEC, <sup>4</sup>Nihon University

2000 年代には入り、グリーンランドやカナダ北極群島の氷床質量が急速に減少していることが衛星重力ミッション GRACE の観測から明らかになってきた (Svendsen et al. 2012, Gardner et al. 2011)。その一因として、氷床や氷流の流動速度が加速し、氷の海洋への流出量の増加が考えられる。

本研究では、衛星合成開口レーダー (SAR) データに ASTER GDEM を利用した差分干渉 SAR 手法を適用し、北極域の氷床や氷流の流動速度を求め、流動速度の時間的な変化の有無を調べることを目的としている。

そこで、我々は、グリーンランド北西部およびカナダ北極群島エルズミア島の 3 地域を観測した ALOS/PALSAR データに差分干渉 SAR 手法を適用し、氷床や氷流の SAR の視線方向の 46 日間の変位量を求めた。講演では、これらの結果を示すとともに、3 パスまたは 4 パス干渉 SAR 手法を適用し、その変動についても議論する予定である。

キーワード: 差分干渉 SAR, 流動, 氷床, 北極域

Keywords: Differential SAR interferometry, flow, ice sheet, Arctic region

## 中央アジア, キルギス・アラトー山脈における岩石氷河の空間分布と分類 Spatial distribution and classification of rock glaciers in Kyrgyz Ala-Too Range, Central Asia

山村 祥子<sup>1\*</sup>; 奈良間 千之<sup>1</sup>; 富山 信弘<sup>2</sup>; 田殿 武雄<sup>3</sup>

YAMAMURA, Akiko<sup>1\*</sup>; NARAMA, Chiyo<sup>1</sup>; TOMIYAMA, Nobuhiro<sup>2</sup>; TADONO, Takeo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 新潟大学自然科学系, <sup>2</sup> 財団法人リモート・センシング技術センター, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>RESTEC, <sup>3</sup>JAXA

乾燥・半乾燥地域である中央アジアの水資源を見積もる上で、山岳氷河と山岳永久凍土の現状把握の必要性が述べられているが (Sorg et al., 2012), 山岳氷河の分布とその変動が調査されている一方、山岳永久凍土の調査報告は一部地域を除いて報告されていない (Marchenko et al., 2007). さらに、近年では、天山山脈のアク・シイラック山脈において山岳永久凍土の融解に起因する地すべりが生じるなど、災害の側面も含め山岳環境にも大きな影響を与えつつある。スイス・アルプスでは、岩石氷河が山岳永久凍土環境の存在指標として指摘されて (Haerberli, 1985), 岩石氷河を用いた山岳永久凍土の空間分布の解明、岩石氷河の流動速度や表面形態の経年変化から山岳地域の温暖化の影響が指摘されるなど、山岳永久凍土環境の研究が活発におこなわれている (Kaab et al., 2006; Roer et al., 2005). そこで本研究では、山岳永久凍土の存在指標である岩石氷河を用いて、未だ明らかでない天山山脈の山岳永久凍土の空間分布やその現状を明らかにするため、キルギス・アラトー山脈中央部の岩石氷河の空間分布と形態分類をおこなった。さらに、これら形態的特徴から分類した岩石氷河に差分干渉 SAR を適用し、ALOS PALSAR データを用いて、岩石氷河の流動から分類結果を検証した。

空中写真判読・ALOS 衛星データ・GoogleEarth を用いて、デブリ地形のポリゴン・ポリラインデータを ArcGIS 上で作成し、それを基にデブリ地形から岩石氷河を認定、さらに、現地調査と ALOS AVNIR-2 による NDVI の植生指標により現成型と停滞～化石型を分類した。その空間分布をみると、現成型岩石氷河の分布の多くは、山脈の北斜面に集中している。さらに現成型岩石氷河を背後の氷河と氷河地形の有無から氷河起源と崖錐起源に分類した。現成型と認定した岩石氷河のうち、氷河起源の岩石氷河が数多く確認された。

周氷河帯とその上位に分布する不連続山岳永久凍土帯を現成の岩石氷河の分布高度と気象観測所のデータから推定した結果、現在の不連続山岳永久凍土帯は北側では 3300m 以上、南側では 3500m 以上であることがわかった。現地の気象観測所の標高と気温をもとに気温の逡減率から推定される本研究の山岳永久凍土帯下限高度における年平均気温は、年平均気温 -2℃～-4℃という世界各地の山岳永久凍土帯下限高度の気温条件 (藤井, 1980) に調和的である。調査地域においては、背後に末端がデブリで覆われた小規模な山岳氷河を持ち、氷河末端部からそのまま岩石氷河に移行している氷河起源の岩石氷河が多く確認された。この結果は、崖錐起源が多くを占めるスイス・アルプスと大きく異なる。これほど多くの氷河起源タイプの岩石氷河が存在する理由として、この山脈に分布する氷河の末端部は岩屑に覆われており、この不明瞭な末端部は、永久凍土帯の下限高度よりも上方に位置し、氷河後退の過程で形成されたデブリで覆われた埋没氷が永久凍土化して流動し岩石氷河の形態に移行したと考えられる。これら認定した岩石氷河の流動解析には、2007年、2009年、2010年の ALOS PALSAR データを使用した。上述の形態による分類から、山脈北側斜面のほうが認定した現成型岩石氷河が広く分布するが、北斜面よりも山脈南斜面で流動する岩石氷河を多く確認した。崖錐起源の岩石氷河の流動は世界的にも数多く報告されているが、本研究地域においては氷河起源と認定した岩石氷河の明瞭な変動を確認できた。今後は、さらに観測期間の短いデータを用いて詳細な流動を調べる予定であり、この結果は当日報告する。

キーワード: 山岳永久凍土, 岩石氷河, 差分干渉 SAR, ALOS PALSAR, 天山山脈

Keywords: mountain permafrost, rock glacier, InSAR, ALOS PALSAR, Tien Shan Mountains



## 防災科研における InSAR 解析ツールの開発 (その 3) Development of InSAR processing tools in NIED ?Part3?

小澤 拓<sup>1\*</sup>  
OZAWA, Taku<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

合成開口レーダー (SAR) は、有用な地殻変動検出ツールの一つとなった。最近では、無償で利用できる SAR 解析ソフトウェア (たとえば、ROI-PAC, GMTSAR, Doris) が公開され、誰でも SAR 解析を用いた地殻変動検出が可能となった。特に、一般的によく用いられる 2 パス差分 SAR 干渉法については、解析アルゴリズムがある程度まで成熟したことにより、誰がどのソフトウェアを用いて解析しても、ほぼ同じ結果を得られるようになった。一方、最近では、時系列解析などの高度 SAR 解析手法を用いて、より高精度な地殻変動検出が試みられている。しかし、その解析については、改良すべき課題が多く残されている。それらの改良に向けた研究開発を効率的に進めるためには、解析アルゴリズムを隅々まで理解できる解析ソフトウェアを用いる必要がある。そこで、防災科研においては、解析アルゴリズムの高度化に向けた InSAR 解析ツールを開発することにした。

本解析ツールは、次のような一般的な解析手順を採用している。(1)SLC フォーマット変換およびパラメータファイル作成。(2) 平行移動のみを考慮した SLC の大まかな位置合わせ。(3) アフィン変換係数の決定。(4)SLC のリサンプリング。(5) 初期干渉画像の作成。(6)DEM に基づく散乱強度画像シミュレーションおよび地理座標系からレーダー座標系への変換テーブルの作成。(7) シミュレート散乱強度画像と観測強度画像とのマッチング。(8) 変換テーブルの修正。(9) 軌道縞および地形縞のシミュレーション。(10) 差分 SAR 干渉画像の作成。(11) 干渉画像フィルターの適用。(12) 干渉画像等のジオコーディング。

日本地球惑星科学連合 2013 年大会においては、SAR 干渉法の適用条件の良いデータペアについて、開発した InSAR 解析ツールによる解析結果を紹介し、GAMMA SAR プロセッサによる解析結果とおおよそ同じ結果が得られることを示した。日本測地学会第 120 回講演会においては、Gatelli et al. (1994) のフィルターによる干渉性の向上、高速化、Skew 画像への対応について述べた。その後、本ツールはオーバーサンプリングおよびバンドパスフィルターによる ALOS/PALSAR の FBS-FBD 画像間の干渉処理に対応した。また、オーバーサンプリング法もしくは双 3 次スプライン補間による DEM のリサンプリングにも対応した。さらに、現時点においては、画像マッチングの高精度化を試みている。これらの対応により、本解析ツールの 2 パス差分 SAR 干渉法の基礎的な部分の開発はひとまず終了とする。今後は、さらなる高精度化や、地形視差の補正、SAR 画像シミュレーションの高精度化、複数軌道 SBAS、SBAS 等の機能を追加していく予定である。また、マニュアルの整備も進める予定である。

キーワード: 合成開口レーダー, 干渉法, 解析ソフトウェア  
Keywords: SAR, InSAR, software, tool

STT60-01

会場:211

時間:4月30日 14:15-14:24

## ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来：導入 Creating future of solid Earth science with high performance computing (HPC): Introduction

堀 高峰<sup>1\*</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 本蔵 義守<sup>3</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>; 有川 太郎<sup>4</sup>; 市村 強<sup>5</sup>; 等々力 賢<sup>5</sup>  
HORI, Takane<sup>1\*</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; HONKURA, Yoshimori<sup>3</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>; ARIKAWA, Taro<sup>4</sup>; ICHIMURA,  
Tsuyoshi<sup>5</sup>; TODORIKI, Masaru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> 東京工業大学, <sup>4</sup> 港湾空港技術研究所, <sup>5</sup> 東京大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Port and Airport Research Institute, <sup>5</sup>University of Tokyo

日本におけるハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) は、従来ハードウェア主体で計画が進められてきたが、次世代 HPC 開発では、今後 10～20 年程度の期間で解決すべき社会的・科学的課題への貢献に主眼をおいた議論が、関連各分野で進められてきた。平成 26 年度からは概念設計が始まるため、ますますこうした議論が重要になっている。本セッションは、固体地球科学分野において、これまで議論されてきた HPC の活用が貢献するであろう社会的・科学的課題や課題解決に向けた方向性を共有し、議論を深めることを目的としている。この導入では、将来の HPCI システムのあり方調査研究で平成 25 年度一杯でまとめられた「計算科学ロードマップ白書」を、講演予定の内容とのつながりを含めて紹介し、議論の出発点とする。

キーワード: HPC, 防災・減災

Keywords: HPC, hazard mitigation

## 「京」コンピュータの成果とポスト「京」コンピュータへの期待 The K Computer and Japan Plan for Exascale

平尾 公彦<sup>1\*</sup>  
HIRAO, Kimihiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 計算科学研究機構 理研  
<sup>1</sup> AICS RIKEN

スーパーコンピュータ「京」は2012年9月末に共用を開始し、本格稼働している。すでに科学技術のさまざまな分野で優れた成果を創出している。昨年のノーベル化学賞にみられるとおり、スパコンは現代の科学技術の発展に必須のツールであり、産業の国際競争力強化や安全安心な社会の構築にも不可欠な国家存立の基盤技術である。「京」の出現で我が国の計算科学、シミュレーション分野は一気に開花した。「京」以前には見渡すことのできなかつた眺望を「京」は与えてくれている。また、次に何をなすべきか、新たなチャレンジや可能性を「京」は示唆してくれている。さらに「京」の出現によって産業界のスパコン利用が加速している。

「京」は Strong Science Machine としてあと数年は世界の最先端に位置するであろうが、この分野の進展は目覚ましく、いずれ「京」を凌駕するスパコンが現れる。国際競争を勝ち抜くためにも、「京」の後継機、ポスト「京」の開発に今から取り組まねばならない。多くの研究者や産業界から「京」の後継機、ポスト「京」を開発すべきとの要望や期待は大きい。昨年暮れに来年度の予算(案)が閣議決定され、この4月より、「京」の100倍規模のエクサスケール・スーパーコンピュータ、ポスト「京」の開発プロジェクトがスタートすることになった。2020年ころの完成を目指している。プロジェクトの概要は

- 2020年までにエクサスケールのスーパーコンピュータを開発し、実際のシミュレーションでも、「京」の100倍の性能を実現
- 世界一の成果を創出できるアプリケーションをシステムと一体的に開発 (Co-design) し、社会的・科学的課題の解決に貢献
- 自主開発により IT 技術の波及効果が得られ、海外展開に貢献するとともに、我が国に蓄積された高度な ICT 技術・人材を維持・強化
- ポスト「京」を設置するために必要なインフラを備え、計算科学分野の優秀な研究者等を有している理化学研究所が主体となって開発
- 総事業費 約 1,400 億円 (うち国費分 約 1,100 億円)

演算性能で「京」よりも100倍速いコンピュータである。ポスト「京」を必要とする課題が様々な分野で存在する。もっとも重要なことは「京」からエクサスケールに至る途中にシミュレーションに大きな質的变化が現れることである。従来の「経験に追随していたシミュレーション」から「実験に先行するシミュレーション(『予測の科学』)」へとパラダイム転換が起こる。「予測の科学」(Predictive Science)への tipping point に到達する。大いに楽しみである。われわれ理化学研究所・計算科学研究機構は「京」を利用して成果を挙げ、国民の期待に応えるとともに、ポスト「京」コンピュータの開発にも全力を挙げて取り組む。

最新の「京」の成果を分かりやすく解説するとともに、ポスト「京」コンピュータへの期待についても講演したい。

## HPCを利用したシミュレーション研究の防災対策への活用への期待 The application of simulation studies using HPC to disaster management: current status and future.

横田 崇<sup>1\*</sup>; 平 祐太郎<sup>1</sup>  
YOKOTA, Takashi<sup>1\*</sup>; TAIRA, Yutaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 内閣府  
<sup>1</sup> Cabinet Office

国の中央防災会議では、災害予防対策や災害応急対策、災害復旧対策の検討のため、想定地震による被害想定を実施している。また、発災直後には被害の状況を把握し政府の応急対応における意思決定をサポートするため被害の早期推計が行われている。より有効な防災計画の策定や、より適切な災害応急対応のためには精度の高い被害推計が必要となる。

事前避難による人的被害の軽減のためには、自然現象の予測技術の高度化が必要であることは言うまでもない。

本講演では、国の防災対策における上記の事項に関する取り組みを紹介し、HPCの活用したシミュレーション研究の防災対策（特に地震・津波対策）への活用に関して期待することについて述べたい。

キーワード: 防災対策, 被害想定, ハイパフォーマンスコンピューティング  
Keywords: disaster managment, damege estimation, HPC



## 京コンピュータ上での統合地震シミュレーターの開発 Development of Integrated Earthquake Simulator on K-computer

市村 強<sup>1\*</sup>; 堀 宗朗<sup>1</sup>  
ICHIMURA, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>; HORI, Muneo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Earthquake simulation with high-resolution and high-accuracy could have significant contribution on making rational and effective contour measures against earthquake disaster. Such earthquake simulation must consider whole process from a fault rupture to city responses, since each process has significant effects on the resulting responses. We are now developing such earthquake simulation system on K-computer, which is called Integrated Earthquake Simulator (IES). IES combines spatial data and earthquake simulation with a high-fidelity model to simulate the whole process. The target domain of earthquake simulation is typically very large, making it difficult to prepare sufficient data to construct a high-fidelity model. Even if a high-fidelity model can be constructed, it is difficult to resolve the computational expense due to the discretization of such models. Thus, simplified analyses or analytical methods are typically used in earthquake simulation. However, the construction of high-fidelity models has become popular with recent increases in available spatial data, and a considerable volume of data from high-density observation networks is now available for checking their validity. The realization of analyses using high-fidelity models is desirable. Several examples of analyses using such models can currently be found on the K-class supercomputer, although the resolution is not yet adequate. In this presentation, we discuss the following earthquake simulations (parts of IES) on the K computer, together with problems to be solved: non-linear wave simulation with high resolution, crust deformation analysis with island-scale and the seismic response analysis of soil-structures system.

キーワード: earthquake simulation, high performance computing, high fidelity, high resolution and accuracy  
Keywords: earthquake simulation, high performance computing, high fidelity, high resolution and accuracy

## HPCによる津波に対する防護施設の粘り強さに関する検討 Consideration to the resiliency of protective structures against tsunami by using High Performance Computer

有川 太郎<sup>1\*</sup>; 大家 隆行<sup>1</sup>; 富田 孝史<sup>1</sup>  
ARIKAWA, Taro<sup>1\*</sup>; OIE, Takayuki<sup>1</sup>; TOMITA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人港湾空港技術研究所  
<sup>1</sup> Port and Airport Research Institute

2011年の太平洋沖地震による巨大津波は、防波堤、海岸堤防などの防護施設の高さを乗り越えて、もしくはそれらを破壊して、背後地域に甚大な被害を生じさせた。そのような状況から、中央防災会議(2011)<sup>1)</sup>では、今後の津波対策に際し、二つのレベルの津波を想定すると提言した。そのうえで、『防護施設に対して、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である。』とされた。そこで、本研究では、防護施設の効果について、STOC-CADMAS(2005)を用いて浸水域などを検討するとともに、防護施設の粘り強さについて、考察するものである。

## スペクトル要素法による理論地震波形計算と地球内部構造推定 Determination of Earth structure using waveform inversion and Spectral-Element Method

坪井 誠司<sup>1\*</sup>; 三好 崇之<sup>1</sup>; 大林 政行<sup>1</sup>; 東野 陽子<sup>1</sup>  
TSUBOI, Seiji<sup>1\*</sup>; MIYOSHI, Takayuki<sup>1</sup>; OBAYASHI, Masayuki<sup>1</sup>; TONO, Yoko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

地球内部の3次元地震波速度構造は、地球内部で起きる地震の性質を研究する上で基礎的なデータとなり、地球の現在の活動を推定するために必要な情報を与えるため、これまでに多くの研究が行われ、様々な3次元モデルが得られている。これらのモデルは、実体波の走時読み取りを元にしたインバージョンにより求めたものがほとんどであるが、地球内部には複雑な形状で沈み込むプレートなどの複雑な構造があり、これらの構造による地震波線経路の1次元モデルからのずれを正しく評価する必要があることは、すでに多くの研究により指摘されてきた。しかし、そのような複雑な3次元構造の元で、理論地震波形記録を厳密に計算するためには、大規模な数値計算が必要であるため、このような影響を波動理論に基づいて考慮した研究はなかった。近年、我々は有限要素法的一种であるスペクトル要素法と世界最速規模のスーパーコンピュータである地球シミュレータを用いた大規模な数値計算により、現実的な3次元地球モデルに対する理論地震波形記録を実体波の周波数領域まで計算できることを示してきた(例えば Tsuboi et al., 2003)。本研究では、スペクトル要素法による理論地震波形計算と、アジョイント法による地震波速度パラメータに関するカーネル計算(Tromp et al., 2005)を組み合わせて、長周期実体波を用いた波形インバージョンにより、日本列島規模の地球内部地震波速度3次元構造モデルを構築することが現実的となっていることを報告する。現在実施している波形インバージョンでは、周期12.5秒から150秒までの間で、二つの周期帯を選び、観測波形から実体波と表面波の位相を切り出してadjoint法による地震波速度パラメータに関するカーネルを計算している。用いる地震は2001年1月以降に東アジア地域で発生したもので161地震を選んだ。この場合、最急降下法によるインバージョンを京コンピュータ等の大規模並列計算機の256コアを用いて実施すると1回の反復に約10万CPU時間を要する。現在までに数回の反復を実行し、観測波形と理論波形との一致は反復ごとに改善する傾向が見られている。得られた地球内部構造モデルは日本列島付近のプレート沈み込みなどの大局的な構造を再現しており、厳密な理論地震波形計算に基づいた波形インバージョンに基づいた地球内部構造推定が現実的な計算時間で実現可能であることを示している。今後は、より短周期の周期帯を用いて日本列島および平野規模の地震波速度構造を求める予定である。

謝辞：本研究は、HPCI戦略プログラム(分野3)「防災・減災に資する地球変動予測」の「地震の予測精度の高度化に関する研究」の一部として行われました。地震波形データの一部に防災科学技術研究所広帯域地震観測網F-netの波形データを使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 地球内部構造, 地震波トモグラフィ, 理論地震波形計算, スペクトル要素法  
Keywords: Earth structure, Seismic tomography, Synthetic seismogram, Spectral Element Method

## マンテル対流研究と HPC: これまでとこれから Mantle convection simulations on HPC: past, present and future

亀山 真典<sup>1\*</sup>; 宮腰 剛広<sup>2</sup>; 古市 幹人<sup>2</sup>; 中川 貴司<sup>2</sup>; 柳澤 孝寿<sup>2</sup>; 中久喜 伴益<sup>3</sup>; 小河 正基<sup>4</sup>  
KAMEYAMA, Masanori<sup>1\*</sup>; MIYAGOSHI, Takehiro<sup>2</sup>; FURUICHI, Mikito<sup>2</sup>; NAKAGAWA, Takashi<sup>2</sup>; YANAGISAWA,  
Takatoshi<sup>2</sup>; NAKAKUKI, Tomoeiki<sup>3</sup>; OGAWA, Masaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学地球深部研, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 広島大学, <sup>4</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>GRC, Ehime University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Hiroshima University, <sup>4</sup>University of Tokyo

「マンテル対流」とは、岩石からなるマンテルが主に固体の状態を保ったまま、非常に長い時間(数百万年～数億年)をかけて、ゆっくりとした速度(数 cm/年)で地球内部を流動している現象を指す。地球惑星科学的に言えばこの流動は、我々が地球表面で観察できる地学現象(地震・火山・プレート運動など)のほとんど全てに関与しているほか、地球や地球型惑星の内部のダイナミクスや進化の過程をも規定する重要なメカニズムである。その一方で流体力学的には、地球惑星の深部で起こっている種々の流動・変動現象の中でもとりわけ特異な性質をもつ流体の運動である。かくも特異なマンテル対流の全貌を理解する上では、数値シミュレーションが不可欠なツールの1つである。実際、マンテル対流を数値流体シミュレーションから理解しようという試みは、古くは1960年代にまで遡ることができ、それ以来HPCの進歩はマンテル対流研究の進展に重要な意味をもっている。

本発表では、マンテル対流のシミュレーションのこれまでの進歩を簡単に振り返りつつ、今後のHPCの発展と歩調を合わせながら進んでいくであろうマンテル対流研究の方向性についても考えてみたい。

キーワード: マンテル対流, 数値シミュレーション  
Keywords: mantle convection, numerical simulation



## クラウドサービスによるデータ同化技術の公開 Cloud Services to Release Techniques of Data Assimilation

長尾 大道<sup>1\*</sup>; 樋口 知之<sup>2</sup>  
NAGAO, Hiromichi<sup>1\*</sup>; HIGUCHI, Tomoyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>The Institute of Statistical Mathematics

Data assimilation (DA) is a fundamental technique to integrate numerical simulations and observation data in the framework of the Bayesian statistics. The purpose of DA is to provide an assimilation model that enables us to predict the future state and/or to determine parameters in the given simulation model. A sequential Bayesian filter, e.g., Kalman filter and particle filter, alternatively estimates probability density functions of one-step-ahead prediction and filtering, which respectively mean the states conditionally given the past observation data and given both past and present observation data. DA seems to be hard to implement due to complex programming of the procedure and needed numerous computation, which essentially requires High Performance Computing (HPC). Cloud service (CS) can be a solution for this through an implementation of the DA procedure on a parallel computing environment.

We have developed and released several CSs related to DA such as CloCK-TiME (Cloud Computing Kernel for Time-series Modeling Engine) and DA system for seismoacoustic waves. CloCK-TiME enables us to carry out a multivariate time-series analysis using the particle filter through the Internet. Users can, via the user interface, construct observation and system models, and specify optional parameters to control the analysis in detail. DA system for seismoacoustic waves enables us to determine hypocentric parameters through DA based on a numerical simulation related to seismoacoustic wave propagation using the normal model summation and observed infrasound data obtained at Shionomisaki and Sugadaira.

We will discuss the importance and availability of CS for DA researches through introduction of CSs we have developed.

キーワード: クラウドコンピューティング, データ同化, 時系列解析, 地震音波, 多変量解析

Keywords: cloud computing, data assimilation, time-series analysis, seismoacoustic wave, multivariate analysis

## NICTサイエンスクラウドによるビッグデータ処理技術 Techniques of Big-Data Processing on the NICT Science Cloud

村田 健史<sup>1\*</sup>; 渡邊 英伸<sup>1</sup>; 鶴川 健太郎<sup>2</sup>; 村永 和哉<sup>2</sup>; 鈴木 豊<sup>2</sup>; 建部 修見<sup>3</sup>; 田中 昌宏<sup>3</sup>; 木村 映善<sup>4</sup>  
MURATA, Ken T.<sup>1\*</sup>; WATANABE, Hidenobu<sup>1</sup>; UKAWA, Kentaro<sup>2</sup>; MURANAGA, Kazuya<sup>2</sup>; YUTAKA, Suzuki<sup>2</sup>; TATEBE,  
Osamu<sup>3</sup>; TANAKA, Masahiro<sup>3</sup>; KIMURA, Eizen<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 株式会社 セック, <sup>3</sup> 筑波大学, <sup>4</sup> 愛媛大学

<sup>1</sup>NICT, <sup>2</sup>Systems Engineering Consultants Co., LTD., <sup>3</sup>University of Tsukuba, <sup>4</sup>Ehime University

現在、多くの科学研究分野ではデータのほとんどがデジタル化され、その量および種類は大規模化の一途をたどっている。これからますます大規模化・複雑化するデータ指向型科学時代を踏まえて、ビッグデータ処理がより容易に、また一元的に行うことができるクラウドシステムが求められている。

NICTサイエンスクラウドは、地球惑星科学を含む様々な科学研究データおよびソーシャルデータのためのクラウドシステムである。NICTサイエンスクラウドでは(1)データ伝送・データ収集機能、(2)データ保存・データ管理機能、(3)データ処理・データ可視化機能の3つの柱(機能)から構成されている。それぞれの機能についての基盤技術を開発するだけでなく、複数の基盤技術を組み合わせることでシステム化を行うことができる。システムを実際に科学研究に応用・適用することで、様々な分野でのビッグデータ科学・データインテンシブ科学が可能となる。

本研究では、NICTサイエンスクラウド上で科学研究のビッグデータ処理を行うための基盤技術について議論する。データサイズが大きい場合にクラウドデータ処理で解決すべき問題点の一つはデータI/Oである。本発表では、分散ファイルシステム(Gfarm)でのデータ読み出し速度の評価を行い、将来の大規模データ処理のためのスケーラビリティについても検討する。

さらに、この高速I/Oを元にしたビッグデータ処理技術について議論する。NICTサイエンスクラウドでは、衛星観測データ処理や3次元シミュレーションデータ処理、3次元気象レーダデータ処理(リアルタイム)等で60倍から100倍を超えるビッグデータ処理の高速化を達成している。この技法は汎用性が高いため様々な研究分野において応用が可能である。

## ハイパフォーマンスコンピューティングが拓く固体地球科学の未来 ー総合討論 Creating future of solid Earth science with high performance computing (HPC): Discussion

日野 亮太<sup>1\*</sup>; 堀 高峰<sup>2</sup>; 本蔵 義守<sup>3</sup>; 金田 義行<sup>2</sup>; 有川 太郎<sup>4</sup>; 市村 強<sup>5</sup>; 等々力 賢<sup>5</sup>  
HINO, Ryota<sup>1\*</sup>; HORI, Takane<sup>2</sup>; HONKURA, Yoshimori<sup>3</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>2</sup>; ARIKAWA, Taro<sup>4</sup>; ICHIMURA, Tsuyoshi<sup>5</sup>; TODORIKI, Masaru<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> 東京工業大学, <sup>4</sup> 港湾空港技術研究所, <sup>5</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Port and Airport Research Institute, <sup>5</sup>University of Tokyo

ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) のめざましい進歩は、固体地球科学をどのように変えるだろうか？招待講演を含む多角的な視点からの講演をうけ、今後10～20年という時間スケールで、HPCと固体地球科学との関わりを議論します。特に、平成26年度から概念設計が始まる次期フラグシップマシンを筆頭に、それを支えるHPCインフラが全体としてどのようなシステムであることが固体地球科学における問題解決にとって重要なかを議論します。例えば、防災・減災に高度なシミュレーションを実際に役立てていく（社会実装していく）か・自然災害の想定、災害誘因発生の長期評価や発生直後の即時予測と警報などの改良をどういう流れで進めるか・ビッグデータをどう防災・減災に活かすか、といったことを念頭に議論を展開していきたいと考えています。

## Parallel Performance of Particle Method in Many-Core System Parallel Performance of Particle Method in Many-Core System

古市 幹人<sup>1\*</sup>; 西浦 泰介<sup>1</sup>

FURUICHI, Mikito<sup>1\*</sup>; NISHIURA, Daisuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We present a computational performance of the smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation on three types of current shared-memory parallel computer devices: many integrated core (MIC: Intel Xeon Phi) processor, graphics processing units (GPU: Nvidia Geforce GTX Titan), and multi-core Central Processing Unit (CPU: Intel Xeon E5-2680 and Fujitsu SPARC64 processors). We are especially interested in the efficient shared-memory allocation methods with proper data access patterns on each chipset. We first introduce several parallel implementation techniques of SPH code for shared-memory system. Then they are examined on our target architectures to find the best algorithms for each processor unit. In addition, the computing and the power efficiency, which are increasingly important to compare multi device computer systems, are also examined for SPH calculation. In our bench mark test, GPU is found to mark the best arithmetic performance as the standalone device and the most efficient power consumption. The multi-core CPU shows the best computing efficiency. On the other hand, the computational speed by the MIC on Xeon Phi approached to that by two Xeon CPUs. This indicates that using MIC is attractive choice for the existing SPH codes parallelized by OpenMP to gain the computational acceleration by the many many-core processors.

キーワード: ハイパフォーマンスコンピューティング, メニイコア, SPH, 並列計算, パフォーマンス解析, 共有メモリ

Keywords: high-performance computing, many core, SPH, Parallel Computing, Performance analysis, Shared memory



## 大規模・高詳細な準動的地震サイクルシミュレーションに向けた高並列化の検討 Numerical investigation of efficient parallelization of large scale quasi-dynamic earthquake generation cycle simulation

兵藤 守<sup>1\*</sup>; 安藤 和人<sup>1</sup>; 日吉 善久<sup>1</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
HYODO, Mamoru<sup>1\*</sup>; ANDO, Kazuto<sup>1</sup>; HIYOSHI, Yoshihisa<sup>1</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Ohtani et al.(2011) は、準動的な地震サイクルの問題に、H-matrices 法と呼ばれる、密行列を階層的な小行列に分割し個々の小行列を効率的に圧縮する手法を適用した。これにより、断層の離散化数  $N$  が  $10^5$ - $10^6$  の範囲で、M8 の地震サイクルを計算した場合の演算数が、従来法の  $O(N^2)$  から  $O(N) \cdot O(N \log N)$  に減少できることとなり、京コンピュータなどの大規模並列計算機を利用した capacity computing によって、様々な M8 クラスの地震発生シナリオを評価できるようになってきた。

しかし、実際のプレート境界では、蓄積される歪(すべり欠損)は本質的に規模が異なる地震同士の相互作用によって解消されており、地震サイクルのシミュレーションを現実近づけるにはこういった様々なスケールの地震の相互作用をモデル化する必要がある。そのためには、対象とする最小規模の地震を解像するだけの細かな空間離散化をモデル化するプレート境界に適用する必要が生じ、例えば、従来の研究で対象としていた地震のマグニチュードを基準とし、そのマグニチュードより 2 小さな地震まで含めたシミュレーションを実施するとすれば、モデル地震断層の断層長が従来の研究の凡そ 1/10 になり、プレート境界を 100 倍細かなメッシュへ離散化することが要求される。そういった計算は、もはやリアル CPU での計算は不可能となり、京コンピュータ等の大規模並列計算機の大部分を利用するような計算(capability computing)を実施する必要が生じる。以上から、現実的な地震サイクルシミュレーションの実現には大規模並列化が必要不可欠である。

我々はこれまで、Ohtani et al.(2011) で扱われたモデルと同程度のモデル断層 ( $N=3 \times 10^5$ ) に Hmatrices 適用し、並列数を百程度とした数値計算を実施してきている。その際、Hmatrices 化前の密行列を基準に行方向に密行列を均等に分割するようなバンド状の部分領域を設定し、各部分領域を MPI プロセスに割り当て、そのバンド幅にオーバーラップする小行列をその MPI プロセスに割り当てるような次元分割で並列計算を実施している。この並列化方法は複数のバンド領域を跨ぐ小行列に関するバンド領域間通信が不要となり、コーディングが単純化できる反面、こういった重複小行列に関する演算の一部は、複数バンド領域で同一の計算を冗長に繰り返す必要が生じる。つまり、大並列を仮定した場合、シリアル計算と比較してトータル演算量が著しく増大してしまいストロングスケーリングが成り立ちにくくなるといったデメリットがあり、現行の並列化方法は並列化での実行に適さない。

このことから、今回我々は、行方向のバンド分割をある分割数に抑えることにより重複演算の増加を抑制し、各行バンドに対し、列方向へも領域分割を適用し、分割を 2 次元化する方針で並列化を見直した。つまり、従来の次元分割の各行バンド内の演算を並列処理することによって、全体としてのスピードアップを計ろうとしている。

各行バンド内で、小行列の大きさと独立したサイズ(ブロック数)を基準にして cyclic な分割を行えば、大きな小行列は複数プロセスに分割され、演算の負荷バランスを解消できる。ただし、これによって従来の次元分割計算に比べると、小行列内での通信と(最終的な行列-ベクトル積の結果を得るための)小行列間の通信の両方が各行バンドに追加されることとなる。しかし、行分割による演算数増加の抑制と、演算を行バンド内で並列処理できること、との兼ね合いによって、現時点でも、同じ並列数(1024MPI プロセス)の計算 ( $N=1.3 \times 10^6$ ) に対し、従来法より 2 倍以上の高速化を達成している。

今回採用した並列化方法は、ブロック数・各次元方向の並列数等の並列パラメータの指定により演算-通信のバランスが変化し、全体としての計算性能に影響を及ぼすと考えられる。今後は、並列化の更なる効率化と、最適な並列パラメータの探索を実施していくことになる。

謝辞. 本研究の一部には理化学研究所の京コンピュータを使用させて頂きました(課題番号 hp120278). 地震サイクルコードの並列化・チューニングには富士通(株)のチューニングチームに助力させて頂きました.

キーワード: 地震サイクル, ケイパビリティコンピューティング, 並列計算, 階層行列

Keywords: earthquake cycle, capability computing, parallel computing, H-matrices

## The Van, Turkey Earthquake of October 2011: Seismicity, Mechanism and its Aftershocks

KALAFAT, Dogan<sup>1\*</sup>  
KALAFAT, Dogan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Bogazici University Kandilli Observatory and ERI Cengelkoy, Istanbul Turkey

<sup>1</sup>Bogazici University Kandilli Observatory and ERI Cengelkoy, Istanbul Turkey

On 23 October 2011, a strong earthquake ( $M_w=7.1$ ) occurred east of Van Lake. The earthquake destroyed damage along the Van Fault Zone. Generally, it is caused significant damage in the city of Van with Ercis town, as well as in many villages. The epicenter of the main shock was located in Tabanlı Village between Van city and Ercis town. Shortly afterwards the November 9, 2011 earthquake ( $M_w=5.6$ ) occurred southeastern part of Van Lake, Edremit town area. The main shock and second shocks caused significant damage and deaths of 644 people.

After the main shock 11 important earthquakes ( $5.0 \leq M \leq 6.0$ ) were occurred in the region which has hypo-central distances of 8-38 km. from the main shock location. The main shock triggered mass movement, spreading, and local liquefaction. The important earthquakes and the aftershocks distribution showed that the E-W and NE-SW oriented fault segments caused the earthquake activities. The distribution of the aftershocks supported the presence a rupture of approximately  $70 \pm 10$  km. Aftershocks occurred within an area of approximately 2300 km<sup>2</sup>.

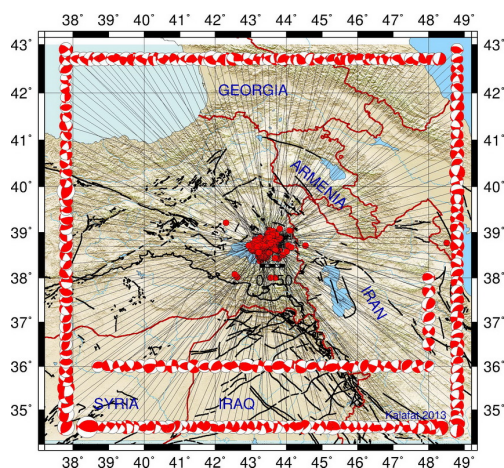
Fault mechanism solution has supported 23 October 2011 Van Earthquake was a reverse fault with a northward dipping fault plane. The fault plane solutions of about 225 important earthquakes ( $M \geq 4.0$ ) were calculated using MT inversion solution technique by this study.

In addition, the stress tensor analysis was completed using the focal mechanism solutions. The stress tensor values of the region were calculated using the azimuth and plunge pairs of P and T axes for 225 earthquakes. The maximum principal stress (P-compressional) of the main shock is aligned in an N-S (NNW/SSE) direction and the tensional axis (T-dilatation) is aligned in an E-W (ENE-WSW) direction. The results of the focal mechanism and stress analysis solutions show that earthquakes have occurred on the reverse faulting and the seismic activity has been continuing under the compressional regime in the region. The Van earthquake activity initiated and caused an increase in seismic activity of the region. This may be explained by the triggering of small faults by the Van Earthquake. The Van earthquake is a good example of compressional deformation and the activity of blind reverse faulting.

This study was supported by Bogazici University Research Projects Commission under SRP/BAP project No. 6671.

キーワード: Van Lake, aftershocks distribution, focal mechanism, stress analysis, reverse faulting

Keywords: Van Lake, aftershocks distribution, focal mechanism, stress analysis, reverse faulting



## Microstructural observation of quartz and K-feldspar in quartzo-feldspathic granulite in Sri Lanka Microstructural observation of quartz and K-feldspar in quartzo-feldspathic granulite in Sri Lanka

Athurupana Bhatiya Madhura Bandara<sup>1\*</sup>; 福田 惇一<sup>1</sup>; 武藤 潤<sup>1</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>  
ATHURUPANA, Bhatiya madhura bandara<sup>1\*</sup>; FUKUDA, Jun-ichi<sup>1</sup>; MUTO, Jun<sup>1</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Tohoku University, Japan

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Tohoku University, Japan

Sri Lankan basement has been considered as high grade terrains which have suffered poly phase deformation and also upper amphibolite to granulite facies metamorphism during Pan-African amalgamation. In order to illuminate the rheological properties of felsic granulite in deep crustal level associated with high grade metamorphism, microstructural and petrographic observations were conducted.

A quartzofeldspathic gneiss sample (Quartz~40%, K-feldspar~55% and plagioclase <5%) contains highly elongated ribbon quartz which demarcate lineation, in K-feldspar matrix. The sample was collected from the hinge zone of kilometer scale large upright cusate antiform between two large synforms named Dumbara and Huluganga in Sri Lanka. The lineation as maximum elongation direction is N35°W/horizontal. Thin sections were made parallel and perpendicular to the lineation for petrographic and microstructural observations. Based on energy dispersive X-ray spectroscopic (EDS) measurement, most of K-feldspars in the matrix are sanidine [(K<sub>0.59</sub>Na<sub>0.41</sub>)AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>] composition. Plagioclase is albite (An 0.1) composition and occurs in clusters and exsolution lamellas in K-feldspar. The grain size of sanidine is from ~50 μm to 2 mm. Large sanidine porphyroclasts are partly recrystallized and show core and mantle structures. Grain boundaries of sanidine are sub polygonal to amoeboid shapes with increasing grain size, while plagioclase grains in clusters show perfect polygonal boundaries with grain size ranging from 50 to 200 μm. Around the plagioclase clusters, scapolite reaction corona exists with crosscutting elongated ribbon quartz. Sericite presents in the same region as very low temperature alteration of plagioclase and scapolite. Most importantly ribbon quartz grains are boudinaged in K-feldspar matrix. Any sign of undulatory extinction or dynamic recrystallization is absent in both boudinaged and large ribbon quartz. Measured average axial ratio of ribbon quartz grains is 21:7:1 with respect to X, Y and Z directions.

The crystallographic orientations of both quartz and sanidine were measured by electron backscattered diffraction (EBSD) method, including large ribbon quartz and boudinaged quartz and also matrix sanidine. The lattice preferred orientation (LPO) patterns of sanidine manifest (010)<001> as a dominant slip system with a minor activation of (010)<100> slip system. The quartz LPO indicates the activations of prism<a> and rhomb<a> slip systems.

According to the presence of K-feldspar as sanidine and their slip systems, we can point out that the sample has prevailed high grade conditions (~550-800°C and ~0.4-0.8 GPa) during deformation [e.g. Menegon et al. 2008]. Scapolitization which occurs at granulite facies could be indicative of peak metamorphism. Also, reaction coronas of scapolite crosscutting ribbon quartz can be interpreted as strong deformation prior to the peak metamorphism. Exsolution of K-feldspar indicates the post dated cooling relative to the strong deformation and the peak metamorphism.

### Reference:

Menegon, L., Pennacchioni G., Spiess R., 2008. Dissolution-precipitation creep of K-feldspar in mid-crustal granite mylonites. *Journal of Structural Geology* 30(5): 565-579

キーワード: Microstructures, Quartz, K-feldspar, Quartz micro boudins

Keywords: Microstructures, Quartz, K-feldspar, Quartz micro boudins



## Multiple events of metamorphism in lenses of eclogite within marbles of Maykhan Tsakhir Formation, Lake Zone, Mongolia Multiple events of metamorphism in lenses of eclogite within marbles of Maykhan Tsakhir Formation, Lake Zone, Mongolia

JAVKHLAN, Otgonkhuu<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; BAT-ULZII, Dash<sup>2</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>  
JAVKHLAN, Otgonkhuu<sup>1\*</sup>; TAKASU, Akira<sup>1</sup>; BAT-ULZII, Dash<sup>2</sup>; KABIR, Md fazle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan, <sup>2</sup>School of Geology and Petroleum, Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Japan, <sup>2</sup>School of Geology and Petroleum, Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

The eclogite-bearing Alag Khadny metamorphic complex in the Lake Zone, SW Mongolia located in the central part of the Central Asian Orogenic Belt, consist mainly of orthogneisses which interleaving with marbles including lenses of garnet-chloritoid schists of Maykhan Tsakhir Formation. Eclogites have two modes of occurrence, i.e. lenses and boudins *eclogite-1* in orthogneisses and *eclogite-2* in marbles. Thermocalc calculations for the peak eclogite facies metamorphism for *eclogite-1* with the assemblage of Grt + Omp + Brs ± Ph ± Ep yielded 570-630 °C and 22-25 kbar (Javkhlan et al., 2013a). In contrast, pressure conditions of the garnet-chloritoid schists (10-11 kbar) are distinctly lower than those of the eclogite-1, whereas temperatures (560-590 °C) are similar (Javkhlan et al., 2013b).

*Eclogite-2* in marbles consists of small grains of garnet (<0.1 mm) and omphacite with minor amounts of amphibole, epidote, paragonite, plagioclase, chlorite, calcite, biotite, quartz, titanite and rutile. The matrix of *eclogite-2* shows a pseudomorphous texture, where small grains of garnet crowd cemented by titanite forming isomorphous round shape. Some of cores of garnet grain contain relics of garnet ( $X_{Ca}=0.32-0.42$ ;  $X_{Mg}=0.06-0.08$ ) indicating previous mineral were larger porphyroblastic garnet. In addition, small grains of omphacite forming rectangular prismatic nature surrounded by garnet grains.

Garnet grains have compositionally zoning with core ( $X_{Ca}=0.08-0.20$ ;  $X_{Mg}=0.10-0.16$ ), mantle ( $X_{Ca}=0.24-0.39$ ;  $X_{Mg}=0.08-0.17$ ), rim ( $X_{Ca}=0.22-0.26$ ;  $X_{Mg}=0.18-0.23$ ) and outer-rim ( $X_{Ca}=0.20-0.22$ ;  $X_{Mg}=0.12-0.18$ ). Few omphacites preserved their core ( $X_{Jd}=0.27-0.31$ ;  $Fe_2O_3=1.34-2.22$  wt%) whereas most of grains have compositional heterogeneity with  $X_{Jd}$  from 0.34 to 0.48 ( $Fe_2O_3=0.04-2.31$ ) and locally with rims of higher  $Fe_2O_3$  (3.79 wt%)-bearing omphacite ( $X_{Jd}=0.32$ ). Omphacites partially replaced by symplectites of Pl (An=15-17), amphibole (Ed, Act, Mg-hbl) and Ep. Three types of amphibole are distinguished by their texture, amphibole (Amp1) [zoned with Act ( $X_{Mg}=0.79-0.81$ ) core, Brs ( $X_{Mg}=0.54-0.69$ ) mantle and rims with Ts, Mg-Trm and Prg in compositions] coexisting with Grt and Omp, poikiloblastic barroisitic amphibole (Amp2) ( $X_{Mg}=0.65-0.75$ ) containing eclogitic minerals of Grt and Omp with their symplectitic assemblage and finally actinolitic amphiboles (Amp3) partially replacing Omp and Grt.

Based on the textures we distinguished two metamorphic events, i.e. eclogite facies metamorphism and poikiloblastic barroisitic amphibole metamorphism. The peak eclogite facies metamorphism characterized by assemblages of Grt (mantle) + Omp + Amp1 (Brs) + Ep + Pg + Rt. Thermocalc calculation yielded  $487 \pm 46$  °C and  $19.7 \pm 2.1$  kbar (sigfit=1.80). Thermocalc calculation of Grt (rim) + Omp (rim) + Amp1 (Mg-Trm) + Ep + Pl yielded  $666 \pm 45$  °C and  $13.7 \pm 1.6$  kbar (sigfit = 2.11) suggesting a decompression stage after the eclogitic metamorphism. The poikiloblastic barroisitic Amp2 shows decreasing Si (7.01-6.69 pfu) and increasing NaB (0.61-0.70 pfu) from core to rim, suggesting that the Amp2 grew after the peak eclogite facies metamorphism, and probably during the second prograde metamorphic event. Approximate P-T conditions of the poikiloblastic barroisitic Amp2 are estimated as 5-7 kbar at c. 450 °C.

<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar muscovite ages for eclogites ( $543 \pm 3.9$  Ma) in marbles (probably eclogite-2) and the garnet-chloritoid schists ( $537 \pm 2.7$  Ma) were determined (Stipska et al. 2010). K-Ar ages for eclogite-1 [ $603 \pm 15$  Ma,  $602 \pm 15$  Ma (Amp) and  $612 \pm 15$  Ma (Ph)] within orthogneisses have been obtained (Javkhlan et al., 2014). These ages are interpreted as the exhumation ages for the eclogites (-1 and -2) and the garnet-chloritoid schists.

The peak temperature conditions of eclogite-2 considerably lower than eclogite-1 whereas the pressure conditions are similar. The peak P-T conditions garnet-chloritoid schists are correlated with the poikiloblastic Amp2 metamorphism of the eclogite-2.

キーワード: eclogite-2, pseudomorphous texture, garnet-chloritoid schists, Maykhan Tsakhir Formation, Lake Zone, SW Mongolia

Keywords: eclogite-2, pseudomorphous texture, garnet-chloritoid schists, Maykhan Tsakhir Formation, Lake Zone, SW Mongolia



---

SCG08-03

会場:311

時間:4月29日 09:45-10:00

lia

## チェコ共和国ボヘミア山塊のザクロ石橄欖岩が経験した多重上昇履歴について Multiple exhumation episodes recorded in orogenic garnet peridotites from the Bohemian Massif (Czech Republic)

苗村 康輔<sup>1\*</sup>; スフォイッカ マルティン<sup>2</sup>; アッカーマン ルカーシュ<sup>2</sup>; 清水 以知子<sup>1</sup>; 平島 崇男<sup>3</sup>  
NAEMURA, Kosuke<sup>1\*</sup>; SVOJTKA, Martin<sup>2</sup>; ACKERMAN, Lukas<sup>2</sup>; SHIMIZU, Ichiko<sup>1</sup>; HIRAJIMA, Takao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> チェコ共和国地質科学アカデミー, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科地質学鉱物学教室

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Geologicky ustav Akademie, Czech Republic, <sup>3</sup>Department of Geology & Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University

Presence of garnet peridotites in *HP/UHP* metamorphic terranes is taken as evidence for interaction between crust and mantle during orogeny. In order to constrain the timing of interaction, *P-T* paths for both peridotites and crustal rocks have been constrained, which demonstrated that there are significant gaps between peak pressure of peridotites and host continental crust. In this contribution, we will show an evidence for multiple exhumations recorded by clinopyroxene (*Cpx*) megacryst discovered in the garnet peridotite from the Bohemian Massif, and will constrain the timing of crust-mantle interaction in the light of the new data.

The Gföhl Unit experienced the highest metamorphic grade in the Moldanubian zone of the Bohemian Massif, and it mainly consists of quartz-feldspathic garnet-kyanite granulite with peak condition at 2.2-2.3 GPa and 1000 °C (Vrana et al., 2013, *J. Geosci.* **58**, 347-378), although Kotková et al. (2011, *Geology* **39**, 667-670) recently found diamond and coesite from the Saxony-type granulite. Gföhl granulite occurs as tens km-sized isolated blocks and contains garnet peridotites whose peak conditions were estimated as 2-6 GPa and 850-1350 °C (Medaris et al., 2005, *Lithos* **82**, 1-23). We studied *P-T* path for the garnet peridotite at Lom pod Libínem quarry in the Prachatice granulite massif in the south Bohemia. Lom pod Libínem (*LPL*) peridotite generally displays granoblastic texture consisting of mm-sized (0.1-5.0 mm in diameter) garnet, pyroxenes, olivine, and most garnet grains are transformed to kelyphite and are replaced by phlogopite. *LPL* peridotite includes a lot of cm-size *Cpx* megacrysts. Among them, the largest megacryst (3×5 cm) shows a strong chemical zoning consisting of three zones (Fig. 1), namely, core, mantle and rim: (1) the "pale-green core" is poor in Ca-Tschemak (CaTs, ~6 mol.%) and rich in Enstatite (En, ~9 mol.%) (components after Simakov, 2008, *Lithos* **106**, 125-136) and includes phlogopite and orthopyroxene, (2) the "mantle" is lower in CaTs. (4-5 mol.%) and En. (4 mol.%), and includes hornblende, chlorite, apatite, titanite, andradite, olivine, and celsian, and (3) the "rim", rich in CaTs. (7-9 mol.%) and En. (9 mol.%), includes olivine, phlogopite, and hornblende, respectively. The mm-size *Cpx* has identical composition to the megacryst-rim, and (4) the smaller *Cpx* is richer in CaTs. (12 mol.%) and poorer in En. (7 mol.%). Four mineral stages can be identified: **Stage 1** is defined by megacryst-core coexisting with phlogopite, orthopyroxene. Assuming the co-existence with garnet, the equilibrium condition was estimated at ~4 GPa and 1000 °C by use of the single *Cpx* geothermobarometer (Nimis & Taylor, 2000, *Contrib. Mineral. Petrol.* **139**, 541-554), **Stage 2** is defined by the "mantle" coexisting with hornblende, chlorite, orthopyroxene, and andradite, which were equilibrated at ~700 °C, *P*<2.5 GPa. **Stage 3** is defined by the core of mm-size pyroxenes, garnet and olivine that were equilibrated at ~3.0 GPa and 1000 °C in the garnet lherzolite facies. **Stage 4** is defined by the matrix spinel lherzolite assemblage equilibrated at *T*~800 °C at 1-2 GPa.

We envisaged the following juxtaposition mechanism: *LPL* peridotite originally came from the upper mantle (4 GPa) that exhumed to the depth of <2.5 GPa and was partially transformed to chlorite peridotite. Assuming that *LPL* peridotite was entrained in the crust at Stage 2, peridotite and host continental crust could have shared the Variscan *UHP* metamorphism at 3 GPa (Stage 3), followed by final exhumation. Although the peak *P-T* condition of Stage 3 is still higher than that of country granulite (<2.3 GPa), this could reflect different degree of retrogression during the final exhumation. Our study suggests some orogenic peridotites were exotically derived from the *UHP* mantle (>4 GPa), where continental crust have not subducted more than 3 GPa. This will give an another solution to the observed pressure gaps between orogenic peridotites and host continental crust.

キーワード: 造山型橄欖岩, 超高压変成岩, 地殻マントル相互作用, ボヘミア山塊, 多重上昇履歴

Keywords: orogenic peridotite, *UHP* metamorphism, crust-mantle interaction, Bohemian Massif, multiple exhumations

SCG08-04

会場:311

時間:4月29日 10:00-10:20

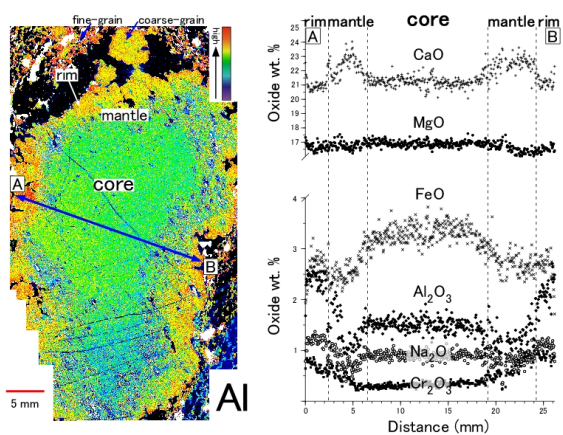


Fig. 1. Cpx megacryst (*Al map*) from the Lom pod Libinem peridotite and its compositions along the line.

## Modelling of the Phase Relations in High- and Ultrahigh-pressure Metabasic Rocks Modelling of the Phase Relations in High- and Ultrahigh-pressure Metabasic Rocks

WEI, Chunjing<sup>1\*</sup>  
WEI, Chunjing<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University

<sup>1</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University

Pseudosections calculated with THERMOCALC predict that for glaucophane-lawsonite eclogite facies conditions (500-600 °C and 18-28 kbar), MORB compositions in the NCKMnFMASHO system will contain glaucophane, garnet, omphacite, lawsonite, phengite and quartz, with chlorite at lower temperature and talc at higher temperature. In these assemblages, the pyrope contents (X<sub>py</sub>) in garnet is mostly controlled by variations in temperature, grossular content (X<sub>gr</sub>) is strongly controlled by pressure, and the silica content (Si-) in phengite increases linearly with pressure. As the P-T conditions for these given isopleths are only subtly affected by common variations in bulk-rock compositions, the P-T pseudosections potentially present a robust geothermobarometric method for natural glaucophane-bearing eclogites. The maximum X<sub>py</sub> content may define the temperature peak (T<sub>max</sub>) and the minimum X<sub>gr</sub> content constrains the pressure peak (P<sub>max</sub>) conditions. An isothermal decompression of these lawsonite-bearing assemblages would result in epidote-bearing assemblages through dehydration reactions such as lawsonite + omphacite = glaucophane + epidote + H<sub>2</sub>O, releasing a large amount of bound fluid. Thus, most natural HP epidote eclogites may have experienced a metamorphic stage of lawsonite stability.

Under low-T UHP conditions (>28 kb, 550-650 °C), basic rocks are predicted to contain garnet, omphacite, lawsonite, phengite, coesite and talc. In this assemblage, the X<sub>py</sub> contents steadily increase as temperature rises and the Si-in phengite increases linearly with pressure. However, the X<sub>gr</sub> content is very sensitive as pressure changes, showing slowly decrease as pressure rises. The peak P-T conditions for low-T UHP eclogites can be determined using the isopleths of maximum X<sub>py</sub> and Si-in phengite in P-T pseudosections. An isothermal decompression of these low-T UHP eclogites at temperature i.e. 600 °C would result in disappearance of lawsonite and talc in the peak stage, but appearance of glaucophane, epidote and kyanite, forming the mineral assemblages involving garnet + omphacite + glaucophane + epidote + kyanite + quartz/coesite + phengite commonly observed. Moreover, garnet in the low-T UHP eclogites is characteristic of growth zoning with its rims containing lower X<sub>gr</sub> and higher X<sub>py</sub> contents.

Under Medium-T UHP conditions (>28 kb and >650 °C), basic rocks are predicted commonly to contain garnet + omphacite + lawsonite + phengite + coesite. In this assemblage, the X<sub>py</sub> in garnet mostly depends on bulk compositions, whereas the X<sub>gr</sub> in garnet and the Si-contents in phengite regularly increase, respectively, as temperature and as pressure rise, and thus, can provide robust thermobarometric constraints. Decompression of the eclogites with lawsonite in the peak stage is inferred to be dominated by lawsonite dehydration, resulting in increase in the mode of anhydrous minerals, or further eclogitization, and formation of epidote porphyroblasts and kyanite-bearing quartz veins in eclogite. As lawsonite dehydration can facilitate evolution of assemblages under fluid-present conditions, the UHP eclogites with lawsonite are hard to memorize their real peak P-T conditions.

キーワード: HP-UHP eclogites, pseudosection, geothermobarometer, basic rock

Keywords: HP-UHP eclogites, pseudosection, geothermobarometer, basic rock



## DEHYDRATED FLUID AND SEISMIC DEFORMATION IN DEEP SUBDUCTION ZONE ?constraints from lawsonite eclogite and olivine-opx spinifex DEHYDRATED FLUID AND SEISMIC DEFORMATION IN DEEP SUBDUCTION ZONE ?constraints from lawsonite eclogite and olivine-opx spinifex

岡本 和明<sup>1\*</sup>  
OKAMOTO, Kazuaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学, <sup>2</sup> 東京学芸大学連合大学院  
<sup>1</sup>Saitama University, <sup>2</sup>Joint Graduate school, Tokyo Gakugei University

**Introduction:** It has been considered that there is a correlation between the double seismic zone and metamorphic dehydration reaction in deep slab. The location of the upper limits of the upper seismic plane correspond to metamorphic facies boundary where H<sub>2</sub>O contents change in subducting crust; numerous earthquakes from 60 to 110 km depths in the lawsonite-blueschist facies, many earthquakes in the lower crust of the slab from 110 to 150 km depths in the lawsonite-amphibole eclogite facies and few earthquakes in the lawsonite eclogite facies. It was considered that the dry eclogite is distributed in the area where there is few earthquake [1]. However, ultrahigh pressure experiments and thermodynamic calculation are both demonstrating that the lawsonite eclogite is stable [2] in the area. In order to unravel relation between dehydration and seismic deformation, we have investigated dehydration process of natural metamorphic rocks recording very cold geo-thermal history in the crust and lithosphere in the slab.

**Lawsonite eclogite (Alpine Corsica):** Alpine Corsica is the best representative field area exhibiting lawsonite eclogite and blueschist as a coherent high pressure, low temperature metamorphic belt. Ophiolite sequence (oceanic plate structure) is also well-preserved, and the pillow structure is clearly recognized in the lawsonite eclogite. Recent petrological researches have revealed that both blueschist (rims of the pillow) and lawsonite eclogite (core of the pillow) are stable in the same pressure and temperature condition [3] because chemical variation including water content creates both lawsonite-amphibole eclogite and lawsonite eclogite in different portion of subducted crust. We carefully observed microtexture of the lawsonite eclogite and blueschist and have found that omphacite vein and lawsonite vein in mylonitized blueschist matrix.

**Olivine-opx spinifex in serpentinite (Cerro del Almirez, Nevado complex):** Metamorphic olivine after antigorite has been described in Italian Alps and also from the Mt. Shiraga, Japan. However, the olivine was formed with talc and fluid by antigorite breakdown reaction in pressures lower than 1.5 GPa. Spinifex olivine with opx in the Cerro del Almirez, is the product at pressures ( $P > 1.5$  GPa) relevant to the lower seismic plane beneath Northeast Japan. In Cerro del Almirez, olivine-opx rocks underlie antigorite schist by a contact [4]. In the olivine-opx rocks, the blade-like, elongated olivine and opx were grown, representing spinifex texture. It clearly indicates the presence of large amount of water facilitate crystallization of elongated olivine with opx.

**Discussion and conclusion:** In the lawsonite eclogite in the Alpine Corsica, blueschist and lawsonite coexist together reflecting chemical difference in pillowed structure or lithology. Omphacite and lawsonite veins are observed along the shear band in mylonitized blueschist. It suggests that decomposition of glaucophane caused hydro-fracturing and precipitate omphacite and lawsonite vein. Garnet was grown statically close to the vein.

Olivine-opx spinifex in the serpentinite, Cerro del Almirez, were probably recrystallized in the presence of large amount of water. The estimated dehydration reaction has a negative P-T slope at pressures higher than 1.5 GPa. The reaction is volume reducing reaction and the olivine-opx spinifex texture was formed under volume reducing reaction.

**References:** [1] S. Kita et al., *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL028239. (2006). [2] K. Okamoto et al., *Geochemistry*, 46 205-215 (2013). [3] A. Vitale Brovarone et al., *J. Met. Geol.*, 29, 583-600, (2011). [4] V. Trommsdorff et al., *CMP*, 132, 139-148 (1998).

**キーワード:** 二重深発地震面, 上面地震帯, ローソン石エクロジャイト, 下面地震帯, 変成かんらん石、輝石スピニフェックす, 脱水脈

**Keywords:** double-seismic zone, upper seismic plane, Lawsonite eclogite, lower seismic plane, olivine-opx spinifex, dehydrated vein

## Ultrahigh-pressure eclogites: paleo-environment indicators Ultrahigh-pressure eclogites: paleo-environment indicators

UR REHMAN, Hafiz<sup>1\*</sup>

UR REHMAN, Hafiz<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshim

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshim

Ultrahigh-pressure (UHP) eclogites generally form by the metamorphism of mafic lithologies (gabbros or basalts) at depths greater than 90 km (minimum stability field of coesite) indicating P-T conditions of >2.7 GPa and 600-800 °C. At such conditions most minerals reequilibrate their chemical elements (e.g. major and trace and even isotopes) and new minerals crystallize or grow at the expense of other minerals formed during the magmatic crystallization. Some chemical elements, considered as relatively less mobile or immobile (e.g. Sm, Nd, Lu, Hf), are widely used for the extraction of past records the rocks have evolved through. Besides those elements, oxygen, the major component of silicates and oxides, impart important information related to protolith formation of rocks and their metamorphism. In general, most basaltic rocks show a narrow range of  $\delta^{18}\text{O}$  (ca.  $+5.7 \pm 0.3$  ‰ relative VSMOW) and values for altered basalts vary from 0 to +12 ‰.

In this paper, I discuss the origin of low or negative  $\delta^{18}\text{O}$  values; recently we found in the Himalayan UHP eclogites of Kaghan Valley and explain the mechanism how these low values were acquired. These eclogites are formed during Eocene by the India-Asia collision and their protoliths were the Panjal Trap basalts which were emplaced in Permian when Indian Plate was part of Gondwana. The  $\delta^{18}\text{O}$  values are as low as  $-2.25$  ‰ in the fresh parts of eclogites and increase towards more positive in the retrogressed or amphibolitized parts. The unusually low  $\delta^{18}\text{O}$  values in eclogites are interpreted to have resulted from the hydrothermal alteration of the protoliths by meteoric water interaction when Greater India was still at southern high latitudes (>65 degrees S) during the Permian indicating glacial paleo-environment. These low  $\delta^{18}\text{O}$  values were frozen-in in the protolith rocks and did not change during subduction-related UHP metamorphism. However retrogressive process, due to infiltration of  $^{18}\text{O}$ -rich fluids during exhumation, shifted these values towards more positive range.

キーワード: Ultrahigh-pressure eclogites, Himalaya, Oxygen isotope, Paleo-environment

Keywords: Ultrahigh-pressure eclogites, Himalaya, Oxygen isotope, Paleo-environment

## 第2大陸の役割 Role of the second continent

河合 研志<sup>1\*</sup>; 市川 浩樹<sup>2</sup>; 山本 伸次<sup>4</sup>; 土屋 卓久<sup>2</sup>; 丸山 茂徳<sup>3</sup>  
KAWAI, Kenji<sup>1\*</sup>; ICHIKAWA, Hiroki<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Shinji<sup>4</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>2</sup>; MARUYAMA, Shigenori<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 愛媛大・GRC, <sup>3</sup> 東京工業大学地球生命研究所, <sup>4</sup> 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University, <sup>3</sup>Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, <sup>4</sup>Department of Earth and Astronomy, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

It has been thought that granitic crust, having been formed on the surface, must have survived through the Earth's evolution because of its buoyancy. Recent geological studies have suggested that a significant amount of crustal material has been lost from the surface due to delamination, continental collision, and subduction at oceanic?continental convergent margins (von Huene and Scholl 1991; Yamamoto et al. 2009; Ichikawa et al. 2013a). If so, then the subducted crustal materials are expected to be trapped in the mid-mantle due to the density difference from peridotitic materials induced by the phase transition from coesite to stishovite (Kawai et al. 2013). In order to study the effect of the subducted granitic materials floating around the mantle transition zone, we conducted two-dimensional numerical experiments of mantle convection incorporating a continental drift with a heat source placed around the bottom of the mantle transition zone. We found that the addition of heat source in the mantle transition zone considerably enhances the onset of upwelling plumes in the upper mantle, which further reduces the time scale of continental drift. The heat source also causes massive mechanical mixing, especially in the upper mantle. The results suggest that the heat source floating around the mantle transition zone can be a possible candidate for inducing the supercontinent cycle (Ichikawa et al. 2013b).

キーワード: 第2大陸, ウィルソンサイクル, 花崗岩, 構造浸食  
Keywords: Second continent, Wilson's cycle, Granite, Tectonic erosion

## Where had the primordial continent gone? Where had the primordial continent gone?

丸山 茂徳<sup>1\*</sup>; 河合 研志<sup>2</sup>; 土屋 卓久<sup>3</sup>  
MARUYAMA, Shigenori<sup>1\*</sup>; KAWAI, Kenji<sup>2</sup>; TSUCHIYA, Taku<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球生命研究所, <sup>2</sup> 東京工業大学, <sup>3</sup> 愛媛大学  
<sup>1</sup>ELSI Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Ehime University

There are no Hadean rocks on the Earth's surface. This indicates (1) there was no continents on the primordial Earth, or (2) continents were present in the Hadean but lost afterwards. It is well-known that Moon surface was covered by anorthositic continental crust with KREEP basalts with ca. 50-60km thickness. Those rocks are the fractionated final residues of magma ocean after the giant impact at 4.56Ga.

The Earth must have been completely melted if giant impact was correct, but due to 6 times larger gravity, the thickness of anorthositic continents must be 21 km. Moreover, during the consolidation of magma ocean, bulk of anorthositic blobs could be transformed into (1) zoisite+kyanite+quartz, (2) grossular+kyanite+quartz, (3) grossular +kyanite+coesite, (4) grossular +kyanite+stishovite, in 300km depth.

Absence of TTG rocks in the Hadean and nearly absent in early Archean less than 5% among the surface of present continents must be caused by extensive tectonic erosion by subducting slabs which are present even today at trench. Therefore, it is wrong to believe that low-density granite must have accumulated on the surface once formed on the surface of the Earth.

Density calculation of anorthosite, MORB, harzburgite, and pyrolite using first principles calculation showed that anorthosite was heavier if it convected at depth in mantle transition zone. If it turns into lower mantle, it becomes to be heaviest among those as mentioned above, suggesting the stability field at D" layer on the bottom of mantle which is right above CMB.

However, it depends on the geothermal gradient on which phase change of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> occurs to determine whether or not the heaviest among all rocks at CMB. Depending on cooling the CMB, meta-anorthosite could have been buoyant particularly after the mantle overturn at 2.7-2.6Ga.

Before the overturn, if the basal magma ocean was present in the Archean, the lost primordial continents must have been melted into basal magma ocean where anorthosite-KREEP basalts mixed with FeO-enriched primordial basal magma ocean. The possible bulk chemistry can be estimated, though qualitatively; it must be super-enriched in anorthositic component. It can be expressed in Ca-Pv, Mg-Pv, Ferro-periclase as major components.

When, mantle overturn occurred at 2.7-2.6Ga, low-temperature materials of upper mantle must have cooled down the basal magma ocean to consolidate to crystallize Ca-Pv rock, bi-mineral Ca-Pv + Mg-Pv rock, and the tri-mineral Ca-Pv + Mg-Pv + FM periclase rock. According to the formation of these rocks, those three rocks would have been behaved differently, although depends on not only density but also mass.

Assuming the enough volume of Ca-Pv rocks, those rocks may be floating in mid-depth of lower mantle.



## 沈み込み起源の超高压クロミタイト：西彼杵変成岩の例 Subduction origin for UHP chromitite from the Nishisonogi metamorphic rocks, Western Kyushu, Japan

西山 忠男<sup>1\*</sup>; 森部 陽介<sup>1</sup>; 石丸 聡子<sup>1</sup>; 荒井 章司<sup>2</sup>; 森 康<sup>3</sup>; 重野 未来<sup>3</sup>  
NISHIYAMA, Tadao<sup>1\*</sup>; MORIBE, Yousuke<sup>1</sup>; ISHIMARU, Satoko<sup>1</sup>; ARAI, Shoji<sup>2</sup>; MORI, Yasushi<sup>3</sup>; SHIGENO, Miki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学自然科学研究科, <sup>2</sup> 金沢大学地球科学教室, <sup>3</sup> 北九州市立いのちのたび博物館

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Kanazawa University,

<sup>3</sup>Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

Ultrahigh-pressure (UHP) chromitite from the Luobsa Ophiolite in non UHP terrane has been an enigma because of its peculiar occurrence. We newly found a UHP chromitite from serpentinite in the Nishisonogi metamorphic rocks (NMR), a member of the Nagasaki Metamorphic Rocks, in Western Kyushu, following our finding<sup>1</sup> of it from the Higo Metamorphic Rocks (HMR), Central Kyushu. The UHP chromitite from NMR documents well a fluid-chromite interaction, showing partial graphitization of microdiamond. Such a fluid-chromite interaction is not observed in HMR chromitite. The NMR are high P/T (epidote-glaucophane schist subfacies) metamorphic rocks of Cretaceous in age, mainly consisting of pelitic and psammitic schists intercalating with minor basic schists<sup>2</sup>. The peak metamorphic condition of the crystalline schists is estimated as 1.4 GPa and 520 °C by an assemblage of garnet with inclusions of chloritoid and omphacite, glaucophane, paragonite, and phengite in a garnet galucophanite<sup>3</sup>. Serpentinite and serpentinite melanges occur as elongated bodies or lenses concordant with schistosity trending N-S of the country schists<sup>1</sup>. Jadeitite and omphacitite occur as tectonic blocks in the serpentinite melange, showing the peak condition of 1.5 GPa and 500 °C by coexistence of jadeite and quartz<sup>4</sup>. Microdiamond-bearing chromitite was found from serpentinite in a melange at Ooseto Town, Saikai City. Chromitite occurs as a thin layer several cm thick and meter-size long in a serpentinite with numerous magnesite (or ankerite) veins. The layer is strongly deformed to show a schlieren-like structure. The serpentinite consists of fine-grained antigorite with no relics of olivine and pyroxenes. The chromitite consists of an aggregate of rounded and fractured chromite crystals with small amounts of talc and magnesite as a matrix and veins. Microdiamond occurs as aligned crystals in narrow zones ranging from a few μm to several tens of μm in chromite. Chromite is zoned, consisting of Mg-rich core (Mg<sub>0.33</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.65</sub>Mn<sub>0.03</sub>)(Cr<sub>0.84</sub>Al<sub>0.12</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.04</sub>)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Fe-rich rim (Mg<sub>0.06</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.89</sub>Zn<sub>0.02</sub>Mn<sub>0.03</sub>)(Cr<sub>0.85</sub>Al<sub>0.12</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.04</sub>)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. The microdiamond-bearing zones are conspicuously richer in Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [(Mg<sub>0.03</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.94</sub>Mn<sub>0.04</sub>Zn<sub>0.01</sub>)(Cr<sub>0.67</sub>Ti<sub>0.01</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.31</sub>)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>], observed as a brighter zone in a BSE image, than other part of chromite in the same grain. The network-like distribution of the zones clearly indicates fluid infiltration associated with the following exchange reaction of trivalent cations between chromite and the fluid: Cr<sup>3+</sup> + Al<sup>3+</sup> (in chromite) = Fe<sup>3+</sup> (in fluid)

Microdiamond occurs either as polyhedral or as platy crystals, 1 to several μm across. Identification of diamond was carried out with an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis (carbon peak) and Raman spectroscopy with a He-Ne laser. We observed a broad Raman peak at 1331 cm<sup>-1</sup>, which is comparable to the peak (1332 cm<sup>-1</sup>) characteristic of diamond. Graphite peak at about 1600 cm<sup>-1</sup> is also observed, showing partial graphitization of microdiamond. These lines of evidence shows that the fluid infiltration may have occurred after inclusion of microdiamond.

It is quite astonishing that microdiamond is preserved in such a completely serpentinitized ultramafic rock. Chromite can be a good container of microdiamond to prevent graphitization during geologically long duration of exhumation and serpentinitization. Our finding suggests the subduction origin of UHP chromitite from NMR rather than mantle migration origin<sup>5</sup> in the case of the Luobusa Ophiolite.

### References

1. Nishiyama, T., Shiosaki, D., Eguchi, H., and Yoshiasa, A. JpGU Meeting, S-MP46 (2014); 2. Nishiyama, T. Mem. Geol. Soc. Japan 33, 237-257 (1989); 3. Moribe, Y. unpublished Mc thesis, Kumamoto University (2014); 4. Shigeno, M., Mori, Y., Shimada, K., and Nishiyama, T. Eur. J. Mineral., 24, 289-311 (2012); 5. Arai, S. J. Mineral. Petrol. Sci., 105, 280-285 (2010)

キーワード: マイクロダイヤモンド, 超高压クロミタイト, 沈み込み帯, 西彼杵変成岩, 超高压変成岩

Keywords: microdiamond, UHP chromitite, subduction zone, Nishisonogi metamorphic rocks, ultrahigh-pressure metamorphic rocks

## Melt-Peridotite Reactions In The Upper Mantle: Geochemistry Of Peridotite And Pyroxenite From The Beni-Bousera Massif

CHETOUANI, Kamar<sup>1\*</sup> ; AMRI, Isma<sup>1</sup> ; TARGUISTI, Kamal<sup>1</sup>  
CHETOUANI, Kamar<sup>1\*</sup> ; AMRI, Isma<sup>1</sup> ; TARGUISTI, Kamal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>departement de geologie, Faculte des sciences de Tetouan. Maroc

<sup>1</sup>departement de geologie, Faculte des sciences de Tetouan. Maroc

The Beni-Bousera massif contains ubiquitous pyroxenites of various types, organized into conspicuous layers ranging from 0.5 to 100 cm in thickness, hosted by peridotites. Integrated field features, petrographic observations, and geochemical analyses from 92 samples (whole rock major and trace elements data: 55 samples, microprobe data for minerals: 48 samples, and mineral trace elements data: 30 samples) from pyroxenites provide information to classify the rock types into four different groups typified as: (1) garnet pyroxenites, (2) spinel-garnet websterites, (3) spinel websterites, and (4) spinel chromium websterites. Type 1 rocks, occurring at the base of the massif, are considered as the most primitive type, garnet pyroxenites layers represent the vestiges of an old veined subcontinental lithosphere. They generally indicate temperatures <970°C (based on two-pyroxene thermometry) and a low to very low Mg# (<76%). Trace element contents show enrichment in heavy and middle rare earth elements but strong depletion in light rare earth elements (LREE). Paradoxically, the host peridotites show enrichment in LREE, which give new insights into their genesis history. Based on our field observations and geochemical results, we suggest that garnet-pyroxenite layers metasomatised the host peridotite successively by the partial melting as a consequence of subsequent heating phase(s) of the lithosphere. The magmatic event that led to the diversity and zoning of mafic layers was caused by melting of the base of thinned subcontinental lithosphere by upwelling asthenosphere, followed by infiltration of asthenospheric melts. The different groups of mafic layers record several stages of this event.

キーワード: Geochemistry, Beni Bousera, Pyroxenite, Peridotites

Keywords: Geochemistry, Beni Bousera, Pyroxenite, Peridotites

## マダガスカル共和国中央東部マサラ岩体に産する超苦鉄質変成岩の岩石学的・地球化学的特徴

### Petrology and geochemistry of the ultramafic metamorphic rocks from the Masora domain, east-central Madagascar

市來 孝志<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>1</sup>; 木村 純一<sup>2</sup>; 仙田 量子<sup>2</sup>

ICHIKI, Takashi<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>1</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>2</sup>; SENDA, Ryoko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学 環境情報, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>Yokohama National University, <sup>2</sup>JAMSTEC IFREE

Madagascar is located within the interior of the Neoproterozoic East African Orogen (Jacobs and Thomas, 2004) that marks the join between East and West Gondwana. In the east Madagascar, the Paleo-Mesoarchean Antongil-Masora domains are exposed (Collins, 2006; Tucker et al., 2011). In this study we report the petrological and whole rock and REE geochemical characteristics of the ultramafic metamorphic rocks exposed within the Masora domain and we discuss their origin and tectonic settings. The Masora domain is mainly composed of the Paleo-Mesoarchean felsic metamorphic rocks with subordinate amounts of metasedimentary rocks (e.g. Randriamananjara, 2008; Tucker et al., 2011). This domain was intruded by Neoproterozoic granitoids and mafic-ultramafic rocks (e.g. Smith et al., 2008).

The ultramafic metamorphic rocks are exposed in the north and south Masora domain. Three types of ultramafic metamorphic rocks are identified in the north: peridotite, pyroxenite and hornblendite. The peridotite is mainly composed of olivine and anthophyllite with subordinate amounts of serpentine, magnesite and magnetite. The pyroxenite is mainly composed of clinopyroxene and hornblende with subordinate amount of magnesite and magnetite. The hornblendite is mainly composed of hornblende with subordinate amount of actinolite and magnetite. Some of the hornblendite has spinel. An ultramafic metamorphic rock body occurs as a lens within metasedimentary rock in the south. This metasedimentary rock is kyanite+biotite+muscovite schist. The mineral assemblage of the ultramafic lens differs between core and rim. It is mainly composed of olivine, tremolite, actinolite and chlorite with subordinate amounts of serpentine, magnetite and altered minerals in the core. The rim is mainly composed of tremolite, actinolite and chlorite with subordinate amount of magnetite and ilmenite.

The ultramafic metamorphic rocks except for the hornblendites have  $\text{SiO}_2 = 42.7\text{-}51.7$  wt.%,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.5\text{-}7.5$  wt.%,  $\text{MgO} = 19.8\text{-}35.4$  wt.%, and  $\text{CaO} = 3.5\text{-}16.5$  wt.%. They have high Mg# (molar ratio of  $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ ) of 0.76-0.83. On the basis of bulk rock CIPW normative Ol-Cpx-Opx composition, the ultramafic metamorphic rocks except for the hornblendites plot in the field of the lherzolite, olivine websterite and websterite (Streckeisen, 1976). Compared with the geochemical characteristics of abyssal peridotites (Niu, 2004), the ultramafic metamorphic rocks shows lower MgO, higher  $\text{TiO}_2$  and CaO than those in the abyssal peridotites. On the MgO-Ni diagram (Pfeifer, 1990 in Katzir et al., 1999) one of the samples plot in the typical abyssal lherzolite field whereas the others plot in higher-Ni (orogenic) field. Chondrite normalized REE patterns of the ultramafic metamorphic rocks show flat HREE with variable LREE patterns. One of the samples shows enriched LREE pattern and the others show depleted LREE patterns. The depleted LREE samples have flat HREE with about twice amount of chondritic HREE abundances. This is typical characteristic of an orogenic lherzolite such as Ronda massif in the southern Spain and Lanzo lherzolites in the Italian Alps (Bodinier and Godard, 2003). Enriched LREE pattern is also a typical characteristic of pyroxenites occurring in orogenic peridotites (Bodinier and Godard, 2003). On the basis of petrological and geochemical characteristics, their protoliths are orogenic lherzolite, websterite and pyroxenite.

キーワード: ゴンドワナ超大陸, マダガスカル共和国中央東部, 地球化学的特徴, マサラ岩体, 超苦鉄質変成岩

Keywords: Gondwana supercontinent, east-central Madagascar, geochemistry, Masora domain, ultramafic metamorphic rocks

Zircon Nano-SIMS U-Pb dating from the country gneiss beside Horoman peridotite, Hokkaido, Japan  
Zircon Nano-SIMS U-Pb dating from the country gneiss beside Horoman peridotite, Hokkaido, Japan

鈴木 良介<sup>1</sup>; 岡本 和明<sup>1\*</sup>  
SUZUKI, Ryosuke<sup>1</sup>; OKAMOTO, Kazuaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学  
<sup>1</sup>Saitama university, Japan

Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, Japan includes the youngest granulites and the Horoman peridotite complex in the highest grade zone. Age of the Hidaka gneiss and amphibolite have been determined by various methods (e.g. K-Ar, U-Pb, Rb-Sr and etc). However, the age of Horoman peridotite complex has not been determined yet. Only Yoshikawa et al (1993) reported the cooling age of the complex as 23 Ma based on whole rock Rb-Sr isochron method. This study performed U-Pb dating of zircons from the paragneiss surrounding the Horoman peridotite complex in order to determine the intrusive age of the Horoman peridotite complex from the upper mantle into the lower crustal conditions. The zircons have detrital cores and thin rims (<20  $\mu$  m). Therefore we used Nano-SIMS because it is possible to focus the secondary beam diameters down to submicrons for the analysis. As a result of this measurement, rim ages of the zircons show that 238U-206Pb age are 7-11Ma (n=7) and detrital core ages show 25.6 Ma, 34-35 Ma, 78 Ma and 150 Ma (n=8). The rim ages are the youngest in Hidaka metamorphic rocks and there is a discrepancy with zircon rim ages (19Ma) from the granulite (Kemp et al. 2007; Usuki et al. 2006). The present rim ages (7-11 Ma) fit well with the tectonic scenario of the collision process of Hokkaido Island proposed by Yamamoto et al. (2010). It is considered that the Horoman peridotite complex was juxtaposed onto the Hidaka metamorphic belt at 7-11Ma by the subducting Pacific plate after the collision between North American and Eurasian plates.

キーワード: Zircon, U-Pb, Nano-SIMS, Horoman peridotite, country gneiss, juxtaposition age  
Keywords: Zircon, U-Pb, Nano-SIMS, Horoman peridotite, country gneiss, juxtaposition age



## ボヘミア山塊 Moldanubian 帯 Nove Dvory 産超高压エクロジャイト中に発見された3種類のCa角閃石とその起源について 3 types of Ca-Amp found from Nove Dvory UHP eclogites and their origin, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif

安本 篤史<sup>1\*</sup>; 平島 崇男<sup>1</sup>  
YASUMOTO, Atsushi<sup>1\*</sup>; HIRAJIMA, Takao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University

The upper-stability limit of Ca/Na amphibole (Amp) in meta-mafic rocks are considered to be around 2-3 GPa in pressures (Schmidt & Poli, 1998). Thus, most Ca-Amp in (ultra)-high pressure metamorphic rocks have been considered as retrograde products. The peak metamorphic conditions of Nové Dvory eclogites are estimated to be 4.5-4.9 GPa and 1050-1150°C. However, some Ca-Amp inclusions in Grt are likely to be interpreted as prograde relicts survived the ultra-high pressure metamorphism. This paper reports the mode of occurrence and the chemical compositions of Ca-Amp and the coexisting minerals in Nové Dvory eclogite, and discusses when Ca-Amp crystallized. Investigated two eclogite samples, ND0107 and ND120, collected from the same outcrop, are composed mainly of garnet (Grt) and Omphacite (Omp) with minor amounts of apatite (Apt) and rutile (Rt) at the UHP stage, and suffered hydration reactions, represented by Ca-Amp and plagioclase (Pl) formation, with various degree during the exhumation stage.

Ca-Amp in studied eclogite can be classified into 3 types based on their modes of occurrence; Type 1 Amp occurs in sporadic euhedral shaped polyphase mineral aggregates (PMAs) in Grt along with Omp, Rt, and Apt. Type 1 Amp is identified only from ND0107, and is classified as pargasite (Prg) or kaersutite (Krs). Omp inclusions associated with Type 1 Amp are homogeneous and have high  $X_{Jd}$  of 40-45, suggesting that the associated Omp did not suffer retrogressive reactions. On ACF diagram, Type 1 Amp is plotted between the associated Omp and host Grt. It suggests that Type 1 Amp could be a relict of the following reaction,  $Amp = Omp + Grt + W$ , during the subduction stage. Type 2 Amp is identified as a member of PMAs in Grt along with spinel (Spl) and diopside (Di). Those PMAs with Type 2 Amp show unidiomorphic shapes and straight alignment in Grt. They are classified as Prg or magnesio-hastingsite (Mg-Hs). Type 3 Amp is a member of the symplectite along with Omp, Di, Spl, and Pl developed at Grt rim. These facts suggest that Type 2/3 Amp were formed during the exhumation stage reacted with infiltrated fluids to the host eclogite.

The different stage origins of Type 1/2 Amp mentioned above is supported by F and Cl contents in them. Type 1 Prg contains 0.21-0.30 wt% of F, but is almost free from Cl (<0.01wt%). Type 2 Prg contains 0.43-1.17wt% of Cl. Type 2 Prg in ND0107 with Type 1 Amp contains 0.05-0.29wt% of F. On the other hand, Type 2 Prg in ND120, which is free from Type 1 Amp, is scarce in F (<0.05wt%). Type 3 Amp is free from Cl.

It is generally considered that Ca-Amp enriched in  $(Na+K)^A$ ,  $^{IV}Al$ , and  $^{VI}Fe^{2+}$  can incorporate more Cl (Makino, 2000). However, Type 1/2 Amp have a similar major element compositions such as  $(Na+K)^A=0.79-0.95$  pfu (for O+OH+F+Cl=24 basis),  $^{IV}Al=2.01-2.45$  pfu, and  $^{VI}Fe^{2+}=0.56-0.97$  pfu, in spite of a scarce but significant difference in Cl content among them. Cl-free Type 3 Amp contains similar amount of  $(Na+K)^A$  (0.75-0.96 pfu) and  $^{IV}Al$  (1.95-2.38 pfu), but less in  $^{VI}Fe^{2+}$  content (<0.47pfu) compared with those of Type 1/2 Amp.

As a present stage conclusion, Type 1 Amp crystallized under F-bearing and Cl-poor environment during the prograde stage, and Type 2/3 Amp crystallized during the retrograde stage along with supply of Cl from outside of the rock. F identified in Type 2 Amp in ND0107 with F-bearing Type 1 Amp could be supplied from the Type 1 Amp through the retrogressive reactions.

キーワード: エクロジャイト, 角閃石, 超高压変成作用, ボヘミア山塊, フッ素, 塩素

Keywords: Eclogite, Amphibole, Ultra-high pressure metamorphism, Bohemian Massif, Fluorine, Chlorine

## 断層-地震発生帯における炭素とヘリウム carbon and helium in faulted-seismogenic areas

佐野 有司<sup>1\*</sup>  
SANO, Yuji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

Carbon and helium have been discharging for a long time from the Earth's mantle to the atmosphere through volcanic and hydrothermal activity. In addition they are derived from faulted-seismogenic areas. It is obvious that volcanic fluxes are originated in magma source even though they may be partly contaminated by crustal material. In contrast, it is difficult to estimate how deep they are derived in non-volcanic and tectonically active regions. Irwin & Barnes [1] reported that CO<sub>2</sub>-rich springs occur worldwide along major zones of seismicity. They further suggested that much of the CO<sub>2</sub> is derived from the mantle and that other important sources are the metamorphism of marine carbonate-bearing sedimentary rocks and the degradation of organic material. Carbon isotopes may provide information of the origin. When the delta 13C value of spring gas in faulted-seismogenic area shows -6permil, it is explained by either mantle carbon or a mixing of marine carbonate (0permil) and sedimentary organic matter (-30permil). Thus it is difficult to estimate the origin of carbon. If the data are combined with helium isotopes, however, we can deconvolve the mantle contribution quantitatively [2]. There are several evidences of mantle carbon and helium degassing from active fault. Kennedy et al. [3] suggested the mantle helium flux in the San Andreas fault system located at boundary between the Pacific and North American plate. The bottom may extend the upper mantle. Significant CO<sub>2</sub> discharges were observed at the same time. A part of CO<sub>2</sub>, up to 3.3% may be derived from the mantle [4]. Similar discharges have been observed in the North and East Anatolian fault zones [5,6]. These are examples of steady-state degassing from active fault. Non steady-state, catastrophic degassing of carbon and helium were reported in the 1995 Kobe earthquake, even though they are originated in shallow crust [7,8]. On the other hand, increase of helium isotopes in bottom seawater in the trench region after the 2011 Tohoku-oki earthquake suggested substantial input of mantle helium [9]. There may be a fluid flow induced by the earthquake, which would carry helium and methane from the mantle wedge to the trench through the entire plate boundary.

Reference [1] Irwin & Barnes, 1980. *JGR* **85**, 3115-3121. [2] Sano & Marty, 1995. *Chem Geol* **119**, 265-274. [3] Kennedy et al., 1997. *Science* **278**, 1278-1281. [4] Kulongoski et al., 2013. *Chem Geol* **339**, 92-102 [5] de Leeuw et al., 2010. *App Geochem* **25**, 524-539. [6] Italiano et al., 2013. *Chem Geol* **339**, 103-114. [7] Sano et al., 1998. *Chem Geol* **150**, 171-179. [8] Famin et al., 2008. *EPSL* **265**, 487-497. [9] Sano et al., 2014. *Nature Commun* **5**, 3084.

Keywords: Helium, Carbon, Origin, Flux, Fault

## キンバーライト中の揮発性元素：深部マントル起源の可能性を示す指標 Volatiles in kimberlites: an indicator of possible deep mantle origin

兼岡 一郎<sup>1\*</sup>  
KANEOKA, Ichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Kimberlites are well known to bear diamonds and their magmas are regarded to have been derived from a depth of at least more than 150km. They are found only in old continental areas and the exposed areas at the surface are quite limited to a diameter of less than 2km in most cases. Although their distributions are quite sparse, they have quite unique characteristics in their chemical and isotope compositions.

In spite of ultrabasic properties, they bear abundant volatiles such as H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, halogens, sulfur and they also contain relatively abundant LIL elements. On the other hand, they show more abundant concentrations of Os and Ir compared to those of other kinds of lavas such as MORBs (mid-oceanic ridge basalts) and OIBs (oceanic island basalts). Their magmas are generally regarded to have been produced in relatively less oxidized environments compared to MORBs, OIBs and IABs (island arc basalts). Hence, it is a quite significant issue to clarify the origin of volatiles in kimberlite magmas, which might be related to the chemical circumstances of deep mantle.

Based on Sr-Nd isotope systematics, kimberlites are classified in two groups (Smith, 1983). In the <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd diagram, Group I kimberlites are relatively concentrated in an area which is close to the Bulk Earth value. In contrast, Group II kimberlites are located in an area of typical enriched character and widely scattered. Most kimberlites are regarded to belong to Group I. Since Group II kimberlite magmas show the effect of recycled materials with an enriched character, volatiles in Group II kimberlites might have been also affected from them.

On the other hand, distribution of data of Group I kimberlites on the Sr-Nd isotope diagram implies that the magma source of Group I kimberlites is less fractionated from the assumed Bulk Earth material than those of MORBs. Further, Ne isotopes in kimberlites from Russia indicates that its magma source is similar to those of OIBs isotopically and different from those of MORBs (Sumino et al. 2006). Noble gas signatures of OIBs indicate the occurrence primordial components in the OIB source (e.g. Kaneoka, 2008). The magma source of MORBs has been generally assigned to be located in the upper mantle, while those of OIBs are located at a deeper part than those of MORBs. These signatures suggest that volatiles in Group I kimberlites would probably reflect those of the deep mantle. In effect, some diamonds are regarded to have been derived from the upper part of the lower mantle. Thus, at least Group I kimberlites might contain volatiles including carbon of the lower mantle origin which has not always been recycled.

Further, kimberlite magmas are conjectured to have been erupted directly from a magma reservoir located below the thick continental lithosphere within a few hours so that captured diamonds might not be decomposed during the rise of a kimberlite magma. Hence, it is inferred that chemical contamination for a kimberlite magma might be less compared to that for a OIB magma which would take much longer time to be transported to the surface from a magma reservoir. If so, Group I kimberlites might keep more primary information on the chemical state of the lower mantle compared to OIBs.

### References

Kaneoka, I. (2008) *Geochem. J.* 42, 3-20.

Smith, C.B. (1983) *Nature* 304, 51-54.

Sumino, H. et al. (2006) *Geophys. Res. Lett.* L16318.

Keywords: volatiles, kimberlite, deep mantle, OIBs, isotopes, diamond

## Carbon isotope systematics during carbonated silicate melting under upper mantle conditions

### Carbon isotope systematics during carbonated silicate melting under upper mantle conditions

MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>1\*</sup>; MIZUTANI, Shogo<sup>2</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>3</sup>  
MADHUSOODHAN, Satish-kumar<sup>1\*</sup>; MIZUTANI, Shogo<sup>2</sup>; YOSHINO, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Shizuoka University, <sup>3</sup>Okayama University

<sup>1</sup>Niigata University, <sup>2</sup>Shizuoka University, <sup>3</sup>Okayama University

Carbon isotope fractionation between graphite and carbonated silicate melt was determined at 5 GPa and in the temperature range between 1400 and 1900 °C. High pressure experiments were carried out in the carbon-saturated model harzbergite system (Enstatite-Magnesite-Olivine-Graphite), where carbonated silicate melt and graphite were the two stable carbon-bearing phases in the run products. Carbonated silicate melting resulted in an isotopic fractionation between graphite and carbon in the silicate melt, where the carbon in the melt is <sup>13</sup>C enriched than co-existing graphite (Mizutani et al., 2014). <sup>13</sup>C enrichment in carbonate melt were further confirmed in experiments where redox melting between olivine and graphite produced carbonate melt as well as carbonate reduction experiments to form graphite.

According to the results of carbon isotope fractionation obtained in this study between graphite and carbonated silicate melt, heavier carbon will be selectively partitioned to the melt and graphite will be lighter than the melt in the order of 1 to 2 permil. If locally oxidative or reductive domains are present or melt extraction and a Rayleigh fractionation process dominate in the upper mantle, then carbonate silicate melt-graphite carbon isotope partitioning at upper mantle conditions will have larger effect on carbon isotopic composition. It is possible that carbonate melt will progressively enrich in carbon isotopes, which corresponds to the primary igneous carbonatite values (-5 to -8 permil) and even rare carbonatites having the more enriched <sup>13</sup>C (-2 to -5 permil) may be explainable in term of the existence of more reductive environment. Conversely, the graphite coexisting with such melts will have delta13C values corresponding to main mantle carbon reservoir. Recent experiments have shown that carbonate melts can be a medium for the efficient crystallization of diamonds in Earth's mantle. Therefore, redox reaction at lower upper mantle is likely to yield the range of carbon isotope variation of mantle derived diamond. Moreover, carbonated mantle melting according to redox melting at upwelling mantle can be an alternative explanation for the formation of <sup>12</sup>C enriched diamonds in the deep mantle

Mizutani, S., Satish-Kumar, M. and Yoshino, T., (2014) Experimental determination of carbon isotope fractionation between graphite and carbonated silicate melt under upper mantle conditions, *Earth and Planetary Science Letters* (in press).

キーワード: carbonated mantle melting, carbon isotopes, graphite, fractionation

Keywords: carbonated mantle melting, carbon isotopes, graphite, fractionation



## 中国東北部 Tancheng-Lujiang 断層におけるヘリウム同位体比の分布 3He/4He distributions near the Tancheng-Lujiang faults zones, at Liaoning, NE China

鄭国東<sup>1\*</sup>; 徐S<sup>1</sup>; 中井俊一<sup>2</sup>; 脇田宏<sup>3</sup>; 王X<sup>1</sup>  
ZHENG, Guodong<sup>1\*</sup>; XU, Sheng<sup>1</sup>; NAKAI, Shun'ichi<sup>2</sup>; WAKITA, Hiroshi<sup>3</sup>; WANG, Xianbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院地質学地球物理学研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 東京大学理学部

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,

<sup>3</sup>Faculty of Science, The University of Tokyo

Chemical and isotopic compositions have been measured for natural gases near the NNE trending Tancheng-Lujiang Fault Zones (TLFZ) at Liaoning Province, NE China, including hydrocarbon-rich natural gases from Liaohe basin (121oE-124oE, 40.5oN-42oN) and nitrogen-rich geothermal gases from the eastern Liaoning Mountains. Observed 3He/4He ratios show two orders of magnitude variability from 0.04 RA to 3.5 RA where RA is atmospheric 3He/4He ratio  $1.4 \times 10^{-6}$ . The following geochemical observations are noted: (1) at Liaohe basin and the adjacent geothermal fields, 3He/4He ratios show positive correlations with He contents; (2) in Liaohe basin, the 3He/4He ratios are largely variable (0.04-3.5 RA), generally high in the eastern depress and low in the western depress; (3) in the eastern Liaoning mountains, geothermal 3He/4He ratios are generally low (0.2-0.7 RA) but have closed relationship with distribution of seismic activity and heat flow; and (4) overall there is a spatial distribution pattern that 3He/4He ratios gradually decrease from the TLFZ eastwards and westwards. Such a 3He/4He distribution feature shows strong evidence that the TLFZ played an important role on mantle-derived helium transform from mantle upwards and groundwater circulation along the deep major faults.

Keywords: helium, fault, china, isotopes

## Heterogenous carbon reservoir in sublithospheric mantle: variations of carbon isotopic composition in diamonds from Sao- Heterogenous carbon reservoir in sublithospheric mantle: variations of carbon isotopic composition in diamonds from Sao-

ZEDGENIZOV, Dmitriy<sup>1\*</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>2</sup>; SHATSKY, Vladislav<sup>3</sup>; RAGOZIN, Alexey<sup>2</sup>  
ZEDGENIZOV, Dmitriy<sup>1\*</sup>; KAGI, Hiroyuki<sup>2</sup>; SHATSKY, Vladislav<sup>3</sup>; RAGOZIN, Alexey<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia, <sup>2</sup>University of Tokyo, Tokyo, Japan,, <sup>3</sup>A.V.Vinogradov Institute of Geochemistry, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia, <sup>2</sup>University of Tokyo, Tokyo, Japan,, <sup>3</sup>A.V.Vinogradov Institute of Geochemistry, Irkutsk, Russia

The Juina kimberlite field in Brazil is a well-known source of alluvial sublithospheric diamonds as identified by their properties and mineral inclusions. Taking advantage of the rather common occurrence of superdeep mineral inclusion assemblages in diamonds from Sao-Luis river alluvial deposits (Juina, Brazil), we carried out a study of variations of C isotope in diamonds from this locality.

Diamonds from Sao-Luis are characterized by rough morphologies and have complex growth histories. Episodic growth, plastic deformation and breakages are visible in these crystals and most diamonds have experienced a final episode of resorption before exhumation. Total nitrogen content in studied diamonds reach 1200 ppm and more. Only several studied diamonds are nitrogen-free (type IIa). Some diamonds consist of domains that are also nitrogen-free but other parts may contain nitrogen. Many diamonds have very low (>10 ppm) but still detectable nitrogen impurity. Extremely high nitrogen aggregation state and overall platelet degradation detected in the majority diamonds from Sao-Luis are suggested they have stored at considerably higher temperatures that are typical for continental lithosphere.

Syngenetic inclusions in 59 diamonds from Sao-Luis were represented by phases of superdeep paragenesis as it was described previously. The dominated inclusions are majoritic garnets, ferropiclses, CaSi- and CaSiTi-perovskites, MgSi-perovskites, TAPP, SiO<sub>2</sub> phases, kyanites, AlSi-phases, olivines and Fe-sulfides. Rare inclusions of clinopyroxenes, KFsp (K-hollandite?), CF, NAL, grossular, native iron, magnesite, CaCO<sub>3</sub>+CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (composite inclusions) have been found in separate diamonds. All majoritic garnets we found are of metabasic affinity and in some cases associated with omphacitic clinopyroxenes.

The studied diamonds from Sao-Luis display wide variations of carbon isotopic compositions ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ranging from 2.7 to -25.3 ‰. The diamonds with inclusions of ferropiclses have very narrow range of  $\delta^{13}\text{C}$  values from -2.1 to -7.7 ‰, which are closely similar to the normal mantle values [Cartigny, 2005; Stachel et al., 2009]. From this observation, it may be suggested that their formation may proceed from isotopically homogeneous mantle reservoir that do not support the model of large primordial isotopic variability of carbon isotopes in primitive Earth's mantle with a predicted pyrolite composition. Diamonds with inclusions of majoritic garnet and CaSi- and CaSiTi-perovskites in many cases show marked differences from the expected normal mantle values of  $\delta^{13}\text{C}$  values. Low  $\delta^{13}\text{C}$  values (-10 to -25 ‰) have been observed exclusively in a series of superdeep diamonds with calcic-majorite garnets, Ca-silicates, aluminous silicates and SiO<sub>2</sub> from Sao-Luis.

The  $\delta^{13}\text{C}$  measurements in core to rim traverses within some individual crystals varied substantially, indicating multi-stage growth histories. The variations in  $\delta^{13}\text{C}$  within individual diamonds may be attributed to either different source of carbon or fractionation effect during diamond growth. No correlation of carbon isotope composition and nitrogen content has been found in individual diamonds. It therefore appears that the cores and rims of the Sao-Luis diamonds precipitated from different fluids/melts with variable N/C ratios and/or under different growth conditions. The highly negative  $\delta^{13}\text{C}$  values in the core (-20 to -25 ‰) potentially represent organic matter in sediments or altered basalts, and the lower  $\delta^{13}\text{C}$  values may represent mixing trends towards normal mantle compositions [Schulze et al., 2004; Harte, 2011]. In this study, we have also described a series of diamonds which show opposite trend of change carbon source from primordial mantle to subducted/crustal (either biotic or abiotic carbon).

キーワード: carbon, diamond, sublithospheric mantle, subduction  
Keywords: carbon, diamond, sublithospheric mantle, subduction

## Chemical composition of nano-inclusions in supe-deep diamonds and implications to the growth condition

## Chemical composition of nano-inclusions in supe-deep diamonds and implications to the growth condition

鍵 裕之<sup>1\*</sup>; 石橋 秀巳<sup>2</sup>; 大藤 弘明<sup>3</sup>; Zedgenizov Dmitry<sup>4</sup>; Shatsky Vladislav<sup>4</sup>; Ragozin Alex<sup>4</sup>  
KAGI, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; ISHIBASHI, Hidemi<sup>2</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>3</sup>; ZEDGENIZOV, Dmitry<sup>4</sup>; SHATSKY, Vladislav<sup>4</sup>; RAGOZIN, Alex<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 静岡大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, <sup>4</sup> ロシア科学アカデミー

<sup>1</sup>Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Shizuoka University, <sup>3</sup>Geodynamic Research Center, Ehime University, <sup>4</sup>Russian Academy of Science

Superdeep diamonds originating from the mantle transition zone and the lower mantle were found from alluvial deposits of Sao-Luis river (Juina, Brazil). We investigated carbon isotopic variations and chemical compositions of nano-inclusions in the superdeep diamonds which can give a clue for the growth condition.

The dominant inclusions in diamonds from studied here are CaSi-perovskite and AlSi-phases. MgSi- and CaTi-perovskites, ferropericlae, native iron, coesite and zircon have also been found. We found syngenetic inclusions of superdeep paragenesis from 59 diamond samples from Sao-Luis. Our SIMS analysis showed the wide variations of carbon isotopic compositions ranging from 2.7 to -25.3 ‰ in  $\delta^{13}\text{C}$ .

Some samples contained microinclusions and FTIR analyses showed that water and carbonates are not major components of diamond-forming fluids. To identify the microinclusions, TEM observations were carried out on a foil of carbonado (0.1 micron thick) made from a polished diamond specimen after Au-coating. The foil was fabricated with a Ga ion beam using a focused ion beam (FIB) instrument (JEOL JEM-9310FIB). The foil was observed with a TEM (JEOL JEM-2010) under an accelerating voltage of 200 kV. We first found out euhedral inclusions of several tens nanometers in size. At present, the chemical composition or mineral species of these nano-inclusions are not clarified. Nanometer-sized inclusions were found in several samples. TEM observation revealed that the nano-inclusions have a negative crystal shape suggesting the syngenetic origin directly related to the diamond growth. Chemical composition obtained from synchrotron X-ray fluorescence analysis clarified that the nano-inclusions contain S, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, and so on. The present study suggests that the growth media of the superdeep diamonds are composed of sulfide melt.

Keywords: diamond, nano inclusion, X-ray fluorescence analysis, super deep diamonds

## 高温高圧実験から見たハワイプルームにおけるマグマの起源：揮発成分の効果 High-pressure melting experiments on magma genesis in Hawaiian plume: effect of volatiles

高珊<sup>1\*</sup>; 高橋 栄一<sup>1</sup>; 今井 崇暢<sup>1</sup>; 鈴木 敏弘<sup>1</sup>  
GAO, Shan<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Eiichi<sup>1</sup>; IMAI, Takamasa<sup>1</sup>; SUZUKI, Toshihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

**Introduction:** Compared with OIB, Hawaiian tholeiitic basalt is thought to be relatively drier (about 0.5 wt.% H<sub>2</sub>O content; Muenow, 1979). In front of the plume core, overlying mantle is metasomatized by hydrous partial melts derived from the Hawaiian plume. Downstream from the plume core, lavas tap a depleted source region similar to enriched Pacific mid-ocean ridge basalt (Dixon & Clague, 2001). Magma genesis model has been proposed by some authors (Hauri, 1996; Takahashi & Nakajima, 2002; Sobolev et al., 2007) that magma produced near the axis of the plume head may be mixtures of two types of melts 1) basaltic andesite melt formed by melting of eclogite and 2) picritic melts formed by the reactive melting of eclogite and peridotite. A series of high temperature high pressure experiments were conducted to explore the genesis of tholeiitic magma from Hawaiian plume and investigate the role of volatiles in magma genesis.

**Experiments:** A series of experiments were conducted under dry and slightly hydrous conditions at 2.85GPa for 1, 3 to 9 hours and from 1460 to 1520C with a piston cylinder by making basalt peridotite sandwich which using MgO-rich CRB72-180 (Takahashi et al 1998) and a fertile peridotite KLB-1 (Takahashi 1986) as starting materials.

**Results:** Three factors that might affect melting progress and chemical reaction among minerals – temperature, duration and water content – were examined, respectively.

1) Temperature: (1460~1520C and every 20C as an interval.)

Basalt went partial molten at 1460C and completely molten when temperature went above 1500C. Orthopyroxene reaction rim formed on the border area due to the reaction between high Si-rich melt and olivine in the peridotite matrix. The opx film becomes more visible and thicker with the increasing of temperature. Partial melting degree of peridotite is also related to the increasing of temperature but the change is not very sensitive when 20C as an interval. The higher temperature, the more peridotite molten. The area of the peridotite near the opx film has a higher degree of partially melting than areas away from the boundary.

2) Duration: (1, 3 and 9 hours.)

Longer time do accelerate the speed of chemical reaction between basalt and peridotite in this study. Basalt molten completely as the running time longer than 3 hours. The orthopyroxene reaction rim on the boundary between peridotite and basalt becomes thicker. Large clinopyroxene crystals formed on the border (the minerals on the border from melt to peridotite are cpx, opx, garnet) momentarily yet faded away as the chemical reaction went on with time. Partial melting of peridotite is also positively related to duration. When the melt of peridotite is too much and unable to support the weight of basalt and it would get rid of the crack and finally went to the basalt side and mixed with the basalt melt.

3) Water content

Basalt layer melted completely, and large orthopyroxene crystallized in the basalt side. Peridotite layer also melted considerably at the same time than its anhydrous counterparts owing to the reason that the join of water could lower the peridotite liquidus line and finally made it more partial melted than in hydrous condition.

**Discussion:** Under dry conditions below peridotite solidus, melting is limited in eclogite layers and chemical reactions with ambient peridotite is hindered by opx film. On the other hand, under slightly wet conditions, water could accelerate the melting process of both eclogite and peridotite layer. As a result, melts formed under wet conditions are saturated with oliv+opx whereas those formed under dry conditions could be saturated with only opx. Changing nature of Hawaiian magma during the shield building stage will be discussed in the light of present melting experiments.

キーワード: ハワイプルーム, 高圧, マグマ, 揮発成分

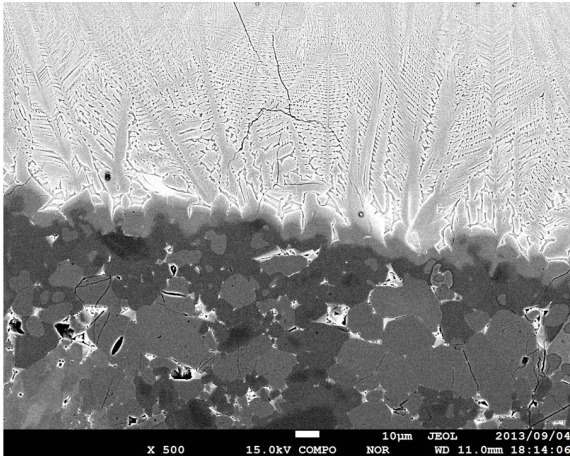
Keywords: Hawaiian plume, high-pressure, magma, volatiles



SCG09-07

会場:315

時間:4月28日 15:06-15:21



Partitioning of carbon between metallic- and silicate-liquids in magma ocean of differentiated planetesimals  
Partitioning of carbon between metallic- and silicate-liquids in magma ocean of differentiated planetesimals

朝原 友紀<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>  
ASAHARA, Yuki<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tohoku University

<sup>1</sup>Tohoku University

Partitioning behavior of carbon has not been determined well though it is one of the strong candidates for light element in the earth's core. We investigated partitioning of carbon with sulfur and oxygen between metallic- and silicate liquids at 6 GPa and 2073 K in carbonaceous chondrite composition (Allende meteorite; CV3). High pressure experiments were conducted with multi-anvil high pressure apparatus. Graphite was used as capsule material. Composition of coexisting metallic- and silicate liquids were measured by electron microprobe with wavelength dispersion type spectrometer except for carbon in silicate liquid. To estimate carbon concentration in silicate liquid, carbon concentration of bulk recovered sample was measured by elemental analyzer. Present result suggests that in oxidized carbonaceous chondrite composition, partitioning coefficient of carbon [ $D_{\text{Metallicliquid/Silicateliquid}} = C_{\text{Metallicliquid}} / C_{\text{Silicateliquid}}$ ;  $C$  is concentration of carbon in wt.%] is close to 1, and it increases with increasing the  $\text{Fe}^{\text{metal}}/\text{Fe}^{\text{oxide}}$  ratio of the bulk carbonaceous chondrite composition.

Experimental study of Group-I kimberlite: evidences for carbonatite primary melt and implication to mantle plumes  
Experimental study of Group-I kimberlite: evidences for carbonatite primary melt and implication to mantle plumes

LITASOV, Konstantin<sup>1\*</sup>; SHARYGIN, Igor<sup>2</sup>; SHATSKIY, Anton<sup>2</sup>; OHTANI, Eiji<sup>3</sup>  
LITASOV, Konstantin<sup>1\*</sup>; SHARYGIN, Igor<sup>2</sup>; SHATSKIY, Anton<sup>2</sup>; OHTANI, Eiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, <sup>2</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University, Sendai, Japan

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, <sup>2</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University, Sendai, Japan

The experiments on the origin of Udachnaya-East kimberlite (UEK) have been performed using a Kawai-type multianvil apparatus at 2-6.5 GPa and 900-1500 °C. The studied composition represented exceptionally fresh Group-I kimberlite containing (wt.%): SiO<sub>2</sub> = 25.9, TiO<sub>2</sub> = 1.8, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2.8, FeO = 9.0, MgO = 30.1, CaO = 12.7, Na<sub>2</sub>O = 3.4, K<sub>2</sub>O = 1.3, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1.0, Cl = 0.9, CO<sub>2</sub> = 9.9, and H<sub>2</sub>O = 0.5. Super-solidus assemblage consists of olivine (Ol), Ca-rich garnet (Gt), Al-spinel (Sp), perovskite (Pv), CaCO<sub>3</sub> (calcite or aragonite), and apatite at 4-6.5 GPa with an addition of clinopyroxene at 3-4 GPa and Na-Ca carbonate with molar ratio of (Na+K)/Ca ~ 0.44 at 6.5 GPa and 900 °C. The apparent solidus was established between 900 and 1000 °C at 6.5 GPa. In the studied P-T range, melt has Ca-carbonatite composition (Ca/(Ca+Mg) = 0.6-0.8) with high alkali and Cl contents (2.8-6.7 wt.% K<sub>2</sub>O, 7.3-11.6 wt.% Na<sub>2</sub>O, 1.2-3.7 wt.% Cl). The K, Na and Cl contents and Ca/(Ca+Mg) value decrease with temperature. It is argued, that the primary kimberlite melt at depth >200 km was essentially carbonatitic (<5 wt.% SiO<sub>2</sub>), however, evolved toward carbonate-silicate composition (with 15-20 wt.% SiO<sub>2</sub>) during ascent. The absence of orthopyroxene among the run products indicates that xenogenic orthopyroxene was preferentially dissolved into kimberlite melt. The obtained subliquidus phase assemblage (Ol + Gt + Sp + Pv) at P-T condition of UEK source region differs from lherzolite lithology of this source. Both petrological observations and experiments indicate that kimberlite magma lost substantial amount of CO<sub>2</sub> at shallow depths.

Our study combined with earlier experiments on carbonate-silicate systems at pressures to 30 GPa implies that liquid phase of thermo-chemical plume generated at the core-mantle boundary is represented by alkali-carbonatite melt. This conclusion has broad geodynamic implication providing insight into fluid regime of mantle melting under hotspots along margins of African large low-shear-wave-velocity province. We conclude that the long term activity of rising hot mantle plume and associated carbonatite melt (i.e. proto-kimberlite melt) causes thermo-mechanical erosion of the subcontinental lithosphere mantle (SCLM) roots and creates hot, oxidized, and deformed metasomatic layer at lower parts of initially depleted SCLM, which corresponds to depths constrained from the sheared Gt-lherzolites. The sheared Gt-lherzolites undoubtedly represent the samples from this layer.

キーワード: mantle, kimberlite, carbonatite, plume, melting

Keywords: mantle, kimberlite, carbonatite, plume, melting

## Gas geochemistry and soil CO<sub>2</sub> flux in active volcanic areas, China Gas geochemistry and soil CO<sub>2</sub> flux in active volcanic areas, China

WEN, Hsinyi<sup>1\*</sup>; YANG, Tsanyao frank<sup>1</sup>; GUO, Zhengfu<sup>2</sup>; FU, Chingchou<sup>1</sup>; CHEN, Aiti<sup>1</sup>; ZHANG, Maoliang<sup>2</sup>  
WEN, Hsinyi<sup>1\*</sup>; YANG, Tsanyao frank<sup>1</sup>; GUO, Zhengfu<sup>2</sup>; FU, Chingchou<sup>1</sup>; CHEN, Aiti<sup>1</sup>; ZHANG, Maoliang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geosciences, National Taiwan University, <sup>2</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences  
<sup>1</sup>Department of Geosciences, National Taiwan University, <sup>2</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences

Changbaishan intra-plate volcano and Tengchong hydrothermal area are two of the active volcanic areas in China. In order to better understand current status of magma/hydrothermal activities of the Changbaishan intra-plate volcano and Tengchong hydrothermal area, we have conducted the soil gas survey and bubbling gas sampling from hot springs around the Tianchi crater lake and Rehai geothermal area.

In Changbaishan volcano, the results show that CO<sub>2</sub> is the major component gas for most samples. The maximum value of helium isotopic ratio of 5.8 R<sub>A</sub> (where R<sub>A</sub> = <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He in air) implies more than 60% of helium is contributed by mantle component, while carbon isotope values fall in the range of -5.8 to -2.0 ‰ (vs. PDB), indicating magmatic source signatures as well. Nitrogen dominated samples, 18Dawgo, have helium isotopic ratio of 0.7 R<sub>A</sub> and carbon isotope value of -11.4 ‰, implying the gas source might be associated with regional crustal components beneath 18Dawgo. The first-time systematic soil CO<sub>2</sub> flux measurements indicate the flux is ca. 22.8 g m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> and 6.8 g m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> at the western and southern flank of Changbaishan, which is at the same level as the background value in the Tatun Volcano Group (24.6 g m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>), implying that Changbaishan may not be as active as TVG.

In Tengchong hydrothermal area, the preliminary results show that CO<sub>2</sub> is the major component gas for most samples. The helium and carbon isotopic ratio fall in the range of 0.5 R<sub>A</sub> to 3.5 R<sub>A</sub> and -4.7 to -1.6 ‰ (vs. PDB), respectively. We also analyzed the hot springs water. The δD and δ<sup>18</sup>O values fall in the range from -59.8 to 84.6 ‰ and -6.20 to -12.38 ‰ (vs. SMOW), respectively. Rehai has the highest helium isotopic ratio of 3.5 R<sub>A</sub>, which implies ca. 40% of helium is mantle-derived. The δD and δ<sup>18</sup>O results implied the water in this area was affect by primary magmatic water. Nevertheless, samples from Banglazhang and Shihchiang hydrothermal areas show much lower helium isotopic ratio of 0.8 R<sub>A</sub> and 0.5 R<sub>A</sub>, respectively. It suggests that the local tectonic setting plays an important role for the gas degassing in this area.



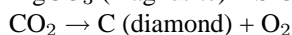
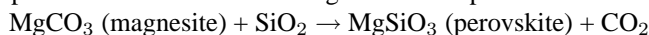
## 高温高圧下における $\text{MgCO}_3$ と $\text{SiO}_2$ の反応と超深部ダイヤモンドの成因 The reaction between $\text{MgCO}_3$ and $\text{SiO}_2$ at high pressure and temperature and genesis of ultra-deep diamonds

前田 郁也<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>1</sup>; 鎌田 誠司<sup>1</sup>; 坂巻 竜也<sup>1</sup>; 高橋 豪<sup>1</sup>; 高畑 明拓<sup>1</sup>; 大石 泰生<sup>2</sup>; 平尾 直久<sup>2</sup>  
MAEDA, Fumiya<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>1</sup>; KAMADA, Seiji<sup>1</sup>; SAKAMAKI, Tatsuya<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Suguru<sup>1</sup>; TAKAHATA, Akihiro<sup>1</sup>; OHISHI, Yasuo<sup>2</sup>; HIRAO, Naohisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Carbon, one of the important light elements for the Earth science, is reserved in the deep part of the Earth. The evidence of the deep carbon is found in ultra-deep diamonds or estimations of carbon fluxes between the surface and interior of the Earth. Subducting slabs are considered as an important C-source of the Earth. Following reactions of  $\text{MgCO}_3$  and  $\text{SiO}_2$  are potentially important in the slabs descending into the deep mantle:



These reactions can play a fundamental role in the deep carbon cycle.

In this work, we investigated the reaction between  $\text{MgCO}_3$  and  $\text{SiO}_2$  up to about 80 GPa and 3000 K using a laser-heated diamond anvil cell combined with in-situ synchrotron X-ray diffraction (XRD) technique and Raman spectroscopy. The starting material is the powered 1:1 (in mole fraction) mixture of natural magnesite (Brazil, Bahia) and reagent  $\alpha$ -quartz. 5 wt.% platinum powder was added to the sample mixture in order to absorb laser and estimate the pressure in the sample chamber. NaCl, KCl or  $\text{SiO}_2$  glass powder was stuffed into the sample chamber as pressure media. XRD patterns of high P-T samples and recovered samples were acquired at beamline BL10XU of SPring-8. Raman spectroscopy was carried out to high-pressure conditions. Raman spectroscopy was also conducted for the recovered samples.

In the present results made at about 70 GPa, diamond and  $\text{MgSiO}_3$  perovskite are detected at temperatures greater than 1750 K. The high P-T XRD patterns in the experiments at 50-60 GPa and 2000-3000 K show the appearance of a small amount of  $\text{MgSiO}_3$  perovskite. Our study demonstrated that formation of diamonds was confirmed in the range of 1300-1500 km depth of the lower mantle in subducting slabs due to the reaction of  $\text{MgCO}_3$  with  $\text{SiO}_2$  and the breakdown of  $\text{CO}_2$ . This phase relations have a possibility to explain one of the origins of diamonds from the lower mantle.

## 前駆微小破壊：室内岩石 AE 実験による洞察 Microcracks preceding ruptures: insights gained from laboratory acoustic emission study

雷 興林<sup>1\*</sup>  
LEI, Xinglin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST, Japan

Earthquakes in the crust are caused by the rapid shear fracture of a fault. Thus, understanding the source processes of earthquakes relies on the understanding of shear fracturing in rocks. Abundant experimental evidence shows that macroscopic shear fracturing within rocks and other brittle materials does not occur by the growth of a single shear crack in its own plane. Rather, it is preceded by a very complex pervasive evolution of some pre-failure damage. Therefore, studies focusing on both fracture dynamics and pre-failure damage are a subject of interest in seismology. Fracturing dynamics and the pre-failure damage can be inferred from AE statistics as the number of AE events is proportional to the number of growing cracks, and the AE amplitudes are proportional to the length of crack growth increments in the rock. Therefore, the AE technique, which monitors the spatiotemporal distribution of AE events, is applied to the analysis of the micro-cracking activity inside the sample space, and it can be performed under an artificially controlled pressure, which is very important for the simulation of underground conditions.

The fracture of intact rocks as well as rocks containing natural structures (joints, faults, foliations) under constant stress rate loading or creep conditions is generally characterized by typical stages with different underlying physics. Through an integrated analysis of several AE statistics obtained from AE data collected with the high-speed AE waveform recording system, a three-phase pre-failure-damage model has been proposed and further enforced with new data. The primary phase reflects the initial rupture of pre-existing microcrack population in the sample or in the fault zone. Sub-critical growth dominates the secondary phase. The third phases termed nucleation phase corresponds to the initiation and accelerated growth of the ultimate fracture. In earthquake seismology, researchers have a special interest with the nucleation phase since faulting nucleation governs the predictability of earthquakes.

Lithology, density and size distribution of pre-existing cracks, meso-scale and macro-scale heterogeneities all have an overall role in AEs. There are some cases in which some phases are not clear. In general, homogeneous (both fine-grained and coarse-grained) rocks with pre-existing cracks likely show all phases. Heterogeneous or weak rocks such as S-C cataclasite normally show a lack of the primary phase. Samples with few pre-existing cracks and samples containing optimally oriented weak structures, likely show an unpredictable fracturing behaviour as well as a lack of primary and secondary phases, in addition the nucleation phase has a small number of AEs.

Rules obtained at the laboratory scale are helpful for understanding natural earthquakes on a significantly larger scale. However, we cannot simply bridge laboratory scale to a scale several orders larger. At every step up from a smaller scale to a larger scale, we encountered something different. The difference could be small for each step but, after many steps, we could see something quite different. Studies on all scales are important. Quantitative investigation of rock fracture using AE techniques is still an interesting field for the future. On one hand, it may shed some light on earthquake seismology. On the other hand, it may provide a fundamental technical background promoting applications including: enhanced geothermal systems (EGS), extraction of shale gas and core bed gas, and CO<sub>2</sub> geological storage. The latter of which involves fluids being intensively pumped into the deep Earth under high pressure; injection-induced earthquakes would be a problem that must be well-addressed.

キーワード: AE, 微小破壊, 前駆ダメージ, 断層核形成

Keywords: Acoustic emission (AE), Microfracture, Pre-failure damage, Fault nucleation

## 種々の物質の摩擦・衝突による電波発生状況 Radio wave emission in friction or collision of various materials

高野 忠<sup>1\*</sup>; 埴 陸也<sup>1</sup>; 三枝 健二<sup>1</sup>  
TAKANO, Tadashi<sup>1\*</sup>; HANAWA, Rikuya<sup>1</sup>; SAEGUSA, Saegusa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本大学  
<sup>1</sup>Nihon University

### 1. Introduction

In fracture of rock, radio wave emission was found experimentally [1]. This phenomenon could be used to detect a rock fracture during an earthquake or a volcanic activity [2] [3]. The cause of the radio wave is expected to be micro-discharges, which are generated by an inhomogeneous potential distribution around micro-cracks [4]. However, the theory of emission is not completely understood yet.

In order to clarify the cause of radio wave emission, we carried out experiments to detect the emission in the cases of friction or collision of various materials. This paper describes the experimental results, and a brief explanation of physical process.

### 2. Tested systems and experimental results

We tested the following systems using the manufactured measuring system at 1 MHz, 300 MHz, 2.0 GHz, and 18.8 GHz [5].

#### (1) A lighter using piezoelectricity

This device makes sparkles by knocking a mineral with piezoelectricity. Due to discharges, strong radio wave is emitted, and detected in our measuring system.

#### (2) A lighter using friction of OL metal

Formerly, this type of a lighter was widely used for igniting cigarettes. The alloy metal of cerium and iron rubs a revolving drum so that sparkles are made changing the friction power to thermal energy. Despite significant sparkles, radio wave could not be detected in this case.

#### (3) Igniter using a flint stone

A flint stone is struck against iron pyrites so that small flakes of iron are scattered being made hot. The flint stone is mostly chert in Europe, and quartz, sanukite, or obsidian in Japan. Sparkles cannot be made by striking two bulks of flint each other. Radio wave is not emitted in this case.

#### (4) Striking a steel lump with a steel hammer

Radio wave is emitted in this case. Probably, the kinetic energy is converted not to thermal energy but to the excitation of electrons or atoms so that inhomogeneous potential distribution is realized.

### 3. Conclusions

In general, sparks are not the origin of radio wave emission. This emission is esteemed a non-thermal phenomenon. An inhomogeneous potential distribution makes micro-discharges that emit radio waves. In some cases, the cause of an inhomogeneous potential distribution makes the sparks.

Further study is needed to clarify the mechanism of the energy transfer to electron excitation.

### References

- [1] Ken-ichiro Maki, Tadashi Takano, Eriko Soma, Kentaro Ishii, Shingo Yoshida and Masao Nakatani, "An experimental study of microwave emission from compression failure of rocks" (in Japanese), Jour. of the Seismological Society of Japan, vol.58, no.4, pp.375-384, 2006.
- [2] Tadashi Takano, Takashi Maeda and Shingo Yoshida, "Experiment and Theoretical Study of Earthquake Detection Capability by Means of Microwave Passive Sensors on a Satellite", IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing, Vol.6, No.1, pp.107-111, 2009.
- [3] T. Maeda and T. Takano, "Discrimination of Local and Faint Changes from Satellite-borne Microwave Radiometer Data", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol 46, issue 9, pp. 2684-2691, 2008.
- [4] K. Maki and T. Takano, "Analysis of the microwave radiation field from the discharge due to an impact destruction", National Convention of the Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ), 1-081, p.87, March 2004.
- [5] T. Takano, J. Kato, M. Hirashima and K. Saegusa, "Radio wave emission from 1 MHz to 18 GHz due to rock fracture and the estimation of the emitted energy", EEIS'12, 978-1-4673-0335-4/12/IEEE, pp.300-303, Cape Town, September 2012.

---

SCG10-02

会場:313

時間:5月2日 09:24-09:39

Keywords: radio wave, friction or collision, various materials, electrical discharge, micro-crack, non-thermal phenomenon



## Seismoelectric phenomena of electrokinetic nature associated with the formation of cracks in porous media

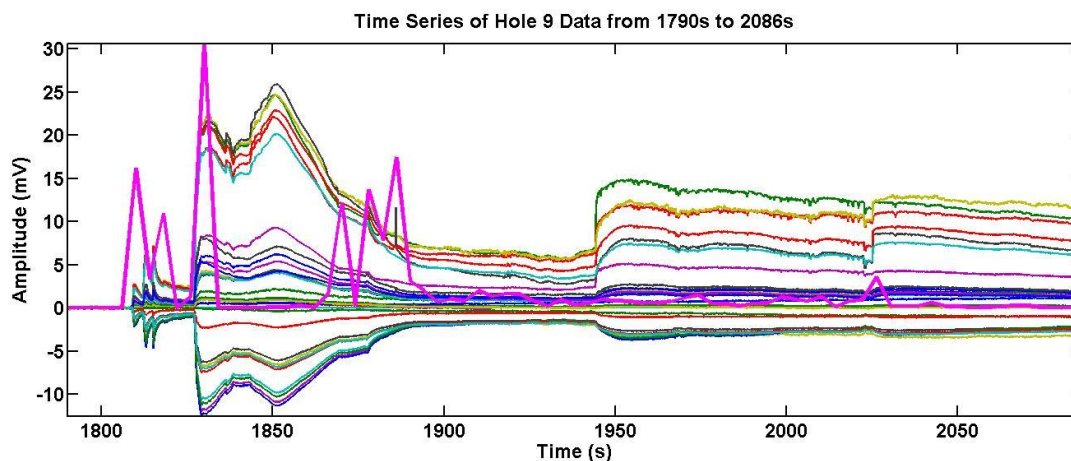
### Seismoelectric phenomena of electrokinetic nature associated with the formation of cracks in porous media

REVIL, Andre<sup>1\*</sup>  
REVIL, Andre<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Colorado School of Mines, department of Geophysics  
<sup>1</sup>Colorado School of Mines, department of Geophysics

I will describe the physics of the generation of electromagnetic disturbances associated with the formation of cracks in porous media. The mechanism is electrokinetic in nature (i.e., associated with the flow of the pore water with respect to the solid phase of a porous material). I will describe the occurrence of these electromagnetic signals and how they can be inverted jointly with seismic signals to determine the position of the hydromechanical disturbance and its moment tensor. I will also demonstrate that electrical fields of electrokinetic nature are associated with the formation of crack through a set of laboratory experiments (see figure below showing the fluctuation in the electrical potential on the surface of the block and the amount of recorded acoustic emissions). The associated electrical field fluctuations can be remotely monitored and the resulting signals used to localize their causative source. The technique is similar to what is performed in electroencephalography (in the medical world) in which an electrical field (associated with the opening of ionic channels at the synapses between the neurons) can be measured on the scalp of a patient and inverted to localize and monitor brain activity. A laboratory experiment shows how these electrical fields can be recorded at the surface of a cement block during the fracking of the block. The measurements are performed with a research-grade medical electroencephalograph and inverted using the genetic algorithm to localize the causative source of electrical current and therefore localize the evolution of the crack. Two snapshots of electrical signals are used to show how the breakage evolves over time. A second experiment is performed to see if we could localize a pulse water injection from a shallow well in field conditions and in the case of a heterogeneous subsurface.

キーワード: electrokinetic, streaming current, self-potential, moment tensor, source localization, electromagnetic phenomena  
Keywords: electrokinetic, streaming current, self-potential, moment tensor, source localization, electromagnetic phenomena



## Waveform analysis of seismo-magnetic signals in Boso, Japan Waveform analysis of seismo-magnetic signals in Boso, Japan

Han Peng<sup>1\*</sup> ; Hattori Katsumi<sup>1</sup> ; Febty Febriani<sup>1</sup> ; Hiroki Yamaguchi<sup>1</sup> ; Chie Yoshino<sup>1</sup>  
HAN, Peng<sup>1\*</sup> ; HATTORI, Katsumi<sup>1</sup> ; FEBTY, Febriani<sup>1</sup> ; HIROKI, Yamaguchi<sup>1</sup> ; CHIE, Yoshino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba University

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba University

To clarify the seismo-magnetic phenomena, it is essential to establish theoretical models to explain how the phenomena come out. A reliable model should coincide with field observations. Thus, the fundamental part is to find out what are the signals associated with earthquakes. Therefore, in this study we have checked detailed waveform of seismo-magnetic signals observed in Boso, Japan. Our preliminary results indicate that there are mainly two kinds of seismo-magnetic signals: one is noise-like signals; the other is transient/quasi-rectangular signals. The former are mainly detected before the 2005 M6.1 Boso earthquake; the latter is observed mainly during slow slip events.

キーワード: ULF seismo-magnetic phenomena, waveform analysis, slow slip events

Keywords: ULF seismo-magnetic phenomena, waveform analysis, slow slip events

## Quantitative evidence of the coupling between seismic and electromagnetic signals Quantitative evidence of the coupling between seismic and electromagnetic signals

HUANG, Qinghua<sup>1\*</sup>  
HUANG, Qinghua<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Peking University  
<sup>1</sup>Peking University

There are some reports of the coupling between seismic and electromagnetic signals from both the natural earthquakes and the active field experiments. Such coupling effect may provide some useful information of earthquake process and/or oil exploration. Although the coupling mechanisms are not well understood at the current stage, there are some candidate mechanisms, such as the electrokinetic effect and piezoelectric effect. We focused this study on seismic and electromagnetic coupling for the data observed during earthquakes or synthesized from our numerical simulation method based on electrokinetic effect and earthquake models. We presented a quantitative analysis method of the correlation between seismic and electromagnetic signals. As an example of the field data, we investigated the data recorded during the Ms5.7 Ningqiang earthquake, China. The results indicated that there is a clear coupling between seismic and electromagnetic signals. As a further example of the synthetic data of seismic and electromagnetic signals, we obtained the synthetic seismic and electromagnetic signals using our numerical simulation method and confirmed the existence of coupling between the seismic and electromagnetic signals in the synthetic data.

This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (41025014, 41274075).

キーワード: Co-seismic electromagnetic signals, Rupture model, Source time function, Electrokinetic effect  
Keywords: Co-seismic electromagnetic signals, Rupture model, Source time function, Electrokinetic effect

## 地表自然電位観測による地下水動態の推定 The Development of self-potential tomography to estimate the ground water condition

大坪 大<sup>1</sup>; 服部 克巳<sup>1</sup>; 山崎 智寛<sup>1\*</sup>  
OTSUBO, Hiroshi<sup>1</sup>; HATTORI, Katsumi<sup>1</sup>; YMAZAKI, Tomohiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of science, Chiba University

近年、集中豪雨の頻度が増加するにつれて、斜面崩壊の発生件数も増加する傾向にある。降雨に起因する斜面崩壊の過程を解明し、斜面の監視や崩壊発生時刻を予測することは重要な課題である。そのために我々は、斜面崩壊の早期予測システムの開発を目的とし、自然電位法によるアプローチを試みている。この手法は、間隙水圧計を用いた観測に比べ、コストが安く、広範囲にわたり観測を行えるという利点がある。これまでの室内実験の結果から、水の動きや土層の変位と自然電位との間に関係性があることが確認されてきた。しかし、現段階では自然電位から地下水動態を推定するまでには至っていない。そこで本研究では、自然電位から地下の電荷分布を推定し、地下水動態を推定する手法の開発を行った。

地下の電荷分布は、測定された自然電位とクーロンの法則によって結びついている。したがって、電荷分布の推定は逆問題となる。この逆問題を解くために本研究では、線形正則化法であるフィリップス・ティホノフ正則化法を用い、最適解を選択するための客観的評価量として、GCV(Generalized Cross Validation)を使用した。また、推定した電荷分布の評価と地下水動態の関係性を調査するため、小型水槽実験システムを用いてシミュレーションと実験を行った。

結果として、開発されたアルゴリズムは数値シミュレーションにおいて有効であることがわかった。小型水槽実験システムを用いた実験は、電荷分布の評価と地下水動態の関係性の解明に良い結果をもたらしたが、一方でいくつかの改善点を示した。詳細は講演時に述べる。

キーワード: 斜面崩壊, 自然電位

Keywords: landslide, self-potential



## Induced seismicity due to fluid injection at a deep well in Youngstown, Ohio, USA Induced seismicity due to fluid injection at a deep well in Youngstown, Ohio, USA

金元英<sup>1\*</sup>  
KIM, Won-young<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo  
<sup>1</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Over 100 small earthquakes ( $M_w$  0.4-3.9) were detected during January 2011- February 2012 in the Youngstown, Ohio, USA area, where there were no known earthquakes in the past. These shocks were apparently close to a deep fluid injection well, and hence, were immediately suspected as induced by the fluid injection. This 14-months seismicity included a half-dozen felt earthquakes and culminated with a  $M_w$  3.9 shock on 31 December 2011, about 24 hours after the fluid injection ceased in the deep well in Youngstown. Among the 109 shocks, 12 events greater than  $M_w$  1.8 were detected by regional network, whereas 97 small earthquakes ( $0.4 < M_w < 1.8$ ) were only detected by using the waveform correlation detector.

Among these shocks, 21 earthquakes were accurately located by using the local portable station data. All of the accurately located earthquakes were distributed along a set of subsurface faults striking N265 (due East-west) and dipping steeply to the north – consistent with the focal mechanism of  $M_w$  3.9 mainshock on 31 December 2011. All of the well-located earthquakes have occurred at depths ranging from 3.5 to 4.0 km in the Precambrian crystalline basement.

We conclude that the recent earthquakes which occurred during 2011 - 2012 in Youngstown, Ohio were indeed induced by the waste fluid injection at a deep injection well due to increased pore pressure along the preexisting East-west trending faults located close to the wellbore in the Precambrian basement. We found that the earthquakes are located along a 1.2 km-long, East-west trending subsurface en echelon fault, and that the seismicity initiated at the eastern end of the subsurface fault – close to the injection point, and migrated toward the west – away from the wellbore, indicating that the expanding high fluid pressure front increased the pore pressure along its East-west trending path and progressively triggered the earthquakes. Further, we observe that the occurrence of these earthquakes is generally correlated to the total daily injection volume and that several sharp peaks in the daily injection volume correlate with the occurrence of earthquakes. We observed that several periods of quiescence of seismicity follow gaps in surface injection volumes and pressure (sudden drops in injection pressure followed by prolonged low pressure), which may indicate that the earthquakes were directly caused by the pressure buildup in the fractured Precambrian basement and stopped when pressure dropped. Geohydrologic properties of the Youngstown, Ohio area behaved as a fractured Precambrian rock similar to the Rocky Mountain Arsenal, Colorado, USA site of induced earthquakes during 1960s.

キーワード: Induced seismicity, Fluid pore pressure, Shale gas extraction, Space and time migration of earthquakes  
Keywords: Induced seismicity, Fluid pore pressure, Shale gas extraction, Space and time migration of earthquakes

## 地震発生直前の微小クラックの特性 Characteristics of Microcracks in the Nucleation Stage of Natural Earthquake

藤縄 幸雄<sup>1\*</sup>; 野田 洋一<sup>2</sup>; 高橋 耕三<sup>3</sup>  
FUJINAWA, Yukio<sup>1\*</sup>; NODA, Yoichi<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Kozo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 株式会社ミエルカ防災, <sup>2</sup> 有限会社テラテクニカ, <sup>3</sup> (元) 通信総合研究所

<sup>1</sup>MierukaBosai Inc., <sup>2</sup>Tierra Tecnica Ltd., <sup>3</sup>(former) Communication Research Laboratory

At the last JpGU meeting we reported that a deep underground electric field measurement using special antenna could detect micro-cracks appearing in the nucleation stage of the Tohoku Earthquake (Fujinawa et al., 2013). Here we report several results of further analysis on the characteristic pulse-like phenomena.

### 1) Detection Distance:

Some events of B-type variation have clear first and second phases (Figure 1). The S-P time is 25ms corresponding to about 180m of the epicentral distance. Majority of events have no apparent P phases due to the small strength of the P phase and/or large dissipation. The detection distance of P phase is about 200m. On the other hand the S phase of the frequency of some 100Hz and amplitude of 2mV suggests detection distance of some 10km, much larger than that of the acoustic emission signal of order several hundred meters by elastic observation.

The characteristic electric field variation induced by crack through electro-kinetic mechanism have been discussed by systematic formulations (Pride, 1994; Revil and Leroy, 2004). As to the wave mode, there are four kinds of wave, slow P and fast P wave (ordinary p wave), S-wave (ordinary S wave) and electromagnetic wave (EM). Events containing P phase have occasionally small forerunners at about the origin time possibly corresponding to (see Fig.1).

### 2) Correspondence to main shock:

The seismological approaches (e.g., Kato et al., 2012) showed that there were two slow seismic slip events from mid-February to the Tohoku Earthquake and microearthquake activities around the foreshocks and mainshocks. Those activities were whole around the epicentral zone, about 300 km northeast from the observation site. The detection distance of the electric field change by the borehole antenna is at most 100 kilometer. Our observational evidence including temporal evolution of the microcrack activity and b value of 0.7 suggest that the micro-cracks of B-type are related to the nucleation process of the main shock, though they occurred at the edge of the giant rupture area. We propose that the nucleation process is not limited at around the asperity, but extends to whole rupture zone. More extensive monitoring of the microcrack of magnitude less than -5 can provide clue to this question.

### 3) Intermittent Criticality

There appeared undulation of microcrack activity after the most active period around 9th March, 2011. The undulation has been suggested to reflect the intermittent criticality indicating another phase of nucleation (Sornette and Sammis, 1995; Kaporis et al., 2005). As approaching to the main shock there appeared two kinds of events. One kind is a superposition of several smaller events. It is interpreted that small events substantially increased with the result of picking up more smaller events in the time interval of data length of 100ms. The second kind is like a long chain of small events. These feature suggest that microcrack activity has changed at the last stage of nucleation stage.

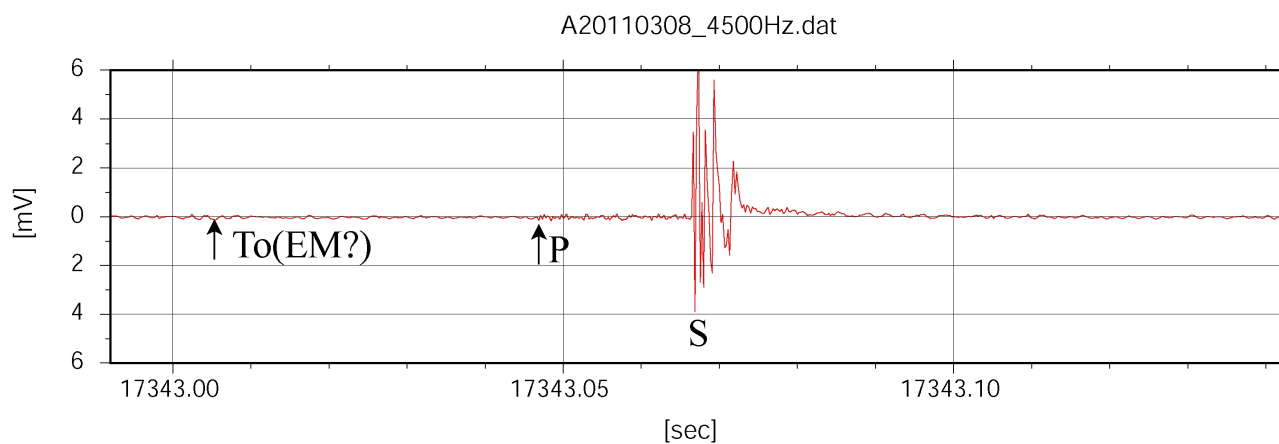
4) It is well known that the crust of the earth is elastic-porous medium filled with fluid as water. The research on the rupture of such kind of medium had a remarkable development in early 1990 contributing to interpret the mysterious seismo-electric phenomena associated earthquakes enabling systematic treatment and suggesting new method of geophysical prospecting. The formulation of Pride and Revil have been used to interpret the phase of faster propagation of EM signal with velocity much larger than the p-wave speed (Fujinawa et al., 2011), the ULF band anomalies associated the slow-slip (Han, 2013). And, our electromagnetic method has been suggested to detect micro-cracks preceding natural earthquakes to identify the nucleation stage providing a break-through for the short term prediction method. The converted electromagnetic mode at the material contrast from elastic seismic wave has been proved to be profitable means to survey for oil and gas.

Keywords: Microcrack, Earthquake Prediction, Nucleation Stage, Seismo-electric- signal, Electrokinetic effect, Tohoku Earthquake

SCG10-08

会場:313

時間:5月2日 11:30-11:45



## 半導体鉱物の破壊に伴う電磁放射 Electromagnetic emissions from fracture of semiconductor pyrite

小沢 光幸<sup>1\*</sup>; 武藤 潤<sup>1</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>; 長瀬 敏郎<sup>2</sup>  
OZAWA, Mitsuyuki<sup>1\*</sup>; MUTO, Jun<sup>1</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>; NAGASE, Toshiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東北大学総合学術博物館

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>The Tohoku University Museum

はじめに

弾性波が鉱体に伝搬するとラジオ波と呼ばれる電磁波が発生する。ラジオ波は弾性波の周波数の10~100倍という高い周波数をもち、その発生は半導体鉱物を含む鉱体での発破実験や、室内での鉱体サンプルを用いた実験で観測されている。こうした観測によるとラジオ波の発生は半導体鉱物を含む鉱体の持つ整流性が強く関係していると示唆されている。半導体鉱物はn型、p型と2つに区別する事ができ、n型、p型が組み合わせると整流性を持つp-n接合を作る。鉱体内部には半導体鉱物のp-n接合が、並列および直列に多数つながって存在するため、鉱体全体で整流性を示す。過去の研究ではラジオ波の発生メカニズムを明らかにするために、鉱体全体の巨視的なスケールの整流特性を測定した。しかし、半導体鉱物における1つ1つの微小なp-n接合の整流特性の評価がされていなかったため、鉱体の整流性の定量的な評価は困難であった。

半導体鉱物の鉱物組成は、微量元素や欠陥の存在により不均質性を持つ。整流性は組成に強く依存するので、整流性の定量的な評価には、微小部位ごとの組成解析が必要である。本研究では、半導体鉱物の黄鉄鉱の組成と整流性を測定する。そして、鉱体における電磁放射の可能性について議論する。

手法

半導体鉱物試料として宮城県和賀仙人鉱山産の黄鉄鉱を用いた。試料は厚さ0.38 cm、表面積1.4 cm<sup>2</sup>の大きさに切断し、測定を行った。

電解法とSEM-EDSにより試料の組織観察、組成測定を行った。そして、プローブ試験機による熱起電力測定、電気特性測定を行った。熱起電力測定により半導体鉱物のp型、n型の判別をし、電気特性測定において整流性の定量的評価を行った。

結果

電解の結果、試料表面の組成の不均質性は溶解度の違いとして現れた。そのため、試料表面に腐食像が現れ、一部は累帯構造を成した。累帯構造の各ゾーンの幅は数十~数百μmである。熱起電力測定によると、こうした腐食によって得られた累帯構造はp型とn型の存在領域の違いを反映している事が分かった。p型の領域はn型の領域に比べ溶解度が大きかった。SEM-EDSの解析によると、p型の領域に約1.0 wt.%のPbの微量元素が結晶面に平行に存在する事が明らかにされた。

プローブによる電気特性測定では、試料のp-n接合部で整流性が確認された。整流性の特性はp-n接合部の電流-電圧特性を測定することで明らかにされ、pn接合の順方向降伏電圧は $V_{FM} = 0.3$  V、逆方向降伏電圧は $V_{RB} = 1.5$  Vであった。

議論・結論

2つの種類の岩石が接触する際、岩石表面間で電子の移動が起こり、電位差が生まれる。この接触による帯電は岩石の剥離時の電磁放射の原因となりうる。もし、2種類の岩石をp型とn型の半導体鉱物と考えると、接触による帯電電圧はp-n接合の順方向降伏電圧で与えられる。接合部はコンデンサーを形成していると見なせる。接合部の剥離の際、表面の帯電密度により極板間の電圧がパッシェンの法則における極板間気体の降伏電圧に達するとコロナ放電が生じる(空気の場合、コロナ放電を引き起こすのに $5.0 \times 10^{-5}$  C/m<sup>2</sup>の帯電密度が必要)。実験結果より、黄鉄鉱のp-n接合の剥離面に生じる帯電密度は $2.7 \times 10^{-4}$  C/m<sup>2</sup>と見積もられる。誘電緩和による剥離面の帯電の減衰の影響を加えると、接触面同士が剥離される速度を考慮する必要がある。この場合、コロナ放電を引き起こすのに必要な剥離速度は2.0 km/sと見積もられる。この結果より、黄鉄鉱の破壊が破壊伝搬速度2.0 km/s以上の剪断破壊により引き起こされる時、コロナ放電による電磁波の発生が期待される。

以上のように、黄鉄鉱の破壊は電磁放射の原因となりうる、鉱体から発生する電磁波の周波数等の特性を明らかにするために、更なる研究が求められる。

キーワード: 地震電磁気現象, 半導体鉱物, ラジオ波, p-n 接合



---

SCG10-P01

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 2 日 16:15-17:30

Keywords: Seismic electromagnetic signals, Semiconductor minerals, Radio wave, P-n junction

西南日本花崗岩類の系統的な SHRIMP ジルコン年代測定が明らかにしたパルス状大陸成長  
Pulsed granitic crust formation revealed by comprehensive SHRIMP zircon dating of the SW Japan granitoids

谷 健一郎<sup>1\*</sup>; 堀江 憲路<sup>2</sup>; Dunkley Daniel<sup>3</sup>; 石原 舜三<sup>4</sup>  
TANI, Kenichiro<sup>1\*</sup>; HORIE, Kenji<sup>2</sup>; DUNKLEY, Daniel<sup>3</sup>; ISHIHARA, Shunso<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> Curtin University, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup> National Institute of Polar Research, <sup>3</sup> Curtin University, <sup>4</sup> Geological Survey of Japan/AIST

The origin of continental crust is a fundamental question in Earth's evolution. Granitoids, its volcanic equivalents, and metamorphic and sedimentary rocks with granitic compositions, are the main components of the upper continental crust. It is therefore important to understand the geodynamic settings in which juvenile granitic magma is generated from mantle-derived sources. Convergent plate margins, such as the Mesozoic circum-Pacific orogenic belts, are regarded as one of the plausible candidates for the post-Archean continental crust formation, as they are associated with abundant calc-alkaline I-type batholiths. However, the fundamental tectonic processes that triggered these voluminous granitic crust formations in the Mesozoic have remained largely unresolved due to the lack of precise temporal constraints on the granitic magmatism. We are currently undertaking a comprehensive geochronological study of the granitic batholith exposed in the Southwest Japan Arc, which is typical of the Mesozoic circum-Pacific orogenic belts utilizing high-precision zircon U/Pb geochronology.

In order to precisely determine the space-time distribution of the granitic magmatism that occurred in the SW Japan Arc during the Mesozoic, we have used the zircon U/Pb method to date a comprehensive suite of granitic rocks from the Chugoku Region in the SW Japan. Contrary to the results previously obtained using conventional geochronological methods, which suggested that the magmatism occurred gradually from ~100 to ~50 Ma, with the plutons forming over long time intervals, the newly obtained zircon ages reveal three clear pulses of granitic crust formation at 85, 60 and 35 Ma separated by 25 million year intervals. The 85 Ma magmatism was the most voluminous and was distributed in a broad zone that extends ~120 km across-strike, whereas the magmatism at 60 and 35 Ma were focused on the northern margin of the SW Japan Arc. Furthermore, the granitic magmatism at 85 Ma involved sediment-incorporated, ilmenite series granitic rocks, while the magmatism at 60 and 35 Ma involved more juvenile, mantle-derived, magnetite series rocks. Thus, not only did the granitic magmatism in SW Japan occur in pulses, there was also a spatial and compositional transition in the magmatism through time. This can be best explained by enhanced subduction zone magmatism during the Mesozoic, rather than the previously proposed model in which it was suggested that the granitic crust was formed by the subduction of a mid-ocean ridge on the Pacific Plate during the Middle Cretaceous.

## 南部北上山地, 氷上山花崗岩類の岩石学とジルコン年代学 Petrology and zircon geochronology of the Hikami Granitic Rocks in south Kitakami Mountains, Japan

佐々木 惇<sup>1\*</sup>; 土谷 信高<sup>1</sup>; 足立 達朗<sup>2</sup>; 中野 伸彦<sup>2</sup>; 小山内 康人<sup>2</sup>; 足立 佳子<sup>3</sup>

SASAKI, Jun<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Nobutaka<sup>1</sup>; ADACHI, Tatsuro<sup>2</sup>; NAKANO, Nobuhiko<sup>2</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>2</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>岩手大教育, <sup>2</sup>九州大比文, <sup>3</sup>新潟大超域

<sup>1</sup>IwateUniversity, <sup>2</sup>KyushuUniversity, <sup>3</sup>NiigataUniversity

氷上山花崗岩類は、南部北上山地の氷上山を中心として分布する氷上山花崗岩体(村田ほか,1974)と、それに類似したいくつかの小岩体からなる(北上古生層研究グループ,1982)。氷上山花崗岩体は、氷上山を中心に東西約8km、南北約14kmのほぼ楕円状に分布する岩体で、その南西部には壺の沢変成岩類を取り込むとされる(浅川ほか,1999;小林・高木,2000など)。層序的位置づけに関しては、クサヤミ沢にシルル系川内層アルコース砂岩と氷上山花崗岩類との不整合などがある(村田ほか,1974)。これまでに得られた年代にはシルル紀に相当するSHRIMP年代(442.0 ± 3.5Ma; Watanabe et al., 1995)のほか、約250Ma, 350Ma, 440Maのモナザイト、ゼノタイム、ジルコンによるCHIME年代がある(鈴木・足立, 1998; 鈴木ほか, 1992; 鈴木・足立, 1994)。またLA-ICP-MSによるジルコンU-Pb年代では、下條ほか(2010)により、429 ± 19Ma, 411~416Maのコンコーディア年代が得られている。これらの氷上山花崗岩類の放射年代には地質学的証拠との間に矛盾があるため小林・高木(2000)の岩相区分を参考に氷上山花崗岩体の9試料と小岩体の4試料からジルコンを分離し、年代測定を行った。その結果氷上山花崗岩類の固結年代は450Maと結論される(佐々木ほか, 2013)。しかしながら、壺の沢変成岩と前期白亜紀の気仙川花崗岩との境界付近の片状中粒白雲母黒雲母花崗閃緑岩の2試料からは、著しくばらついた年代が得られたためさらにデータを増やして検討する。

本研究では、小林・高木(2000)をもとにして、全岩化学組成によって岩相区分の再検討を行った。全岩化学組成の主成分元素の分析結果より、普通角閃石を含む岩相はFeO\*, MgO, CaO, Scの値が高いことが分かった。岩体の南部にのみ分布する片状普通角閃石黒雲母花崗閃緑岩は普通角閃石を含むが異なる傾向を示す。また、壺の沢変成岩と密接に伴って分布する片状中粒白雲母黒雲母花崗閃緑岩は西縁部の気仙川花崗岩に近いものは他の岩相に比べて重希土類元素の値が低いことが確認された。以上の検討から、氷上山花崗岩体は以下の3つの系列に分けることができる。

1) 角閃石を含む系列(小林・高木(2000)の斑状普通角閃石黒雲母花崗閃緑岩, 片状含普通角閃石黒雲母トータル岩, 片状黒雲母普通角閃石トータル岩)。

2) 角閃石を含まない系列(小林・高木(2000)の黒雲母花崗閃緑岩(大野型花崗閃緑岩), 片状黒雲母花崗閃緑岩, 片状普通角閃石黒雲母花崗閃緑岩, 片状中粒黒雲母トータル岩, 片状中粒白雲母黒雲母花崗閃緑岩)。

3) 気仙川花崗岩のすぐ東に分布する小林・高木(2000)の片状中粒白雲母黒雲母花崗閃緑岩。

次に氷上山花崗岩類の全岩化学組成を、日本列島の古生代前期の花崗岩類と比較する。約500MaのジルコンU-Pb年代の値が得られている花崗岩として阿武隈山地南部の日立変成岩類に伴う花崗岩類があげられる(Sakashima et al, 2003; Tagiri et al, 2011)。南部北上山地からは大船渡市甫嶺付近のトータル岩からジルコンU-Pb法で498 ± 7Maの年代が得られている。(土谷ほか, 本要旨集)。450MaのジルコンU-Pb年代を示す花崗岩としては黒瀬川構造帯の花崗岩(小山内ほか, 印刷中)などがある。これらの花崗岩を氷上山花崗岩類の全岩化学組成の分析データと比較する。八代花崗岩は小山内ほか(印刷中)、台花崗岩類は小林ほか(2000)のデータを使用した。全岩化学組成による主成分の比較からは450Maの年代を示す八代花崗岩と氷上山花崗岩類が同様の傾向を示すことが確認された。微量成分の比較からは500Maの年代を示すものと台花崗岩はRbが氷上山花崗岩類に比べて低いことが確認できる。また、Srが胆沢川石英閃緑岩と台花崗岩は氷上山花崗岩類よりも高い値を示す。希土類元素による氷上山花崗岩類と八代花崗岩の比較では八代花崗岩の一部が氷上山花崗岩体西側に分布する片状中粒白雲母黒雲母花崗閃緑岩と同じ傾向を示すことが確認できる。

キーワード: 氷上山花崗岩, ジルコン, U-Pb年代, 岩石学

Keywords: HikamiGranites, zircon, U-Pb age, Petrochemistry

## 東北日本の白亜紀～古第三紀花崗岩類の Sr-Nd-Pb-Hf 同位体岩石学 Sr-Nd-Pb-Hf isotopic variations of Cretaceous to Paleogene granitic rocks from northeast Japan

土谷 信高<sup>1\*</sup>; 加々島 慎一<sup>2</sup>; 平原 由香<sup>3</sup>; 高橋 俊郎<sup>3</sup>; 仙田 量子<sup>3</sup>; 常 青<sup>3</sup>; 木村 純一<sup>3</sup>  
TSUCHIYA, Nobutaka<sup>1\*</sup>; KAGASHIMA, Shin-ichi<sup>2</sup>; HIRAHARA, Yuka<sup>3</sup>; TAKAHASHI, Toshiro<sup>3</sup>; SENDA, Ryoko<sup>3</sup>; CHANG, Qing<sup>3</sup>; KIMURA, Jun-ichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 岩手大・教育, <sup>2</sup> 山形大・理, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>Iwate University, <sup>2</sup>Yamagata University, <sup>3</sup>JAMSTEC

日本列島は、太平洋西部の5億年に及ぶ沈み込みによって形成されたと考えられ、古生代後期から新生代の付加体および付加体起源の高圧型変成帯が主要な構成物である (e.g., Maruyama, 1997; Isozaki et al., 2011). Maruyama (1997) は、日本列島は太平洋型造山帯の典型例であり、中央海嶺の周期的な沈み込みに伴う大陸地殻の急成長と広域変成帯の上昇位置を通して形成されたと論じた。一方 Jahn (2010) は、西南日本の花崗岩類がリサイクルした古い大陸地殻から形成されたと述べた。日本列島の形成史を明らかにするためには、大陸地殻物質の主体をなす花崗岩類の同位体岩石学的検討は非常に有効である。加々美ほか (2000) は、東北日本の花崗岩類の Sr-Nd 同位体岩石学的特徴から、北上帯、北帯 (阿武隈帯)、および南帯 (足尾帯・美濃帯) に区分し、この順番大陸地殻成分に富んでいくことを見出した。本報告では、加々美ほか (2000) の結果をさらに発展させるため、東北地方の花崗岩類の Sr-Nd-Pb-Hf 同位体岩石学的特徴について検討する。

Sr-Nd-Pb-Hf 同位体分析は、北上帯 (階上・田野畑・宮古・金華山・遠野・人首・千厩などのアダカイト質累帯深成岩体とそれ以外の深成岩体および岩脈類の一部)、阿武隈帯 (白神山地、生保内付近、太平山地、脊梁山地、阿武隈山地)、朝日帯 (西朝日岩体、中岳岩体、大朝日岩体)、足尾帯 (奥利根地域、只見地域、奥只見地域、帝釈山地、足尾山地) の花崗岩類について行なった。これらのデータから、北上帯、阿武隈帯、朝日・足尾帯の順番で大陸地殻物質の影響が大きくなっていることが示され、このトレンドは大陸地殻物質に枯渇した端成分とそれに肥沃な端成分の混合によるものと考えられる。大陸地殻物質に枯渇した端成分としては、沈み込んだ海洋地殻および枯渇したウェッジマントルと考えて矛盾はない。一方大陸地殻物質に富む端成分については、沈み込んだ堆積物 (Plank and Langmuir, 1998; Chauvel et al., 2008) では Hf-Nd 同位体比のトレンドを説明できない。Hf-Nd 同位体比のトレンドを説明するためには、古い大陸地殻起源の碎屑性ジルコンに富む Hf 同位体比初生値の低い堆積物 (Chauvel et al., 2008) を考える必要がある。また Hf-Nd 同位体比のトレンドを詳しく見ると、北上帯のトレンドは全体のトレンドと斜交しており、より Hf 同位体比初生値の低い端成分との混合を考えざるを得ない。北上帯は前期白亜紀の海嶺沈み込みに関連したアダカイト質岩の産出で特徴づけられることから、北上帯に沈み込んでいた海洋地殻の年齢は若いはずであり、深海底堆積物の関与が少なかったために大陸地殻起源の堆積物の影響が相対的に高くなったことで説明できる。

キーワード: 東北日本, 花崗岩, Sr-Nd-Pb-Hf 同位体, 岩石化学

Keywords: Northeast Japan, granite, Sr-Nd-Pb-Hf isotope, petrochemistry



## 山梨県富士河口湖町毛無山周辺に見られるザクロ石酸性岩体について Garnet-bearing acidic igneous bodies in Mt. Kenashi-yama area, Fujikawaguchiko-machi, Yamanashi, Japan

永幡 寛三<sup>1\*</sup>; 石井 輝秋<sup>2</sup>

NAGAHATA, Hiromi<sup>1\*</sup>; ISHII, Teruaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 放送大学大学院修士全生, <sup>2</sup> 公益財団法人深田地質研究所

<sup>1</sup> Graduate school, Open University of Japan, <sup>2</sup> Fukuda Geological Institute

【はじめに】 山梨県南都留郡富士河口湖町毛無山周辺にザクロ石 (almandine) を含む酸性岩が存在することは既に知られている (片田 1956, 戸川ほか 1996, 戸川ほか 1997, 松原ほか 2008, 田村ほか 2010)。しかし、これらが岩体として存在することについての記載は少なく、河口湖から西湖に至る地域の石英ひん岩にザクロ石を含むものがあるという報告に限られる (片田 1956)。この度、本地域においてザクロ石酸性岩体を確認したので、その産状を報告する。

【地質】 御坂山地は、伊豆 - 小笠原孤、南部フォッサマグナ、中央構造線が密接に関係する地質形成史を考える上で重要な位置にある。毛無山周辺域は御坂山地東部に位置し、中新統後期の西八代層群、河口累層に属し (片田 1956)、火山岩類を主とする第三紀御坂層群とこれを貫く石英閃緑岩、及び石英ひん岩等からなる (山梨県 1984)。

【産状】 淵坂峠から毛無山山頂に至る尾根、室沢川東側尾根、文化洞トンネルから毛無山山頂に至る尾根、及び西湖から十二ヶ岳山頂に至る尾根、これらの一部に、ザクロ石酸性岩体の露頭と見られる岩石が不連続ながら確認出来る。これらは、やや性質の異なる三つのグループに分類できる。即ち、標高 1,100 m から 1,200 m 付近で西南西 - 東北東方向に分布するもの (以下、「A グループ」と呼ぶ)、A グループの直上標高 1,200 m 付近で西南西 - 東北東方向に狭在するザクロ石を含む酸性火山灰の風化物 (又は A グループザクロ石酸性岩の風化物) (以下、B グループと呼ぶ)、及び標高 1,300 m から 1,400 m 付近で西南西 - 東北東方向に分布するもの (以下、「C グループ」と呼ぶ) である。

【A グループ】 青灰白色 - 灰褐色の比較的緻密な岩石。斑晶に石英 (10% ~ 20%, 最大径約 5 mm)、長石 (10% ~ 25%, 最長約 4 mm)、ザクロ石 (約 1%, 最大径約 3 mm) を含み、石基は 60% ~ 65% 程度である。ザクロ石は長石に包有されているものが多い。岩石は比較的西方では空隙が少なく密であるが、東方では空隙が多い。空隙部分には褐色の微細粉状又は膜状物質を伴っている。

【B グループ】 灰白色 ~ 茶褐色の土質層。層厚約 2 m。A グループと同程度の石英 (最大径約 4 mm) 及びザクロ石 (最大径約 3 mm) を含む。ザクロ石は、やや微細な網目状割れ目を有し茶褐色の特徴ある膜状物質を伴っている。火山ガラス状物質及び異質岩片状物質を含む。ザクロ石を含む酸性火山灰の風化物 (又はザクロ石酸性岩の風化物) と見られる。

【C グループ】 青灰色 - 灰褐色の比較的脆い岩石。斑晶に石英 (3% ~ 20%, 最大径約 4 mm)、長石 (3% ~ 20%, 最長約 3 mm)、ザクロ石 (0.1%, 最大径約 3 mm)、及び角閃石 (約 1%, 最長 9 mm) を含み、石基は 65% ~ 85% 程度である。A グループに比べてザクロ石含有量は少ない。角閃石は著しく風化又は溶融し原型の確認が困難なものも多い。空隙部分には褐色の微細粉状又は膜状物質を伴っている。石英は割れ目が少なく比較的新鮮な印象を与えるもの、また融食縁を有するものもある。貫入岩と見られる。

【化学組成】 現在、蛍光 X 線全岩分析の解釈を行っているところである。A, B, C, 各グループの SiO<sub>2</sub> 値は 72wt% ~ 76wt% の範囲にあり、アルカリ - SiO<sub>2</sub> ダイアグラム (Le Bas, et al., 1986) に対比するとこれらは流紋岩相当の岩石であると見られる。また、丹沢細川谷ザクロ石流紋岩 (山下, 1997) に比べて Na<sub>2</sub>O 値がやや高く、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 値はやや低い。

【考察】 ザクロ石酸性岩から成る三つの岩石グループが想定出来る。即ち、A グループ; 西南西 - 東北東方向に約 2 km 連続した最大幅約 100 m の下部帯状岩体 (溶岩流の可能性もある)、B グループ; A グループの直上に狭在するザクロ石を含む酸性火山灰の風化物 (又は A グループザクロ石酸性岩の風化物)、C グループ; 西南西 - 東北東方向に約 3 km 連続した最大幅約 80 m の上部帯状岩体 (貫入岩) である。これらは流紋岩と見られる。

キーワード: ザクロ石, 石英, 長石, 流紋岩, 毛無山, 富士河口湖町

Keywords: garnet, quartz, feldspar, rhyolite, Mt. Kenashi-yama, Fujikawaguchiko-machi

ロシア極東, ウスチベラヤ. オフィオライトの2つのタイプのウェブステライト;  
その起源と意義  
Two types of websterite from the Ust'-Belaya ophiolite, Far East Russia: Origins and  
implications

町澄秋<sup>1\*</sup>; 石渡明<sup>2</sup>; 森下知晃<sup>1</sup>; 早坂康隆<sup>3</sup>; 荒井章司<sup>1</sup>; 田村明弘<sup>1</sup>  
MACHI, Sumiaki<sup>1\*</sup>; ISHIWATARI, Akira<sup>2</sup>; MORISHITA, Tomoaki<sup>1</sup>; HAYASAKA, Yasutaka<sup>3</sup>; ARAI, Shoji<sup>1</sup>; TAMURA,  
Akihiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学理工研究域自然システム学系, <sup>2</sup> 東北大学, 東北アジア研究センター, <sup>3</sup> 広島大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Natural Sci & Tec., Kanazawa Univ., <sup>2</sup>NE Asia Center, Tohoku Univ., <sup>3</sup>Earth & Planet. Sys. Sci., Hiroshima Univ.

The Ust'-Belaya ophiolite is located in the Koryak Mountains, Far East Russia. We report two types of websterite in the mantle section of the ophiolite.

The lithology of the mantle peridotites from the ophiolite is variable from very fertile lherzolite to moderately depleted harzburgite. The mineral chemistry of the very fertile lherzolite shows similar signature to those of the subcontinental peridotite. The two types of websterite (type1 and type2) occur in them as dikes/veins. Type1 is composed of brownish colored cpx, opx and Al-spinel. On the other hand, type2 is composed of green colored cpx, opx and Cr-spinel.

Type2 websterite is similar to those reported from many other ophiolites. Websterites, which are characterized by extremely aluminous spinel similar to the type1 websterite, are never found in ophiolitic peridotites but are described in passive margin peridotites (e.g. Zabargad Island in Red Sea and Iberia Abyssal plain peridotites). These websterites are generally interpreted as high-pressure cumulates and the host peridotites are considered as fragments of subcontinental mantle.

The mantle section of the Ust'-Belaya ophiolite represents, at least partly, fragments of subcontinental mantle. The two types of websterite might be related to two different magmatisms in two different tectonic settings; type1 is formed former subcontinental to oceanic environment and then type2 is formed later oceanic to arc environment.

キーワード: ウスチベラヤ・オフィオライト, ウェブステライト, 大陸下マントル  
Keywords: Ust'-Belaya ophiolite, websterite, subcontinental mantle

## 溶岩中の板状節理の形成メカニズムに関する野外地質学的考察 Field geological considerations on the formation mechanism of platy joints in lava flows

佐藤 景<sup>1\*</sup>; 石渡 明<sup>2</sup>

SATO, Kei<sup>1\*</sup>; ISHIWATARI, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学東北アジア研究センター

<sup>1</sup>Grad. School Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>CNEAS, Tohoku Univ.

Columnar jointing and platy jointing are characteristic types of jointing in volcanic rocks. The origin of columnar joints has been discussed for centuries, and at the present day it is considered that they are the result of cooling and contraction of lava (Aydin and DeGraff, 1988). However, platy joints have far less attracted researchers than columnar joints and their formation mechanism is still controversial. Platy joints can develop in thick (>100 m) and voluminous lava flows which have glassy margins such as "flood andesite" in Kyushu, Japan (Nagao et al., 1995) and ridge-forming lava flows at Mount Rainier (Lescinsky and Sisson, 1998), probably reflecting stress distribution or physical property within solidifying lava. Previous studies attributed formation of platy joints (sheeting joints) to late stage shear of lava flow and/or microlite orientation (Lescinsky and Fink, 2000), deflation of flow (Spörli and Rowland, 2006) or both flowage and shrinkage of lava (Bonnichsen and Kauffman, 1987). Although absolute evidence for the origin of platy jointing has not been found, restraining of internal lava by solidified flow margin would be an important factor in any case and density (volume ratio of crystals to glass) difference between flow margin and interior would be also important when we consider thermal contraction. It is also a problem when platy joints form, especially in the case that columnar and platy joints intersect without terminating each other. Occasionally platy joints are filled with tridymite and/or mica mineral with or without andesitic to dacitic melt, which might be segregated from the crystallizing lava body, suggesting that platy joints start to form at early stage of cooling of lava.

### References:

Aydin and DeGraff, 1988, *Science*, 239, 471-476.

Bonnichsen and Kauffman, 1987, *GSA Special Papers*, 212, 119-145.

Lescinsky and Fink, 2000, *J. Geophys. Res.*, 105, 23711-23726.

Lescinsky and Sisson, 1998, *Geology*, 26, 351-354.

Nagao et al., 1995, *Mem. Geol. Soc. Japan*, 44, 155-164 (in Japanese with English abstract).

Spörli and Rowland, 2006, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 157, 294-310.

Keywords: platy joints, flood andesite, internal flowage, thermal contraction, segregation vein

## モンゴル Tariat Depression 産スピネルレールゾライトゼノリスにおける構成鉱物中の Fe の酸化数:特にかんらん石中の Fe<sup>3+</sup> の意義 Oxidation stats of Fe within constituent minerals in spinel-lherzolite xenolith from Tariat Depression, Mongolia: Signif

江島 輝美<sup>1\*</sup>; 小山内 康人<sup>2</sup>; 大藤 弘明<sup>3</sup>  
EJIMA, Terumi<sup>1\*</sup>; OSANAI, Yasuhito<sup>2</sup>; OHFUJI, Hiroaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 九州大学比較社会文化, <sup>3</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクスセンター  
<sup>1</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>2</sup>Kyushu Univ., <sup>3</sup>Ehime Univ.

モンゴル Tariat 地域は、Baikal-Mongolia rift における深層巨晶ゼノリス (deep-seated megacrystic xenolith) およびマン  
トルゼノリス (mantle-derived xenolith) のもっとも有名な産地の一つである。Tariat 地域では、大規模に噴出した洪水玄武  
岩中にガーネット-ウェブスタライト・ガーネットレールゾライト・スピネルレールゾライトが観察される (Osanai et al.,  
2011)。本研究では、Tariat 地域におけるスピネルレールゾライトの構成鉱物および玄武岩溶岩中のかんらん石における  
Fe の酸化数をメスバウアー分光分析および電子線微小部分分析 (EPMA) 法を用いて定量し、これらの構成鉱物に含まれ  
る Fe<sup>3+</sup> の形成時期について検討した。研究に使用したスピネルレールゾライトゼノリスは、地表における変質や酸化の  
影響を受けていないものを用いた。メスバウアー分光分析に用いた試料の純度は、EPMA、X 線粉末構造解析 (XRD)、ラ  
マン分光分析、透過型電子顕微鏡観察により評価した。

Tariat 地域のレールゾライトゼノリスは、かんらん石 (Fo<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>)、

単斜輝石 [(Na<sub>0.17</sub>Ca<sub>0.71</sub>Mg<sub>0.81</sub>Fe<sub>0.09</sub>Al<sub>0.20</sub>)<sub>2.00</sub>(Si<sub>1.89</sub>Al<sub>0.11</sub>)<sub>2.00</sub>O<sub>6</sub>]、斜方輝石 [(Mg<sub>0.85</sub>Fe<sub>0.09</sub>Al<sub>0.04</sub>Ca<sub>0.02</sub>)(Si<sub>1.89</sub>Al<sub>0.11</sub>)O<sub>3</sub>]  
およびスピネル [(Mg<sub>0.81</sub>Fe<sup>2+</sup><sub>0.22</sub>)<sub>1.03</sub>(Al<sub>1.80</sub>Cr<sub>0.17</sub>)<sub>1.97</sub>O<sub>4</sub>] よりなる。かんらん石、斜方輝石、スピネルは均質である。  
単斜輝石の粒子はリム (1 μm ~ 50 μm 程度) にシンプレクタイトが観察される。この部分は、本体の単斜輝石よりも Na  
および Al 含有量の少ない輝石と長石に近い組成を持つガラスからなる。

メスバウアー分光分析に用いた粉末試料は、玄武岩とゼノリスの接触部分を避けゼノリスの中心部から分離し  
た斑晶を用いた。メスバウアー分光分析の結果、かんらん石、斜方輝石、単斜輝石およびスピネルの Fe<sup>2+</sup>:Fe<sup>3+</sup> の比は、  
97(1):3(1) 85(8):15(1) 74(4):26(3) 66(8):34(5) であった。透過型顕微鏡による観察結果から、かんらん石中の Fe<sup>3+</sup>  
は析出物や不純物によるものではなく、かんらん石の構造中に存在すると結論される。一方、このゼノリスを捕獲して  
いる玄武岩中のかんらん石の Fe は、EPMA 法による Fe の酸化数の定量の結果、すべての Fe が 2 価の鉄であった。マグ  
マ中のかんらん石斑晶が Fe<sup>3+</sup> を含まず、マントルゼノリスの構成鉱物すべてが少量の Fe<sup>3+</sup> を含むという事実は、マグ  
マに取り込まれる以前にスピネルレールゾライトゼノリス中の構成鉱物が Fe<sup>3+</sup> の存在できる環境下に置かれたことを示  
唆する。

今後、他地域のゼノリス及び深さが異なる場所からもたらされたマントルゼノリスの詳細な研究を行うことによ  
って、マントルの酸化還元状態の詳細が明らかになることが期待される。

キーワード: かんらん石, Fe の酸化数, スピネルレールゾライトゼノリス, メスバウアー分光分析, モンゴル  
Keywords: olivine, oxidation state of Fe, spinel-lherzolite xenolith, Mossbauer methods, Mongolia



## 三宅島産灰長石巨晶中に見出された Al/Si 無秩序配列を持つ灰長石結晶：Al/Si 配列に与える不定比性の効果 Al/Si disordered anorthite in anorthite megacryst from Miyake-jima: effect of non-stoichiometry on Al/Si distribution

越後 拓也<sup>1\*</sup>; 星野 美保子<sup>2</sup>; 木股 三善<sup>3</sup>; 清水 雅浩<sup>3</sup>; 松井 智彰<sup>4</sup>; 西田 憲正<sup>5</sup>  
ECHIGO, Takuya<sup>1\*</sup>; HOSHINO, Mihoko<sup>2</sup>; KIMATA, Mitsuyoshi<sup>3</sup>; SHIMIZU, Masahiro<sup>3</sup>; MATSUI, Tomoaki<sup>4</sup>; NISHIDA, Norimasa<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 滋賀大・教育学部, <sup>2</sup> 産総研・鉱物資源研究グループ, <sup>3</sup> 筑波大院・地球進化科学専攻, <sup>4</sup> 鹿児島大・教育学部, <sup>5</sup> 筑波大・研究基盤センター

<sup>1</sup> Faculty of Education, Shiga University, <sup>2</sup> Mineral Resources Research Group, AIST, <sup>3</sup> Earth Evolution Sciences, University of Tsukuba, <sup>4</sup> Faculty of Education, Kagoshima University, <sup>5</sup> Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba

灰長石 (anorthite:  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) の結晶構造は、Megaw et al. (1962) により初めて決定され、堅固なアルミノケイ酸塩フレームワーク構造と、ケージ内に包摂されるカルシウムイオンとで特徴付けられる。純粋な灰長石 (An100) においては、結晶構造中の Al・Si の数が等しいため、四面体席における Al/Si の秩序配列の結果、c 軸長がカリ長石やアルバイトの約 2 倍の  $14\text{\AA}$  前後になる。Al/Si が部分的に無秩序化した灰長石は高温から急冷を受けた結晶において観察されるが (e.g., Megaw 1974, Bruno et al. 1976)、これまでに、Al/Si が完全に無秩序化した灰長石の結晶構造は報告されておらず、アルミニウム排除則 (Al-avoidance rule: Loewenstein 1954) が成立する代表例とされてきた。しかし、高分解能 NMR を用いた先行研究 (Philips et al. 1992) によると、三宅島産ソレライト質玄武岩中に産する灰長石 (An97) には、Al/Si 配列が無秩序化していることを示すブロードなピークが検出されており、少なくとも局所的には、結晶成長後に急冷を受けた火山岩中に Al/Si 無秩序型灰長石が含まれていることが判明している。今回、三宅島産灰長石巨晶を詳細に分析した結果、Al/Si 配列が無秩序化した結晶と、一部秩序化した結晶が共存している組織を発見したので、それらの波長分散型電子線マイクロプローブアナライザ (EPMA-WDS) による定量分析結果、単結晶 X 線回折法による結晶構造解析結果、カソードルミネッセンス分光分析結果などを報告する。

三宅島産灰長石巨晶の実体顕微鏡による観察から、ヘキ開面の発達した部分とガラス光沢を示す透明な部分を摘出し、回転対陰極 X 線源を備えた 4 軸型 X 線回折計 (Rigaku AFC-7R) で回折強度を測定した。結晶構造解析の結果、本研究で得られた灰長石の空間群は P-1 で、c 軸長は約  $7\text{\AA}$  となり、四面体席における Al/Si の配列が完全に無秩序化していることを示す。これは、アルミニウム排除則が成立しない灰長石が天然環境で生成したことを示す初めての例である。また、結晶構造解析に使用した結晶の化学組成を EPMA-WDS を用いて決定したところ、 $(\text{Ca}_{0.93}\text{Na}_{0.03}\text{Mg}_{0.01}\text{Fe}_{0.02}\square_{0.01})(\text{Al}_{1.94}\text{Si}_{2.06})\text{O}_8$  という化学組成式が得られた。化学分析および端成分分解の結果、Al/Si 配列が無秩序化した灰長石結晶は、エキストラフレームワークサイトに空孔を持ち、フレームワークサイトに過剰シリカ成分 ( $\square\text{SiO}_2$  端成分にして 0.8%) を固溶していることが判明した。これまでに報告された Al/Si 無秩序配列をもった  $\text{M}^{2+}\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8$  結晶としては、Lunar anorthite ( $(\text{Ca}_{0.94}\text{Na}_{0.03}\square_{0.03})(\text{Al}_{1.94}\text{Si}_{2.06})\text{O}_8$ ; S.G., P-1,  $c\approx 14\text{\AA}$ ) (Smyth, 1986)、Sr-anorthite ( $(\text{Sr}_{0.84}\text{Na}_{0.03}\square_{0.13}\text{Al}_{1.69}\text{Si}_{2.29})\text{O}_8$ ; S.G., C2/m,  $c\approx 7\text{\AA}$ ) (Grundy and Ito, 1974)、Eu-anorthite ( $(\text{Eu}_{0.96}\square_{0.04}\text{Al}_{1.92}\text{Si}_{2.08})\text{O}_8$ ; S.G., C2/m,  $c\approx 7\text{\AA}$ ) (Kimata, 1988) などがある。これら Al/Si 無秩序型結晶の共通点は、化学組成が Si-rich ( $\text{Si}>2.0$ ) で、エキストラフレームワークサイトに空孔をもつ不定比性 (nonstoichiometric) にある。今回発見された Al/Si 配列が無秩序化した天然灰長石においては、こうした不定比性によってアルミノケイ酸塩フレームワークおよび反位相境界 (anti-phase-boundary) に Si-O-Si 結合が導入された結果、結晶構造が安定化し、Al/Si の無秩序な配列が保存されていると考えられる。

キーワード: 灰長石, Al/Si 秩序-無秩序配列, 灰長石巨晶, 構造不均質性

Keywords: Anorthite, Al/Si order-disorder, Anorthite megacryst, Structural heterogeneity

## 北海道産黒曜石の加熱実験によるパーライトの形成温度と岩石組織 Formation temperature of perlite and its texture by heating experiments of obsidians from Hokkaido

池谷内 諒<sup>1</sup>; 和田 恵治<sup>1\*</sup>; 斉藤 丈朗<sup>1</sup>  
IKEYAUCHI, Ryo<sup>1</sup>; WADA, Keiji<sup>1\*</sup>; SAITO, Takeaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道教育大学旭川校  
<sup>1</sup> Hokkaido University of Education at Asahikawa

黒曜石の多くは流紋岩質でほとんどガラスからなる。黒曜石には急冷によって生成したガラスの中に H<sub>2</sub>O が比較的多く残っているため、黒曜石を高温で熱すると H<sub>2</sub>O が気体となって気泡をつくり、黒曜石全体がパンのように膨らむ現象がおこる。ガラス質で緻密であった黒曜石が軽石に似た形態に「変身」する。このような発泡した黒曜石は「パーライト」と呼ばれる。

今回、北海道産黒曜石（7地域 13カ所）を電気炉中で加熱して発泡させる実験を行い、黒曜石の発泡開始温度を新たに計測した。また黒曜石の水分量をカールフィッシャー電量滴定法により測定した。得られた発泡開始温度と黒曜石の水分量を比較したところ、水分量が多い黒曜石は発泡開始温度が低く、水分量が少ない黒曜石は発泡開始温度が高くなる結果が得られ、発泡開始温度は黒曜石の水分量によってほぼ決定されることが明らかとなった。

白滝産・十勝石沢黒曜石についてパーライトの岩石組織を調べた。このパーライトの発泡形態は発泡時の加熱温度によって異なることが観察された。発泡開始温度とほぼ同等の 1030℃で発泡させたパーライトは、個々の気泡サイズが大きいのに対し、それよりも高温である 1100℃で発泡させたパーライトは気泡サイズが小さく数密度が大きい。さらに温度を上げて 1200℃で発泡させたものは気泡サイズが小さいことに加え、逆に発泡倍率（パーライトの体積/黒曜石の体積）が小さくなった。1030℃発泡と 1100℃発泡ではどちらもほとんど隙間なく気泡が密に存在するが、1200℃発泡では気泡と気泡の間にパーライトの固体部分が多く存在して隙間をつくっており、気泡部分が占める体積の割合が小さいために発泡倍率が小さくなる。

低温発泡の場合はガラスの粘度がまだ大きいために、発生した気泡はすぐには脱ガスせず、ゆっくりと時間をかけて気泡が成長・移動して気泡同士が接触するため連結が起こって次第に気泡が大きくなり成長していくと考えられる。高温発泡の場合は、ガラスの粘度が小さいので、発生した気泡は比較的すばやく移動することができる。そのため、先に発生した気泡はすでに脱ガスしたため、気泡が密集することはない、連結も起こらない。したがって、気泡のサイズは小さいままとなる。以上のように、ガラスの粘度の大きさが気泡の移動速度に影響し、気泡の連結の頻度が異なることによって、発泡形態に違いが生じると考えられる。

キーワード: 黒曜石, 加熱実験, パーライト, 発泡, ガラス  
Keywords: obsidian, heating experiment, perlite, vesiculation, glass

## Cs補正走査透過電子顕微鏡によるオリビンにおけるMg-Fe結晶内分配係数の推定の試み Estimation of intracrystalline distribution coefficient of Mg-Fe ions in olivine using Cs-corrected STEM

三宅 亮<sup>1\*</sup>; 藤 昇一<sup>2</sup>; 福永 啓一<sup>3</sup>; 栗林 貴弘<sup>4</sup>  
MIYAKE, Akira<sup>1\*</sup>; TOH, Shoichi<sup>2</sup>; FUKUNAGA, Keiichi<sup>3</sup>; KURIBAYASHI, Takahiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup>京大・理, <sup>2</sup>福岡大・理, <sup>3</sup>ファインセラミックスセンター, <sup>4</sup>東北大・理  
<sup>1</sup>Kyoto Univ., Sci., <sup>2</sup>Fukuoka Univ., Sci., <sup>3</sup>JFCC, <sup>4</sup>Tohoku Univ., Sci.

主要な造岩鉱物であるオリビン ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ) は、結晶学的に非等価な M1, M2 席を有する。M1, M2 席への Mg と Fe との分配 (結晶内分配係数) について、古くから X 線や中性子を用いた構造解析やメスバウアー法を用いて推定されている。しかし、Fe が M2 席に多く入る結果と M1 席に多く入るといった結果が混在し、またこうした結晶内分配係数は加熱温度や冷却実験により異なることが知られている。一方近年では、球面収差補正走査型透過電子顕微鏡 (Cs-STEM) と円環状の検出器により原子カラム像の観察が可能となり、高角度散乱暗視野法 (HAADF) では、像強度は原子番号のほぼ二乗に比例することが知られている。そこで本研究では、化学組成の異なる合成のフォルステライト (Mg 端成分)、San Carlos 産、Sri Lanka 産、三宅島産のオリビンを、それぞれ a 軸方向からの HAADF-STEM 観察を行い、M1, M2 サイトごとの輝度の比較を行い、Mg/Fe 結晶内分配係数の推定を試みた。また、同時に四軸 X 線構造解析を行い、結晶内分配係数の比較を行った。その結果 HAADF-STEM によりオリビンの原子カラム像を取得することができた。さらに、それぞれの席での輝度を得ることにより、結晶内分配係数の推定することができた。合成フォルステライトのサイト間の輝度には差が見られず、端成分である結果と一致した。また、それぞれの結晶内分配係数については、San Carlos 産、Sri Lanka 産試料は、X 線構造解析の結果と良い一致を示した。一方、三宅島産の試料については差異が見られた。この理由については今後の検討課題である。

キーワード: 走査型透過電子顕微鏡, カンラン石, 結晶内分配係数  
Keywords: STEM, olivine, intracrystalline distribution coefficient

## 統計的ラマン分光法による採掘鉱物資源粒子の新規分類法 A Novel Approach for the Classification of Mineral Ore Particles by A Statistical Raman Spectroscopic Method

笹倉 大督<sup>1\*</sup>; 早内 愛子<sup>1</sup>  
SASAKURA, Daisuke<sup>1\*</sup>; HAYAUCHI, Aiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> マルバーン事業部 (スペクトリス株式会社)

<sup>1</sup> Malvern Instruments Division of Spectris Japan

### [Introduction]

Mineral ores extracted by mining go through a milling process before ore dressing. An important factor in both milling and ore dressing operations is the determination of the particle size distribution of the materials being processed, commonly referred to as particle size analysis. An elemental analysis technique such as X-Ray fluorescence and destructive wet chemical analysis can determine the quantity of mineral species present in the ore, however, these chemical analysis methods do not allow the study of the composition of individual particles of different size and shape. The statistical Raman spectroscopic method is a novel approach which can resolve this problem. Using this method the Raman spectra of several hundred particles is determined after size and shape classification of each individual particle by automated particle image analysis. Raman spectroscopy can be used to acquire the spectra of any inorganic compounds such as metal oxides and nitrides which are Raman active. Many mineral resources are mined as inorganic compounds. Therefore, Raman spectroscopy can be used for the identification of the chemical composition of mineral ores. Using the statistical Raman spectroscopic method described herein, it is possible to calculate the particle size distribution and proportion by mass or volume of each chemical component or mineral species based on Raman spectroscopic information. This study will report and discuss the capability of the statistical Raman spectroscopic method using iron ore as a model material.

### [Material and Method]

Iron ore samples were purchased from a vendor. These samples had been through the ore dressing process. Statistical Raman analysis was carried out using a Morphologi G3SE-ID instrument (Malvern Instruments, UK) equipped with a dry powder sample dispersion unit (SDU) and Raman module. The laser wavelength of Raman excitation was 785nm the laser power was less than 5mW and the irradiation time was 5 sec. The particle image measurements were made in diascopic mode with a total magnification 250x. Iron ore dry powder samples were dispersed using the SDU using a short duration pulse of compressed air. Measurements were made automatically using Standard Operating Procedures (SOPs) which define the software and hardware settings used. Measurement sample was dispersed on to glass plate as sample carrier which was minimized environmental exposure by the enclosed sample chamber unit. Particle identification by Raman analysis used the spectrum correlation coefficient approach.

### [Results and Discussion]

A Total of 66,436 particles of iron ore were measured by image analysis. The circle equivalent diameter particle size distribution by volume (VCED) exhibited a monomodal distribution with size distribution percentiles as follows: 8.62 $\mu\text{m}$  (d10), 21.83 $\mu\text{m}$  (d50), 51.29 $\mu\text{m}$  (d90). A subset of 700 particles were selected and the Raman spectra were measured. Particles over 20 micron in size were selected randomly from the image analysis data and Raman spectra were acquired. The spectra enabled identification of 4 components (Fig.1). The relative proportion of each component by volume or number of particles is shown in Table 1. Component (A) comprised approximately 90% of the sample. This component exhibited a Raman spectrum typical of  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  [1]. It is assumed that components (B) and (C) are polymorphs based on the ratio of the intensities at 221 $\text{cm}^{-1}$  and 245 $\text{cm}^{-1}$ . Component (D) exhibited a spectrum typical of  $\alpha\text{-FeOOH}$  and composed less than 3% of the sample. This result does show that the statistical Raman analysis approach can detect components present at quite low concentrations.

### [Summary]

This report illustrated the application and capability of statistical Raman analysis for the characterization of mineral ores using a new approach based on combining chemical and particle size / shape information.



SCG61-11

会場:311

時間:5月2日 11:45-12:00

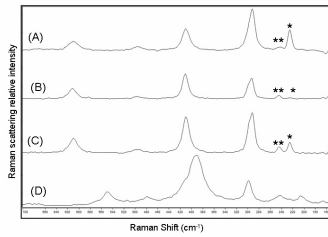


Fig 1. Raman Spectrums of iron ore.  
 (\* : 221cm<sup>-1</sup>, \*\* : 245cm<sup>-1</sup>)

Table 1  
 Ratio of each component based on Raman spectrum

Component	Number (%)	Volume(%)
A	87.6	90.2
B	2.5	2.1
C	7.2	6.3
D	2.7	1.4

## Assessment of Nakhile porphyry Cu mineralization potential using geological, geochemical and statistical studies: a case Assessment of Nakhile porphyry Cu mineralization potential using geological, geochemical and statistical studies: a case

Boomeri Mohammad<sup>1\*</sup>; 中島 和夫<sup>2</sup>; F Yavari<sup>1</sup>  
BOOMERI, Mohammad<sup>1\*</sup>; NAKASHIMA, Kazuo<sup>2</sup>; F, Yavari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. of Sistan and Baluchestan, <sup>2</sup>Yamagata Univ.

<sup>1</sup>Univ. of Sistan and Baluchestan, <sup>2</sup>Yamagata Univ.

The Nakhile Cu mineralization is located in 145 km northwest of Zahedan in Sistan and Baluchestan province of Iran. This area is geologically located in boundary part of Lut block and flysch zone of east Iran. Geology of the study area consists of Cretaceous to Eocene andesitic lavas and tuffs that were intruded by a dioritic to quartz-dioritic stock. The intrusive rocks are mainly altered and mineralized. Based on the petrography and XRD studies, main mineral in all types of the igneous rocks is plagioclase and the main texture is porphyry. Other minerals are clinopyroxene, amphibole, biotite, quartz, and secondary minerals that vary in the igneous rocks. A large part of the intrusive rocks is rich in pyrite. The pyrite occurs as veins, veinlets and disseminated in the stock. Cu mineralization occurs as vein and can be divided into hypogene and supergene mineralization. Hypogene mineralization is characterized by chalcopyrite and pyrite while supergene mineralization is characterized by malachite, azurite, jarosite, gothite, hematite and limonite. The propylitic alteration is dominant feature of the intrusive rocks as a wide outer zone. Potassic, phyllic and argillic alterations are also important in the area. The potassic alteration is probably important in the center part of the stock in depth. phyllic and argillic alterations are mainly formed by supergene processes.

The samples that were collected from the least altered and altered rocks in the study area were analyzed by ICP were processed by convenient software such as EXCEL and SPSS to obtain statistic parameters of: skewness, maximum, minimum and standard deviation. Then, the histograms for the amount of Cu, Au and related elements were drawn and their correlation coefficients were calculated. There are remarkable positive correlations between Cu, Au and Ag indicating their similar origin. The highest content of Cu is 7000 ppm in the study samples. The Cu anomalies are mainly observed in central and eastern parts of the area. The highest content of Au is 6000 ppb. The Au anomalies are mainly observed in western parts of the area. The higher contents of Pb, Zn and Ag are observed more away from the intrusive rocks.

The outcrops in the area are mainly similar as propylitic alteration zone of porphyry Cu deposits that is characterized by secondary hydrothermal epidote and chlorite and pyrite. The Cu porphyry mineralization and other alteration zones specially potassic probably occur in depth in the area.

## 新潟-山形県境, 金丸小国地域の HFS 元素に富む優白質花崗岩 A leucogranite stock rich in high field strength elements, Kanamaru-Oguni area on the Niigata-Yamagata border, NE Japan

亀井 淳志<sup>1\*</sup>; 内藤 一樹<sup>2</sup>; 高村 早弥香<sup>3</sup>; 加々島 慎一<sup>4</sup>; 奥澤 康一<sup>5</sup>; 関 陽児<sup>6</sup>; 渡部 芳夫<sup>2</sup>

KAMEI, Atsushi<sup>1\*</sup>; NAITO, Kazuki<sup>2</sup>; TAKAMURA, Sayaka<sup>3</sup>; KAGASHIMA, Shin-ichi<sup>4</sup>; OKUZAWA, Koichi<sup>5</sup>; SEKI, Yoji<sup>6</sup>; WATANABE, Yoshio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所地質調査総合センター, <sup>3</sup> リコー・ジャパン, <sup>4</sup> 山形大学理学部地球環境学科, <sup>5</sup> 大林組技術研究所, <sup>6</sup> 東京理科大学理工学部

<sup>1</sup>Department of Geoscience, Shimane University, <sup>2</sup>Geological Survey of Japan/ AIST, <sup>3</sup>Ricoh Japan Corporation, <sup>4</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Yamagata University, <sup>5</sup>Technical Research Institute, Obayashi Corporation, <sup>6</sup>Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

A small stock of leucocratic Grt-two mica granite enriched in high field strength elements (HFSEs) has recently been found in the Kanamaru-Oguni district of the Asahi-Iide mountains in the Ashio Belt of the NE Japan arc. The granite has a high-K peraluminous composition, and is categorized as an A-type within-plate granitoid, according to several geochemical discriminants based on HFSEs. However, total Zr+Nb+Ce+Y contents are lower (166-192 ppm) and Rb/Ba ratios are higher (19-48) than those typical of A-type granitoids (Zr+Nb+Ce+Y >350, Rb/Ba <10). This suggests that this stock is in fact a highly fractionated granite, rather than an A-type intrusive. The stock solidified at shallow depth (about 3 - 6 km) from a silicic granitic magma, under moderately water-rich conditions. Geochemical modeling shows that the petrogenesis of the granite can be explained by partial melting of crustal rocks, leaving abundant plagioclase as a residual phase, with subsequent active fractional crystallization of plagioclase + alkali-feldspar. Many other small stocks composed of Grt-two mica granite occur in the Asahi and Iide mountains. The granitic activity ranges from Late Cretaceous (ca 90 Ma) to Paleogene in age. Although most of these stocks were derived from melting of various crustal rocks, some are highly differentiated, and have HFSE concentrations similar to the Kanamaru-Oguni stock studied here.

HFSE-rich granitoids also occur sporadically within the other Japanese geological units, but they are restricted in the southwestern Japan. The granitoids in the Inner and Outer Zones of SW Japan differ in composition. The HFSE-rich granitoids in the Inner Zone originated from middle to lower crustal materials, and were then strongly differentiated before emplacement. This is similar genesis to the granite in the Kanamaru-Oguni district. In contrast, the solitary HFSE-rich granitoid in the Outer Zone crops out at Cape Ashizuri. This occurrence is the only classic A-type intrusion in Japan, and is considered to have formed by a low degree of partial melting of the upper mantle or mafic lower crust. Although the HFSE-rich granitoids within the SW Japan arc may be similar geochemically to within-plate or ocean-ridge granites, they are in fact volcanic arc granites produced within the subduction zone by specific activities.

キーワード: 花崗岩, HFS 元素, 新潟-山形, 東北日本弧

Keywords: Granite, HFS elements, Niigata-Yamagata, NE Japan

## 北部九州，深江花崗岩北波多岩体の希土類元素組成 Rare earth element compositions of the Kitahata body in the Fukae granite, northern part of Kyushu

川野 良信<sup>1\*</sup>  
KAWANO, Yoshinobu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 立正大学地球環境科学部環境システム学科

<sup>1</sup> Department of Environment Systems, Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

九州北部には白亜紀に活動した花崗岩類が広く分布しており（唐木田，1985），佐賀県唐津市北波多にもその一部である深江花崗岩が分布している．北波多に分布する深江花崗岩（以下，北波多岩体と呼ぶ）には部分的にアプライト様の岩相や珪長質包有物が認められる．珪長質包有物は直径 50 cm ほどのプール状の楕円形を示し，周囲の花崗岩と漸移関係を示している．北波多岩体の主要構成鉱物は石英，カリ長石，斜長石，黒雲母で，副成分鉱物として燐灰石，ジルコン，不透明鉱物を伴う（川野，2013）．北波多岩体の黒雲母 K-Ar 年代は  $95.8 \pm 2.4$  Ma を示す（北波多村村史編纂委員会，2008）．北部九州に分布する花崗岩類の年代は 90 Ma から 100 Ma に集中することが知られており（唐木田ほか，1992），本岩体の黒雲母 K-Ar 年代はその範囲内に入る．

川野（2013）は，全岩化学分析の検討から，北波多岩体中に見られる珪長質包有物が岩体を形成したマグマの残液が濃集したものと推定した．今回，北波多岩体 7 試料，珪長質包有物 1 試料，アプライト 2 試料の計 10 試料について希土類元素組成を求め，川野（2013）の推定結果との比較を行った．

コンドライトで規格化した希土類元素のパターンでは，軽希土の値は北波多岩体が最も高く，次いでアプライト，珪長質包有物の順に低くなる．また，規格化した La/Lu 比は北波多岩体で最も高く，珪長質包有物，アプライトの順に低くなる．さらに，北波多岩体と珪長質包有物には Eu の負異常は認められないものの，アプライトには明瞭にそれが認められる．すなわち，Eu/Eu\* 比はアプライトが最も低く，北波多岩体と珪長質包有物は同程度の値を示す．

北波多岩体，珪長質包有物，アプライトの順に SiO<sub>2</sub> 量は増加し，アプライトは花崗岩に比べ分化が進んでいると考えられる．通常，同一マグマからの分化した場合，分化が進むにつれ軽希土の値は大きくなる．しかしながら，SiO<sub>2</sub> に富むアプライトや珪長質包有物の軽希土の値は SiO<sub>2</sub> の乏しい北波多岩体よりも低く，同一マグマからの分化では説明が困難である．また，分化が進行すれば La/Lu 比も大きくなると考えられるが，同比が最も大きいのは北波多岩体であり，アプライトが最も小さい．このこともこれらの岩石が同一マグマ起源ではないことを示している．Eu の負異常や低 Eu/Eu\* 比から，アプライトは斜長石の分別を行ったと推定されるが，軽希土の濃度や La/Lu 比の特徴から，北波多岩体を形成したマグマからアプライトが導き出されたとは考えられず，異なるマグマからの分化物と考えられる．北波多岩体のアルミナ飽和度は 1.0 よりも大きいのが，珪長質包有物のそれは 0.9 以下でメタアルミナスの性質を示す．このことから，マグマに取り込まれた堆積岩が融解したとは考えられず，異なる起源を持つ珪長質マグマを取り込んだのかもしれない．

キーワード: 九州, 深江花崗岩, 北波多, 希土類元素組成

Keywords: Kyushu, Fukae granite, Kitahata, rare earth element



## 西南日本内帯・因美侵入岩類の花崗岩類の記載岩石学的・地球化学的研究 Petrographic and geochemical studies of granitoids from the Inbi intrusives, Inner Zone of Southwest Japan

佐藤 桂<sup>1\*</sup>; 亀井 淳志<sup>2</sup>; 南 雅代<sup>1</sup>; 浅原 良浩<sup>3</sup>; 加藤 丈典<sup>1</sup>  
SATO, Kei<sup>1\*</sup>; KAMEI, Atsushi<sup>2</sup>; MINAMI, Masayo<sup>1</sup>; ASAHARA, Yoshihiro<sup>3</sup>; KATO, Takenori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学年代測定総合研究センター, <sup>2</sup>島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域, <sup>3</sup>名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

<sup>1</sup>Center for Chronological Research, Nagoya University, <sup>2</sup>Department of Geoscience, Shimane University, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

We report a data set of whole rock compositions of seven granitoids from the early Paleogene Inbi intrusives and a granitoid from the mid Paleogene Namariyama intrusives, Inner Zone of Southwest Japan. The Inner Zone where voluminous granitic plutons occur is subdivided from the north to the south into three areas in terms of mineralogical and petrological characteristics of granitoids: the San-in Belt, the San-yo Belt, and the Ryoke Belt. The examined Paleogene intrusives, which belong to the San-in Belt, show volcano-plutonic association on the eastern side of younger Daisen volcano at the southern part of Tottori Prefecture and the northern part of Okayama Prefecture [e.g. 1-5].

Seven early Paleogene granitoids were collected from three plutons of the Inbi intrusives: Tottori granite, Ningyo Toge granite, and Sangenya granite [4]. Minerals in polished thin sections were first described under microscope. All of the granitoids from the Inbi intrusives contain quartz, feldspars, biotite and iron oxide. Most of them except for Tottori granite contain amphibole. Sphene is found as accessory mineral in some thin sections.

Each mixture of lithium tetraborate and powdered rock was put into a platinum crucible, and then ignited in a furnace at 1000 degree-C and cooled for preparing a glass bead. And then, major and trace elements were measured using XRF analyzer. To prepare sample solutions for measuring trace elements including REEs, the powdered rocks were first digested in a PTFE beaker with HF/HClO<sub>4</sub> mixture on a hotplate at 120-140 degree-C, and then residue probably including heavy minerals such as zircon was dissolved in sealed high-pressure container with HF/HCl mixture at 180 degree-C. The first step decomposed fraction and residual one were well-mixed, and then this mixture was split into two aliquots: one was separated from other elements using a quartz column filled with cation exchange resin for measuring REEs, and the other aliquot was for analysis of trace elements except for REEs. These solutions were analyzed using ICP-MS.

Chemical analyses for whole rock compositions of seven Inbi granitoids yielded the following results. Molecular Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) values are given as I-type with a range from 0.96 to 1.10. Relationship of Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O vs. total FeO vs. MgO shows calc-alkaline series on AFM diagram. SiO<sub>2</sub> content ranges from 65.7 wt% to 73.4 wt%, and relationship between Si and other major elements gives clear differentiation trend on Harker variation diagrams. Five samples of the granitoids are categorized as high-K series. Many granitoids in this area suffer weathering. The resulting in weathering yields a decrease of CaO (from 2.5 wt% to 1.7 wt%) and Na<sub>2</sub>O (from 4.1 wt% to 3.6 wt%) for Ningyo Toge granites. Whereas Sangenya and Ningyo Toge granites contain about 200 to 360 ppm Sr, Tottori granite contains only 90 ppm Sr. The values of Ti normalized by the mean MORB composition [6] against seven granitoids yield a trend of depletion in Ti. Those of REEs normalized by the MORB composition are given as enriched LREE pattern, negative Eu anomaly, and relatively flat MREE and HREE patterns. All of these normalized patterns have characteristics as volcanic arc granites [e.g. 7].

### References:

[1] Shibata, H. and Saruyama (1959) Paper. ITSUR, Okayama Univ., 25, 1-12 (in Japanese with English abstract); [2] Shibata, K. and Yamada (1965) Bull. Geol. Surv. Japan, 16, 437-442; [3] Kawano and Ueda (1966) Jour. Mineral. Petrol. Econom. Geol., 56, 191-211 (in Japanese with English abstract); [4] Sasada et al. (1979) Memoir. Geol. Soc. Japan, 17, 19-34 (in Japanese with English abstract); [5] Shibata, K. (1979) Memoir. Geol. Soc. Japan, 17, 69-72 (in Japanese with English abstract); [6] Albarede (2005) Geophys. Monogr. R.D. van der Hilst, J. Bass, J. Matas and J. Trampert. Washington D.C., Amer. Geophys. Union, 160, 27-46; [7] Imaoka et al. (2011) Jour. Asian Earth Sci., 40, 509-533.

キーワード: 花崗岩類, 山陰帯, 蛍光X線分析, ICP質量分析, 微量元素, 希土類元素  
Keywords: granitoid, San-in Belt, XRF, ICP-MS, trace element, REE

御斎所変成岩中に露出する超苦鉄質岩の岩石学：御斎所変成岩は沈み込み帯域オフィオライトか？  
Petrology of ultramafic rocks in the Gosaisho series, northeastern Japan: Is the Gosaisho series the SSZ ophiolite?

佐藤 勇輝<sup>1\*</sup>; 石渡 明<sup>2</sup>  
SATO, Yuki<sup>1\*</sup>; ISHIWATARI, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東北大学東北アジア研究センター  
<sup>1</sup>Dept. Earth Sci., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Center for NE Asian Studies, Tohoku Univ.

阿武隈高原は東北日本の太平洋岸に沿って伸びる南北約 180km, 東西約 50km の隆起準平原であり, 主に白亜紀花崗岩類と広域変成岩によって特徴づけられる。阿武隈高原の中部に位置する御斎所一竹貫地域では, 西部の竹貫変成岩の構造的上位に東部の御斎所変成岩が載るとされている(梅村, 1979 など)。御斎所変成岩は主に苦鉄質岩と珪質岩に由来し, 竹貫変成岩は主に泥質岩を起源とする。御斎所変成岩中には, 竹貫変成岩との境界に沿って多数の小規模超苦鉄質岩体が散在している。阿武隈高原の変成岩については 19 世紀から現在まで詳細な研究が行われているが, 超苦鉄質岩についてはその限りではなかった。

御斎所一竹貫地域の超苦鉄質岩は白亜紀花崗岩類による接触変成作用を少なからず受けているものの, 全岩化学組成から原岩はマントルかんらん岩と超苦鉄質集積岩であると考えられる。超苦鉄質集積岩は変斑れい岩を伴うことがある。超苦鉄質岩体のひとつである大辻山では, 山麓部がマントルかんらん岩からなり, 集積岩が中腹から山頂を占める。これは, 本地域の超苦鉄質岩体がオフィオライトの下部の断片であることを示唆する。また, 本地域ではコートランド岩が斑れい岩を伴って産することがある。コートランド岩は主に花崗岩体中に産し, その多くは白亜紀花崗岩類の活動に伴って露出したものと考えられる。

かんらん岩の全岩組成は Ca や Al に乏しく ( $\text{CaO} < 0.6 \text{ wt. } \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.6 \text{ wt. } \%$ ), 枯渇度の高いマントルかんらん岩であると考えられる。一方で, マントルの枯渇度を反映するとされるかんらん岩中のスピネルの Cr# は場所によって 14 - 87 という幅広い値を示し, 枯渇度に差があることを示唆する。またスピネルは Ti に乏しく ( $\text{TiO}_2 < 0.2 \text{ wt. } \%$ ), マントルかんらん岩が島弧起源であることが示唆される(Arai et al., 2011)。これは, 超苦鉄質集積岩に伴う変斑れい岩の全岩組成が Ca や Al に富み, Ti に乏しい ( $\text{CaO} = 11.6 - 17.0 \text{ wt. } \%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.8 - 18.5 \text{ wt. } \%$ ,  $\text{TiO}_2 = 0.06 - 1.06 \text{ wt. } \%$ ) ことも調和的である。また, 本地域の超苦鉄質集積岩は鉄によく富んでいることも大きな特徴である (up to Fo = 73)。

御斎所変成岩では, 変成チャートからジュラ紀の放散虫化石が発見されている(Hiroi et al., 1987)。また, 変成度の低い苦鉄質変成岩の中には枕状溶岩の構造を保存したものとされる(野原・廣井, 1989)。Hiroi et al. (1998) では, 御斎所変成岩は中央海嶺で形成された海洋地殻を起源とし, それが陸源堆積物起源の竹貫変成岩に衝上したものとされている。しかし, 御斎所変成岩中には母岩とともに変成作用を受けたカルクアルカリ系列の岩脈がしばしば見られることが知られている(Umemura, 1970)。これは超苦鉄質岩が島弧起源とみられることと調和的である。よって, 御斎所変成岩はジュラ紀に竹貫変成岩に衝上した島弧起源の沈み込み帯域オフィオライトである可能性が示唆される。一方で, この超苦鉄質岩が古生代初期の早池峰・宮守オフィオライトと対比される可能性もあり(町田・石渡, 2013 など), 御斎所変成岩中の苦鉄質一超苦鉄質岩のより包括的な研究が求められる。

キーワード: 沈み込み帯域オフィオライト, 超苦鉄質岩, 阿武隈変成岩

Keywords: supra-subduction zone ophiolite, ultramafic rock, Abukuma metamorphic rocks

## 韓国, Goseong 地域の火山岩の実験岩石学 Experimental petrology of Goseong volcanoes, Korea

藤永 希<sup>1\*</sup>; 佐野 貴司<sup>2</sup>  
FUJINAGA, Nozomi<sup>1\*</sup>; SANO, Takashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 立正大学大学院地球環境科学研究科, <sup>2</sup> 国立科学博物館地学研究部

<sup>1</sup>Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University, <sup>2</sup>Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science

Genozoic volcanoes with composition of alkali basalts are widely distributed in Southwest Japan, Korea, and East China. On the basis of geochemical studies, several models to explain magma origin of the alkali basalts were proposed (e.g., upwelling of hot asthenosphere, melting of stagnant slab, and so on). However, little is known about differentiation processes for the alkali basalts based on petrological studies. We therefore performed a series of experimental determinations of melting relation in alkali basalts on Goseong volcanic field, Goseong-do, Korea. Goseong volcanic field consists of seven volcanic plugs, and some of them are accompanied by lava flows. We have carried out petrological studies on alkali basalts from all the seven plugs. The alkali basalts have phenocrysts of olivine and augite and microphenocryst of spinel. Whole rock compositions show that the alkali basalts are relatively primitive ( $\text{FeO/MgO} < 0$  and  $\text{MgO} > 11$  wt %), and mineral chemistry supports this (Forsterite content in olivine  $> 87$ ). The most primitive rock was selected for melting experiments at 1110-1220 °C and 1 bar under the oxygen fugacity along the fayalite-magnetite-quartz buffer. The experimental results show that mineral assemblage (olivine, spinel, and plagioclase) is different from natural one (olivine, spinel, and augite), indicating that crystallization pressures were probably higher than the melting pressure (1 bar). Thus, we will conduct melting experiments at high pressures in future work.

## マダガスカル共和国中央東部アンタナナリボ岩体アンバートフツ地域に産するザクロ石-珪線石片麻岩の温度圧力経路 Metamorphic evolution of garnet-sillimanite gneiss from Ambatofotsy region, Antananarivo domain, east-central Madagascar

市来 孝志<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>1</sup>  
ICHIKI, Takashi<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学 環境情報  
<sup>1</sup>Yokohama National University

マダガスカル共和国は東-西 Gondwana 大陸の衝突縫合帯である東アフリカ-南極造山帯の中央部に位置していると考えられている (e.g. Jacobs and Thomas, 2004). そのため造山帯の形成プロセスを理解する上で重要な地域の一つである. 本研究ではマダガスカル共和国中央東部アンタナナリボ岩体東部アンバートフツ地域に産するザクロ石-珪線石片麻岩中のザクロ石から藍晶石+十字石+白雲母+ルチルの鉱物組み合わせを初めて見いだしたのでその産状を報告するとともに、各種地質温度圧力計とシュードセクション法による結果から変成温度圧力経路を議論する.

アンタナナリボ岩体は主に珪長質変成岩から構成され、少量の変成堆積岩を含む (Tucker et al., 2012). ザクロ石-珪線石片麻岩は岩体東部に産しており、周囲には磁鉄鉱-斜方輝石-石英片麻岩 (変成縞状鉄鉱), ザクロ石-斜方輝石岩, ザクロ石-角閃石-黒雲母片麻岩などが産する. ザクロ石-珪線石片麻岩は主にザクロ石, 珪線石, カリ長石, 斜長石, 石英から構成され、少量の黒雲母, 白雲母, モナズ石, ジルコン, ルチル, 石墨を含む. 珪線石はマトリクスおよびザクロ石の包有物として見られ、藍晶石はザクロ石の包有物としてのみ見られる. またザクロ石 ( $X_{Mg} = 0.17-0.18$ ) 中にはスピネルが包有されており、また石英の包有物を大量に含み、モナズ石が濃集しているのが特徴である. このスピネルは Mg に乏しく ( $X_{Mg} = 0.21-0.22$ ), Zn に富む (ZnO = 18.4-19.0 wt.%). さらにザクロ石中から藍晶石+十字石+白雲母+ルチルの包有物が今回初めて見つかった. この十字石は Mg に乏しく ( $X_{Mg} = 0.12$ ), Zn に富む (ZnO = 3.1 wt.%). ザクロ石の一部は黒雲母 ( $X_{Mg} = 0.58$ ) と珪線石に置き換わっており、放射状の集合体として見られる.

これらの岩石記載の結果、ザクロ石-珪線石片麻岩の変成条件は十字石+石英の安定領域から、温度上昇によりザクロ石+藍晶石の安定領域へ進んだものと考えられる (Spear and Cheney, 1989). さらにピーク時にはザクロ石+珪線石+スピネル+石英が安定な鉱物組み合わせであったと考えられる. そこでザクロ石-珪線石-斜長石-石英地質圧力計 (Spear, 1993), ザクロ石-珪線石-スピネル-石英地質温度圧力計 (Nichols et al., 1992) とザクロ石の活動度 (Berman, 1990) を用いて変成温度圧力条件を見積もると、温度約 800 °C, 圧力 0.9 GPa が見積もられる. ザクロ石の周囲にしばしば放射状の黒雲母と珪線石が見られる. これはザクロ石を置き換えてこれらの鉱物が生成する加水反応 (Le Breton and Thompson, 1988) であり、ザクロ石+カリ長石+水から低温で安定な黒雲母+珪線石+石英の鉱物組み合わせに変化したものと考えられる. この後退変成作用の温度圧力条件はザクロ石-角閃石-黒雲母片麻岩の見積もりとほぼ一致する. この岩石についてザクロ石-角閃石地質温度計 (Graham and Powell, 1984), 角閃石-斜長石地質温度計 (Holland and Blundy, 1994), ザクロ石-角閃石-斜長石-石英地質圧力計 (Kohn and Spear, 1990) を用いた結果、温度約 700 °C, 圧力 0.6 GPa の変成条件が見積もられる.

以上のことから、アンタナナリボ岩体東部アンバートフツ地域に産するザクロ石-珪線石片麻岩は十字石+石英の安定な高圧条件から、昇温期変成作用を経て温度約 800 °C, 圧力 0.9 GPa のピーク変成条件を経て、後退変成作用を経て温度約 700 °C, 圧力 0.6 GPa まで温度低下と圧力減少を経る時計回りの変成経路を経たと考えられる.

キーワード: Gondwana 超大陸, マダガスカル中央東部, アンタナナリボ岩体, ザクロ石-珪線石片麻岩, 時計回りの変成経路  
Keywords: Gondwana supercontinent, east-central Madagascar, Antananarivo domain, Garnet-sillimanite gneiss, Clockwise P-T path



## Gondwana大陸衝突帯にみられるざくろ石単斜輝石岩の比較 Petrogenesis of garnet-clinopyroxene rocks from the Gondwana collisional orogeny

高村 悠介<sup>1\*</sup>; 角替 敏昭<sup>1</sup>; 飯沼 美奈子<sup>1</sup>; 小泉 達也<sup>1</sup>; SANTOSH M.<sup>2</sup>; MALAVIARACHCHI Sanjeeva<sup>3</sup>  
TAKAMURA, Yusuke<sup>1\*</sup>; TSUNOGAE, Toshiaki<sup>1</sup>; IINUMA, Minako<sup>1</sup>; KOIZUMI, Tatsuya<sup>1</sup>; SANTOSH, M.<sup>2</sup>; MALAVIARACHCHI,  
Sanjeeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大・地球, <sup>2</sup> 中国地質大学, <sup>3</sup> ペラデニヤ大学

<sup>1</sup>Univ. Tsukuba, <sup>2</sup>China University of Geosciences Beijing, <sup>3</sup>Univ. Peradeniya

東アフリカ-南極造山帯は、原生代最末期の Gondwana大陸集合時の海洋の閉塞に伴って形成された造山帯である。特にマダガスカル、インド、スリランカ地域には、モザンビーク海の海洋プレートの沈み込み→付加→最後の大陸衝突によって形成された縫合帯 (Palghat-Cauvery Suture Zone など) がみられる。この縫合帯の主な岩相は、酸性-中性の正片麻岩、苦鉄質グラニュライト/角閃岩、泥質グラニュライト、珪岩/縞状鉄鉱層、苦鉄質-超苦鉄質複合岩体 (オフィオライト) などであるが、縫合帯の外側の岩体 (主に高度変成作用を受けた正片麻岩および準片麻岩からなる) との大きな違いは、断片状に産出するオフィオライト岩体および変ハンレイ岩体などの苦鉄質-超苦鉄質岩体の存在である。この中で後者の変ハンレイ岩体は主に粗粒のざくろ石、単斜輝石からなり、微量の斜長石、石英、斜方輝石、チタン鉄鉱などから構成されているエクロジャイト的な岩石である (ただし、全岩の Na 含有量が少ないため、単斜輝石はオンファス輝石ではなく普通輝石あるいはディオプサイド-ヘデンバージャイトである)。この変ハンレイ岩 (ざくろ石単斜輝石岩) は、南インド・Palghat-Cauvery 縫合帯 (Nishimiya et al., 2008; Sajeev et al., 2009; Saitoh et al., 2011)、スリランカ・ハイランド岩体 (Osanai et al., 2006)、東南極リュツォ・ホルム岩体 (Saitoh et al., 2012) の限られた地域からのみ報告されている。これらざくろ石単斜輝石岩は様々な年代の海洋プレートの断片と考えられるため、その原岩および変成作用の広域的な比較は、Gondwana大陸集合時の海洋の閉塞や最終的な大陸衝突のテクトニクスを考察する上で重要である。本研究では、特にスリランカ・ハイランド岩体から新たに得られたざくろ石単斜輝石岩の岩石学的な特徴および変成温度圧力条件について報告する。

キャンディー周辺のハイランド岩体から採集したざくろ石単斜輝石岩は、変堆積岩中に 1 m 程度のブロックとして産出する。地球化学的判別図から、原岩は MORB 的な岩石である。鉱物組み合わせは、ざくろ石+単斜輝石+斜方輝石+チタン鉄鉱+普通角閃石+斜長石 (岩相 1)、ざくろ石+斜長石+単斜輝石+斜方輝石+石英+チタン鉄鉱である (岩相 2)。岩相 2 には、ざくろ石+石英→斜方輝石+斜長石からなるシンプレクタイト組織がみられ、ピーク変成作用後の減圧が推測される。岩相 1 にざくろ石-単斜輝石地質温度計を適用して得られた温度条件は、800-840 °C 程度であったが、NCFMASHTO 系のシューセクションから推測される温度圧力条件は、960-1040 °C、8-10.5 kbar であった。この条件は、Osanai et al. (2006) が苦鉄質グラニュライトから得たピーク変成条件 (>17 kbar, >1000 °C) に比べて、温度は調和的であるが圧力が 7 kbar 程度低い。

近年の岩石学的研究により、Palghat-Cauvery 縫合帯のようなモザンビーク海の閉塞とその後の大陸衝突によって形成された縫合帯には、様々な年代をもつ岩石がブロック状に取り込まれ、メランジを形成している。例えば Palghat-Cauvery 縫合帯にみられる苦鉄質-超苦鉄質岩体 (オフィオライトや層状貫入岩体) は、(1) 25 億年前の火成および変成年代をもつ岩体、(2) 25 億年の火成年代と 7-8 億年の変成年代をもつ岩体、(3) 7-8 億年の火成年代と 7-8 億年の変成年代をもつ岩体の 3 つが混在しており、これらのピーク変成条件や温度圧力履歴は異なる。今回キャンディー周辺から得られたざくろ石単斜輝石岩の温度圧力履歴は (1) のタイプと類似している。以上のように、縫合帯のメランジを構成する苦鉄質-超苦鉄質岩体は、南インド Palghat-Cauvery 縫合帯からスリランカ・ハイランド岩体を通り、東南極リュツォ・ホルム岩体南西部まで連続する可能性がある。

キーワード: グラニュライト, Gondwana, 縫合帯, シュードセクション

Keywords: granulite, Gondwana, suture zone, pseudosection

## 南インドの Gondwana 大陸衝突帯に見られる新太古代と新原生代中期のバイモーダル火成作用 Neoproterozoic and Middle Neoproterozoic bimodal magmatism in the Gondwana orogeny, South India

小林 愛理<sup>1\*</sup>; 角替 敏昭<sup>1</sup>; 小泉 達也<sup>1</sup>  
KOBAYASHI, Airi<sup>1\*</sup>; TSUNOGAE, Toshiaki<sup>1</sup>; KOIZUMI, Tatsuya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 筑波大・地球  
<sup>1</sup>Univ. Tsukuba

玄武岩質岩とデイサイト質岩からなる大規模なバイモーダル火成作用は、島弧またはリフト帯に特徴的なイベントと考えられている。したがってこれら火成岩の岩石学的・地球化学的研究は、その地域のテクトニクスを議論する上で重要であるといえる。本研究では、南インドの大陸衝突型造山帯にみられる 2 つの異なる時代のバイモーダル火成作用を報告し、その成因について考察する。

南インドは北部の太古代 (33-25 億年) の花崗岩-グリーンストーン帯 (ダルワークラトン) およびグラニュライト岩体 (セーラム岩体、マドラス岩体、クーグ岩体など) と、南部の原生代 (5.3-5.7 億年) のグラニュライト岩体 (マドゥライ岩体、トリバンドラム岩体など) の 2 つの地塊で主に構成される。これら地塊の境界部はパルガット-カウベリー剪断帯と呼ばれるが、これは原生代末期 ~ カンブリア紀初期 (約 5.5 億年前) の Gondwana 大陸集合最末期に起こったモザンビーク海の閉塞および両地塊の衝突によって形成された剪断帯である。本研究ではパルガット-カウベリー剪断帯の北部に位置する太古代地塊のうち、新太古代 (25 億年) の火成・変成年代を示すマドラス岩体と、33-32 億年の火成・変成年代を示すクーグ岩体に貫入した新原生代中期 (クライオジェニアン) の火成岩体みられるバイモーダルな火成作用のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

タミルナドゥ州のナマッカル-セーラム間に露出するマドラス岩体の塊状チャノッカイト (斜方輝石を含む花崗岩質岩) には、不規則な形状をした数十 cm 程度の黒色の玄武岩質岩のブロックが局所的に分布している。これら 2 つの異なる岩相の境界は明瞭で、これは典型的なマグマ混和組織と考えられる。主要な岩相である花崗岩質岩は、石英、斜長石、普通角閃石、斜方輝石からなる粗粒で完晶質の岩石である。一方で苦鉄質岩は変成作用を受けて苦鉄質グラニュライトとなっており、鉱物組み合わせは斜長石、単斜輝石、斜方輝石、黒雲母、石英からなるグラノブラスティックな岩石である。両者ともにサブアルカリックで、花崗岩質岩はデイサイト質、苦鉄質岩は玄武岩質安山岩質な組成をもつ。花崗岩質岩の Nb-Y、Ta-Yb、Rb-(Y+Nb)、Rb-(Yb+Ta) および苦鉄質岩の La-Y-Nb(La/10-Y/15-Nb/8) 比から、両者はともに火山弧起源の火成岩である。しかし、鉱物化学組成や顕微鏡下の組織からは、マグマ混合の証拠は得られなかった。これは、原岩形成後の 800 °C を超えるグラニュライト相の変成作用により、もとの組織や鉱物組成が完全に再結晶化したためと考えられる。

一方、ケララ州カサラゴド北部には、33-32 億年のクーグ岩体に貫入した新原生代中期 (クライオジェニアン) の花崗岩質岩中に、濃緑色で最大約 20 × 40cm の大きさの多数の苦鉄質岩ブロックが産出する。マドラス岩体のものと類似した産状から、この岩石もマグマ混和組織と考えられる。花崗岩質岩は白色 ~ 淡桃色で、主要な構成鉱物は石英、斜長石、カリ長石、黒雲母である。特に斜長石は自形を呈する。一方の苦鉄質岩は細粒であり、斜長石、普通角閃石、黒雲母、スフェーンからなる。緑簾石、緑泥石などの変質鉱物もみられる。マグマ起源の単斜輝石の残存結晶が角閃石や黒雲母に包有される組織から、この苦鉄質岩はマグマ混和後に角閃岩相の変成作用を被ったことがわかる。この花崗岩質岩は火山弧起源のカルクアルカリ岩型であり、苦鉄質岩は火山弧起源のアルカリ岩 (basaltic trachy-andesite) である。両者の境界部にみられる斜長石斑晶からは、反復累帯構造や汚濁帯の存在が確認された。汚濁帯累帯構造は、微晶なメルト包有物が斜長石に含まれたもので、一般的にマグマ混合が生じた時に低温マグマから晶出した結晶が、液と反応して部分溶解して生じると考えられている (Tsuchiyama, 1985)。また斜長石斑晶の累帯構造に Ba 含有量に急激な変化が見られたため、これがマグマ混合プロセスを知る手がかりとなる可能性がある。

南インド Trivandrum 岩体の CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 流体の浸透とパッチ状のチャノッカイトの形成  
Infiltration of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O binary fluid and formation of patchy charnockite from Southern India

遠藤 雄大<sup>1\*</sup>; 角替 敏昭<sup>1</sup>; M. Santosh<sup>2</sup>  
ENDO, Takahiro<sup>1\*</sup>; TSUNOGAE, Toshiaki<sup>1</sup>; M., Santosh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 筑波大・地球, <sup>2</sup> 中国地質大学  
<sup>1</sup>Univ. Tsukuba, <sup>2</sup>China University of Geosciences Beijing

Since the first discovery of patches, veins and ladders of coarse-grained orthopyroxene-bearing felsic granulite (incipient charnockite) within foliated amphibolite-facies gneiss from Kabbal in Karnataka, southern India, by Pichamuthu (1960), the origin and petrogenesis of charnockite and its implications for granulite processes in lower crust have been the focus of many petrologists. According to previous studies, charnockite formation in the SGT is considered to have resulted by the infiltration of CO<sub>2</sub>-rich anhydrous fluids along structural pathways within upper amphibolite-facies gneisses, resulting in the lowering of water activity and stabilization of orthopyroxene through breakdown of biotite (e.g. Janardhan et al., 1979; Newton et al., 1980; Hansen et al., 1987; Santosh et al., 1990; Newton, 1992; among others).

This study presents new petrological data of 'incipient' charnockite developed within garnet-biotite (Grt-Bt) gneiss from Kakkod with the western Trivandrum Granulite Block (TGB), India. In this locality, bulk rock compositions of charnockite and the host Grt-Bt gneiss are almost equivalent. The result of conventional geothermobarometry using Grt-Opx-Pl-Qtz assemblage shows the peak metamorphic condition of 860-960 °C and 6.9-8.4 kbar, which is consistent with the results of mineral equilibrium modeling. The metamorphic condition certainly corresponds to granulite-facies event, and it is higher than those reported from other incipient charnockite localities in the TGB and adjacent Nagercoil Block. Furthermore, the estimated metamorphic condition is too high for the stability of the host Grt-Bt gneiss that contains a mineral assemblage formed at amphibolite-facies condition. In addition, although pseudosecondary fluid inclusions are composed of pure CO<sub>2</sub>, secondary fluid inclusions contain CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O binary fluid. Therefore, patchy charnockite in Kakkod from the TGB is considered to have formed by infiltration of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O binary fluid during a retrograde stage. The petrogenetic model of incipient charnockite formation proposed in this study is therefore different from reported petrogenesis from other localities.

キーワード: チャノッカイト, 変成流体, シュードセクション, 地質温度圧力計, Trivandrum Granulite Block, 南インド  
Keywords: incipient charnockite, metamorphic fluid, pseudosection, geothermobarometry, Trivandrum Granulite Block, southern India

## 沸石と母岩の関係性 小笠原諸島父島・伊豆半島を例として Relationship of zeolites and host rocks

清水 康平<sup>1\*</sup>; 安井 万奈<sup>2</sup>  
SHIMIZU, Kouhei<sup>1\*</sup>; YASUI, Mana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京都市大学知識工学部自然科学科, <sup>2</sup> 早稲田大学理工学術院環境資源工学科

<sup>1</sup>Department of Natural Sciences, Faculty of Knowledge Engineering, Tokyo City University, <sup>2</sup>Department of Resources and Environmental Engineering, Waseda University

天然の沸石は主に地殻浅所で火成岩、堆積岩、変成岩といった多様な岩石中に存在する。本研究においては、伊豆・小笠原地域から採取した母岩及び沸石類の化学組成分析を行いそれらの関係性を示す。

先行研究においては、晶洞中や気孔中、脈中で産出される肉眼やルーペで識別できる大きさの沸石と母岩との間に、成因的關係はほとんど認められないと報告されている。(歌田 1995) 本研究では、沸石の母岩異なる小笠原諸島父島及び、伊豆半島からの岩石について沸石類と母岩の化学組成との関係性を検証する。

### 2. 調査地域

東京都小笠原諸島父島では宮之浜、釣浜駐車場、釣浜、長崎、初寝浦北側、初寝浦南側、洲崎北側、洲崎南側、ブタ海岸、金石浜の10ヶ所、静岡県伊豆半島ではやんだ、大洞林道の2ヶ所の調査を行った。

### 3. 方法

母岩は粉末にして加圧整形ディスクとした。分析には蛍光X線装置 RIX-3000(Rh 管球,50kV50mA)を使用し、産総研(地質調査所)の岩石標準試料15種類から作成した検量線をもとに、計算を行った。

沸石を含む母岩中の鉱物の同定に関しては、肉眼及び顕微鏡観察を行った。また、肉眼では同定困難なものについては、X線回折により同定した。分析には2種の装置を使用し、Bruker AXS, D2 phaser(管球,30kV,10mA)、Bruker AXS, Smart Breeze(管球,50kV,30mA)(単結晶構造解析)を使用した。Smart Breezeに関しては分析試料をおよそ1mm大に調整し測定した。

### 4. 結果・考察

各地点で産出した沸石類の同定結果と、母岩の全岩化学組成分析結果を比較、検討した。

今回、同定された沸石の種類は、輝沸石、方沸石、モルデン沸石、菱沸石、エリオン沸石、湯河原沸石、束沸石、灰十字沸石の8種類であった。

父島において束沸石は宮之浜、初寝浦北側、初寝浦南側、洲崎、ブタ海岸、金石浜で確認することができた。これらの地点と束沸石が産出しなかった地点での母岩の $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比を比較すると、産出しなかった地点では4.230-4.768と5以下であるのに対し、産出した地点では5.248-7.672と5以上であり違いが見られた。沸石の構造を決定するためにはS/Alの比が重要な要素となる。沸石を主に構成する元素であるSiおよびAlの母岩中の比率を用い、熱水により岩石から溶脱した成分が岩石中の脈や気孔で結晶化することにより生成される沸石類の沸石と母岩の関係性を示すことができた。

キーワード: 沸石, 母岩, 小笠原諸島父島, デイサイト

Keywords: zeolites, host rocks, Chichijima, Ogasawara islands



## 箱根火山産三輝石安山岩（ピジョン輝石-普通輝石-紫蘇輝石安山岩）の成因 Three pyroxene andesite (pigeonite-augite-hypersthen andesite) from Hakone volcano

石井 輝秋<sup>1\*</sup>  
ISHII, Teruaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 公益財団法人深田地質研究所  
<sup>1</sup>Fukada Geological Institute

ピジョン輝石斑晶を含む火山岩は非常に稀であり、世界で数例しか知られていない。箱根火山箱根峠産ピジョン輝石-普通輝石-紫蘇輝石安山岩（単に三輝石安山岩またはピジョン輝石安山岩と呼ばれる）は久野久先生による、偏光顕微鏡を駆使した詳細な研究論文（Kuno 1935, Kuno 1936a）により世界的に有名である。本研究では EPMA によりこのピジョン輝石安山岩の輝石晶出経路および輝石温度計で求めたマグマの温度変化を解析し、その成因を検討した。初生的な水に富むソレライト質高温マグマが、水に関し開いた二次的マグマ溜り中で三相の輝石を平衡晶出して形成された三輝石斑晶含有マグマ（温度は約 1070 °C）が、元の高温度マグマ（温度は約 1110 °C）と二次的マグマ溜り中で混合して、ピジョン輝石安山岩を形成したという作業仮説を提出する。水に関し開いた二次的マグマ溜り中での、三種の輝石斑晶の平衡晶出の存在が鍵と成る。

キーワード: 箱根火山, 輝石地質温度計, ピジョン輝石, マグマ混合, 三輝石安山岩, マグマの温度

Keywords: Hakone volcano, pyroxene geothermometer, pigeonite, magma mixing, three pyroxene andesite, magmatic temperature

## 単結晶モナザイトの水熱合成及びモナザイトに対する水の溶解度測定 The structural water in hydrothermally synthesized monazite

阿部 健康<sup>1\*</sup>; 中村 美千彦<sup>1</sup>  
ABE, Takeyasu<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Michihiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University

**Introduction:** The U-Th-Pb dating of accessory minerals such as zircon and monazite is widely applied for various types of rocks [1,2,3]. There has been proposed another method to obtain geochronological information from these minerals: quantifying the degree of metamictization (destruction of crystal structure by radioactive components). It is reported for zircon that the water content (up to 10 wt%) is in proportion to the degree of metamictization, thus to the concentration of radioactive nuclei and geological age[4]. Monazite on the other hand usually undergoes much less metamictization than zircon due to the higher bond strength of P and O compared to that of Si and O; this results in the lower water content in the metamictized monazite. Determination of the structural water content in monazite without radioactive damage is thus necessary to constrain the "initial" water content prior to hydration. The water content bears significance also for better understanding the crystal chemistry of monazite. In this study, we synthesized monazite single crystals at hydrothermal condition and determined the content of structural water as a function of pressure.

**Experimental method:** The hydrothermal synthesis of monazite was conducted at a temperature of 800 degC and pressures of 1.5, 10 and 15 kbar using a cold-seal pressure vessel and a piston cylinder apparatus. The CePO<sub>4</sub> reagent was encapsulated with H<sub>2</sub>O or H<sub>2</sub>O-NaCl solution and run for ca. 100 hours. The FT-IR analyses of the obtained monazite single crystals were conducted to determine the concentration of structural OH on the basis of Lambert-Beer's Law. The molar absorption coefficient was estimated by linear calibration curve against the OH stretching vibration wavenumber [5].

**Results and Discussion:** The broad absorption band was observed at 3100-3600 cm<sup>-1</sup> in the crystals synthesized in all the experimental conditions. The water content of synthesized monazite was estimated approximately to be 20-70 ppm, showing no large pressure dependence. FT-IR analyses of pleochroic absorption are on-going to determine the OH dipole orientation within the crystal structure.

**References:** [1]J. M. Langille, M. J. Jessup, J. M. Cottle, G. Lederer, T. Ahmad, *Journal of Metamorphic Geology*, 30, 769-791 (2012)

[2]E. Janots, A. Berger, E. Gnos, M. Whitehouse, E. Lewin, T. Pettke, *Chemical Geology*, 326-327, 61-71 (2012)

[3]T. Imayama, K. Suzuki, *American Mineralogist*, 98, 1393-1406 (2013)

[4]M. Zhang, E. K. H. Salje, R. C. Ewing, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14, 3333-3352 (2002)

[5]M. S. Paterson, *Bulletin de Mineralogie*, 105, 20-29 (1982)

キーワード: 水熱合成, アクセサリー鉱物, モナザイト年代, メタミクト化, NAMs, フーリエ変換型赤外分光装置

Keywords: hydrothermal synthesis, accessory mineral, monazite dating, metamictization, nominally anhydrous minerals, FT-IR

## 高温下における ternary feldspar の相関係 Phase relation in ternary feldspar system at high temperature

兒玉 優<sup>1\*</sup>; 三宅 亮<sup>1</sup>; 外田 智千<sup>2</sup>; 川崎 智佑<sup>3</sup>  
KODAMA, Yu<sup>1\*</sup>; MIYAKE, Akira<sup>1</sup>; HOKADA, Tomokazu<sup>2</sup>; KAWASAKI, Toshisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京大・理, <sup>2</sup>国立極地研究所, <sup>3</sup>愛媛大・理

<sup>1</sup>Kyoto Univ., Sci., <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Ehime Univ., Sci.

### 【はじめに】

長石は相転移に伴い双晶や離溶ラメラなどの微細組織を形成する。微細組織を観察することで、長石の冷却過程に関する情報を得ることができる。岩石の冷却過程を知る上で有用な鉱物である。特に高温 ( $T > 800\text{C}$ ) で晶出する ternary feldspar (Tfs) は、斜長石やアルカリ長石よりも多くの温度情報を保存している。超高温変成岩の変成履歴の解析に適用することができる。斜長石系: An (anorthite,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) - Ab (albite,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )、アルカリ長石系: Ab - Or (orthoclase,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) については多くの研究が行われ、相関係がよく知られている (Carpenter, 1994 など)。しかし、An-Ab-Or 3 成分系での相関係については、あまり多くの研究は行われていない。特に高温下での C2/m - C-1 転移は Tfs が経る可能性のある相転移であるが、その際の挙動はアルバイト端成分における高温その場粉末 X 線回折法 (XRD) による実験結果とその結果に基づく理論計算によって予想されたものである (Kroll et al., 1980; Salje et al. 1985, Carpenter, 1988)。粉末 XRD による分析は実験試料全体に対して行われているため、回折計の角度分解能が不足している場合に 2 相分離による組織の形成に関わる分解反応を捉えられない可能性がある。また、高温その場分析では反応時間の不足により反応がほとんど進まない可能性がある。したがって、高分解能の電子顕微鏡を用いて高温高压実験による実験試料を直接観察し、C2/m - C-1 相転移の際の挙動について再検討する余地がある。一方、ナピア岩体などの超高温変成岩体では Tfs の産出が報告されている (Harley 1985; Sheraton et al. 1987; Hokada, 2001 など)。バルク組成におけるソルバス温度から変成時の到達温度の見積りが行われているが、その離溶組織の成因は十分に研究されていない。Tfs の相関係を明らかにすることにより、超高温変成岩の形成史を詳細に検討することが期待でき、超高温変成作用が解明できる。

本研究では、長石の C2/m - C-1 相転移の挙動を明らかにした。本研究ではピストンシリンダー装置を用いて 1100 - 1300C、10 kbar の条件で長石の相関係を調べた。出発物質には離溶ラメラを含まない、oligoclase (Olg,  $\text{An}_{21}\text{Ab}_{75}\text{Or}_4$ )、sanidine ( $\text{An}_{1}\text{Ab}_{15}\text{Or}_{84}$ ) の単結晶を粉碎した粉末を用い、任意の割合で混合しバルク組成を変化させたものを用いた。実験試料の観察では、oligoclase-sanidine 間の元素交換に伴った微細組織が形成されているか否かに着目した。Tfs の複雑な離溶組織の形成に関わると考えられる前駆的な組織を直接観察するために、電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) や走査透過型電子顕微鏡を用いた環状検出器による暗視野法 (ADF-STEM) などの微細組織の組成コントラストを高分解能で観察可能な装置を用いて実験試料の観察を行った。

### 【結果と考察】

1100C, 1200C の実験のうち、 $\text{An}_{15}\text{Ab}_{65}\text{Or}_{20}$  の実験試料において化学組成の不連続による異なる化学組成のラメラからなる組織を確認した。この結果から長石の C2/m - C-1 転移は、2 次の相転移ではなく、1 次の相転移であることが明らかとなった。また、観察された微細組織の界面方位はほぼ (010) であった。一方、1250C, 1300C で行われた実験試料にはガラスが観察された。これらの結果を総合し、Olg-Or 擬似 2 成分系の  $T > 1100\text{C}$ ,  $P = 10\text{kbar}$  における相図を得た。

Mt. Riiser-Larsen 産片麻岩サンプルについて、兒玉ら (2013 など) は、薄片スケールの元素分布、ミルメカイト状の組織の産状と Ce などの微量元素の分布、ジルコン中のガラス包有物の存在から、Mt. Riiser-Larsen におけるピークの変成時における Olg 成分に富む Tfs 組成のメルトの存在の可能性を示唆した。さらに、Tfs に見られる複雑で多様な離溶組織の存在を示した。今回実験により得られた相図より、こうした Olg 成分に富む Tfs 組成のメルトの存在から、変成時の温度は少なくとも 1200-1250C に達していたと考えられ、また、Tfs 中の複雑で多様な離溶組織は、(010) で接する C2/m - C-1 の 1 次の相転移に伴う離溶組織と、その後の冷却による (-901) で接するスピノーダル分解によって形成される離溶組織の 2 種類の組織が複合したものであることがわかった。

キーワード: ternary feldspar, 相関係, 高温実験

Keywords: ternary feldspar, phase relation, high temperature experiment

## He コリジョン型 ICP-四重極質量分析計による岩石組成の定量分析法 Quantitative Analysis of Rock Samples by ICP-Quadrupole Mass Spectrometer (QMS)

網代 卓也<sup>1\*</sup>; 大木 誠吾<sup>2</sup>; Chako Tchamabe Boris<sup>3</sup>; 大場 武<sup>2</sup>  
AJIRO, Takuya<sup>1\*</sup>; OOKI, Seigo<sup>2</sup>; CHAKO TCHAMABE, Boris<sup>3</sup>; OHBA, Takeshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東海大学大学院理学研究科化学専攻, <sup>2</sup> 東海大学理学部化学科, <sup>3</sup> 東海大学総合理工学研究科

<sup>1</sup>Course of Chemistry, Graduate School of Science, Tokai University, <sup>2</sup>Department of chemistry, School of Science, Tokai University, <sup>3</sup>School of Science and Technology, Tokai University

### 1. はじめに

ICP-四重極質量分析計 (QMS) は、高感度かつ短時間で多元素分析を可能とするが、目的とする元素と同じ質量を有する多原子分子による干渉を受ける。例えば Ar を含む多原子イオン (ArO、ArCl など) は、Fe や As の分析を妨害する。多原子イオンを除去するために、コリジョンガスを使用する ICP-QMS が開発された。コリジョンガスは、一般的に He ガスのような不活性ガスが用いられる。コリジョンガスを用いることにより、アルゴンガスによる生成物や再結合による生成物を壊し、これまで測定が困難であった元素の分析が可能となる。本研究では、標準岩石を用いて He コリジョン型 ICP-QMS で主成分及び微量成分組成の分析が可能か検討し、実際の試料としてカメルーン火山列の火山岩の分析をした。

### 2. ICP-QMS

分析には、ThermoScientific 社の iCAP-Q を用いた。iCAP-Q は、1.6kW 27MHz の ICP 部で試料溶液をプラズマ化する。Ar ガスの消費量は 16L/分と比較的少ない。サンプリングコーン部は片手で工具なしで装置外に引き出すことが可能で、洗浄にかかる手間は少ない。真空系に導入されたプラズマは 90 度の曲げ角を持つイオンレンズで He コリジョンセルに導入される。イオンレンズで中性分子は効率よく排除される。He コリジョンセルは小さな QMS を構成しており、目的元素よりも低質量のイオンの大部分が排除され、多原子イオンは He 原子との衝突でエネルギーを失い排除される。コリジョンセルを通過したイオンは主たる QMS で質量分別され、アナログ及びパルス器で感知される。

### 3. 分析

サンプルは、産業技術総合研究所の標準岩石 (JA-2、JB-2、JB-3) 及びカメルーン・バロンペンボ火山における火山岩を使用した。まず、粉末状の試料 50mg をテフロン製分解容器に入れ、35wt% 塩酸 2mL、60wt% 過塩素酸 1mL、50wt% フッ化水素酸 0.5mL を加えた。これを Parkin Elmer 社の Multiwave3000 でマイクロ波加熱酸分解した。分解はまず、出力を 50W/min で 500W まで上昇させ、60 分間加熱した。その後、50 °C 以下になるまで冷却した。その後、飽和ホウ酸水 2.5mL 及び超純水 2.5mL を加えて、280W/min で 1400W まで上昇させ、20 分間加熱した。加熱終了後、50 °C 以下に冷却した。分解後の溶液は超純水で 50mL に定容した。

### 4. 結果と考察

標準岩石における主成分は、Si を除いてほぼ 70% 以上の収率が得られた。微量元素については、一部を除いて 70% 以上の収率が得られた。また、複数回同様の岩石を用いて測定を行なったところ、それぞれの元素の収率に顕著な違いは見られなかった。したがって、いくつかの改善の必要はあるものの iCAP Qc により Si を除いて岩石の主成分及び微量成分化学組成を分析することが可能であると判断される。カメルーンで産する火山岩を分析した結果、Nb/Y に対する Zr/TiO<sub>2</sub> の関係を用い、火山岩はアルカリ玄武岩に分類された。これは、カメルーン火山岩を研究した A. Marzoli ら (2000) による結果と良く一致する。

キーワード: ICP-QMS, マイクロ波分解法, 火山岩, 定量分析, カメルーン

Keywords: ICP-QMS, microwave digestion, volcanic rock, quantitative analysis, Cameroon



## EPMA 定量分析における質量吸収係数の検討 Validation of mass attenuation coefficients in quantitative electron probe microanalysis (EPMA)

加藤 文典<sup>1\*</sup>; Jeon Mi-Jung<sup>2</sup>; Cho Deung-Lyong<sup>3</sup>; 佐藤 桂<sup>1</sup>  
KATO, Takenori<sup>1\*</sup>; JEEN, Mi-jung<sup>2</sup>; CHO, Deung-lyong<sup>3</sup>; SATO, Kei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学年代測定総合研究センター, <sup>2</sup> 釜山国立大学共同実験実習館, <sup>3</sup> 韓国地質資源研究院国土地質研究本部地質調査研究部

<sup>1</sup>Center for Chronological Research, Nagoya University, <sup>2</sup>Center for Research Facilities, Pusan National University, <sup>3</sup>Geological Mapping Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

質量吸収係数は、電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) を用いた定量分析の確からしさに大きく影響する。これまで実験的に得られた質量吸収係数や理論計算から得られた質量吸収係数が提案されてきた。また、質量吸収係数の近似式 (Heinrich, 1966 など) も広く用いられている。本研究では Henke et al. (1993) 及び Hubble & Seltzer (1995) の値をもとに、原子番号 1 から 92 の範囲で新しい質量吸収係数を作成した。これは、Henke et al. (1993) 及び Hubble & Seltzer (1995) のいずれにも不確かな要素があるからである (吸収端以外のエネルギーで不連続になる場合や吸収端近傍の形状が著しく不自然になる場合があることなど)。2つのデータセットから正確な質量吸収が得られないデータを取り除き、特性 X 線のエネルギーが 1keV 以下の領域では Henke et al. (1993) のデータセットを用い、それ以上のエネルギーの特性 X 線に対しては Hubble & Seltzer (1995) のデータセットをもとに新しい質量吸収係数を求めた。この質量吸収係数を用いれば、地質学的試料を含む EPMA 定量分析の確からしさが向上する。

Heinrich K.F.J. (1966) In: The Electron Microprobe, McKinley T.D., Heinrich K.F.J and Wittry D.B. (eds.), John Wiley and Sons, New York, 296 - 377.

Henke B.L., Gullikson, E.M. and Davis, J.C. (1993) At. Data Nucl. Data Tables, 54, 181 - 342.

Hubbel J.H. and Seltzer S.M. (1995) NISTIR, 5632, pp. 116.

キーワード: 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA), 定量分析, 質量吸収係数, 補正計算

Keywords: electron probe microanalysis (EPMA), quantitative analysis, mass attenuation coefficients, matrix correction

## SEM-EDS 自動粒子解析による岩石の鉱物組成分析 SEM-EDS Automated Particle Analysis of Mineral Compositions of Rocks

武藤 仁美<sup>1\*</sup>; 島田 愛子<sup>2</sup>; 小野寺 浩<sup>3</sup>  
MUTOU, Hitomi<sup>1\*</sup>; SHIMADA, Aiko<sup>2</sup>; ONODERA, Hiroshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本電子 (株) SM 事業ユニット SM アプリケーション部, <sup>2</sup> (株) JEOL RESONANCE S M部, <sup>3</sup> 日本電子 (株) SA 事業ユニット SA アプリケーション部

<sup>1</sup>JEOL Ltd.SM APPLICATION DEPARTMENT SM BUSINESS UNIT, <sup>2</sup>JEOL RESONANCE Inc. SM APPLICATION DEPARTMENT, <sup>3</sup>JEOL Ltd.SA APPLICATION DEPARTMENT SA BUSINESS UNIT

岩石は、その形成過程や産地によって様々な鉱物組成を示す。岩石を構成する鉱物組成の知見は、岩石の生成過程を知るうえで非常に重要である。岩石の元素分析には、一般的に蛍光 X 線分析が用いられている。この場合、岩石を粉碎した多数の粒子から得られる平均的な元素濃度比から、構成する鉱物種やその割合を推定する。一方、走査電子顕微鏡 (SEM) とエネルギー分散形 X 線分光器 (EDS) を組み合わせた画像解析機能の一つである SEM-EDS 自動粒子解析を用いることで、試料を構成する多数の粒子を各々直接自動分析することができる。SEM-EDS 自動粒子解析では、岩石を構成する各粒子を直接分析し鉱物種を特定することが可能で、その大きさや形状、各粒子を構成する複数の鉱物種の成分組成などと合わせて考察することができる。

本報告では、SEM (JSM-IT300LA, JEOL)-EDS (JED2300, JEOL) 自動粒子解析を用いて、岩石の成分やその鉱物組成比などを分析した結果を紹介する。試料は、江若花崗岩や八甲田カルデラ火砕流堆積物などの生成過程の異なる岩石である。各々の岩石を粉碎し、樹脂に包埋後、粒子断面を作成し分析試料とした。

江若花崗岩の主な鉱物種は、石英、長石グループ、雲母グループ、その他有色鉱物に分類された。また、蛍光 X 線分析装置 (JSX-3100R II, JEOL) を用いた比較分析も行った。同じ試料の組成比の値は良く一致した。八甲田カルデラ火砕流堆積物の主な鉱物種は、石英、斜長石、その他有色鉱物などに分類された。その大部分は軽石で占められ、江若花崗岩とは異なり、多くの粒子から複数の鉱物種などが検出された。得られた鉱物組成比や微量有色鉱物の共存元素傾向の詳細な結果は、他の分析手法による結果と合わせて当日報告する。

キーワード: 鉱物, 粒子解析, SEM-EDS

Keywords: Mineral, Particles Analysis, SEM-EDS

## アナログ実験における柱状節理の形態形成の濃度分布依存性について Dependence of water concentration distribution of columnar joints formation in analogue experiments

濱田 藍<sup>1\*</sup>; 寅丸 敦志<sup>2</sup>

HAMADA, Ai<sup>1\*</sup>; TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 九大・理・地惑, <sup>2</sup> 九大・理院・地惑

<sup>1</sup>Earth and Planet. Sci., Kyushu Univ., <sup>2</sup>Earth and Planet. Sci., Kyushu Univ.

火成岩や溶結凝灰岩などに見られる柱状節理の形態には多様性がある。柱状の構造の形態を特徴づける要素の一つとして、「柱が直線的か曲線的か」という点が挙げられる。柱状節理は岩体の冷却固結に伴い体積収縮により岩体内部に蓄積された応力が解放される時、岩体の温度勾配に従って割れ目が段階的に形成されると考えられているが、「曲がった構造」の形成過程を説明する基礎的な研究は行われていない。そこで本研究ではデンプンと水の混合物を乾燥させて天然の柱状節理の構造を再現するアナログ実験を行い、「曲がった構造」の形成過程を観察し、考察することを目的とする。実験では、円筒の容器に混合物を投入し、混合物表面上に白熱ランプを点灯する。混合物表面とランプの間の距離を1.5 cmに設定し混合物を乾燥させ、混合物が完全に乾燥する前の状態をX線CT解析装置で撮影することで乾燥途中、すなわち節理形成の最中の水の空間分布を観察した。その結果、混合物表面から同じ深さにおいて、ランプ直下からの水平距離が長くなるに伴い、混合物中の水の濃度が大きくなることが分かった。また混合物表面から内部に向かって発達した割れ目の進行方向は、水の等濃度面に対してほぼ垂直になっていることが分かった。混合物表面が受けるランプの熱の影響がランプからの距離に応じて異なることが確かめられ、混合物の乾燥速度に場所による違いが生じ、混合物内にできた水の濃度分布に不均一ができたと考えられる。形成された割れ目は混合物中の水の濃度分布の時間変化に伴い、その伸展方向が変化することが予想されるが、発表では混合物中の水の濃度分布の時間変化と割れ目形成の関係性についても報告を行う。

キーワード: 柱状節理, アナログ実験, 割れ目形成, マイクロフォーカスX線CT, 濃度分布

Keywords: columnar joint, analogue experiment, crack formation, Micro-focus X-ray CT, concentration distribution

## スラブ流体は塩水 Slab-fluids contain chlorine

川本 竜彦<sup>1\*</sup>  
KAWAMOTO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大、理・地球熱学  
<sup>1</sup>Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University

スラブ流体が塩水である可能性は高いと提案する。根拠の一つは天然の岩石中に含まれる流体包有物である。沈み込み帯のマントル捕獲岩中の塩濃度としてピナツボ火山のマントル捕獲岩中に 5.1 重量%の塩水を発見した (Kawamoto ほか、2013、PNAS)。続いて、一ノ目瀉火山のマントル捕獲岩中に 3.7 重量%の塩水を発見した (Kumagai ほか、投稿中) ほか、多くの共同研究者と塩水の流体包有物を記載し続けている。これまで観察した H<sub>2</sub>O にとむ流体包有物は多かれ少なかれ必ず塩水である。このことから、スラブ流体は塩素を含んでいると考える。

スラブ流体が塩水であることは、沈み込み帯での元素移動にどのような影響を持つか考えたい。そこで、多くの共同研究者達と、メルトと水流体の間の元素分配実験を放射光実験設備で行い、塩濃度が与える影響を理解しつつある。その結果、スラブ流体は塩水だと考えると、島弧玄武岩の微量成分元素の特徴を定性的に説明することが可能であると提案する。ただし、定量的には、まだよくわかっていない。それは、塩素を含んだ超臨界流体が塩水とメルトに分離し、それぞれがマグマを作ると提案している (Kawamoto ほか、2012、PNAS) が、再びおたがいに混ざったりする過程は複雑で、どのような元素のマグマになるか予想することが困難であることが主な原因である。もう一つは、実験に使用した塩水の濃度は天然の流体包有物で確認されている塩濃度の倍から 5 倍である。実験では濃い塩水とマグマの間には不混和があると考えているが、5%の場合、塩水とマグマの間の混和・不混和領域がどのようになるかさえ、まだわかっていない。

### 参考文献

Kawamoto T., Kanzaki M., Mibe K., Matsukage K.N., Ono S. (2012) Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 109, 18695-18700.

Kawamoto T., Yoshikawa M., Kumagai Y., Mirabueno M.H.T., Okuno M., Kobayashi T. (2013) Mantle wedge infiltrated with saline fluids from dehydration and decarbonation of subducting slab. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 110, 9663-9668.

キーワード: 沈み込み帯, H<sub>2</sub>O, 流体包有物, マントルウェッジ, 放射光 X 線, マグマ  
Keywords: subduction zone, H<sub>2</sub>O, fluid inclusion, mantle wedge, synchrotron X-ray, magma



## 岩石-水反応の数値モデリング～表層環境を中心として～ Numerical modeling of water-rock reaction with a focus on the earth's surface environment

横山 正<sup>1\*</sup>  
YOKOYAMA, Tadashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

<sup>1</sup> Osaka University, Graduate School of Science, Department of Earth and Space Science

岩石-水反応は、岩石内部における溶解・沈殿等の反応と元素の拡散や水の移流との相互作用により進行する。岩石内部の反応・輸送過程は、以下の式で定量的に記述できる：

$$\phi(\partial c/\partial t) = D_e(\partial^2 c/\partial x^2) - v\phi(\partial c/\partial x) + Ar_0f(c)$$

この式は一次元の反応・輸送方程式の一例であり、 $c$ は溶液中の元素濃度 (mol/cm<sup>3</sup>)、 $t$ は時間 (s)、 $x$ は距離 (cm) (地表面からの深さなど)、 $\phi$ は間隙率 (無次元)、 $D_e$ は有効拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)、 $v$ は間隙水の流速 (cm/s)、 $A$ は岩石の単位体積あたりの表面積 (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)、 $r_0$ は鉱物の溶解速度定数 (mol/cm<sup>2</sup>/s) である。 $f(c)$ は溶解速度の溶存元素濃度依存性を表す関数であり、石英など溶存 Si 濃度の増加に比例して溶解速度が下がる鉱物の場合は、 $f(c)=(1-c/c_{eq})$ となる ( $c_{eq}$ は鉱物の平衡濃度 (mol/cm<sup>3</sup>)) (Schott et al., 2009)。反応・輸送方程式を解くことにより、岩石内部の溶存元素濃度と溶解速度の分布や、一次鉱物と二次鉱物の分布がどのように時間変化するかなどの情報が得られる。そのような解析は反応・輸送モデリングと呼ばれ、土壌の生成 (Maher et al., 2009) や CO<sub>2</sub> の地下貯留に伴う反応 (Xu et al., 2010) など、様々な過程の研究に応用されている。

反応・輸送方程式で用いる各パラメータの値は、フィールドでの実測、室内実験、モデリングにおけるフィッティング (計算結果と天然の産状の比較) などにより見積もられる。反応・輸送モデリングで天然の現象を正確に再現するためには、個々のパラメータの値をできるだけ正確に見積もることが基本になる。しかし、どのような値を設定すれば適切なモデリングになるかの判断は難しい。例えば、反応表面積  $A$  については、鉱物へのガスの吸着量から求めた値や、鉱物の外形を球などと近似して得られる表面積がよく用いられるが、それらの表面のどれだけの割合が実際に反応に寄与しているかは不明な場合が多い。また、一つの鉱物に対して様々な  $f(c)$  が提案されていたり、溶解速度の時間変化 (White and Brantely, 2003) が生じたりするため、採用すべき反応速度則がよく分からない場合もある。したがって、適切なパラメータの設定の方法は、主要な研究課題の一つである。

地球表層環境の岩石-水反応においては、岩石内部で水の浸透や乾燥が断続的に起こり、それに伴って間隙を水が満たす割合 (水飽和率) が変化するため、その影響の評価は重要である。水飽和率が下がると、岩石内部の水の通りやすさ (透水係数) や有効拡散係数  $D_e$  が低下し、モデリングの結果に大きく影響することが示されている (Yokoyama, 2013)。また、水飽和率が反応表面積  $A$  にどのような影響を及ぼすかも近年明らかになってきている (Nishiyama and Yokoyama, 2013)。

キーワード: 反応・輸送モデリング, 岩石-水反応

Keywords: Reactive transport modeling, Water-rock reaction

## 地殻におけるシリカ析出の反応速度 Kinetics of overall silica precipitation within the Earth's crust

最首 花恵<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>2</sup>; 土屋 範芳<sup>2</sup>  
SAISHU, Hanae<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>2</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科  
<sup>1</sup> AIST, <sup>2</sup> Tohoku University

The kinetics of dissolution and precipitation of silica minerals is important to reveal the geochemical reaction and to estimate how long silica deposits forms in the Earth's crust. The present kinetic equation for silica-water reactions was determined at 0-300 C and in the low Si saturated solution, where quartz growth on quartz surfaces occurs than that of nucleation of silica polymorphs [1]. However, the precipitation experiments of the high Si supersaturated solution showed that the co-precipitation of silica polymorphs via nucleation could occur [2], and the euhedral quartz crystals precipitates without precursor of silica polymorphs from the solution with minor components (Al and Na) [3].

In this study, the overall precipitation rate of silica minerals, which includes surface reaction of quartz (first term) and nucleation of silica polymorphs (second term), is derived empirically to estimate the total amount of silica precipitation within the Earth's crust. The previous kinetic equation of surface reaction [1] is applied as the first term. Based on the precipitation experiments of flow rate, the nucleation-controlled precipitation of silica minerals is expressed in a first order rate equation in the second term. The applicability of the nucleation term determined as the nucleation parameter is only in the conditions that precipitation occurs: in the solution supersaturated with respect to quartz, and in the supercritical conditions of water. The rate constant of nucleation is derived as a function of Al concentration in the solution based on the experiments of silica precipitation [3].

By using the new kinetic equation, silica-water interaction was simulated at the well WD-1a of the Kakkonda geothermal field, Japan, which penetrated the boundary of the hydrothermal convection and heat conduction zones [4]. Amount of dissolution and precipitation of silica minerals increases with decreasing of the fracture permeability. The largest amount of silica precipitation occurs in the downflow fluid at the permeable-impermeable boundary regardless of the fracture permeability.

The equilibrium consideration [5] and the kinetic results indicate that, if open fractures forms at the depth of the permeable-impermeable boundary, the impermeable zone could be reproduced by precipitation of silica minerals, which cause the sustainable division between the permeable zone and the impermeable zone in the Earth's crust.

### References

- [1] Rimstidt and Barnes (1980) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1683-1699.
- [2] Okamoto et al. (2010) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 3692-3706.
- [3] Saishu et al. (2012) *Am. Min.*, **97**, 2060-2063.
- [4] Doi et al. (1998) *Geothermics*, **27**, 663-690.
- [5] Saishu et al. (in press) *Terra Nova*.

キーワード: シリカ鉱物析出反応, 熱水実験, 反応速度式, 核形成, 透水不透水境界

Keywords: Silica precipitation, Hydrothermal experiment, Kinetic equation, Nucleation, Permeable-impermeable boundary

## ハロゲンと希ガスから明らかになった堆積物中間隙水起源のマントルウェッジ中流体 Sedimentary pore-fluid origin of H<sub>2</sub>O-rich fluid in mantle wedge revealed by halogens and noble gases

小林 真大<sup>1\*</sup>; 角野 浩史<sup>1</sup>; 長尾 敬介<sup>1</sup>; 石丸 聡子<sup>2</sup>; 荒井 章司<sup>3</sup>; 芳川 雅子<sup>4</sup>; 川本 竜彦<sup>4</sup>; 熊谷 仁孝<sup>4</sup>; 小林 哲夫<sup>5</sup>  
KOBAYASHI, Masahiro<sup>1\*</sup>; SUMINO, Hirochika<sup>1</sup>; NAGAO, Keisuke<sup>1</sup>; ISHIMARU, Satoko<sup>2</sup>; ARAI, Shoji<sup>3</sup>; YOSHIKAWA, Masako<sup>4</sup>; KAWAMOTO, Tatsuhiko<sup>4</sup>; KUMAGAI, Yoshitaka<sup>4</sup>; KOBAYASHI, Tetsuo<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 熊本大学理学部地球環境科学講座, <sup>3</sup> 金沢大学理工学域地球学コース, <sup>4</sup> 京都大学理学研究科地球熱学, <sup>5</sup> 鹿児島大学理学部地球環境

<sup>1</sup>GCRC, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Dept. Earth Environ. Sci., Kumamoto Univ., <sup>3</sup>Dept. Earth Sci., Kanazawa Univ., <sup>4</sup>Inst. Geothermal Sci., Kyoto Univ., <sup>5</sup>Dept. Earth Environ. Sci., Kagoshima Univ.

H<sub>2</sub>O plays an important role in mantle processes in subduction zones. Yet its subducting processes to the mantle remain unknown because of scarcity of direct observations of H<sub>2</sub>O in mantle-derived materials. Since halogen and noble gas are strongly partitioned into fluids and they show distinct elemental and/or isotopic ratios depending on their origins, their compositions in mantle rocks can provide complementary constraints on the behavior and origin of H<sub>2</sub>O in the mantle. Although only few researches have been conducted, the subduction of halogens and noble gases derived from sedimentary pore fluids (seawater trapped in pores of deep-sea sediments) has been suggested. Pore fluid-like halogens and noble gases were found in mantle wedge peridotites which captured H<sub>2</sub>O-rich fluids just above a subducting slab [1]. H<sub>2</sub>O-rich fluid inclusions whose salinity is similar to that of pore fluids (salinity of pore fluids is the same level as that of seawater [2]) are found in a mantle xenolith from a subduction zone [3]. We investigated halogen and noble gas compositions of mantle wedge peridotites from subduction zones to better constrain how far the influence of subducted sedimentary pore fluids extends into the mantle.

The samples studied are harzburgitic xenoliths from the Avacha volcano in Kamchatka and the Pinatubo volcano in the Philippines, and alpine-type peridotite from the Horoman massif in Japan. H<sub>2</sub>O-rich fluid inclusions have been found in olivine of those mantle peridotites [3,4,5].

We applied the noble gas method, in which halogens (Cl, Br, and I) are converted to corresponding isotopes of Ar, Kr, and Xe by neutron irradiation in a nuclear reactor and then the concentrations of noble gas isotopes are determined by noble gas mass spectrometry. Halogen detection limits of this method are from two to five orders of magnitude lower than conventional method, which enable to determine the low halogen abundances in mantle-derived materials. By crushing samples under ultra-high vacuum, noble gases are selectively extracted from H<sub>2</sub>O-rich fluid inclusions. Unirradiated peridotites were also analyzed to obtain precise noble gas isotope compositions.

The halogens of all peridotites are heavily enriched in I, although the halogen ratios are distinctive in each locality. These high I/Cl ratios show a strong contribution of sedimentary pore fluids [2]. The noble gases except for He have the elemental and isotopic ratios similar to elementally fractionated atmospheric noble gases dissolved in seawater, which is probably equivalent to those dissolved in sedimentary pore fluids. The <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios are similar to that of the mantle and distinctly higher than the atmospheric ratio. This indicates that the fluids derived from subducting slabs acquired He from the ambient mantle, where He is much more enriched than in seawater.

These pore fluid-like halogen and noble gas signatures are strong evidence that the H<sub>2</sub>O-rich fluids in the studied peridotites are derived from sedimentary pore fluids and transported to the mantle.

References: [1] Sumino *et al.* (2010) *EPSL* **294**, 163. [2] e.g. Muramatsu *et al.* (2007) *Appl. Geochem.* **22**, 534. [3] Kawamoto *et al.* (2013) *PNAS* **110**, 9663. [4] Ishimaru *et al.* (2007) *J. Petrol.* **48**, 395. [5] Arai & Hirai (1985) *Nature* **318**, 276.

キーワード: 水, ハロゲン, 希ガス, 沈み込み帯, マントル, かんらん岩  
Keywords: water, halogen, noble gas, subduction zone, mantle, peridotite

東海地域におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場・脱水と想定東海地震・SSE・LFEとの関連性  
Relations among temperature, dehydration of the PHS plate, and a large earthquake, a SSE, and LFEs in the Tokai district

末永 伸明<sup>1\*</sup>; 吉岡 祥一<sup>2</sup>; 松本 拓己<sup>3</sup>  
SUENAGA, Nobuaki<sup>1\*</sup>; YOSHIOKA, Shoichi<sup>2</sup>; MATSUMOTO, Takumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大・理, <sup>2</sup> 神戸大・都市安全セ/理, <sup>3</sup> 防災科研

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe Univ., <sup>2</sup>RCUSS, Graduate School of Science, Kobe Univ., <sup>3</sup>NIED

東海地域では、海溝型巨大地震の発生が懸念されており (e.g., Ishibashi, 1980)、浜名湖周辺では 2000 年から約 5 年にわたって長期的スロースリップイベント (SSE) が発生した (e.g., Miyazaki et al., 2006)。また、東海地方では深部低周波地震 (LFE) の震源の深さが東へ行くほど深くなる傾向がみられる。本研究では、東海地域において、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場の数値シミュレーションを行い、海洋地殻中の中央海嶺玄武岩 (MORB) の相図を用いてフィリピン海プレート上面からの脱水過程を見積もった。得られた温度場及び脱水過程の計算結果から、東海地震の想定震源域、浜名湖周辺で発生した長期的 SSE 及び東海地域における LFE の発生原因との関連についてそれぞれ考察した。計算モデルは 2 次元箱型熱対流モデル (Yoshioka et al., 2013) を使用し、駿河トラフを始点として東海地方を通る 3 本の平行な測線を設定し、それぞれの測線に沿った鉛直断面内の温度場を計算した。末永他 (2013 日本地震学会) からの主な変更点は、プレート境界面での摩擦熱を計算する際のパラメーターである間隙水圧比について、一様な値から深さによって異なる値を与える改良を行った。その結果、計算結果の温度場の妥当性の指標となる地殻熱流量の観測値と計算値のフィッティングが改善され、その結果に基づき、プレート境界面の温度、プレート上面からの脱水過程について見直しを行った。プレート間カップリングがみられる上端・下端の深さは温度によって支配されると考えられており (Hyndman and Wang, 1993)、プレート境界面の温度 150~350 °C の領域を東海地震の想定震源域とすると、その深さの範囲は 9~21 km のプレート境界面となり、その領域は東へ行くにつれて狭くなった。また、浜名湖周辺の SSE 発生領域では、プレート境界面温度が 350~450 °C となり、不安定すべりから安定すべりへの遷移領域に相当した。また、SSE 発生領域付近では blueschist から greenschist への相転移に伴う脱水反応が生じ、プレート境界面に水が存在することが推定される。東海地域での LFE の震源分布域でのプレート境界面の温度は 500~630 °C とばらつきがみられたが、脱水過程をみると、greenschist から epidote amphibolite または blueschist から greenschist への相転移による脱水反応が震源分布域周辺でみられた。そこで本研究では、LFE の発生原因として、プレート境界面での水の存在が第一要因であるとし、震源の深さに差がみられるのは、異なる脱水過程を経るためにプレート境界面において水が存在する深さが東へ行くほど深くなっているためであると結論づけた。

キーワード: 2次元箱型熱対流モデル, 巨大地震, 低周波地震, スロースリップ, 温度, 脱水

Keywords: 2-D thermal modeling, megathrust earthquake, low-frequency earthquake (LFE), slow slip event (SSE), temperature, dehydration from hydrous MORB



## 四万十帯・室戸地域における CO<sub>2</sub> 流体の広域的分布・鉱物脈中の変化 The regional and single-vein scale distribution of the CO<sub>2</sub> fluids in the Shimanto accretionary complex, Muroto area, SW

武者 倫正<sup>1\*</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>  
MUSHA, Michimasa<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 環境科学研究科

<sup>1</sup> Environmental Studies of Tohoku University

Carbon dioxide and methane are major carbonic components of the fluids in the crust. The crustal fluids generally have composition of C-H-O system, mainly composed of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>, and they may be carried down into Earth's interior at subduction zones. Many studies have examined fluid components in various accretionary prisms under low-grade metamorphic conditions, and CH<sub>4</sub> is showed as the only carbonic species. Therefore, there is little information on the variation of the components of C-H-O fluids in subduction zones.

The Tertiary (Paleogene and Neogene system) Shimanto belt, southwest in Japan, is one of the best-studied ancient accretionary complexes. The Muroto Peninsula belongs to the Tertiary Shimanto belt, and it is mainly composed of sandstones, mudstones and conglomerates with small amount of basalt. Mineral veins were mainly composed of quartz, with small amount of calcite near the vein walls, while many studies have showed CH<sub>4</sub> is the only carbonic component in the Shimanto belt, therefore it is unclear why calcite precipitated in the veins in absence of CO<sub>2</sub>. Lewis (2000) reported the fluid inclusions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> mixture at one area in the Muroto Peninsula, but the extensive distribution of CO<sub>2</sub> fluids in the whole peninsula is not clear. In this study, we examined the distribution of C-H-O fluids from the Muroto Peninsula, as fluid inclusions in the mineral veins, using microthermometry and Laser Raman spectroscopy, in regional scale and single vein scale.

Fluid inclusions from quartz in the veins are composed of one-phase carbonic inclusions (only CH<sub>4</sub>) and two-phase aqueous inclusions (carbonic vapor and H<sub>2</sub>O liquid). Carbonic components of the vapor phase in the two-phase inclusions are gradually transitioned from CH<sub>4</sub>-dominant in the north area of the belt to a CO<sub>2</sub>?CH<sub>4</sub> mixture in the south; the CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) ratio in mole fraction ( $X_{CO_2}$ ) vary from 0~0.3 in the north area to 0~0.9 in the south.

In single vein scale, we examined single CO<sub>2</sub>-bearing vein from the south area of the Peninsula, where  $X_{CO_2}$  is 0~0.8. The CO<sub>2</sub> ratio in the carbonic species is decreased from the vein wall ( $X_{CO_2} = 0.5?0.8$ ) to the vein center, in which carbonic species in the fluids is only CH<sub>4</sub> ( $X_{CO_2} = 0$ ). The existence of CO<sub>2</sub> only near the vein walls is in good agreement of the precipitation of calcite near the vein walls. The homogenization temperature increases from ~180 °C to 240?250 °C, indicating the transition of the carbonic species from CO<sub>2</sub>?CH<sub>4</sub> to CH<sub>4</sub> during vein formation.

The dominant species of carbonic species in most accretionary prisms is CH<sub>4</sub> under low-grade metamorphic conditions, and thermodynamic calculation about equilibrium in the C-H-O fluids also shows that CH<sub>4</sub> is dominant carbonic species in the equilibrium with graphite under the P?T conditions of formation of the CO<sub>2</sub>-bearing veins (235?245 °C, 165?200 MPa). The CO<sub>2</sub>-fluids are preferentially distributed close to an out-of-sequence thrust that brings the Muroto sub-belt into contact with the late Oligocene?early Miocene Nabae sub-belt with its many volcanic lavas and intrusive rocks. Therefore, the CO<sub>2</sub>-fluids were considered to be magmatic-origin, and that the fluids were injected and mixed with the CH<sub>4</sub>-pore-fluids of the sediments in the accretionary prism in the timing of formation of CO<sub>2</sub>-bearing veins.

キーワード: 流体包有物, 付加体, 方解石, 鉱物脈, C-H-O 流体, 四万十帯

Keywords: fluid inclusions, accretionary complexes, calcite, mineral veins, C-H-O fluid, Shimanto belt

## 山口県徳佐盆地の地下における深部流体の流動 Visualization of deep-seated fluid flow in Tokusa Basin, Yamaguchi Prefecture

西山 成哲<sup>1\*</sup>; 田中 和広<sup>2</sup>; 鈴木 浩一<sup>3</sup>  
NISHIYAMA, Nariaki<sup>1\*</sup>; TANAKA, Kazuhiro<sup>2</sup>; SUZUKI, Koichi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 山口大学, <sup>2</sup> 山口大学, <sup>3</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup>Yamaguchi University, <sup>2</sup>Yamaguchi University, <sup>3</sup>Central Research Institute of Electric Power Industry

わが国には、内陸部にも関わらず高塩濃度の地下水が湧出していることが知られており（酒井ほか，1978），流体の湧出箇所は地表からの自然湧水とボーリング孔からの湧水に区別される．深部流体は地下深部よりもたらされるため，その湧出箇所の特定は高レベル放射性廃棄物の地層処分場のサイト選定や評価において重要である．本研究ではボーリング孔からの深部流体の湧出が観測される，徳佐盆地において地質・地下水調査及びCSAMT法による比抵抗探査を行い，ボーリング掘削で確認された深部流体がどのように岩盤中を上昇し，被覆層が存在する場合，その後どのように流動するのかに関して検討を行った．

徳佐盆地内には白亜紀の溶結凝灰岩と流紋岩溶岩が分布し，これらを未固結の砂礫，粘土からなる更新統と完新統が覆っている．基盤岩中においては，徳佐-地福断層（佐川ほか，2008）に沿い，確認される範囲で約2.5kmの区間において低比抵抗帯が連続し，堆積物中においては断層の北側に低比抵抗帯が舌状に分布している．堆積物中の低比抵抗帯は地下水の水質分布の結果からNaCl型地下水を起源とすることが明らかとなった．また，ボーリング孔から湧出する高濃度地下水の比抵抗と物理探査により得られた比抵抗が整合的であることより，岩盤中の低比抵抗はこれら高塩濃度地下水の上昇を捉えているものと考えられる．以上より，徳佐盆地における深部流体は，徳佐-地福断層沿いに上昇し，被覆層に浸透した後，天水による希釈を受けながら河川方向に流動したものと考えられ，ボーリング孔からの湧水は断層沿いに連続的に湧出している可能性が示された．

キーワード: 深部流体, CSAMT法, 徳佐-地福断層, 地下水流動

Keywords: Deep-seated fluid, CSAMT method, Tokusa-Jifuku fault, Groundwater flow

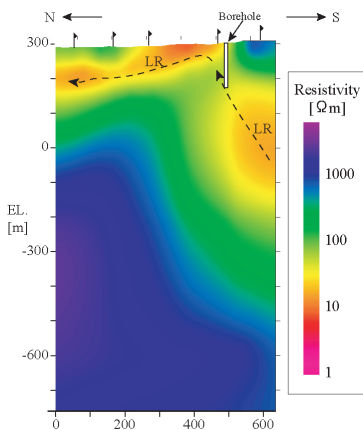


Fig.1 The resistivity profile by the CSAMT survey.

## 沈み込みプレート境界での非アスペリティの正体は粘土鉱物？ Can clay minerals account for the non-asperity on the subducting plate interface?

片山 郁夫<sup>1\*</sup>; 久保 達郎<sup>1</sup>; 佐久間 博<sup>2</sup>; 河合 研志<sup>3</sup>  
KATAYAMA, Ikuo<sup>1\*</sup>; KUBO, Tatsuro<sup>1</sup>; SAKUMA, Hiroshi<sup>2</sup>; KAWAI, Kenji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 広島大学地球惑星システム学, <sup>2</sup> 物質・材料研究機構, <sup>3</sup> 東京工業大学地球惑星科学

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>National Institute for Materials Science, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

沈み込みプレート境界面には、プレート間同士がしっかりと固着しているアスペリティと普段から安定的にすべる非アスペリティが分布し、プレート間地震はおもに前者のアスペリティで発生する。では、アスペリティと非アスペリティを作り出す原因はなんだろうか？アスペリティは空間的に不均質に分布するため温度圧力などによる鉱物の相転移を想定することは難しく、これまでは海山などの沈み込みによるプレート面での凸凹が有力視されている（例えば Cloos, 1992）。しかし、海山などの沈み込みが見られない地域や陸源性の堆積物によってプレート境界面が平滑にされている箇所にもアスペリティがみられ、その実体についてはまだ不明な点が多い。私たちは、アスペリティと非アスペリティの違いはプレート境界上に分布する物質の違いであるとの仮説をたて、粘土鉱物の摩擦特性に注目した実験を行なっている。摩擦の性質としては、速度を急変させた際の応答（速度依存性）から地震性すべりか非地震性すべりかが議論されることが多いが、今回は摩擦が静止（固着）した際に強度がどの程度回復するかを調べるヒーリング実験を行なった。これまでの予察的な実験の結果、スメクタイトと緑泥石は石英に比べ強度の回復が極端に小さいことが分かった。このことは、摩擦面に石英などの無水鉱物がある状態では固着強度が時間とともに回復するのに対し、粘土鉱物が分布する面上では固着力が弱く強度の上昇が妨げられる。プレート境界面では、沈み込むプレートから絞り出される水溶液により粘土鉱物が不均質に分布していることが考えられるため、アスペリティを囲う非アスペリティはそのような変質による粘土鉱物の存在によって生じるのかもしれない。

キーワード: プレート境界地震, アスペリティ, 粘土鉱物, 摩擦実験, 強度回復

Keywords: Interplate earthquake, Asperity, Clay minerals, Frictional experiment, Frictional healing

## メルト包有物の硫黄化学状態から見た島弧初生マグマの酸素分圧 Oxidation state of arc primary magma-inferred from sulfur speciation of melt inclusions

清水 健二<sup>1\*</sup>; 柏原 輝彦<sup>1</sup>; 為則 雄祐<sup>2</sup>  
SHIMIZU, Kenji<sup>1\*</sup>; KASHIWABARA, Teruhiko<sup>1</sup>; TAMENORI, Yusuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 高輝度光科学研究  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>JASRI, SPring-8

Oxidation state of arc magmas highly influences the chemical behaviors of redox sensitive elements such as chalcophile and some siderophile elements in subduction zone. Therefore, Oxidation state of arc magmas is essential to understand arc magma geneses and evolutions of ore deposits. It has been suggested that sub-arc mantle is oxidized by subducted materials such as fluid, sediments and oceanic crust. However, recent studies contradicted that the oxidation state of primary arc magma (sub-arc mantle) is similar to the average upper mantle and oxidation is caused by differentiation associated with crystallization and interaction within preexisting crust (e.g. Lee et al., 2012, *Science*, v336, p64).

In order to constrain oxidation state of primary arc magmas at an immature subduction zone, we have analyzed S<sub>6+</sub>/ΣS of boninitic and tholeiitic melt inclusions within Cr-spinel from Bonin Islands and Guam by soft X-ray microbeam at SPring-8/BL27SU. Boninite in Bonin Islands uniquely formed at the early stage of subduction formation (~50 Ma) by melting of highly depleted hydrous mantle and 0-7 myrs later, related arc tholeiites erupted in southern Bonin Islands and Guam by melting of depleted mantle (Ishizuka et al., 2011, *EPSL*, v306, p229). Compositions of melt inclusions fully cover compositional ranges of whole-rocks and some boninitic melt inclusions have MgO higher than 20 wt%, showing that they are very primitive magmas. S<sub>6+</sub>/ΣS of boninitic and tholeiitic melt inclusions are 0.57 to 0.78 and 0.47 to 1, respectively; S<sub>6+</sub>/ΣS of all high-MgO (7 to 12 wt%) tholeiitic melt inclusions are >0.9. Oxygen fugacities of primary boninite and tholeiite are estimated to be ΔFMQ >+1 and >+1.5, respectively by experimental results of Jugo et al. (2010, *GCA*, v74 p5926), indicating that sub-arc mantle is oxidized even at an early stage of subduction zone. Between the period of eruption of boninite and tholeiite, not only mantle sources but also the subducting component in term of oxidation state of sub-arc mantle may have changed.

キーワード: メルト包有物, ボニナイト, 島弧, 硫黄  
Keywords: melt inclusion, boninite, arc, sulfur



## Evaluating slab-fluid contribution into inhomogeneous mantle source: geochemical variation of Central and East Java arc Evaluating slab-fluid contribution into inhomogeneous mantle source: geochemical variation of Central and East Java arc

Handini Esti<sup>1\*</sup>; 長谷中 利昭<sup>1</sup>; Wibowo Haryo Edi<sup>2</sup>; 柴田 知之<sup>3</sup>; MORI Yasushi<sup>4</sup>; HARIJOKO Agung<sup>2</sup>  
HANDINI, Esti<sup>1\*</sup>; HASENAKA, Toshiaki<sup>1</sup>; WIBOWO, Haryo edi<sup>2</sup>; SHIBATA, Tomoyuki<sup>3</sup>; MORI, Yasushi<sup>4</sup>; HARIJOKO, Agung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, <sup>2</sup>Geological Engineering, Gadjah Mada University, <sup>3</sup>Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, <sup>4</sup>Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, <sup>2</sup>Geological Engineering, Gadjah Mada University, <sup>3</sup>Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, <sup>4</sup>Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

The spatial distribution of the volcanoes in Central and East sections of Java arc denotes the widest and the narrowest of Java Island. Central Java section corresponds to the largest range and depth of Wadati-Benioff Zone along the island (180-360 km), whereas East Java section shows the narrowest range (190-220 km). However, both sections equally show wide geochemical variation with the function of slab-depth. Both also mark the appearance of the rear-arc alkaline suites in a different slab depth (360 km for Central Java, and 220 km for East Java). Geochemical datasets of basalt to basaltic andesite (further screened on Zr/Nb basis) from these sections were compiled to evaluate the contributions of slab-derived fluid to the mantle sources, and to assess the possible mantle sources of these magmas.

We group the lavas of the Central and East Java into two series: (1) the volcanic front series (VF), calc-alkaline suites of frontal- and middle-arc region volcanoes of Central and East Java, and (2) the rear-arc series (RA) consists of alkaline suites from Central and East Java (Muria, and Ringgit-Beser and Lurus, respectively). The VF series consistently shows typical island arc geochemistry, with strong LILE enrichment (Sr, Ba, Pb, and Rb) relative to HFSE. The RA series, mainly Muria, indicate stronger enrichment of LILE than other volcanoes closer to the trench. Ringgit-Beser and Lurus, the rear-arc lavas of East Java, behave differently in LILE enrichment. Ringgit-Beser lavas shows stronger LILE enrichment than that of lavas from Lurus, within the same enrichment range of Muria lavas. In the other hand, Lurus lavas are showing obvious HFSE depletion compared to OIB. The decreasing trend of LILE/HFSE and LILE/LREE (e.g. Ba/Nb, Ba/La, Pb/Ce, Pb/Nb) is observed across both Central and East Java sections. These ratios become lower toward the rear-arc of both sections, and the lowest in the rear-arc of Central Java. In various normalized plots (such as Nb vs. Ba/Nb), the VF series are plotted within the range of typical island arc basalts (IAB). Muria lavas, the rear-arc alkaline suite of the Central Java, resemble OIB and other non-arc type alkaline rock characteristics, but with positive indications of being island arc, such as negative Nb and Ti anomalies. Ringgit-Beser and Lurus alkaline lavas of East Java, however, are associated with other arc-type alkaline rock characteristics, with stronger signature of island arc than Muria.

Our analyzed samples show that lavas from East Java are closer in compositions to primitive magmas compared to Central Java's. The thicker overriding crust beneath Central Java than East Java possibly acts as the magma retainer that allows extensive fractionation. Across-arc variation of slab-derived fluid in both sections are observed as shown by decreasing LILE/HFSE and LILE/LREE toward rear-arc, suggesting the decreasing amount of slab-fluid added to the great slab-depth. The slab-fluid added to the volcanic front of East Java is slightly higher than that of Central Java, which may be controlled by the narrow range of slab dehydration area in the former that allows more fluid to concentrate. The low ratio of these trace elements in the rear-arc of both sections suggests that these parts have also been affected by dehydration of subducted slab. The stronger slab-fluid contributions in the rear-arc alkaline lavas of East Java than that of Central Java may reflect the role of shallower slab depth. Different mantle characteristics between the rear-arc of Central and East Java may reflect several possibilities: (1) the inhomogeneous mantle plume (E-type/EMI) beneath both sections, or (2) stronger EMI-type mantle contribution to Central Java than to East Java, or (3) the combination of both.

キーワード: Sunda arc, slab-derived fluid, across- and along-arc variations, trace elements  
Keywords: Sunda arc, slab-derived fluid, across- and along-arc variations, trace elements

## かんらん石-石英境界における熱水変質の反応進行度と空隙率変化 Reaction progress and porosity change in hydrothermal alternation at Olivine/Quartz boundary

大柳 良介<sup>1\*</sup>; 岡本 敦<sup>1</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
OYANAGI, Ryosuke<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Atsushi<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Serpentinization in oceanic lithosphere is a fundamental process to bring water into deep earth's interior. It is known that silica activity controls the reaction paths during the hydrothermal alternation of peridotites [e.g. 1,2], however the detailed reaction mechanism induced by silica transport is poorly understood. In this study, we conducted hydrothermal experiments in olivine (Ol)-quartz (Qtz)-H<sub>2</sub>O system for investigating the mechanism of silica metasomatism at crust/mantle boundary.

Composite powders, which was composed of Qtz zone and Ol zone was set in inner tubes, with diameters of 1.7 mm and heights of 50 mm, and then loaded into autoclave with alkaline solution (NaOH, aq, pH = 13.8 at 25 °C). Temperature and pressure are 250 °C and vapor-saturated pressure (= 3.98 MPa), respectively. After the experiments, the inner tube was cut into ten segments to evaluate the reaction progress as a function of the distance from Ol/Qtz boundary (hereafter denoted X), by Thermogravimetry and XRD. In order to evaluate the spatial variation of the reactions, the area of each minerals (olivine and reaction products) and pore was measured from the back-scattered electron (BSE) images of the thin section.

After 46 days, the H<sub>2</sub>O content near the Ol/Qtz boundary is lower (3.9 wt.% H<sub>2</sub>O) than that in (12 wt.%) at the margin of the reaction tube. The reaction products after olivine changed systematically as away from Ol/Qtz boundary from smectite+serpentine zone to the serpentine+brucite zones. In the smectite+ serpentine zone, the (Mg+Fe)/Si ratio of the products increases from 0.5 to 1.5, indicating that proportion of serpentine with respect to smectite increased away from the boundary. With increasing time, the smectite+ serpentine zone was enlarged, where as the serpentine+brucite zones was retreated.

Based on the combined analyzes of BSE images, TG and SEM-EDS, we obtained the reaction progresses of individual elementary reactions between 25 and 46 days as follows:

(1) In the smectite+ serpentine zone, smectite was formed via hydration of olivine and dehydration of serpentine by supply of silica. As the result, overall reaction has a variation in the smectite+ serpentine zone;  $\Delta m_{H_2O}$  is negative (hydration) at X=0-4 mm, it is positive (dehydration) at X=4-10 mm. Volume expansion factor ( $V/V_0$ ) is much higher (=1.4) at Ol/Qtz boundary than other zones ( $\sim 1.1$ ), mainly due to Si-metasomatic reaction.

(2) Far from the Ol/Qtz boundary (X = 20-40 mm), there is no influence of silica supply, indicating that silica was completely consumed in the smectite+ serpentine zone. In these area, serpentinization proceeds as the typical olivine hydration reaction to produce brucite and serpentine with constant Srp/Brc ratio.

(3) In the transient zone, serpentine was formed by two ways: hydration of olivine and dehydration of brucite by supply of silica. These two serpentine forming reaction resulted in a large amount of serpentine in this area, and high volume expansion factor ( $\sim 1.4$ ).

Due to these two volume expansion reactions, low porosity ( $\sim 5\%$ ) area developed locally, never-theless porosity of other area is 30%. The amount of silica ( $\Delta m_{SiO_2, aq}$ ), which consumed from 25 to 46 days, is largest at Ol/Qtz boundary, and monotonically decreases with increasing distance. If excess silica are available, the zones affected by silica will increase gradually with increasing time during hydrothermal alteration around mantle/crust boundary. In contrast, the porosity has a minimum around X = 15 mm in the transition zone, because Ol-hydration and Brc-dehydration reaction proceed with large volume expansion. Such volume expansion reaction and mineral changes causes the mechanical strength of boundary.

### References:

- [1] Frost, B. R., & Beard, J. S. (2007). *Journal of Petrology*, 48(7), 1351-1368.
- [2] Ogasawara, Y., Okamoto, A., Hirano, N., & Tsuchiya, N. (2013). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 119, 212-230.

Keywords: serpentinization, ultramafic rock, Si-metasomatism, Hydrothermal alternation

## 沈み込み帯におけるメルトの分布と輸送 Distribution and transportation of melt in subduction zones

石井 和彦<sup>1\*</sup>

ISHII, Kazuhiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪府立大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Sciences, Osaka Prefecture University

沈み込み帯で起こる地震・火山活動や変成作用を総合的に理解するために、地球物理学的・岩石学的な実験・観測・解析のほか、それらから得られる多様な情報を相互に関連づける様々な数値モデリングが行われている。しかし、沈み込み帯ではスラブやマントルウェッジの脱水・加水・溶融・固結に加え、流体の移動や流体による粘性の変化（部分溶融・加水軟化）など、様々な過程が相互に関連しながら起こるため、各過程を個別にではなく総合的に理解する必要がある。本研究では、スラブの脱水、マントルウェッジの加水・脱水、マントルウェッジの部分溶融、メルトとH<sub>2</sub>O流体の移動、温度・含水量・部分溶融度に依存したかんらん岩の流動則を考慮した数値モデルを用いて計算を行った。このモデルでは、地震波トモグラフィーなどの結果から推定されている、火山フロントの下からマントルウェッジ内にスラブとほぼ平行に延びるメルトの分布を再現することができるが、その形状はかんらん岩に対する水の溶解度、およびメルトやH<sub>2</sub>O流体の浸透流速度などのパラメータに依存して変化する。発表では、メルトの分布に対するこれらのパラメータの効果について検討し、沈み込み帯で起こる諸過程の相互関係について議論する。

キーワード: 沈み込み帯, メルト, 分布と輸送

Keywords: subduction zones, melt, distribution and transportation

## 鉱物の粒径分布が及ぼすマントルウェッジ内の水の流動パターン Effects of mineral grain size variation on fluid migration in the mantle wedge

和田 育子<sup>1\*</sup>; Behn Mark D.<sup>2</sup>  
WADA, Ikuko<sup>1\*</sup>; BEHN, Mark D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> ウッズホール海洋研究所  
<sup>1</sup>IRIDeS, Tohoku University, <sup>2</sup>Woods Hole Oceanographic Institution, USA

In this study, we investigate the effect of mineral grain size on the migration paths of aqueous fluids in the mantle wedge. Grain size is an important parameter that controls the grain-scale permeability of the mantle; in general, the smaller the grain size, the less permeable the mantle is, provided that the pores between grains are connected. The migration paths of aqueous fluids are therefore dependent on the grain size distribution, influencing the location and the degree of hydrous melting in the mantle wedge and the location of arc volcanism. We develop a 2-D fluid migration model with generic subduction zone geometry. In the model, we adopt grain size distributions calculated by coupling a subduction zone thermal model with a laboratory-derived grain size evolution model for a range of subduction parameters (Wada et al., 2011). The fluid migration model also includes the effects of mantle flow velocities and mantle-flow-induced pressure gradients, both of which are also calculated from the thermal model. The calculated grain size immediately above the slab is on the order of 10-100  $\mu$  m beneath the forearc region, depending on the slab thermal structure, and it increases down-dip to a few cm beneath the arc region. Our preliminary modeling results with a simplified fluid influx pattern indicate that the aqueous fluids tend to become trapped in the down-going mantle due to low permeability and dragged down-dip until permeability becomes high enough for the fluids to migrate upward. Grain size above a colder slab tends to be smaller than that above a warmer slab, and therefore fluids become dragged down-dip further in a cold-slab subduction zone than in a warm slab subduction zone. A colder slab also tends to release fluids at deeper depths than a warmer slab, influencing the pattern of fluid influx into the mantle wedge. In this study, we calculate the fluid influx along the base of the mantle wedge, using the thermal modeling results and thermodynamic calculations based on *Perple\_X*, and quantify fluid migration in the mantle wedge with the grain size and fluid influx distributions that are consistent with a given slab thermal structure.

キーワード: subduction zone, mantle wedge, aqueous fluid migration, grain size, slab dehydration, arc volcanism  
Keywords: subduction zone, mantle wedge, aqueous fluid migration, grain size, slab dehydration, arc volcanism



## 圧力 1GPa におけるアンチゴライト蛇紋岩弾性波速度の温度依存性 Temperature dependence of seismic velocities in a antigorite serpentinite at 1 GPa

白井 亮<sup>1\*</sup>; 渡辺 了<sup>1</sup>; 米田 明<sup>2</sup>; 道林 克禎<sup>3</sup>

SHIRAI, Ryo<sup>1\*</sup>; WATANABE, Tohru<sup>1</sup>; YONEDA, Akira<sup>2</sup>; MICHIBAYASHI, Katsuyoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 富山大学理学部地球科学科, <sup>2</sup> 岡山大学地球物質科学研究センター, <sup>3</sup> 静岡大学理学部地球科学科

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Toyama, <sup>2</sup>Institute for Study of Earth's Interior, Okayama University, <sup>3</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University

Serpentines play key roles in subduction zone processes including water transport, seismogenesis, exhumation of high-pressure rocks, etc. Geophysical mapping of serpentinitized regions in the mantle wedge leads to further understanding of these processes. Seismic properties of serpentinitized peridotites are critical to interpretation of seismological observations. Antigorite is a major form of serpentine, which is stable to higher temperatures. The single-crystal elastic properties were recently revealed via Brillouin scattering technique (Bezacier et al., 2010; 2013). However, the temperature dependence of elastic properties is still poorly understood. We have measured elastic wave velocities in a antigorite serpentinite at high temperature and pressure conditions.

A black massive antigorite serpentinite was collected from the Nagasaki metamorphic rocks, western Japan. It is composed of antigorite (98.0 vol.%), diopside (1.5 vol.%) and magnetite (0.5 vol.%). Microstructural observation reveals an interpenetrating texture characterized by randomly oriented antigorite blades. Antigorite CPO data shows weak concentration of antigorite axes. Elastic wave velocities measured at 180 MPa shows very weak anisotropy in elasticity. Cylindrical samples (D=L=6mm) were made with ultrasonic machining.

Measurements were made at the pressure of 1 GPa and the temperature of up to 550 C, by using a piston-cylinder type high pressure apparatus at ISEI, Okayama University. The pulse reflection technique was employed for velocity measurement. One LiNbO<sub>3</sub> transducer with the resonant frequency of 5 MHz was used to transmit and receive ultrasonic signals. The length of the sample at high pressure and temperature conditions was estimated from the length of the recovered sample.

Both compressional and shear wave velocities linearly decrease with increasing temperature. The temperature derivatives are  $-3.6 \times 10^{-4}$  (km/s/K) and  $-2.7 \times 10^{-4}$  (km/s/K) for compressional and shear wave velocities, respectively. The temperature derivative of compressional wave velocity is close to that observed in the direction subparallel to antigorite *c*-axis (Yano et al., in prep.). The temperature dependence of *c*<sub>33</sub> might dominate that of the effective elastic constants of a randomly oriented polycrystalline aggregate. Applications to seismological observations will also be discussed in this presentation.

キーワード: 地震波速度, 蛇紋岩, アンチゴライト, 沈み込み帯, 流体

Keywords: seismic velocity, serpentinites, antigorite, subduction zone, fluid

## ラマン・赤外分光計測による石英表面の水の構造化の検出とその分子動力学的評価 Detection of structured water on quartz interface by Raman-FTIR spectroscopy and its evaluation by molecular dynamics

石川 慧<sup>1\*</sup>; 佐久間 博<sup>2</sup>; 土屋 範芳<sup>1</sup>  
ISHIKAWA, Satoru<sup>1\*</sup>; SAKUMA, Hiroshi<sup>2</sup>; TSUCHIYA, Noriyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>2</sup> 独立行政法人 物質・材料研究機構

<sup>1</sup> Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, <sup>2</sup> National Institute for Materials Science

地殻中では含水鉱物や流体包有物中の水、間隙中の水など、様々な形で水が存在しており、プレートの沈み込み帯も、海洋由来の水やマントル由来の水などが存在する環境である。沈み込み帯における地震発生帯の温度は 150~350 °C 程度であり、水は亜臨界-超臨界で存在する熱水である。また、この領域の水は鉱物粒界に非常に薄い薄膜状の形で存在しており、この薄膜水はバルクの水（自由水）とは違った性質を持つことが知られている。

本研究では、高温高压の薄膜水が観察可能なダイヤモンドセルと顕微ラマン-赤外分光計を用いて、様々な温度圧力における金属反射板上および石英基板上の水を観察した。

ラマンスペクトルおよび赤外吸収スペクトルの観察結果より、3400cm<sup>-1</sup> 付近に現れる水の OH 伸縮振動ピークが温度圧力によって変化することが観察された。このピークは高温では水素結合の影響は弱まり 3700cm<sup>-1</sup> 付近にシフトするが、石英基板上の水について、高温であっても水素結合の影響を強く受けた 3200cm<sup>-1</sup> 付近の振動の存在が確認された。

また本研究では、分子動力学プログラム MXDORTO を用いて実験を模擬した条件でシミュレーションを行い、石英基板上の水の構造化を再現した。シミュレーションでは、石英表面近傍の数ナノメートルの範囲において、通常の水には見られない水の密度の分布が見られた。

以上のような分光観察、分子シミュレーションを用いて得られた石英表面の水分子の構造および性質の変化を、水分子と石英表面のシラノール基 (Si-OH) の水素結合に着目して考察する。

キーワード: ラマン分光, 赤外分光, 界面水, 亜臨界, 石英, 分子動力学

Keywords: Raman spectroscopy, IR spectroscopy, interfacial water, subcritical, quartz, molecular dynamics

## 地質学的証拠に基づいた地殻流体が関与する岩石破壊過程の解明 Generation process of brecciated marble at Hiraodai karst, Kyushu, Japan

石山 沙耶<sup>1\*</sup>; 安東 淳一<sup>1</sup>; 中井 俊一<sup>2</sup>; 太田 泰弘<sup>3</sup>; ダス カウシク<sup>1</sup>  
ISHIYAMA, Saya<sup>1\*</sup>; ANDO, Jun-ichi<sup>1</sup>; NAKAI, Shun'ichi<sup>2</sup>; OTA, Yasuhiro<sup>3</sup>; DAS, Kaushik<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 北九州市立自然史・歴史博物館いのちのたび博物館

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>3</sup>Kitakyushu Museum of Natural history & Human history

Geofluid is believed to be closely related to the seismic and volcanic activities. However, the detail relationship of geofluids with seismicity and volcanic activity is not studied properly through geological observations. We have found recently the brecciated marble widely distributed at Hiraodai karst plateau, Fukuoka Pref. This brecciated marble offers unique opportunity to study the relationship between geofluid and seismicity. Here, we shall explore the generation process of this brecciated marble through geological, microstructural and geochemical methods using polarization microscope, SEM, TEM, EPMA, microthermometric and MC-ICP-MS techniques.

The marble in Hiraodai karst plateau was thermally metamorphosed due to Cretaceous Hirao granodiorite intrusion. The brecciated marble occupies about 0.7 km x 1km of area in the central part of the karst. The main results of the present study are as follows.

- 1) The brecciated marble is composed of the rock fragments with variety of sizes ranging from millimeter to meter scale, and having angular to rounded shapes.
- 2) Numerous fluid inclusions are observed in the thin section of the brecciated marble.
- 3) TEM observation shows that the dense tangled dislocations are formed in calcite grains of the brecciated marble.
- 4) The homogenization and freezing temperatures of the fluid inclusions are about 240 deg C and 0 deg C, respectively.
- 5) The whole-rock and mineral separates (biotite and plagioclase) of Hirao granodiorite yields Rb-Sr isochron age of 129.4 +/- 2.4 Ma. Interestingly, Rb-Sr data of the fluid inclusions also lie on the Rb-Sr isochron of Hirao granodiorite.

The above-mentioned results of 1) and 2) suggest that the brecciation occurred by fluid infiltration and that the fragments were moved and rotated at very high speed. The result 3) demonstrates that the calcite grains of the brecciated marble experienced high stress. These three results together indicate that the brecciation process might generate seismic wave. On the other hand, the results of 4) and 5) suggest that the possible origin of the fluid inclusion is the released fluid from the Hirao granodiorite magma. Therefore, the brecciation of marble distributed at Hiraodai karst plateau was probably generated by magmatic fluid from Hirao granodiorite under high stress condition at 129.4 +/- 2.4 Ma ago.

Keywords: Brecciated rock, Hiraodai karst, Hirao granodiorite, Fluid inclusion, Rb-Sr isotope

## 沈み込む堆積岩層中の含水相 topaz-OH の高温高压下における状態方程式の決定 Equation of state of topaz-OH in the subducted sediment under high pressure and high temperature

新里 美月<sup>1\*</sup>; 井上 徹<sup>2</sup>; 蔡 闊<sup>2</sup>; 末次 秀規<sup>2</sup>; 柿澤 翔<sup>2</sup>

NIIZATO, Mizuki<sup>1\*</sup>; INOUE, Toru<sup>2</sup>; CAI, Nao<sup>2</sup>; SUENAMI, Hideki<sup>2</sup>; KAKIZAWA, Sho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学理学部地球科学科, <sup>2</sup> 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Ehime University, <sup>2</sup>Geodynamics Research Center, Ehime University

沈み込むスラブ中の含水鉱物の脱水分解反応によって H<sub>2</sub>O に富んだ流体が生成され、その流体はマグマの生成や熔融温度の低下、マグマ組成の変化を引き起こすと考えられている。topaz-OH [Al<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>] は沈み込むスラブの堆積岩層中に存在すると考えられる含水鉱物であり、天然の topaz [Al<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>(OH,F)<sub>2</sub>] の端成分である。安定領域については topaz-OH は 5-10 GPa、1500 °C まで安定に存在すると報告されている (Wunder *et al.*, 1993; Ono, 1998; Schmidt *et al.*, 1998)。状態方程式の研究は天然の topaz (Komatsu *et al.*, 2003; Gatta *et al.*, 2003) では行われているが topaz-OH においては未だに報告されておらず、また高温及び高压下での実験も行われていない。従って、本研究では topaz-OH の状態方程式すなわち熱弾性的性質を明らかにするために高温高压下での X 線その場観察実験を行った。

出発物質の topaz-OH はマルチアンビル型高压発生装置を用いた急冷回収実験によって 10 GPa、~1000 °C の条件下で合成した。X 線その場観察実験は高エネルギー加速器研究機構、PF-AR NE5C の高压発生装置 MAX80 を使用し、エネルギー分散法により X 線回折パターンの収集を 3-10 GPa、800 °C までの範囲で行った。熱弾性物性値は Angel (2000) による EosFit v5.2 の計算ソフトを用いて計算し、フィッティングには 3 次のバーチマーナハンの状態方程式を用いた。

高温高压条件下で得られた全データを 3 次のバーチマーナハン状態方程式によってフィッティングしたところ ( $K'=4$  で固定)、 $V_0=354.7(1) \text{ \AA}^3$ 、 $K_0=169.8(22) \text{ GPa}$ 、 $(dK_T/dT)_P=-0.013(7) \text{ GPa K}^{-1}$ 、 $a_0=1.61(23) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 、 $b_0=1.36(41) \times 10^{-8} \text{ K}^{-2}$  という値が得られた。一方、今回得られた圧縮データを詳しく解析すると、7 GPa 付近で圧縮特性の変化が示唆された。この現象は a 軸と b 軸の圧縮特性の変化として現れている。従って、7 GPa 付近を境界に低圧側、高压側で状態方程式の計算を試みた ( $K'=4$  で fix)。結果、低圧側で  $V_0=355.2(1) \text{ \AA}^3$ 、 $K_0=160.1(2) \text{ GPa}$ 、高压側で  $V_0=356.5(9) \text{ \AA}^3$ 、 $K_0=153.1(89) \text{ GPa}$  と異なる値をとる結果が得られた。天然の topaz を用いた先行研究との比較を行うと本研究によって得られた topaz-OH の体積、体積弾性率はともに先行研究より大きい値となった。これは OH の含有量の増加に伴う体積弾性率の増加が原因であると考えられる。体積弾性率に対する密度の比較を行うと、topaz-OH はバーチの法則に従う直線近くに位置し、高压含水相である Ph D [Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>] と並んで体積弾性率が大きく、密度が大きい鉱物であることが明らかとなった。そのため、topaz-OH は堆積岩層中の安定な領域ではスラブの沈み込みを促進させ、より深部へ水を運搬することができると思われる。

キーワード: topaz-OH, 高压含水相, 沈み込むスラブ, 状態方程式, 放射光 X 線その場観察

Keywords: topaz-OH, high pressure hydrous phase, subducting slab, equation of state, synchrotron X-ray in-situ experiment



メルト包有物と斜長石の Anorthite 成分から見積もる東北日本・伊豆弧の玄武岩質マ  
グマの含水量  
Water content in arc basaltic magma in northeast Japan and Izu-Mariana arc estimated  
from melt inclusions in olivine and

潮田 雅司<sup>1\*</sup>; 池口 直毅<sup>1</sup>; 高橋 栄一<sup>1</sup>  
USHIODA, Masashi<sup>1\*</sup>; IKEGUCHI, Naoki<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Eiichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup>Dept. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Primitive arc basalt magma is generated by partial melting of sub-arc mantle with adding aqueous fluid which was derived from dehydration of subducting slab. Aqueous fluid has profound effects on melting temperature of the mantle, crystallization pathways of generated magmas, and explosivity of magmas. Precise estimation of H<sub>2</sub>O content in arc basalt magma is important to evaluate the effect of water on generation, differentiation, and eruption of magmas in subduction zones. We estimated variation of water content of arc basaltic magmas in the northeast Japan arc and the Izu-Mariana arc using a simple plagioclase phenocryst hygrometer and melt inclusion analysis of olivine phenocrysts.

A simple plagioclase phenocryst hygrometer was constructed by high-pressure and high temperature experiments using internally heated pressure vessels: SMC-2000 and SMC-5000 installed at the Magma Factory, Tokyo Tech (Ushioda et al., 2013, VSJ fall meeting). High-pressure and high-temperature experiments were conducted for relatively primitive basalt from Miyakejima volcano under hydrous conditions. OFS (Ofunato scoria: Tsukui et al., 2001; Niihori et al., 2003) is one of the most primitive basalt in the last 10,000 years. All experiments were conducted near the liquidus of plagioclase ( $\pm$ magnetite) and therefore the composition of melt is essentially the same as the starting material. H<sub>2</sub>O content of melt was calculated by weight ratio of melt using mass balance calculation of all phases assuming that water was concentrated only in melt. Partition coefficient  $K_D^{pl-melt}_{Ca-Na}$  is proportional to H<sub>2</sub>O content in melt. In the experimental conditions, both pressure and temperature effects are negligible.

We then chose geochemical data sets of relatively primitive basaltic rocks (with no evidence of magma mixing) and most frequent Ca-rich plagioclase phenocrysts from 15 arc basaltic volcanoes, which includes both frontal arc volcanoes and rear-arc volcanoes from literature. In 15 volcanoes, plagioclase phenocrysts of high anorthite content (An>90) are commonly observed, whereas plagioclase phenocrysts in rear arc volcanoes usually have lower anorthite content (90>An>80). Estimated H<sub>2</sub>O content of basaltic magma is 3 wt.% H<sub>2</sub>O or higher.

We also analyzed H<sub>2</sub>O content of melt inclusions in olivine phenocrysts using FTIR micro reflectance measurement (Yasuda, 2011) and FTIR micro transmission measurement (absorption coefficient: Yamashita et al., 1996) in order to compare H<sub>2</sub>O content between melt inclusion analysis and this simple plagioclase phenocryst hygrometer. For example, melt inclusions of olivine phenocrysts in scoria from Ko-Fuji volcano had up to 3.7 wt.% H<sub>2</sub>O which was consistent with estimate from our simple plagioclase phenocrysts hygrometer. In Miyakejima volcano, melt inclusions of olivine phenocrysts from OFS contained up to 3.3wt.% H<sub>2</sub>O although H<sub>2</sub>O content was 5.2 wt.% estimated from this hygrometer. In either case, basaltic magmas in volcanic front have 3 wt.% H<sub>2</sub>O or higher.

キーワード: マグマ中の水, メルト包有物, 斜長石メルト間平衡  
Keywords: water in magma, melt inclusion, equilibrium between plagioclase and melt

## 加水・脱水反応に起因するフラクチャーパターン：個別要素法によるアプローチ DEM simulation on fracturing induced by hydration and dehydration reactions

岡本 敦<sup>1\*</sup>; 清水 浩之<sup>2</sup>  
OKAMOTO, Atsushi<sup>1\*</sup>; SHIMIZU, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院環境科学研究科, <sup>2</sup> 東北大学流体科学研究所

<sup>1</sup>Graduate School of environmental Studies, Tohoku University, <sup>2</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University

Dehydration and hydration reactions play significant roles on the global water circulation in the solid Earth, and cause drastic change in the mechanical properties of the subduction zone interface. Progress of both reactions requires an effective transport of water (release or supply) between the reaction sites and outer system, and are commonly characterized by large changes in solid volume, porosity, and fluid pressure. Reaction textures with fracturing are commonly observed both in hydration and dehydration hydration reactions. However, the dynamic relationship among reactions, fluid transport and deformation (fracturing, plastic deformation) is too complicated to be understood solely by observations of natural occurrences.

In the present study, we carried out numerical simulations on fracturing induced by hydration or dehydration reactions by using distinct element method (DEM). At first, we consider a dehydration reaction like a dehydration of serpentine. In the model, the following factors are introduced: (1) pressure dependence of reaction rate, (2) grain boundary as weak and water-saturated region, and that (3) mineral grains become permeable after fracturing or reacted. In this model, reaction rate drastically decreases with progress of dehydration reaction, when fluid cannot escape from the system.

We examined two rock systems; one is composed of reactive minerals (uniform-reactive system) and the other one is composed of reactive minerals embedded in unreactive matrix minerals (reactive minerals in matrix system). In both systems, one is drain-boundary, whereas all the others are undrain-boundary. The spatial variation in fractures and progress of reactions are contrasting between the two systems. In the uniform-reactive system, fracturing does not occur and reactions uniformly occur from the drain-boundary, because fluid effectively escapes through newly-produced pore-network. In contrast, the reactive-mineral-in-matrix-system, the fracture network is produced among the reactive grains, and heterogeneous distributions of reaction progress was produced in the rocks. We will further discuss the key parameters to controls the fracture patterns and difference between hydration and dehydration reactions.

Keywords: hydration, dehydration, fracturing, distinct element method

## Investigation on the temporal change in attenuation within ruptured fault zone of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake Investigation on the temporal change in attenuation within ruptured fault zone of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake

MA, Kuo-fong<sup>1\*</sup>; WANG, Yu-ju<sup>1</sup>  
MA, Kuo-fong<sup>1\*</sup>; WANG, Yu-ju<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, National Central University

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, National Central University

Attenuation, noted as  $1/Q$ , had been considered as a geophysical parameter related to the fluid content, temperature and fracture of the medium. The attenuation parameter related to S-wave named as  $Q_s$  has more significant indication to the factors indicated above. The damage zone of a large earthquake was often considered as a fracture zone, especially the hanging wall of a thrust faulting earthquake, which suggests a zone with possible high attenuation (decrease in  $Q$ ). Earlier  $Q_p$  and  $Q_s$  tomography studies revealed the feature with high attenuation on the hanging wall of the ruptured Chelungpu fault of the 1999 Chi-Chi earthquake. To examine the attenuation character in the rupture fault, we further investigate the temporal variation of the attenuation, specifically in  $Q_s$ , within the hanging wall before, following and after the earthquake. We observed a decreasing in  $Q_s$  within the fault rupture zone two years following the 1999 Chi-Chi earthquake by  $Q_s$  tomography images and an analysis of single-path  $Q_s$  near the Chelungpu fault. The synthetic and sensitivity tests of the  $Q_s$  determination were carried out accordingly to justify the temporal variation. A  $Q_s$  value within the hanging wall above the hypocenter was determined to be 157 two years following the Chi-Chi earthquake, which is significantly lower than the values of 238 and 289 prior to and two years after the main shock, respectively, from the  $Q_s$  tomography. Similar values using a signal-path  $Q_s$  analysis, from events within the ruptured fault zone to stations along the fault were obtained. The corresponding  $Q_s$  values were 247 prior to the Chi-Chi earthquake. After the earthquake, we obtained the  $Q_s$  values of 158 and 318 for the time, two years following and two years after the earthquake, respectively. Considering the two independent methods in determination of  $Q_s$ , the reduction in  $Q_s$  of 89 two years following the Chi-Chi earthquake in both method is significant. Along with 1%  $V_s$  reduction revealed by the analysis of repeating earthquakes, our studies suggested possible reduction both in  $V_s$  and  $Q_s$  within the fault zone after the Chi-Chi earthquake. The observation of temporal changes in  $Q_s$  after the Chi-Chi earthquake implies variations of pore fluid saturation in the ruptured fault zone. The reduction in  $Q_s$  two years following the Chi-Chi earthquake might indicate high pore-fluid saturation within fractured fault zone rocks due to post-seismic redistribution of the fluid.

キーワード: attenuation, fault zone, temporal variation, earthquake rupture

Keywords: attenuation, fault zone, temporal variation, earthquake rupture

## 台湾南西部に湧出する温泉の化学的性質について Chemical characteristics of hot springs in Southwestern part of Taiwan

菅井 秀翔<sup>1\*</sup>; 田中 秀実<sup>1</sup>; 照沢 秀司<sup>1</sup>; 角森 史昭<sup>2</sup>; 村上 雅紀<sup>3</sup>; 川端 訓代<sup>2</sup>  
SUGAI, Shuto<sup>1\*</sup>; TANAKA, Hidemi<sup>1</sup>; TERUSAWA, Shuji<sup>1</sup>; TSUNOMORI, Fumiaki<sup>2</sup>; MURAKAMI, Masaki<sup>3</sup>; KAWA-  
BATA, Kuniyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設, <sup>3</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup>School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of  
Tokyo, <sup>3</sup>OYO Corporation

台湾はユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界をなすマニラ海溝と琉球トラフの接合点に位置し、東部ではフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる一方で、台湾西部ではマニラ海溝においてユーラシアプレートがフィリピン海プレートの下に沈み込んでいる。このプレート境界は台湾南部の高雄市の付近で地上に乗り上げており、以北ではプレート境界が活断層として地表に現れている。多くの断層が北東-南西方向に発達しており、これらの断層からは多くの温泉が湧出し、特に南部の高雄県においては泥火山も見られる(浜田ほか, 2009)。

その中で本研究では台湾南西部、台南市や嘉義県に湧出する温泉に着目した。台湾西部ではプレート境界が陸上に活断層として表れており、この断層の東側 20 km 付近に列状に 34~70 °C の温泉が分布している。これらの温泉から採取された温泉水について各種化学分析を行った。本発表ではこれらの結果を報告する。

キーワード: 台湾, 温泉

Keywords: Taiwan, hot springs



## 有馬型流体の起源流体組成とフラックス推定 Estimate of isotopic composition and flux of Arima type fluid

田中 秀実<sup>1\*</sup>; 照沢 秀司<sup>1</sup>; 菅井 秀翔<sup>1</sup>; 角森 史昭<sup>2</sup>; 村上 雅紀<sup>3</sup>; 川端 訓代<sup>2</sup>  
TANAKA, Hidemi<sup>1\*</sup>; TERUSAWA, Shuji<sup>1</sup>; SUGAI, Shuto<sup>1</sup>; TSUNOMORI, Fumiaki<sup>2</sup>; MURAKAMI, Masaki<sup>3</sup>; KAWA-  
BATA, Kuniyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, <sup>3</sup> 応用地質 (株)

<sup>1</sup>School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo,  
<sup>3</sup>OYO Corporation

地下水の化学組成の変動は、地震を含む地殻変動の指標として古くから認知され、かつ世界の各地で現在も計測が続けられている。しかしながら、その目的に対する組成測定的位置、着目する組成等の必然性、すなわち地殻変動観測に対する化学測定の背景動機の必然性については、必ずしも明確ではなかったと考えられる。地震に関して言えば流体の前兆現象の存在がクローズアップされがちであるが、研究初期の段階が遙か昔となり、その後、地震流体分野自体が衰退してしまったことを考えれば、この戦略は現代では十分有効ではないと考えられる。本分野が再興するかどうかは、流体前兆現象的中／非的中を越えて、流体物理化学量の変動から断層等を含めた地殻の挙動を診断する診断学を確立させることができるか否かが鍵となるだろう。地殻変動を対象とした地殻流体の診断学を確立できるかどうかを調べるために必要な課題は、大きく分けて三つある(田中ほか 2012)。一つは、(1) 地殻変動を観察するために採取すべき流体の必然性、(2) 流体を観測、分析するための装置の必要な性能の想定と実装実現、最後には、(3) 測定された結果事例の解釈＝診断認知力の向上である。

以上のような理念に基づき、その中の小さな一つを取り上げて検討した結果を報告する。今回は、有馬温泉の湧泉を例として考える。有馬温泉は、複数の湧出源泉が存在し、掘削が行なわれた 1940～1950 年代以後、神戸市の管理のもと、一定の湯量と泉質を維持している日本でも数少ない温泉である。これまで多くの研究者の興味を引き、表層地質、地下構造、湧出源、湧出経路を始めとした種々の研究が行なわれ明らかにされてきた。表層および地下構造の物理探査の結果から、温泉水が断層を流路として上昇していることが明らかにされている。このような流体を我々は「断層流体」と呼び新たな流体分類カテゴリーとした。地殻変動の監視に特化した場合、断層流体かそうでないかは観測対象を明確化する際の重要な要素だからである。また、有馬温泉の起源については独特の同位体組成から、深部流体の混入が確認されている。本発表は、(1) なぜ、その位置で観察しなければならないのか? についての基礎的な課題と考えられる断層流体のフラックス定量を議論し、過去の解析結果と比較検討する。

キーワード: 地殻流体, 有馬型温泉, フラックス, 塩水, 同位体組成

Keywords: crustal fluids, Arima type Hot spring, fluid flux, saline water, isotopic composition

## 長距離用ガス採取管を用いたメタンガス測定 Basic experiments for continuous monitoring of CH<sub>3</sub> in the field by Mass spectrometer

川端 訓代<sup>1\*</sup>; 角森 史昭<sup>1</sup>; 村上 雅紀<sup>3</sup>; 田中 秀実<sup>2</sup>

KAWABATA, Kuniyo<sup>1\*</sup>; TSUNOMORI, Fumiaki<sup>1</sup>; MURAKAMI, Masaki<sup>3</sup>; TANAKA, Hidemi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>3</sup>OYO Corporation

野外におけるガスの連続観測は今後、科学的な目的や様々な場所の環境モニタリングなど幅広い分野で必要となると予測される。そのために、野外で環境ガス分析が可能な精密ガス分析装置の開発が行われている。本研究では分析装置から離れた箇所のガスの計測を可能とするための基礎実験を行った。ボアホール内や、トンネルなどある程度空間がある場所でのメタンガス放出を想定し、その発生源やガス量の推定を行った。本発表では実験室内での基礎実験結果を発表する。

本研究では質量分析計に 25m 長のある間隔でガス取り入れ口がつけられたチューブを取り付け、それぞれのガス取り入れ口からガスを注入し、ガスを連続的に分析した。得られた連続ピークはガス取り入れ口の位置に応じてピークの値や形が異なる結果を得た。この結果はガスの移流・拡散モデルとよく合っている。この結果は、分析装置から離れた箇所で発生したガスの分析が可能である事を示すと考えられる。

キーワード: 質量分析計, メタン, モニタリング, 野外

Keywords: Mass spectrometer, methane, monitoring, in the field

## 地下水中 Rn-222 と Cl<sup>-</sup>による立川断層帯の地殻化学的調査 Geophysical Research of Tachikawa Fault Zone by Rn-222 and Cl<sup>-</sup> Concentration in Groundwater

下舘 知也<sup>1\*</sup>; 角森 史昭<sup>2</sup>; 安原 正也<sup>3</sup>; 林 武司<sup>4</sup>

SHIMODATE, Tomoya<sup>1\*</sup>; TSUNOMORI, Fumiaki<sup>2</sup>; YASUHARA, Masaya<sup>3</sup>; HAYASHI, Takeshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国際基督教大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所, <sup>4</sup> 秋田大学

<sup>1</sup>International Christian University, <sup>2</sup>The University of Tokyo, <sup>3</sup>AIST, <sup>4</sup>Akita University

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake enhanced the probability of earthquake in Tachikawa Fault Zone. To evaluate the physical condition of Tachikawa fault zone, we researched Rn-222 concentration in groundwater, which is known as a precursory anomaly of earthquake. Additionally, we focused on the connection between the concentration of chloride ion in groundwater and fault damage zone and measured chloride ion in groundwater as well. Our purpose in this paper is to detect suitable groundwater for continuous measurement: (1) The depth of aquifer is deep enough to reach the bedrock. (2) Water contains much enough radon to monitor. (3) Water contains chloride ion whose concentration is controlled by the condition of fault damage zone.

Radon concentration in confined aquifer is supplied by alpha decay of radium in the surface of the grain. If the specific surface area of the grain changes according to physical condition of fault, radon concentration in the groundwater would change. The upper edge of bedrocks, main source of radon, has a depth of under 2,000 m around Tachikawa Fault Zone and it deepens in the west.

We focus on the distribution of chloride ion around Ayasegawa Fault is similar to one around Tachikawa Fault Zone. Low concentration of chloride ion in groundwater around Ayasegawa Fault is affected by fault damage zone, and we expect that groundwater around Tachikawa Fault Zone also shows low concentration of chloride ion due to fault damage zone. We use RTM1688(SARAD) for radon measurement, and ion chromatography for chloride ion measurement.

As a result, samples around the fault show high concentration of radon and low chloride ion. This suggests that the well around fault reach the bedrock and contain low concentration of chloride ion due to fault damage zone. These samples would show concentration change according to earthquake.

キーワード: ラドン, 塩化物イオン, 立川断層帯, 温泉水

Keywords: radon, chloride ion, Tachikawa Falut Zone, spring water

## 東北地方太平洋沖地震前に観測された地下水ラドン濃度の先行現象について Precursory Change of Radon Concentration in Groundwater before 2011 Tohoku Earthquake

角森 史昭<sup>1\*</sup>  
TSUNOMORI, Fumiaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, University of Tokyo

本講演では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の前に観測された、地下水ラドン濃度の先行的な濃度変化と後に観測された緩和的な濃度変化について報告する。

地下水中のラドン濃度は、地震の前後で異常変化をする場合があることが知られている。その現象の研究は、始まった当初は地震発生予測に利用できるのではないかという楽観的な見方をされてきたが、近年では様々な理由からほとんど行われていない。それでも、毎年多くの事例が報告されているので、地下水ラドン濃度の変動の機構を正しく理解する研究は重要である。本講演では、中伊豆に配置した連続観測点で実測された地下水ラドン濃度が、東日本東北沖地震の前後でどのような変動を示したかを報告し、それを理解するためのモデルについて議論したい。

中伊豆観測点のラドン濃度は、2010年11月ごろからラドン濃度の上昇が大きくなり、地震発生とともにラドン濃度のジャンプも観測された。その後、1年をかけて指数関数的にラドン濃度が減少し、現在では通常値に戻った。地震発生前にラドン濃度変化が起きるタイミングは1978年の場合と同じであるが、今回は上昇するという変化であったことが前回と異なる。地震発生後の変化は、1978年の時はすぐに通常値に戻ったが、今回は1年をかけて指数関数的に減少して通常値に戻ったことも特徴である。これまでに確からしい地震前兆現象は報告されていないので、これらの地震前後のラドン濃度変化が前兆現象であると確定できない。しかしもし、これらの変化が装置由来のゴーストであったならば、地震発生と同時の濃度変化や1年をかけての指数関数的な変動を説明することができない。このことから、今回観測されていたラドン濃度の地震前の変化は先行現象ではないかと考えている。

キーワード: ラドン, 地下水  
Keywords: Radon, Groundwater



## 敦賀地域江若花崗岩中に分布する破砕帯の冷却史：複数の熱年代学的手法による制約

### Cooling history of a fracture zone in the Kojyaku granite, Tsuruga area: Constraints from multi-system thermochronology

末岡 茂<sup>1\*</sup>; 安江 健一<sup>1</sup>; 丹羽 正和<sup>1</sup>; 島田 耕史<sup>1</sup>; 石丸 恒存<sup>1</sup>; 梅田 浩司<sup>1</sup>; 山田 隆二<sup>2</sup>; 檀原 徹<sup>3</sup>; 岩野 英樹<sup>3</sup>; 郷津 知太郎<sup>4</sup>

SUEOKA, Shigeru<sup>1\*</sup>; YASUE, Ken-ichi<sup>1</sup>; NIWA, Masakazu<sup>1</sup>; SHIMADA, Koji<sup>1</sup>; ISHIMARU, Tsuneari<sup>1</sup>; UMEDA, Koji<sup>1</sup>; YAMADA, Ryuji<sup>2</sup>; DANHARA, Tohru<sup>3</sup>; IWANO, Hideki<sup>3</sup>; GOUZU, Chitaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 原子力機構, <sup>2</sup> 防災科技研, <sup>3</sup> 京都 FT, <sup>4</sup> 蒜山地質

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>2</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>3</sup>Kyoto Fission-Track Co., Ltd., <sup>4</sup>Hiruzen Institute for Geology and Chronology Co., Ltd.

通常、断層の活動年代は、断層変位を受けた地形面や地層、または人工物などの変位指標の年代から推定される。しかし、基盤岩中の断層など、変位指標を持たない断層についてはこのような変動地形学的手法は適用できない。上記のような断層に対しては、断層活動時の摩擦発熱や岩石破砕に伴う放射年代のリセット（例えば、Ikeya et al., 1982; Murakami and Tagami, 2004; Yamada et al., 2013; 雁沢ほか, 2013）や、断層活動後に形成された粘土鉱物や熱水脈の形成年代（例えば、Zwingmann et al., 2004; Watanabe et al., 2008; Siebel et al., 2009; Yamasaki et al., 2013）に基づいた、地球年代学的なアプローチが試みられてきた。しかし、断層帯近傍における熱現象や物質移動は単純ではなく、決定的な方法は未だに確立されていない。同手法の今後の発展のためには、さらなる基礎研究と、様々な地形・地質条件と年代測定手法の組み合わせにおける事例研究の蓄積が必要である。

本講演では、敦賀半島北西部の露頭で見られた基盤岩中の断層破砕帯に対し、フィッション・トラック法 (FT法)、K-Ar法、U-Pb法といった熱年代学的手法を適用して冷却史を求め、活動年代の推定を試みた事例について紹介する。近畿三角帯の北頂部にあたる湖北地域～敦賀湾沿岸には、湖北山地断層帯や野坂・集福寺断層帯をはじめとした北東-南西または北西-南東方向の横ずれ断層が多数分布する（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2003a, b）が、山間部を通過する横ずれ断層では上載地層を利用した変動地形学的手法の適用は困難なことが多い。本研究で対象とした断層も江若花崗岩敦賀岩体（栗本ほか, 1999）中に形成された横ずれ断層で、人工改変の影響もあり上載地層や変動崖は認められない。年代測定は、1) 断層破砕帯を充填する粘土状物質、2) 断層破砕帯から10数m離れた断層破砕を受けていない花崗岩新鮮部、3) 断層破砕帯から数mの位置に貫入した玄武岩脈、の3グループについて行った。破砕帯試料と花崗岩試料では、ジルコンU-Pb年代 (66.8±1.0Ma, 68.5±0.7Ma) とジルコンFT年代 (58.7±11.2Ma, 71.6±4.8Ma) では有意な差が見られず、ジルコンFT長 (11.04±0.71 μm, 10.84±0.66 μm) にも共に短縮は認められなかった。これは、約68Maの花崗岩貫入以降、花崗岩がジルコンFT法の閉鎖温度 (210~350 °C) 付近に冷却されるまでの間、両者は冷却史を共有していたことを示している。一方、アパタイトFT年代 (閉鎖温度: 90~120 °C) では、花崗岩で50.8±18.5Maに対して破砕帯で28.4±13.6Maという若い値が得られており、年代値の誤差が大きいため断定はできないが、破砕帯のみがより最近に被熱している可能性が否定できない。熱源の候補としては、新第三紀以降の断層摩擦発熱と、中新世の玄武岩脈の貫入 (斜長石K-Ar年代と全岩K-Ar年代で19.1~18.8Ma) が挙げられるが、いずれの場合もイベント年代よりアパタイトFT年代が古く、partial annealingの状態である可能性が考えられ、イベントとの対応には慎重な検討が必要である。講演当日は、FT長測定の結果も踏まえた検討結果を報告予定である。

キーワード: 断層帯の年代測定, フィッション・トラック法, K-Ar法, U-Pb法, 江若花崗岩

Keywords: dating of a fault, fission-track thermochronology, K-Ar dating method, U-Pb dating method, Kojyaku granite

## 西南日本における有馬型温泉の探索と検証 Chemical and isotopic examinations of Arima-type high saline hot spring water in south-west Japan

田中 秀実<sup>1\*</sup>; 照沢 秀司<sup>1</sup>; 菅井 秀翔<sup>1</sup>; 角森 史昭<sup>2</sup>; 村上 雅紀<sup>3</sup>; 川端 訓代<sup>2</sup>  
TANAKA, Hidemi<sup>1\*</sup>; TERUSAWA, Shuji<sup>1</sup>; SUGAI, Shuto<sup>1</sup>; TSUNOMORI, Fumiaki<sup>2</sup>; MURAKAMI, Masaki<sup>3</sup>; KAWABATA, Kuniyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, <sup>3</sup> 応用地質株式会社  
<sup>1</sup>School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo,  
<sup>3</sup>OYO Corporation

日本には 30000 点近くの源泉が存在し、古くからその成分や熱源、水源を探る研究が多数行われてきた。Matsubaya et al.,(1974) は、温泉水中の水素と酸素の同位体比及び地質から日本中の温泉の起源を (1) 火山温泉型, (2) 有馬温泉型, (3) 海岸温泉型, (4) グリーンタフ型の 4 つに分類した。この中で, (2) 有馬型温泉は深部流体を起源とした温泉で水素・酸素同位体比は起源が天水とマグマ水の混合であることを示唆している。また, He 同位体比は有馬温泉では 10Ra 程度で深部起源のガスが上昇してきていると言える。

杉本 (2012) は、日本全国の温泉 6058 点のデータを温泉分析書から収集し、微量元素を用いて約 180 点の有馬型温泉と思われる温泉を抽出した。この中で用いられた Li/Cl, Br/Cl はそれぞれ、水が経験した最高温度 (You et al., 1996), 海水や生物の影響 (Hurwitz et al., 2005 上村ら 1999) の指標となっており、より高温を経験し、海水・生物の影響の少ない温泉を有馬型温泉の候補としている。しかし、温泉分析書をもとにした議論であるため、元々の定義付けに用いられた水素・酸素同位体比に関する議論は行われていない。

そこで、本研究では杉本 (2012) での基準を踏襲し、データ数を約 9887 件に増やした上で、有馬型温泉の再抽出をした。その結果全国で 185 点の候補を抽出し、その中から西日本を中心に 67 点を現地に赴き、採水、水素・酸素同位体比及び溶存イオン濃度測定を行った。

その結果、四国中央構造線沿い、鹿塩、石仏を含む近畿中央構造線沿いで有馬温泉と同様に同位体シフトのある温泉が見つかった。水素・酸素同位体比におけるそれぞれでの天水と起源水との混合線を外挿すると 1 点に収束し、これを有馬型温泉の起源水とした。塩化物イオン濃度と水素同位体比の関係でも 1 点に収束することから、起源水の組成を  $\delta D = -35 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{18}O = 5 \text{ ‰}$ ,  $Cl^- = 42 \text{ g/l}$  と見積もった。今までの最も塩濃度の高い温泉での水素・酸素同位体比を起源水のものであるという起源水の決め方に比べ、複数地域からの同位体シフト線が 1 点に集まった今回の結果は起源水の組成にかなり強い成約を与える。

キーワード: 有馬温泉, 酸素同位体, 水素同位体, 塩水, 起源組成

Keywords: Arima hot spring, Oxygen Isotope, Hydrogen Isotope, Brine fluids, original composition

## 2013-2014年房総スロースリップイベントにおけるすべりと地震活動の時空間発展 Spatial and temporal evolution of slip and seismicity during the 2013-2014 Boso slow slip event

福田 淳一<sup>1\*</sup>; 加藤 愛太郎<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 三浦 哲<sup>2</sup>  
FUKUDA, Jun'ichi<sup>1\*</sup>; KATO, Aitaro<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; MIURA, Satoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東北大学理学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Tohoku University

GPS time series data show that transient crustal deformation has been occurring in the Boso peninsula, central Japan, since December 2013. Observed spatial and temporal patterns of surface displacements suggest the occurrence of transient aseismic slip on the subducting Philippine Sea plate. In addition, an increased rate of seismicity was observed from 31 December 2013 to 9 January 2014 off the east coast of the Boso peninsula. The location of the increased seismicity partly overlaps with the areas of seismic activity during the past Boso slow slip events.

To estimate spatial and temporal evolution of aseismic slip, we use GPS data from 71 stations of the GEONET in the Kanto region and data from 6 stations located along the east coast of the Boso peninsula, which are operated by Earthquake Research Institute of University of Tokyo and Tohoku University. The data are analyzed with GIPSY-OASIS II software to obtain daily coordinate time series at the 77 stations. Secular velocities, seasonal variations, and postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake are removed from the time series. We use a modified version of the Network Inversion Filter to estimate spatial and temporal evolution of daily cumulative slip and slip rate on the Philippine Sea plate. Slip slowly started around 20 December 2013 off the east coast of the Boso peninsula and then slip rapidly accelerated around 28 December and propagated to the west. Slip continued to accelerate until 3 January and then rapidly decelerated until 9 January.

To investigate spatial and temporal correlation of slip and seismicity, we use a matched-filter technique to detect earthquakes in the area of increased seismic activity. The detected earthquakes are located along the northern edge of the large aseismic slip and migrated from east to west during the period of rapid aseismic slip (31 December to 9 January). This migration pattern is consistent with the propagation of rapid aseismic slip, suggesting that the earthquakes are triggered by stress loading due to the propagation of aseismic slip. We do not identify significant seismic activity before 28 December, indicating that the slow slip event started well before the initiation of the seismic activity.

キーワード: スロースリップイベント, 地震活動, GPS  
Keywords: slow slip event, seismic activity, GPS

## 2011年東北沖地震に誘発された房総スロースリップイベント A slow slip event near the Boso Peninsula immediately triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>; 五十嵐 俊博<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>  
KATO, Aitaro<sup>1\*</sup>; IGARASHI, Toshihiro<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> ERI University of Tokyo

It has been recognized that a series of slow slip events, accompanying with ordinary earthquakes, take place with recurrence intervals from 5 to 7 years near the Boso Peninsula along the plate interface of the subducting Philippine Sea plate [e.g., Hirose et al., 2012]. Immediately after the 2011 Tohoku-oki earthquake, intensive afterslip have been detected to start along the plate interface of the Pacific plate from off Tohoku region to southward Kanto region [e.g., Munekane et al., 2012; Fukuda et al., 2013]. It is well known that both the Pacific and the Philippine Sea plates are subducting beneath the Kanto region, and interacting with each other. Therefore, it is expected that the Philippine Sea plate might be dragged by the speeding Pacific plate during the intensive afterslip. We hypothesize that the dragging of the Philippine Sea plate by the Pacific plate leads to triggering of a slow slip event near the Boso Peninsula immediately after the Tohoku-Oki earthquake.

In order to verify the above hypothesis, we analyzed the seismicity including small repeating earthquakes, applying the matched filter technique to continuous waveforms. We used all available earthquakes associated with three sequences of slow slip events in 2007, 2011, and 2014 as template events. Then, we searched for events those have similar waveforms to ones of each template event from continuous waveforms. Based on the new earthquake catalog, we found out an abrupt increase in the swarm-like seismicity at the slow slip source area from March 12 to 14, 2011. In addition, some repeating earthquakes were extracted in the swarm, indicating aseismic slip transient. We, thus, interpret that the seismic swarm were linked to a newly detected slow slip event, which has not been previously recognized. However, based on the amount of aseismic slip deduced from the repeating earthquakes, moment released by the slow slip event is estimated to be smaller than by previously recognized slow slip events. We thus conclude that a small slow slip event might be triggered through the dragging of the Philippine Sea plate by the Pacific plate immediately after the Tohoku-Oki earthquake.



## 房総半島沖のスロースリップイベントに伴う群発地震活動と地球潮汐の関係 Tidal correlations of earthquake swarms associated with slow slip events off Boso Peninsula

田中 佐千子<sup>1\*</sup>  
TANAKA, Sachiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科研  
<sup>1</sup> NIED

### 1. はじめに

房総半島沖では、フィリピン海プレートの沈み込みに伴い、数年間隔でスロースリップイベントが発生し、その北縁域では、これらの活動に同期して、群発地震活動が活発となることが知られている (Hirose et al., 2012). 2013年12月末から2014年1月上旬にかけて発生したスロースリップイベントでは、約1週間にわたって地震活動の活発化が観測され、12/24時間の周期で消長を繰り返す特徴が見られた。群発地震活動の発生に地球潮汐が影響を及ぼしている可能性が示唆される。本研究では、2000年以降に捉えられた4回のスロースリップイベント (2002年, 2007年, 2011年, 2014年) に注目し、各イベントに伴う群発地震活動と地球潮汐の関係を調査した。

### 2. データ・解析方法

スロースリップイベントに伴う群発地震活動は、Hirose et al. (2012) に従い、深さ 28 km 以浅の Hi-net 震源データに基づいて抽出した。地球潮汐による応力変化は Tanaka et al. (2012) の方法を用い、海洋荷重の効果も含めて理論的に計算した。応力成分は断層面上のクーロン破壊応力 (摩擦係数 0.2) に着目した。断層幾何は、2014年の活動の最大地震 (Mw 4.9) について得られた F-net モーメントテンソル解を参考に、プレート走向に沿う陸側傾斜の逆断層を仮定した。計算した理論地球潮汐から地震発生時刻の潮汐位相角を読み取り、Schuster (1897) の方法を用いて位相選択性の有無を検定した。この検定で得られる p 値は帰無仮説「地震発生は地球潮汐の位相角によらない」を棄却する危険率を表す。

### 3. 解析結果

2014年の活動について、活動推移を地球潮汐によるクーロン破壊応力と比較すると、地震の発生数は応力変化に対応して増減を繰り返し、地球潮汐の特定の位相に集中する傾向が見られた。活動の全期間について得られた p 値は 0.01% で、地震の発生が地球潮汐の応力変化に対して強い位相選択性を示すことが明らかとなった。地震の発生頻度は、地球潮汐による応力変化が断層面上のすべりを最も強く促進する位相角 0 度付近に集中する傾向を示す。スロースリップによって周辺の応力状態が高まり、地球潮汐の応力変化が加わることで地震が誘発されたと考えることができる。

一方、2002年, 2007年, 2011年の活動については、活動推移と地球潮汐との間に明瞭な対応関係は見られない。各期間について得られた p 値は、87% (2002年), 16% (2007年), 14% (2011年) である。房総半島周辺で観測された地殻変動データからは、これら3回の活動では、2014年よりも変動量が大きく、スロースリップイベントの規模が大きかったと考えられる (Hirose et al., 2013; 木村, 2014)。2002年, 2007年, 2011年の活動では、スロースリップの影響が大きく、地震の誘発に地球潮汐による応力変化はほとんど影響を及ぼさなかったと推察される。

キーワード: 房総半島スロースリップ, 地球潮汐, 地震トリガリング

Keywords: Boso Peninsula slow slip events, Earth tides, earthquake triggering

## 水準データから推定される1981年以降の東海地方の固着・スロースリップ Interplate coupling and SSE in the Tokai region after 1981 using leveling data

落唯史<sup>1\*</sup>  
OCHI, Tadafumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>産総研  
<sup>1</sup>AIST

2000年から2005年にかけて発生した東海長期スロースリップイベント(SSE)は約5年間継続したイベント[水藤・小沢(2009)]で、他の地域で発生したSSEと比べても継続期間が極めて長い[例えば、Schwartz and Rokosky(2007)]。2005年以降は顕著なイベントは発生していないため、現段階では繰り返しの全体像は得られていないし、そもそも繰り返す現象なのかどうか不明かではない。Ochi and Kato(2013)は固着・すべりの時間発展を推定したが、これはGNSSデータによる面的な地殻変動が容易に得られるようになった1996年以降の解析であるから、上記の問題の解決には足りない。固着・スロースリップの時間発展をモデリングし物理過程を考察するためには、次のSSEが発生するまで待つか、過去の同様なイベントを探索するかの二通りの選択肢があるが、現段階でできる研究は明らかに後者である。

過去にも様々な測地観測は行われており、これらのデータを用いた固着の時間変化の研究はこれまでもいくつも行われている。たとえば木股・山内(1998)ではEDMの、小林・吉田(2004)では潮位記録のデータを解析して、過去の地殻変動の変化を検出している。本研究では1981年以降、1999年までの水準測量データを解析し、東海地方の上下地殻変動のパタンによる時間変化を推定した。掛川?御前崎の水準路線に対しては年4回の、また舞阪を西端、静岡を東端とする三角形の水準路線に対しては年1回のデータが国土地理院により提供されている。これらのデータを用いて、2年平均の年間鉛直変動速度をFujii(1991)の時間依存網平均方法により推定した。推定誤差は2mm/yr程度であり、同様のモデルをGNSSデータに適用したときの鉛直変位速度の推定誤差の2倍程度である。他の測地データと比較して水準データを用いることの最大の利点は、網平均をとることによって、比較的誤差の小さい鉛直変動データが面的に得られることである。

解析の結果、SSEの有無に対応すると考えられる2つの空間パタンが交互に現れ、2000-05年のSSEと似たパタンが1982-83、1988-90、1997年に現れた。このうち1982-83年のイベントは継続時間が短いのにに対して、1988-90年のイベントは長期間継続しており、2000-05年のイベントと合わせると、継続期間に多様性があることがわかった。1997年の小さなイベントを含めると、大小の現象が交互に発生し、大きなイベントの後には間隔が広がるようにも見える。ただし、1997年のイベントは2000年以降のSSEと近接しているため、時間方向の平滑化による見かけ上の結果である可能性があり、この点は検討中である。

さらに得られた結果からプレート境界面の固着・スロースリップの分布の時間変化を推定した。スロースリップの中心の位置はOchi and Kato(2013)の結果にしたがって浜名湖北東深さ30-40km程度の場所に固定し、大きさのみをフォワード計算で合わせたところ、1982-83年、1988-90年のいずれの現象も、2000-05年のSSEと比べてすべり量は数割程度小さくする必要があることがわかった。一方、固着に関しては御前崎直下ではほぼ一定に30-40mm/yr程度のすべり欠損に相当する量が必要であり、これは2000-05年のイベントと同様である。

キーワード: 水準データ, プレート間固着, スロースリップ, 東海地方  
Keywords: leveling data, interplate coupling, slow slip event, the Tokai region

## 道北で2012年後半に発生した浅いSSE：地震動によるトリガー A shallow slow-slip-event in northern Hokkaido in 2012-2013: An event triggered by seismic waves.

池田 将平<sup>1\*</sup>; 日置 幸介<sup>2</sup>  
IKEDA, Shohei<sup>1\*</sup>; HEKI, Kosuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学院, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

GPS (Global Positioning System) に代表される全球衛星測位システム GNSS (Global Navigation Satellite System) が登場し、地震動を伴わない断層すべりであるスロー地震 (Slow Slip Event, SSE) が観測できるようになった。従来、房総沖や南海トラフなど、海域のプレート境界で起こった SSE については多くの報告があるが、内陸部での浅い SSE の報告はなかった。本研究では、プレート境界から離れた内陸部である道北 (北海道北部) で 2012 年夏から 2013 年初頭にかけて、GEONET (GNSS Earth Observation Network System) の点である幌延と中頓別の間の距離が 2 cm 近く縮んだことを見出し、その原因を SSE と仮定し、断層パラメータ等を推定した。SSE が起こった道北には南北にブロック境界が走り、年間 1 cm 程度の東西方向の収束が起こっていると考えられている (Loveless and Meade, 2010)。この SSE は内陸部のブロック境界におけるイベントとしてユニークな観測例である。

本研究では、幌延と中頓別に、天塩や浜頓別等の近隣 GNSS 局も加えて、それらの相対位置の時系列を解析した。今回推定されたスロー地震の断層パラメータによると、解放された地震モーメントはマグニチュード 5.9 に相当するものであった。すべり量は約 10 cm と推定されたが、道北のブロック境界の平均的な収束速度 (1cm/yr) から、この程度の SSE は、十年に一度程度の間隔で繰り返している可能性がある。残念ながら幌延と中頓別の GNSS 局はいずれも 2002 年に運用を開始しており、2012 年の前の回の SSE についての情報は得られていない。

幌延—中頓別の基線長変化は 2012 年夏と 2013 年初頭に折れ曲がりを持つ折れ線で最も良く近似される。折れ曲がりの位置を、残差が小さくなるように最適化すると、開始が 2012.64、終了が 2013.08 となった。開始時期にはサハリン深部で深さ 600 km を超える Mw7.7 の深発地震が 8 月 14 日に発生している。また同年 7 月には幌延局の近傍で四度の M4 級地震が発生している。SSE の開始は、これらの地震による地震動が関わっている可能性が高い。また SSE が終わった時期 (2013/1/3) には SSE の断層の深部延長の深さ約 24 km のところで M4.8 の地震が発生している。力学的にはこの地震が SSE の終了を促すことは考えにくいいため、SSE の終了と断層深部延長における地震の発生は偶然である可能性も高い。

キーワード: GPS, スロー地震, 道北, 地震動

Keywords: GPS, Slow Slip Event, Northern Hokkaido, seismic waves

## DONET 内で同時期に観測された地震活動変化と圧力変動 Seismicity and pressure changes observed around DONET at the same time

鈴木 健介<sup>1\*</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>; 神谷 眞一郎<sup>1</sup>; 中野 優<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
SUZUKI, Kensuke<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>; KAMIYA, Shin'ichiro<sup>1</sup>; NAKANO, Masaru<sup>1</sup>; KANEDA,  
Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

海洋研究開発機構は、南海トラフで発生する地震・津波を常時監視することを目的として、熊野灘海域に地震・津波観測監視システム（Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis: DONET）を展開している。DONET の各観測点には、広帯域地震計・強震計・ハイドロフォン・微差圧計・水晶水圧計・温度計が設置され、海底ケーブルに接続されているためにデータがリアルタイムで常時陸上に伝送されてきている。陸から離れた海域に地震計が設置されているため、陸上観測点のみでは捉えることのできない微小地震を検知することが可能であり、微小地震を含めた詳細な地震活動およびその変化を捉えることができる。同様に、水圧計が常時海底に設置されているため、連続的に水圧変化を監視し、ローカルな地殻変動を捉えることが可能である。上述された地震・測地学的情報は、地震発生のメカニズムを考える上で基礎的かつ重要な情報となる。

現在、海洋研究開発機構では、気象庁一元化カタログとは独自に DONET の広帯域地震計記録から地震の検知をおこなっているため、気象庁一元化カタログには載っていない微小地震も検知することができる。鈴木・他（2013）は、2011年01月から2013年9月までの地震活動に対して ETAS モデル（Ogata, 1989）を適用し、2013年2月以降はモデルから予測されるよりも地震活動が低下していることを示した。また、同時期の圧力計の記録に注目すると一部の近接した観測点（KMB05, KMB06, KMB07）においてトレンドからのずれ（圧力変動）が観測された。

本研究では、鈴木・他（2013）が用いたデータに2014年1月までのデータを追加し、同様の解析をおこなった。その結果、2013年2月以降の地震活動は依然としてモデルから予測されるよりも低調である。一方、3点の圧力計で観測された変動は2013年9月以降も続いており、鈴木・他（2013）では変動が確認されなかった3観測点に近接した KMB08 においても新たに変動が観測された。同時期に地震活動と圧力計に変動がみられたことから両者の間になんらかの関係性が存在することが期待される。地震活動変化と圧力変動を引き続き監視するとともに圧力変動を説明可能な断層運動を推定し、地震活動に与える影響を評価することが今後の課題である。

キーワード: 地震活動, 海底圧力計, DONET, ETAS モデル

Keywords: seismicity, ocean bottom pressure gauge, DONET, ETAS model



## 地下水位（水圧）観測による南海トラフの短期的ゆっくり滑りの検出 Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough by observations of groundwater level or pressure

北川 有一<sup>1</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1\*</sup>

KITAGAWA, Yuichi<sup>1</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質調査総合センター

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

非火山性の深部低周波微動（以降、単に深部低周波微動と記す）が世界のいろいろな沈み込み帯で発見されている [Obara, 2002; Ide, 2012]。 (地殻変動のみを生じて通常の地震波をださない) 短期的ゆっくり滑りも同様に世界の沈み込み帯で検出されている [Rogers and Dragert, 2003; Schwartz and Rokosky, 2007; Sekine et al., 2010]。 深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りについては時空間的に密接な関係があるが、詳細に見てみると、深部低周波微動が発生している所で必ずしも短期的ゆっくり滑りが発生していない場合があるし、その逆の場合もある。したがって、沈み込み帯のプレート境界で何が起きているのかを知る為には、深部低周波微動と短期的ゆっくり滑りの時空間的な関係を、より詳細に明らかにする必要がある。しかしながら、地殻変動観測による短期的ゆっくり滑りの検出能力は、地震観測による深部低周波微動のそれより一般に劣ることを考慮する必要がある。双方の検出能力が異なる大きな理由の1つは、地殻変動の距離減衰は、地震波の距離減衰よりずっと大きいということである。したがって、この検出能力の差異を小さくするために、短期的ゆっくり滑り検出のための新たな観測技術を開発する必要がある。我々は、三重県のANO観測点における地下水圧観測とそのデータの解析によって、南海トラフの短期的ゆっくり滑りを検出することを試みた。ANO観測点での地下水・地殻ひずみ観測は2010年2月にスタートしたが、観測データが安定したのは2011年6月以降である。2011年6月～2013年4月の観測データを調べた所、ANO観測点周辺で発生した6度の短期的ゆっくり滑りに対してANO観測点のひずみだけでなく、地下水圧も変化していることがわかった。この地下水圧変化は、短期的ゆっくり滑りのモデルを用いて定量的に説明出来た。また、地下水圧（地下水位）観測で短期的ゆっくり滑りが検出可能な条件についても考察した。南海トラフの短期的ゆっくり滑りに伴う体積歪変化は、大きくても10-20 nstrain/day (nstrain=10<sup>-9</sup>strain) なので [Kobayashi et al., 2006], 体積歪に換算して、ノイズレベルを5 nstrain/day 以下にする必要がある。実際の地下水観測条件を考慮すると、この条件を満たすためには、地下水位や地下水圧の体積ひずみ感度が1mm/nstrain 以上で、ノイズレベルが50mm/day 以下であることが必要条件である（十分条件ではない）。

キーワード: ゆっくり滑り, 深部低周波微動, 地下水, 多孔質弾性論, ひずみ, 地震予測

Keywords: Slow slip event, Deep low-frequency tremor, Groundwater, Poroelastic theory, Strain, Earthquake forecast

## 深部低周波微動エピソードの時間発展に見られる特徴 Time evolution of non-volcanic tremor episode

小原 一成<sup>1\*</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>; 田中 佐千子<sup>2</sup>; 前田 拓人<sup>1</sup>

OBARA, Kazushige<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>; TANAKA, Sachiko<sup>2</sup>; MAEDA, Takuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

西南日本などの沈み込み帯に発生する深部低周波微動 (Obara, 2002) は、プレート境界の巨大地震発生域と安定すべり域との間の遷移領域を震源とするスロー地震現象であり、数日以上継続する規模の大きな微動エピソードは短期的スロースリップイベント (SSE) を伴って発生することから、微動の時間発展は SSE のすべり破壊過程を反映すると考えられる。巨大地震と類似した特性を示す微動・SSE の活動様式を明らかにすることは巨大地震の理解にも重要であることから、本研究では微動エピソードの時間発展について解析を行なった。

西南日本に発生する深部低周波微動は、それぞれのエピソードの移動範囲や繰り返し性から数個のセグメントに分割される (Obara, 2010)。また、一つのセグメント内でも複数のサブセグメントが存在し、微動エピソードの活動を規定する (小原・他 2013)。微動エピソードは幅の狭い帯状領域の深部側から開始することが多く、浅部側に達する場合に規模の大きなエピソードとして発達するが、浅部側でも不均質の強い場所から微動エピソードが始まることもある (Obara et al., 2011)。これらの微動エネルギーの成長速度を比較すると、深部で微動が開始した場合は、はじめは成長速度が遅く浅部に達した途端に速度が急増するのに比べ、浅部から開始した場合には、活動開始直後から成長速度が速い。このことは、強いエネルギーを放射する微動源が浅部側に集中していることを示す。また、微動エピソードの最終的規模は、開始時の成長速度に依存せず、大きなエピソードに発展するかどうかは、途中のひずみエネルギーの蓄積状況によると考えられる。このことは、微動エピソードの走向方向への進展についても同様であり、移動する微動エピソードがサブセグメント境界を越えるかどうかは、その先のサブセグメントのすべり欠損の状況に依存する。微動活動のギャップであるサブセグメント境界では、移動速度が一旦減速する場合が認められた。一方、ある場所では、微動エピソードがそこを通過する際に加速することが何度か確認されている。この場所は、定常的に小規模な微動が発生する sweet spot に対応し、エピソードの開始点となる場合も多いことから、不均質性が強いことが考えられる。このような不均質がスロースリップのすべり破壊過程に影響を及ぼしているのであろう。

※この研究は、科学研究費助成事業基盤研究 (A)「沈み込みプレート境界遷移領域におけるすべり特性の解明」によって実施された。

キーワード: 深部低周波微動, スロー地震, 沈み込み帯, 震源移動, セグメンテーション

Keywords: non-volcanic tremor, slow earthquake, source migration, segmentation

## 深部低周波微動カタログの基本的特性 Fundamental properties of non-volcanic low frequency tremor catalogues

武田 直人<sup>1\*</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>; 田中 佐千子<sup>2</sup>; 小原 一成<sup>3</sup>; 前田 拓人<sup>3</sup>  
TAKEDA, Naoto<sup>1\*</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>; TANAKA, Sachiko<sup>2</sup>; OBARA, Kazushige<sup>3</sup>; MAEDA, Takuto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>GSI, AIST, <sup>2</sup>NIED, <sup>3</sup>ERI, Univ. of Tokyo

西南日本での深部低周波微動 (non-volcanic low frequency tremor; NVT) の発見 (Obara Science 2002) 以来, 日本のみならず世界の様々な沈み込み帯や断層深部において NVT が発見され, それに関する研究が盛んにおこなわれている. その中でもエンベロープ相関法を用いた NVT の検出, カタログ化は NVT 活動の時空間分布の特徴を知る上で重要な役割を果たしている (例えば, Maeda & Obara, JGR, 2009; Ide, Nature, 2010; Nakata et al., Nature Geoscience, 2008; Imanishi et al., GRL, 2011). これらの研究で用いられる NVT カタログは全て同じでは無く, 研究者毎に異なった解析プログラムを使っており, それぞれ独自の工夫がこらされている. また, 同じ解析プログラムでも, カタログの用途に応じて検出パラメータを調整する場合もある. したがって, NVT 活動の様子を詳細に見ると, カタログ毎にところどころ異なる場合があるが, 現状ではその相違点は無視されがちである. そこで本報告では, 気象庁一元化震源の低周波地震, 防災科研及び産総研それぞれの NVT カタログを対象に, カタログの基本特性としての位置分解能, NVT 規模感度特性等に関して比較した結果を紹介する.

位置分解能の推定手法は Ide (Nature 2010) の相対位置の標準偏差を拡張し, いくつかのカタログ間の相対位置標準偏差から個々のカタログ単体の位置分解能を導出した. その結果, 気象庁, 防災科研, 産総研のカタログ共に大きな差はなく, 水平位置分解能は 2~3km となった.

NVT 規模感度特性は各カタログを基にし, その他のカタログのマグニチュード (気象庁カタログを基にした場合) もしくは NVT エネルギー (防災科研・産総研カタログを基にした場合) に対する感度の変化を調べた. その結果, カタログ毎に感度が高くなる NVT 規模 (マグニチュード, NVT エネルギー) が異なることが分かった. この感度特性は, 検出パラメータを変えることでも変化する場合があった. また, どのカタログにおいても NVT 規模が大きくなるにつれ感度が低下していた. NVT の特徴の一つとして連続して起こることが挙げられるが, 発生頻度が高くなった場合, NVT であるか否かの判断が難しくなる. また, この時 NVT 規模が大きくなると予想される. これが, NVT 規模が大きくなるにつれ感度が低下する原因と考えられる. 講演では, これら感度特性の違いが NVT 活動の時空間分布の見え方が変わる例をいくつか紹介する.

今回明らかにした NVT カタログの基本的特性は, 様々なカタログを比較する場合の指標になるだけでなく, 用途に応じ検出パラメータを調整する場合にも役立つものと考えている.

謝辞: 本研究において気象庁一元化震源リスト及び防災科研 Hi-net, 産総研, 気象庁, 東京大学, 京都大学, 九州大学, 高知大学, 名古屋大学の連続地震波形記録を使わせていただきました. 記して, 感謝いたします.

キーワード: 深部低周波微動, カタログ, 位置分解能, NVT 規模感度特性

Keywords: non-volcanic low frequency tremor, catalogue, position resolution, NVT scale-sensitivity property



## S波の振動方向を用いた深部低周波微動の発震機構解推定—S波スプリッティングの補正— Determination of focal mechanisms of non-volcanic tremors using S-wave polarization: Correction for shear wave splitting

今西 和俊<sup>1\*</sup>; 内出 崇彦<sup>1</sup>; 武田 直人<sup>1</sup>  
IMANISHI, Kazutoshi<sup>1\*</sup>; UCHIDE, Takahiko<sup>1</sup>; TAKEDA, Naoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

世界各地のプレート境界域で発見された深部低周波微動は、巨大地震の発生機構を解明するための重要な手掛かりとして注目されている。微動に有効な震源決定法はいち早く開発され (Obara, 2002)、発生場所や活動様式についての理解に繋がっている。一方、どのような運動で発生しているのかを表す発震機構解は、同じ場所で発生している微動を数多くスタックして SN 比を上げることで可能となるが (Ide et al., 2007; Bostok et al., 2013)、結果としてごく一部の解しか推定できないという問題点が残される。

今西・武田 (2010) は連続波形の Polarization 解析により、微動が発生している時間帯になると振動方向のばらつきが小さくなることを明らかにした。同様の結果はカスケードの微動においても報告されている (Bostock and Christensen, 2012)。微動は主に S 波で構成されていることから (例えば、Obara, 2002)、ここで見ている振動方向は S 波によるものである。S 波の振動方向は発震機構解に依存しているので、複数観測点の振動方向を使うことで発震機構推定が可能となる。しかし、S 波は異方性媒質中を伝播するとスプリッティングを起こすため、その影響を正しく評価しないと発震機構解の推定に影響を及ぼしてしまうことに注意が必要である。実際に通常地震を用いた研究では、スプリッティングの影響を考慮しないで求めた振動方向は発震機構解から計算される振動方向と矛盾することが報告されている (例えば、Zhang and Schwartz, 1994)。

本研究ではまず始めに、微動データに対して異方性解析 (Silver and Chan, 1991) を行い、スプリッティングが存在しているか否かを調べた。解析においては観測波形に 2-8Hz のバンドパスフィルターを掛け、1 分のタイムウィンドウ毎に早い S 波の振動方向 (LSPD) および早い S 波と遅い S 波の到着時間差 (DT) の推定を行った。推定された DT は 0.1 秒ほどあり、震源放射に関係した S 波の振動方向を正しく求めるためにはスプリッティングの補正が必要である。推定された LSPD はプレートの沈み込み方向にほぼ直交するものと平行するものの 2 パターンが卓越しており、それぞれ明瞭な空間分布を示す。これらの結果は通常地震を用いた既存研究 (例えば、Saiga et al., 2011) と調和的であり、SN 比の悪い微動であっても異方性パラメータの推定が可能であることが確認できた。

次に以下の手順に従い、スプリッティングの影響を補正して発震機構解を推定した。

(1) 水平 2 成分を早い S 波の振動方向と遅い S 波の振動方向に回転し、遅い S 波の振動方向を時刻 DT だけ進める。その後逆回転させて東西、南北方向に戻す。

(2) 1 分のタイムウィンドウ毎に Polarization 解析を行い、振動方向を推定する。

(3) 振動方向の平均値と標準偏差を 1 時間ごとに計算する。

(4) 複数観測点の振動方向を最も良く説明できる発震機構解 (ダブルカップルを仮定) を 1 時間ごとにグリッドサーチにより推定する。この際、震源の深さは 35km と仮定し、震央はエンベロープ相関法で決められた位置の 1 時間平均とする。

(5) ブートストラップ法により解の推定誤差を評価する。

以上の解析を 2013 年 4 月上旬に三重県北部で発生した微動活動に適用した。周辺の定常地震観測点に加え、この地域に展開している臨時観測点 (7 地点) のデータも利用した。推定結果を見ると、北西側が低角で南東側が高角の節面を持つ解が多い。振動方向に 180 度の曖昧性があるため本手法のみでは P 軸と T 軸を決めることができないが、周辺で起こっている超低周波地震の結果 (Ito et al., 2007) を考慮すると、低角逆断層型とみなすのが妥当であろう。また、推定誤差を考慮しても横ずれ成分を多く持つ微動も起こっていることが明らかとなった。発表においてはさらに多くの活動を解析することで、発震機構解の空間分布や時間分布の特徴について報告する。

謝辞：解析には防災科学技術研究所 (Hi-net)、気象庁、東京大学地震研究所の波形データを利用させていただきました。本研究は JSPS 科研費 (24540463) の助成を受けたものです。

キーワード: 深部低周波微動, 発震機構解, Polarization 解析, S 波スプリッティング



---

SCG64-10

会場:501

時間:4月30日 14:45-15:00

Keywords: Non-volcanic tremors, Focal mechanism, Polarization analysis, Shear wave splitting

## 深部低周波微動活動全体像把握のための微動輻射エネルギー推定法の改良 Improved estimation of seismic energy radiation from deep low-frequency tremor

案浦 理<sup>1\*</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 前田 拓人<sup>1</sup>  
ANNOURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; MAEDA, Takuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

南海トラフをはじめとする沈み込み帯で発生する深部低周波微動 [Obara, 2002] は、プレート境界の固着域に隣接する領域でスロースリップと同期して発生するため、この現象の解明は巨大地震発生メカニズムの理解に重要な役割を果たす可能性がある。これまで、微動活動の全体像を把握するため発生数の時空間分布に関する研究が盛んに行われてきた。本研究では微動の輻射エネルギー量をより定量的に見積もるための手法の改良を行った。

ハイブリッド法 (HM) [Maeda and Obara, 2009] は、エンベロープの観測点間の走時差情報に加えて振幅情報も利用する手法であり、微動の震央位置と地震波輻射エネルギー量を同時に求めることができる。これまでノイズによる誤決定の混入を極力避けるため、震源決定の際の VR (Variance Reduction) の閾値を  $VR > 90$  と高い値に設定した HM selected カタログが微動研究に用いられてきた。しかし、微動の活動度が高い場合には、複数箇所でも同時に微動が発生するなど波形が複雑になるため、微動エンベロープ波形間の相関が悪くなる。その結果、検出された微動の VR は総じて低くなり、HM selected カタログから漏れてしまう傾向がある [武田・他, 2014]。ゆえに、微動活動のエネルギー放出量を正確に調べるためには波形データを用いて再評価を行う必要がある。

本研究では、エンベロープ波形と HM カタログから微動の継続時間を決めることで微動のエネルギーを推定する方法を開発した。HM selected カタログに震源が決まっている時刻周辺で、近接した複数の観測点の振幅がほぼ同時にノイズレベルより高い時間帯を探し、それを微動の継続時間として抽出した。抽出された継続時間ごとに、該当する時間内に含まれる HM selected カタログの震央から求めた重心位置を震央とし、 $VR > 60$  の微動のエネルギーを合計することで輻射エネルギー量を求めた。

本研究で微動のエネルギー推定法の改良を行った結果、微動の輻射エネルギーの空間分布に特徴的な傾向がみられた。個数の分布では微動発生域の深さ方向に2つのピークがあることが知られていたが、エネルギー量の高い領域は微動域の浅部側のみ走向方向に沿って線状に分布していることがわかった。これは、微動発生域である脆性?延性領域の中でも浅い部分の方が脆性が強く、せん断すべりの際に大きな地震波エネルギーを輻射することと対応する。本研究は沈み込み帯での応力解放プロセスにおける微動の役割の定量的な評価につながるものである。

キーワード: 深部低周波微動, 南海トラフ, スロー地震  
Keywords: tremor, Nankai trough, slow earthquake

## ゆっくり地震における微動の役割 The role of tectonic tremor in slow earthquake

矢部 優<sup>1\*</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
YABE, Suguru<sup>1\*</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>Dept. EPS, The University of Tokyo

ゆっくり地震の発見以来、それを構成する様々な周波数帯の現象（深部低周波微動・超低周波地震・スロースリップ）は強く関連していると考えられているが、両者の現象サイズを定量的に比較した研究が少ないため、どのように関係した現象であるかはまだよく分かっていない。特に深部低周波微動の定量的評価はあまり進んでいない。そこで本研究では深部低周波微動の地震波エネルギー（もしくは地震波エネルギーレート）を推定することで、定量的な評価を試みる。地震波エネルギーを推定するために、地震波の距離減衰とサイト増幅についても微動の地震波シグナルを用いて推定を行った。特に地震波の距離減衰については、微動の地震波エネルギーを調べた先行研究で十分な取り扱いがなされていなかった。地震波エネルギーについては2-8Hzの限られた周波数帯でのエネルギーを推定した。対象とした地域は、南海・カスケード・ハリスコ（メキシコ）・南チリの四つの沈み込み帯である。

本研究で明らかにされた微動活動とエネルギーレートの関係は、三タイプに分類できる。一つは、推定したエネルギーレートが空間的に不均一に分布する地域での微動活動である。このタイプの活動は南海やカスケード北部で主に見られる。そのような場所では微動活動は常にエネルギーレートの小さい場所で発生し、小規模な活動の場合はそのまま収束する。稀に大きい場所へ移動した場合には大規模な活動に発展し、走向方向に長く移動して収束する。また、南海地域において推定された超低周波地震のサイズ分布と微動のエネルギーレート分布はよく一致することから、ゆっくり地震の特徴は空間的には変化するものの、周波数にかかわらず似た振る舞いをする事が示唆される。二つ目は、孤立的な微動活動で、四国東部やハリスコ・南チリで見られる微動活動である。ここでは、各パッチの活動は独立に発生している。三つ目はエネルギーレートが均一に分布する場所で発生する微動活動であり、カスケード南部の一部地域で見られる。そのような場所では全体の微動活動がまとまって発生する。

本研究により明らかにされた微動のエネルギーレートと微動活動の関係は、微動のエネルギーレートの空間分布がゆっくり地震の活動様式を規定している可能性を示唆する。エネルギーレートが不均質に分布する地域では、高エネルギーレートの領域がスロースリップを引き起こすスイッチとなっていることが示唆される。微動パッチが孤立的な場所では、その活動はテクトニックな応力载荷に支配され、受動的に微動が発生する。エネルギーレートが均一に分布する場所では、その地域の一部のみでの小規模な活動は発生できず、テクトニックな応力载荷と周囲での応力擾乱に応じて活動する。

キーワード: ゆっくり地震, 深部低周波微動, 地震波エネルギー

Keywords: Slow Earthquake, Tectonic Tremors, Seismic wave energy

## 長期的スロースリップイベントと巨大地震の微動活動への影響 Effect of long-term SSE and megathrust earthquake on tremor activity

井戸 未季<sup>1\*</sup>; 須田 直樹<sup>1</sup>  
IDO, Miki<sup>1\*</sup>; SUDA, Naoki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate school of Science, Hiroshima University

微動活動は、およそ 10 km/day でプレート境界の走向方向に伝播する。その移動フロントは微動の時空間分布において放物線状であり、微動の伝播は拡散の現象であることが指摘されている [Ide, 2010]。我々はこれまでに四国西部における 2001 年から 2013 年までの大規模な活動を解析し、全ての活動について  $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$  のオーダーの拡散係数を得た。また、豊後水道での長期的スロースリップイベント (SSE) の発生期間および 2011 年東北地方太平洋沖地震後の活動については、比較的大きな拡散係数 ( $>1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ ) を得た (地震学会 2013)。本研究では、これら高い拡散係数を示す微動活動と外部から受ける応力擾乱との関係を探った。

これらのイベントによる誘発の影響を評価するため、Coulomb 3.3 [Toda et al., 2011] を用いて、プレート境界面におけるクーロン応力変化 ( $\Delta\text{CFF}$ ) を計算した。その結果、2003 年と 2010 年の長期的 SSE による四国西部での  $\Delta\text{CFF}$  は、それぞれ 28.7 kPa と 5.4 kPa となった。これは微動発生に影響する潮汐の効果と同じオーダーであり、微動活動の誘発に関与していると考えられる。一方、2011 年東北地震による  $\Delta\text{CFF}$  は 0.4 kPa であった。この値は潮汐による効果より 1 桁小さいが、粘弾性応答による長期間にわたる応力変化があれば、微動発生に影響を与えることは可能である。また、この応力擾乱は四国下のプレート境界全域に広がっている。これらによって加速された微動活動の伝播が、高い拡散係数として観測された可能性が考えられる。発表では速度・状態依存摩擦則から得られた地震発生率理論にもとづく考察についても述べる。

キーワード: 深部非火山性微動, 震源移動, クーロン応力変化, 長期的スロースリップイベント, 海溝型巨大地震, 沈み込み帯

Keywords: deep non-volcanic tremor, tremor migration, Coulomb stress change, long-term slow slip event, megathrust earthquake, subduction zone



## Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in Shikoku and Kanto

### Improvement of tectonic tremor detecting and locating methods: Case study in Shikoku and Kanto

CHAO, Kevin<sup>1\*</sup> ; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>  
CHAO, Kevin<sup>1\*</sup> ; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

Obtaining accurate tremor sources in time and space is important because it provides essential information that reveals the mechanism of tremor activity. Recent findings of triggered tectonic tremor in recently discovered regions in Hokkaido (Obara, GRL, 2012), Kyushu, and Kanto (Chao and Obara, AGU Meeting, 2012) provide an ideal dataset with which we can test the clock-advanced model, which predicts the occurrence of triggered tremor in regions where ambient tremor occurs. In this study, we improve upon two existing tremor detecting and locating methods: 1) the WECC (Waveform Envelope Correlation and Clustering) auto-detecting algorithm (Wech and Creager, GRL, 2008), which auto-detects tremor episodes, and 2) the improved conventional envelope cross-correlation technique (Obara, Science, 2002; Chao et al., BSSA, 2013), which accurately pinpoints the locations of short duration tremor sources in space. Using WECC, we detected tremor episodes in western Shikoku and compared the results with existing NIED tremor catalogs (Maeda and Obara, JGR 2009; Obara et al., GRL, 2010). Our preliminary results indicate that during testing period (i.e., tremor episodes between 2012/05/25 and 2012/06/02), the WECC was able to successfully auto-detect the same ambient tremor episodes listed in the NIED tremor catalogs. The tremor detections by WECC show similar tremor migrations pattern as the features from the NIED tremor catalog. In addition, the WECC is able to capture more small tremor episodes that are not included in the NIED catalog. Our next step will be to apply the WECC to the entire dataset to determine whether it can successfully detect all tremor episodes while minimizing noise. Using the modified envelope cross-correlation technique, we plan to conduct a 3D grid search to locate accurate triggered tremor sources in Kanto following several teleseismic earthquakes. This modified technique has been used to locate micro-earthquakes ( $M \leq 0.5$ ) in western Shikoku, and a comparison of the hypocenter of these micro-earthquakes with those from the JMA earthquake catalog showed that they were located within 5km of one another.

キーワード: ambient tremor, Shikoku, Kanto, tremor auto-detection technique

Keywords: ambient tremor, Shikoku, Kanto, tremor auto-detection technique

## 火山性深部低周波地震とマグマ冷却 Volcanic Deep Low-Frequency Earthquakes and Cooling Magma

麻生 尚文<sup>1\*</sup>; Tsai Victor<sup>2</sup>; 井出 哲<sup>1</sup>  
ASO, Naofumi<sup>1\*</sup>; TSAI, Victor<sup>2</sup>; IDE, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科, <sup>2</sup> カリフォルニア工科大学 Seismological Laboratory

<sup>1</sup> Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup> Seismological Laboratory, California Institute of Technology

深部低周波地震 (LFE) は深部で発生し低周波の地震波を放出する地震である。プレート境界で発生する Tectonic LFE は断層すべり運動であると考えられている一方で、主に火山直下のモホ面付近で発生する Volcanic LFE のメカニズムは未だによく分かっていない。震源域の温度圧力条件で脆性的な初期破壊が発生するためには、高い歪みレートが必要である。

密度境界であるモホ面では上昇過程のマントルダイアピルが停滞しやすいため、停滞マグマが冷却して熱収縮することにより、Volcanic LFE が駆動されているのではないかと考えた。そこで本研究では、火山直下のモホ面付近でマグマが冷却する際に発生する熱歪みレートを推定した。

初期条件として、板状と管状の貫入岩体内に 400K の温度擾乱を仮定し、温度の時間発展を計算した。そして、弾性的に振る舞うと考えられる、温度擾乱が 200K 以下の領域について、ポアソン媒体を仮定して熱歪みレートを見積もった。部分溶融状態の相転移による潜熱の解放と密度変化の影響を加味し、熱拡散率  $6 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  と熱膨張係数  $2 \times 10^{-5}/\text{K}$  を用いた。

得られた偏差歪みレートは、幅 200m 以下の板状マグマや半径 160m 以下の管状マグマで、プレート運動による効果よりも大きい ( $>5 \times 10^{-14}/\text{s}$ )。初期破壊は観測されないような剪断滑りであったとしても、大きな変形へと成長して LFE として観測されている可能性がある。

また、発生する歪みレートの向きは、マグマの形状によって異なる。マグマの形状が震源分布に対応し、歪みレートが LFE の震源メカニズムに対応するのならば、Volcanic LFE の震源分布と震源メカニズムとの対応関係が期待される。島根県東部の LFE について、その関係が部分的に確認できたが、本モデルの検証のためには、更なるメカニズム研究が必要である。

キーワード: 火山性深部低周波地震, マグマ冷却, CLVD

Keywords: volcanic low-frequency earthquakes, cooling magma, CLVD

## 南海トラフおよび南西諸島海溝における浅部超低周波地震の時空間分布 Spatiotemporal Distribution of Shallow Very Low Frequency Earthquakes along the Nankai Trough and the Ryukyu Trench

浅野 陽一<sup>1\*</sup>; 松澤 孝紀<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>2</sup>  
ASANO, Youichi<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net に併設された高感度加速度計の記録のアレイ解析によって、南海トラフ近傍で発生する浅部超低周波地震活動は半ばルーチン処理的にモニタリングされている [例えば、防災科学技術研究所 (2013: 予知連会報)]. 一方、観測点が少ない南西諸島海溝の近傍においても、既知の地震や浅部超低周波地震の記録との相関解析によって、連続記録中から浅部超低周波地震の検出が可能であることが分かってきた [浅野・他 (2013: 秋季大会)]. そこで我々は、より広域にわたって浅部超低周波地震活動の地域性を比較することを目的として、日本およびその周辺の全域をこの手法によって準リアルタイムで解析する準備を進めている. 本稿ではその途中経過として、南海トラフおよび南西諸島海溝に沿った領域における解析結果を報告する.

本研究では、広帯域地震観測網 F-net のうちの西南日本に位置する 40 点における 2003 年以降の広帯域速度計 (STS-1 型または 2 型) の三分記録を使用した. ここでは、100 Hz サンプリングによる原記録を通過帯域 0.02 から 0.05 Hz のバンドパスフィルターに通した後に、1 Hz にリサンプリングして解析した. テンプレートには、既知の通常の地震 17 個と浅部超低周波地震 6 個を選んだ. 解析手法は基本的には浅野・他 (2013) と同様であるが、相関係数の評価のみでは観測点カバリッジが悪い領域において空間的なエイリアシングによる誤検出や誤推定が起りやすい. これを軽減するために我々は、相関係数を評価する時間窓とその直前の時間窓における波群の振幅比を S/N 比と定義して、複数の観測点における平均の相関係数のみならず、平均の S/N 比も大きな値をとるような未知イベントの発生時刻と位置をグリッドサーチで調べる方法を採用した.

解析の結果、浅野・他 (2013) で報告した日向灘以南の浅部超低周波地震活動に加えて、紀伊半島沖や四国沖における浅部超低周波地震を検出することができた. 具体的には、紀伊半島沖では 2004 年の紀伊半島南東沖の地震 (M7.4) の後および 2009 年に、室戸岬沖では 2003 年および 2009 年に、足摺岬沖では 2003 年および 2010 年の豊後水道スロースリップとほぼ同時期にそれぞれ顕著な活動が検出された. この結果は、これまでに報告されてきた浅部超低周波地震の活動 [たとえば、Obara and Ito (2005) および防災科学技術研究所 (2013)] と矛盾せず、今回の解析法が広域における浅部超低周波地震モニタリングに適していることを示す. 一方、南海トラフから南西諸島海溝までの広域を単一の解析法によって調べた今回の結果から、紀伊半島沖、室戸岬沖および足摺岬沖では、高い頻度で浅部超低周波地震活動が発生する日向灘以南の南西諸島域と比べて、活動の頻度が著しく低いことも明らかとなった. この地域では、1944 年東南海地震および 1946 年南海地震を始めとする巨大地震が繰り返し発生してきたことが知られており、地震間にあたる近年は固着状態にあると考えられている. これに対して、南西諸島域では巨大地震の繰り返し発生は知られておらず、プレート間の固着はおおむね弱いと考えられている. このような固着状態の違いは、上に述べた浅部超低周波地震の活動度にも影響を及ぼすかもしれない. すなわち、紀伊半島沖、室戸岬沖および足摺岬沖では、プレート間の地震発生層における強い固着が、浅部延長に位置する浅部超低周波地震の発生を抑制している可能も考えられる.

キーワード: 浅部超低周波地震, 南海トラフ, 南西諸島海溝, プレート間固着  
Keywords: Very Low Frequency Earthquakes, Nankai Trough, Ryukyu Trench

## 琉球弧南部の繰り返しスロースリップイベントと超低周波地震活動の関係 Relationship between very low frequency earthquakes and repeating slow slip events in the south Ryukyu Trench

中村 衛<sup>1\*</sup>; 砂川 尚也<sup>1</sup>  
NAKAMURA, Mamoru<sup>1\*</sup>; SUNAGAWA, Naoya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学理学部  
<sup>1</sup> Faculty of Science, Univ. Ryukyus

琉球弧南部では深さ 30~50km の沈み込んだプレート上面で繰り返しスロースリップイベントが発生している (Heki & Kataoka, 2008)。またその西側の与那国島付近では、2002 年 3 月の台湾近海地震 (Mw6.8) によるアフタースリップが 2002 年から 2005 年にかけて発生した (Nakamura, 2009)。

最近、琉球海溝に沿って定常的に超低周波地震が発生していることが明らかになってきた (Ando et al., 2012)。琉球海溝に沿って発生するスロースリップイベントと超低周波地震は、この地域のプレート間すべりと密接に関係していると考えられる。そこでこれらスロースリップイベント・アフタースリップに対する超低周波地震活動との関係を明らかにした。

防災科学技術研究所の広帯域地震計記録網 (FNET) の広帯域地震計記録および IRIS の観測点を使用した。使用した観測点は琉球弧の島々および九州地域に設置された観測点 15 点および IRIS の TATO (台北) と SSE (上海) である。これらの観測点で記録された上下動成分の連続観測記録を解析に使用した。解析期間は 2002 年 1 月 1 日~2013 年 9 月 30 日である。連続波形に 0.02-0.05Hz のバンドパスフィルターをかけ、目視で低周波イベントを検出した。次に検出した低周波イベントを地震カタログおよび 2Hz 以上の高周波波形記録と比較し、遠地地震および近地地震を除去した。さらに低周波イベントとして観測される波が Raleigh 波であると仮定して手動で最大振幅到達時刻を読み取り、震源再決定を行った。

約 11 年間で震源決定できた VLFE は合計 6299 個であった。VLFE の震源は大部分が琉球海溝軸付近に分布する。VLFE は西表島南方沖および沖縄本島南方沖、沖縄本島北東沖から奄美大島付近に集中する。沖縄トラフ付近にもトラフ軸に沿って震源が分布する。しかしこれは、琉球弧の観測点配置が直線的なために生じた震源決定のエラーによる可能性が高い。

次に、震源が密集した各領域で累積地震個数を調べた。まず八重山諸島南方沖では、2002~2004 年の活動と比較して 2005~2010 年に活動が低下、さらに 2011 年後期から活発化の傾向が見られた。この傾向は 2002~2005 年にかけて与那国島周辺で発生したアフタースリップの影響が考えられる。沖縄本島南方沖では、長期的にはほぼ定常的な VLFE 活動が見られる。短期的活動としては、VLFE が 2, 3 カ月間隔で群発的・バースト状に発生する様子が見られた。奄美大島沖では沖縄本島南方沖よりもさらに群発的に VLFE が発生している。奄美大島沖では 2002 年中旬と 2010 年後半に大きな活動の増加が見られる。しかしこの活動に対応する地殻変動等のイベントは確認できなかった。

西表島直下の繰り返し SSE との対応を比較したところ、期間中に発生した SSE24 イベント中 14 イベントに対して VLFE が活発化する傾向が見られた。SSE 発生中の VLFE 発生率は、通常の VLFE 発生率に対して約 2~3 倍に増加する。一方、通常の地震活動に対して SSE 発生との関係は明瞭ではなかった。西表島直下の SSE によって VLFE が特に活発化する理由として、SSE 発生による周辺での応力変化が、低角逆断層型地震である超低周波地震 (Ando et al., 2012) に対して特に活発化を促した可能性がある。

キーワード: 超低周波地震, スロースリップイベント, 琉球海溝  
Keywords: very low frequency earthquake, slow slip event, Ryukyu Trench



## 深部超低周波地震の活動様式とすべり遷移域の構造 Activity characteristics of deep very low frequency earthquake and asperity structure

仁里 太郎<sup>1</sup>; 須田 直樹<sup>1\*</sup>; 松澤 孝紀<sup>2</sup>  
NIZATO, Taro<sup>1</sup>; SUDA, Naoki<sup>1\*</sup>; MATSUZAWA, Takanori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学, <sup>2</sup> 防災科技研  
<sup>1</sup>Hiroshima Univ., <sup>2</sup>NIED

### 【はじめに】

南海沈み込み帯のプレート境界深部では、短期的スロースリップイベントに付随して超低周波地震 (VLF) と非火山性微動 (微動) が発生している。先行研究では、VLF の震源メカニズムがフィリピン海プレート上部境界面のジオメトリやプレート収束方向と調和的であることが明らかにされている [Ito et al. 2007, 2009; Takeo et al. 2010]。我々はこれまでに VLF の検出に特化した検出法を開発し、VLF の活動と微動活動との関連性について調べてきた。今回さらに検討を進めた結果、新たな知見が得られたので報告する。

### 【検出法の概要】

沈み込むフィリピン海プレート上部境界面上に設定した仮想震源に対して計算された理論波形と Hi-net 高感度加速度計で得られる観測波形に対して計算される相互相関と Variance Reduction (VR) にもとづいて検出を行う。仮想震源は、水平方向に 10 km 間隔、深さ方向に最大で 8km 間隔で設定されている。それらにおける震源メカニズムは、プレート境界面のジオメトリとプレート収束方向から求め、理論波形をあらかじめ計算しておく。先行研究と同様に本手法でも VR を検出基準に用いており、通常の地震やノイズを VLF として検出してしまうことがある。そのような誤検出を減らすため、観測波形の振幅に関する基準を設けている。

### 【結果】

Hi-net 高感度加速度計の水平動 2 成分の記録を用いて、2006 年 9 月 6-21 日と 2007 年 3 月 10-20 日の四国西部における活動について解析を行った。その結果、VLF の活動には次の特徴があることが分かった：(1) VLF の活動は微動に比べて急速に活発になり、その時間的極大は微動より遅れている、(2) 活動期によって VLF を伴ったり伴わなかったりする微動クラスターが存在する、(3) VLF にも微動の rapid tremor reversal に相当する現象が存在する、(4) VLF と微動のモーメント解放量の空間的極大は異なっている、(5) プレート境界における VLF のモーメント解放が最も大きい場所は SSE のすべりが最も大きい場所の浅部に隣接する。これらのうち (1) と (2) はすでに報告済みである。

### 【議論】

すべり遷移域の構造として、フラクタルアスペリティモデル [Seno, 2003] のようなアスペリティが入れ子になったモデルを考える。このモデルでは、ある階層のアスペリティは比較的ゆっくりとすべるバリアに囲まれている。間隙流体圧の上昇などによりバリアがゆっくりとすべる状態になることをバリア浸食と呼び、そのときアスペリティが連続的に破壊する。逆に、アスペリティの連続的な破壊がバリア浸食を加速する。今回の場合は、微動のアスペリティの周りのバリアが VLF のアスペリティであり、その周りのバリアが短期的 SSE のアスペリティとなっている。このモデルでは、微動が VLF に先行する現象は次のように説明できる：(1) 短期的 SSE により微動クラスター全体でバリア浸食が進み、微動が連続的に発生するが、VLF を発生するまでにはいたらない、(2) 微動発生の影響でバリア浸食が加速されることで、VLF が連続的に発生する。また、バリア浸食の速さや広がりやすさに地域差があれば、微動と VLF の時空間的な活動様式の違いも説明できる。

キーワード: 南海沈み込み帯, スロー地震, 超低周波地震, 非火山性微動, 自動検出, アスペリティ

Keywords: Nankai subduction zone, slow earthquake, very low frequency earthquake, nonvolcanic tremor, automatic detection, asperity

速度・状態依存摩擦を用いた階層アスペリティの動的地震サイクルシミュレーションで現れる大地震前の挙動  
Preseismic behaviors involving slow slip in rate-state earthquake sequence models with a hierarchical asperity concept

野田 博之<sup>1\*</sup>; 中谷 正生<sup>2</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
NODA, Hiroyuki<sup>1\*</sup>; NAKATANI, Masao<sup>2</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学  
<sup>1</sup>JAMSTEC, IFREE, <sup>2</sup>The University of Tokyo, ERI

Understanding preseismic phenomena before large earthquakes is of critical importance in assessing possibility of disaster mitigation by detecting and recognizing them. The 2011 Tohoku-Oki earthquake has long recorded geophysical data for tens of years prior to it. Since the earthquake, multiple studies have reported potentially important phenomena involving slow slip which may be particular to ripe asperities. It is our mission for modelers to see if they are consistent with, or appear naturally without fine tuning of numerical models of earthquake sequences accounting for interseismic processes, as well as earthquake ruptures.

The off-Miyagi to off-Fukushima region was locked at least from Apr. 1995 to Mar. 2002 [Nishimura et al. 2004], with the shallower region not being able to be constrained by on-land GPS stations [Loveless and Mead, 2011]. The region started creeping from 2005 [Ozawa et al., 2012]. Recently, Katsumata [2013, JpGU] pointed out that seismic quiescence [Katsumata, 2011] correlates with the locked period, and inferred that this region may have been creeping at least from 1980 to 1988. In the shallower region near the hypocenter of the Tohoku-Oki earthquake, a couple of slow slip events were reported by Ito et al. [2013], one in Nov. 2008 and the other in Feb. 2011. This interval is much shorter than that for the larger scale events inferred by Katsumata [2013].

Suito et al. [2011] reported that M7-class earthquakes along the Japan Trench after 2005, including the Mw 7.3 preshock 2 days before the Tohoku-Oki earthquake, had unusually large amount of afterslips. The postseismic moment releases are comparable to or even larger than the coseismic ones, with the centroid being located close to the epicenters, not deeper than them.

In the present talk, we present that qualitatively similar behaviors to those observations are recognized in numerical models reported by Noda et al. [2013, JGR]. They presented rate-state earthquake sequence simulations accounting for a hierarchical asperity concept [Ide and Aochi, 2005]; a large tough patch has a small fragile patch in it. Importantly, those simulations were not meant to mimic the Tohoku-Oki earthquake through fine tuning of the model, and are representing general behaviors characteristic to the rate-state (aging law) earthquake sequence with a certain kind of heterogeneity in the parameter distribution.

In those simulations, interseismic penetration of a creep front into a locked velocity-weakening patch often becomes non-steady and accompanied by aseismic transients before nucleation. This is because the critical length scale for impossibility of coherent steady-state slip [Rice et al., 2001] can be smaller than the nucleation size [Rubin and Ampuero, 2005]. In the simulation, the transients take place both in the large tough patch and in the small fragile patch when a creep front penetrates inwards to a certain extent. A transient does not necessarily, but may lead to nucleation. In addition, such an elevated aseismic slip rate in the large patch seems to be a necessary condition for cascade-up rupture growth from the small patch if it is smaller than the nucleation size of the large patch.

A small event which only ruptures the small patch is sometimes followed by a large event before the afterslip smearing out. Such small events are classified as precursory events, since clear causality is recognized between them and the following large ones; the large ones are initiated either by delayed cascade-up or by large nucleation hosted by the afterslip. The precursory small events tend to have larger afterslip than non-precursory ones.

In the rate- and state-dependent friction law, logarithmic slip rate is, by definition, proportional to stress minus strength which correlates with fracture energy. Therefore temporal changes in the aseismic slip rate in a so-called asperity, if detectable, could be used to infer the ripeness of it.

Keywords: Earthquake sequence, Preseismic phenomena, Hierarchical asperity, Numerical simulation

## 2011年東北地方太平洋沖地震の前に発生したスロースリップイベントの数値シミュレーション Numerical simulation of slow slip events before the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

中田 令子<sup>1\*</sup>; 有吉 慶介<sup>1</sup>; 兵藤 守<sup>1</sup>; 堀 高峰<sup>1</sup>  
NAKATA, Ryoko<sup>1\*</sup>; ARIYOSHI, Keisuke<sup>1</sup>; HYODO, Mamoru<sup>1</sup>; HORI, Takane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup> JAMSTEC

東北地方の日本海溝沿いでは、2011年3月11日に、M9.0の巨大地震(東北地方太平洋沖地震)が発生し、震源域は岩手県沖から茨城県沖まで広範囲に及んだ。この巨大地震の震源域内で特にすべりの大きかった領域の近くで、2011年2月頃から、スロースリップイベント(SSE)が発生していたことが、海底観測から明らかになった[Ito et al., 2013]。このSSEは、少なくとも巨大地震の2日前(2011年3月9日)に発生したM7.3の地震(巨大地震の前震)時まで継続していた。そして、前震の余効すべりは、本震の震源まで伝播し、巨大地震をトリガーしたとみられている[e.g., Ando & Imanishi, 2011]。

本研究では、スロー地震による前震と本震のトリガーに着目して、地震発生サイクルの数値シミュレーションを行った。数値計算では、プレート境界で発生する地震の繰り返しを、プレート相対運動からのずれの蓄積と解放過程としてモデル化した[e.g., Rice, 1993]。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則[Dieterich, 1979]に従うと仮定し、断層の構成則と強度の定義はNakatani[2001]を用い、強度の時間発展則にはslowness law[Dieterich, 1979; Ruina, 1983]を用いた。プレート境界面形状は、構造探査に基づいた3次元曲面[Baba et al., 2006]を使用した。各イベントの震源域では、円形断層上のすべりのふるまいを支配する破壊核の臨界サイズ[Kato, 2003; 2004]と半径の比が、地震性すべりまたは非地震性すべりの条件を満たすような摩擦特性を与えた。

2008年11月にも2011年2月と同様の場所・規模でSSEが発生していることから、この領域は周囲と異なる摩擦特性を持つと考えた。そこで、巨大地震の震源域内では、特にすべりの大きかった領域、前震の震源域、非地震性すべり(SSE)を起こす領域がそれぞれすみ分けするように存在していると仮定し、3つの領域に、それぞれ異なる摩擦特性を与えたモデルで、計算を行った。その結果、SSE→前震→本震という順での発生を定性的に再現することができた。このモデルの結果では、まず、浅部で始まったSSEが深部へと伝播しMw7.1の地震(前震)をトリガーした。その後、前震の余効すべりは浅部へ伝播し、Mw8.6の地震(本震)の破壊をトリガーした。しかし、SSEの規模や継続期間、本震の破壊開始点、前震-本震の時間間隔などに関して、定量的には再現できていなかった。これは、本震で特にすべりの大きかった領域・前震の震源域・SSE域が互いに近接していることが主な要因であると考えられる。異なる大きさの円形パッチで近似したこれらの領域の場所や大きさと摩擦特性との間にトレードオフがあり、その結果、前震やSSE発生のタイミングがモデルによって大きく異なっていた。

現在、本震の震源域内での摩擦特性の不均質の与え方を改良した新たなモデルで同様の数値シミュレーションを行っている。さらに、様々な観測データから示唆されているプレート境界面上の不均質の分布等を参考にしたいいくつかのモデルについて同手法を適用し、2011年に観測されたM9地震発生に至る過程を、定量的に再現できるモデルの構築を試みる。モデルの良否は、シミュレーション結果から見積もられる地震時や地震間のすべり分布や地殻変動等と、観測データとの整合性を基に判断する。そして、どのような条件下で、東北地方太平洋沖地震の前に観測されたようなシナリオが起こり得るのか検討する。

謝辞：本研究は文科省のプロジェクト「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の補助を受けて行われました。数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

## Deep Triggered Non-Volcanic Tremor in the Slow Earthquake Active Regions in South Chile and Ecuador Deep Triggered Non-Volcanic Tremor in the Slow Earthquake Active Regions in South Chile and Ecuador

CHAO, Kevin<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>  
CHAO, Kevin<sup>1\*</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

<sup>1</sup>ERI, the University of Tokyo

Deep non-volcanic tremor has been observed at many major plate-boundary faults and intraplate faulting systems. Recent studies have shown that the tremor triggered by surface waves of teleseismic earthquake occurs on the same fault patches as the spontaneously occurring ambient tremor. The observations suggest that the triggered tremor can be used as a proxy to estimate the background tremor activity. Here we search for tremor triggered by teleseismic earthquakes in south Chile and Ecuador where the ambient tremor and slow slip event have been observed respectively. In south Chile, we analyzed a temporal array data between 2004 and 2006 and observed clear triggered tremor following the 2004 Mw9.0 Sumatra, 2005 Mw8.6 Nias, and 2006 Tonga earthquakes. Triggered tremor sources are located at the central of the ambient tremor zone. The results indicate both Love and Rayleigh waves promote the tremor triggering potential. The tremor triggering threshold is around 2 kPa, similar to which in Parkfield. In Ecuador, we can only use single station to infer the existence of triggered tremor due to lack of seismic stations in this region. During the period between 2004 and 2012, we observed triggered tremor following the 2010 Mw8.8 Chile and 2007 Mw8.0 Peru earthquakes. Since there is no other station within 500 km near that station, we roughly estimate that the triggered tremor sources are located within 50 km from the station based on the attenuation of tremor from previous studies and the estimation of the time difference between P- and S-waves of triggered tremor. We infer that the triggered tremor source might be located at the region where the slow slip event has been observed. The apparent tremor triggering threshold in Ecuador is about 40 kPa. The high threshold infer a low background tremor rate or simply due to the network capability.

キーワード: non-volcanic tremor, triggered tremor, south America  
Keywords: non-volcanic tremor, triggered tremor, south America



## 海底地震観測データの解析から明らかとなった日向灘における浅部低周波微動活動 Shallow low-frequency tremor activity in the Hyuga-nada, revealed by ocean bottom seismic observation

山下 裕亮<sup>1\*</sup>; 八木原 寛<sup>2</sup>; 内田 和也<sup>1</sup>; 清水 洋<sup>1</sup>; 平野 舟一郎<sup>2</sup>; 宮町 宏樹<sup>2</sup>; 馬越 孝道<sup>3</sup>; 山田 知朗<sup>4</sup>; 中元 真美<sup>1</sup>; 福井 海世<sup>1</sup>; 神薗 めぐみ<sup>1</sup>  
YAMASHITA, Yusuke<sup>1\*</sup>; YAKIWARA, Hiroshi<sup>2</sup>; UCHIDA, Kazunari<sup>1</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>; HIRANO, Shuichiro<sup>2</sup>; MIYAMACHI, Hiroki<sup>2</sup>; UMAKOSHI, Kodo<sup>3</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>4</sup>; NAKAMOTO, Manami<sup>1</sup>; FUKUI, Miyo<sup>1</sup>; KAMIZONO, Megumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山観測研究センター, <sup>2</sup>鹿児島大学南西島弧地震火山観測所, <sup>3</sup>長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科, <sup>4</sup>東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima Univ., <sup>3</sup>Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki Univ., <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

2013年5月下旬から6月下旬にかけて、種子島東方沖～宮崎市東方沖の日向灘プレート境界浅部領域において発生した浅部低周波微動活動を、海底地震観測によって捉えることに成功した[Yamashita et al., 2013 AGU fall meeting]. 本発表では、海底地震計の連続波形データにエンベロープ相関法[Obara, 2002]を適用し、浅部低周波微動の震源決定を行った結果と活動様式の特徴について報告する。

### 海底地震観測

2013年4月17日～7月4日にかけて、日向灘南部のプレート境界浅部領域～プレート境界地震発生領域において12台の短期間・短周期海底地震計を用いた海底地震観測を行った。観測は九州大学・鹿児島大学・長崎大学・東京大学の共同研究であり、地震計の設置・回収には長崎大学水産学部練習船「長崎丸」の協力を得た。海底地震観測のうち2台は1Hzのセンサーを搭載している。

### 震源決定

浅部低周波微動の震源決定には、エンベロープ相関法を用いた。海底地震観測で取得した11観測点の連続波形データに2-8Hzのバンドパスフィルタをかけ、水平2成分を合成し、RMSエンベロープを作成後、20Hzにダウンサンプリングしたデータを用いた。解析は自動処理とし、150秒のmoving windowを75秒ずつ移動させ、各観測点のRMSエンベロープ間の波形相関を計算し、相関係数の最大値が0.85以上の場合にその時刻差を観測点間の相対走時差として採用する。相対走時差データが6データ以上ある場合に、震源をグリッドサーチによって推定した。この際、震源位置と仮定するS波速度も同時に未知数としてサーチした。出力された結果のうち、地震やT-phaseなどのイベントを取り除いて最終的なカタログを作成した。

### 結果

震源決定の結果、浅部低周波微動活動の特徴が明らかとなった。今回の活動は大きく分けて2つのマイグレーションエピソードで特徴づけられる。初めのエピソード(5月下旬～6月14日頃)では種子島東方沖で活動が始まり、6月10日ごろからS08観測点付近で活発化したあと、北西方向(おおよそプレートの沈み込み方向)に進路を変えて、ちょうどS06観測点付近までマイグレートした。2つめのエピソード(6月17日頃～25日頃)では、S08観測点付近から北西に向かってマイグレートし、6月19～20日頃にはS07観測点付近で活動が活発化、6月21日頃には東にマイグレートしてS09観測点付近で活動が活発化し、その後S07・S09観測点付近で活動が続いた。

### 考察

今回明らかとなった浅部低周波微動のマイグレーションは、プレート境界浅部で短期的スロースリップが発生していることを強く示唆している。震源域付近には九州パラオリッジが沈み込んでおり、今回の日向灘の浅部低周波微動活動はリッジよりも南側(琉球弧側)に見られ、リッジよりも東側(足摺岬沖)へ進展していない。特に、マイグレーションの方向が北西方向に変化しているS08観測点付近は九州パラオリッジの沈み込みに伴いプレート境界の深さが急激に浅くなる領域である[e.g., Park et al., 2009]。つまり、種子島東方沖あたりから浅部低周波微動活動を伴ったスロースリップが北へ進展し、九州パラオリッジにさしかかった際にリッジの高まりに沿ってスロースリップの進展方向が北西方向にシフトしたと考えられ、本研究結果から九州・パラオリッジがこの領域のプレート間すべりの広がりやをコントロールするセグメント境界の役割を果たしていることが示唆される。今回見られた浅部低周波微動のマイグレーションパターンの再現性を確認するためにも、海底地震および測地観測を行うことが必要不可欠である。

SCG64-P02

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

謝辞

日向灘における海底地震観測では、長崎大学水産学部練習船・長崎丸（兼原壽生船長）の皆様に変にお世話になりました。

キーワード: 浅部低周波微動, 海底地震観測, 日向灘

Keywords: Shallow low-frequency tremor, Ocean Bottom Seismographic observation, Hyuga-nada

## 2014 年 1 月房総半島沖スロースリップイベントと群発地震活動 The Slow Slip Event off the Boso Peninsula on January 2014 and the associated earthquake swarm

木村 尚紀<sup>1\*</sup>  
KIMURA, Hisanori<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所 (防災科研)

<sup>1</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

### はじめに

房総半島沖ではスロースリップイベント (Slow Slip Event: SSE) が群発地震を伴って 4-7 年間隔で繰り返し発生することが知られている。これまでに 1983 年、1990 年、1996 年、2002 年、2007 年、および 2011 年の発生が知られており、最新の活動は 2013 年 12 月末から 2014 年 1 月にかけて 2 年 2 カ月の繰り返し間隔で再来した。

SSE は、プレート境界浅部の巨大地震が発生する固着域と、深部の定常すべり域との間に位置する、プレート境界の性質が変化する遷移的な領域で発生する現象と考えられている。関東地方南部では、フィリピン海プレート上で 1923 年関東地震 ( $M_W$ 7.9) が発生し、その翌日に房総半島沖で  $M_W$ 7.5 の最大余震が発生した (武村, 1994; Kimura *et al.*, 2009; 本多ほか, 2014)。房総 SSE すべり域は最大余震震源域の深い側に位置しており、その活動を把握することはプレート境界での応力の蓄積状況をモニタリングする上で重要である。

そこで、房総 SSE に伴う群発地震の詳細な活動履歴を明らかにするとともに、測地データの解析により SSE 断層モデルを決定した。

### データ・手法

房総半島沖の深さ 30km 以浅、2005 年 1 月 1 日以降に発生した地震を対象として、波形相関を用いた Double Difference 法によって詳細震源分布を決定した。初期震源は防災科研 Hi-net による。ただし、一部自動処理結果を含む。

防災科研 Hi-net に併設された高感度加速度計 (傾斜計) による記録を元に、Obara *et al.* (2004) に従い、断層位置・形状については genetic algorithm inversion、すべり量は最小二乗法により一様すべりの矩形断層モデルを決定した。傾斜変動の顕著な 2013 年 12 月 31 日から 2014 年 1 月 6 日にかけての傾斜変動量を用いた。傾斜記録は潮汐成分、気圧応答成分の補正を行った後、リニアトレンド成分を除去し、気圧補正には、波崎 2 観測点 (HA2H) の気圧観測値を使用した。すべりの方向はプレートの相対運動方向に固定した。

### 結果

今回の房総 SSE に伴う群発地震の大部分は、これまでの房総 SSE に伴う群発地震の発生域 (以後、地震発生域とする) の北端周辺で発生した。はじめ、一宮沖で地震が発生しはじめ、その後西に発生域が移動するとともに、地震発生域の南端および勝浦直下周辺でも地震が少数発生した。はじめ西の海域で地震が発生し東に移動する点は過去の房総 SSE と同様である。2007 年は主に地震発生域の北端周辺で地震が発生しており、これは今回の活動と類似している。ただし、群発地震の広がりや 2007 年の方がやや大きく、地震発生数も 2007 年の方が多し。一方、2011 年は勝浦直下回りでも多くの地震が発生した。

最大の傾斜変動は勝浦東観測点 (KT2H) において北西傾斜の約  $0.4 \mu\text{radian}$  の変動が観測された。房総 SSE のすべり域は勝浦沖に決定され、規模は  $M_W$ 6.1 と推定された。すべり域の位置は、傾斜データから推定された 2007 年 (Sekine *et al.*, 2007) および 2011 年 (Hirose *et al.*, 2012) の初期のすべり域とほぼ重なる。傾斜データを見ると、2007 年 ( $M_W$ 6.4) と比較して KT2H での傾斜方向はほぼ同じだが変動量は約 1/2 と小さく SSE 全体の規模が小さいことと調和的である。2007 年と比較して今回の地震発生数が少なかったことは、SSE 規模の違いを反映している可能性がある。2011 年ははじめの 2 日半で北西方向に約  $0.3 \mu\text{radian}$  の傾斜変動が見られ、この期間の規模は  $M_W$ 6.2 と推定された (Hirose *et al.*, 2012)。この期間の傾斜変動の方向・変動量、および SSE の規模は今回に近い。また、この期間には地震発生域の北端周辺で地震が発生しており、今回の活動と類似している。一方、2011 年は初期の活動に続いて勝浦直下でも地震が発生するとともに、北北西方向に約  $1.0 \mu\text{radian}$  に達する大きな変動が見られたが、今回はこれに対応するような地震活動および傾斜変動は観測されていない。

### 議論

今回は、過去約 30 年間で最短の間隔で再来した。2011 年房総 SSE は再来間隔がそれまでで最短だったが、SSE の規模はそれまでとほぼ同程度であり、2011 年東北地方太平洋沖地震および余効変動による応力変化が房総 SSE の応力降下量の大きな割合に相当することから、応力増加により発生が早められた可能性が提案されている (Hirose *et al.*, 2012)。これに対して、今回はこれまでより規模が小さく、すべり域がほぼ同じだとするとすべり量が小さい可能性がある。この

SCG64-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

ことは、これまでより応力蓄積量が小さい状態で発生し、そのために再来間隔が短くなった可能性を示唆している。房総半島沖の応力蓄積過程を明らかにするためには、さらにデータを追加し房総 SSE の詳細な震源過程を明らかにする必要がある。

謝辞：

解析には東京大学地震研究所および気象庁による地震観測データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

キーワード: スロースリップイベント, プレート境界, 群発地震活動, 関東地方

Keywords: Slow Slip Event, plate boundary, earthquake swarm, Kanto region



## 四国中部で 2013 年に発生した長期的スロースリップ A long-term slow slip event in central Shikoku in 2013

小林 昭夫<sup>1\*</sup>  
KOBAYASHI, Akio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute

日本では近年の稠密な GNSS 観測網 GEONET [国土地理院測地観測センター (2004)] の展開により、様々な時定数を持つプレート境界でのすべり現象が発見されている。南海トラフ沿いでは、数か月から数年の継続時間を持つ長期的スロースリップイベント (SSE) が、東海地域で 2001~2005 年に [Ozawa et al. (2002)、国土地理院 (2007)]、豊後水道付近で 1996~1997 年 [Hirose et al. (1999)]、2003 年 [Ozawa et al. (2004)]、2009~2010 年 [国土地理院 (2010)] に発生したことが観測された。この他に小規模な長期的 SSE が 1996~1997 年に紀伊水道 [Kobayashi (印刷中)]、2005 年に四国西部 [小林 (2010)]、2005 年から 3 回日向灘 [Yarai and Ozawa (2013)] で発生していたことが報告されている。

同じ南海トラフの沈み込み帯においても、長期的 SSE の発生する領域が限られていたり、発生間隔、発生規模が異なっていたりすることが明らかになってきている。長期的 SSE の過去および現在の発生を把握することは、プレート境界面の領域による状態の違いに関する情報を提供する。ここでは、GNSS の解析から明らかになった四国中部における 2013 年の長期的 SSE について報告する。

データは、国土地理院 GEONET の GNSS 日座標値 (F3 解) を用いた。非定常な地殻変動を見るため、プレートの沈み込みなどに伴う定常的な成分を除去する。東北地方太平洋沖地震の余効変動が残っているため、ある程度落ち着いた 2012 年 1 月から 1 年間のデータから直線トレンド係数を求め、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周変化については補正をしていない。また、GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [岩下・他 (2009)] は、国土地理院ホームページで公開されているデータセット [国土地理院 corrF3o.dat] を用いて補正した。

2012 年 10 月から 1 年間の非定常変位を見ると、中国地方から近畿地方の多くの観測点の水平変位は小さく、これらの地域の観測点はこの 1 年間に定常的な変動をしていたことを示している。一方、四国中部の観測点には南東向きの数 mm の水平変位が見られる。水平変位の見られた観測点の座標時系列と、中国地方 (北西側) の観測点との基線長変化を見ると、2013 年の前半に伸びの変化が見られる。

観測された 2013 年の非定常変位がプレート境界上のすべりによるものとして、すべり分布をインバージョンにより求めたところ、四国中部にすべりが推定された。すべりの中心はベルト状に分布する深部低周波地震よりやや南東側に位置している。すべりの規模は Mw6.2 相当で、南海トラフ沿いで報告されている他の長期的 SSE の規模より小さい。このような小規模な長期的 SSE は他にも発生している可能性があり、2002~2003 年の四国東部、2007~2008 年の四国中部にも南東向きの非定常変化が見られる。

本調査には国土地理院 GEONET の座標値、オフセット補正值を使用させていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 長期的スロースリップ, GNSS, 地殻変動, 四国中部

Keywords: long-term slow slip, GNSS, crustal deformation, central Shikoku

## 八重山スロースリップの時空間発展シミュレーション Rate and state simulation of Yaeyama slow slip events in the southwestern part of the Ryukyu Arc, Japan

奥田 亮介<sup>1\*</sup>; 平原 和朗<sup>1</sup>; 宮崎 真一<sup>1</sup>; 加納 将行<sup>1</sup>; 大谷 真紀子<sup>1</sup>  
OKUDA, Ryosuke<sup>1\*</sup>; HIRAHARA, Kazuro<sup>1</sup>; MIYAZAKI, Shinichi<sup>1</sup>; KANO, Masayuki<sup>1</sup>; OHTANI, Makiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University

海溝型地震震源域の下部プレート境界上で発生する、スロースリップイベント (SSE) の活動は、海溝型大地震発生の前に変動する可能性が指摘されており、SSE を引き起こす摩擦特性を知ることは、海溝型大地震の発生を知る上で重要な鍵を握る。我々の最終目標は、SSE に対してデータ同化という手法を用いることで、SSE の原因となる断層面上の摩擦パラメータを推定し、海溝型地震の発生の予測に役立てることにある。本研究では、その第一歩として、まず、スロースリップ時のすべりの時空間発展のシミュレーションモデルの構築を行う。

今回対象とするのは、琉球弧南西部に位置する八重山諸島沖で繰り返し起きていている SSE である。この SSE は観測された回数が多く、SSE の発生に影響を与える大きな地震が観測期間中に近傍で起きていないという特徴がある。これがこの八重山 SSE を対象とした理由である。

Heki and Kataoka(2008) によると、八重山 SSE の特徴は、1) SSE は深さ 20-40km で発生している、2) 平均発生間隔は 6.3 ヶ月、3) その発生間隔の標準偏差は 1.2 ヶ月、4) 12.5cm/年と推定される非常に速い収束速度に対して SSE により解放されるすべり速度は 11.0cm/年、とまとめられる。

これらの特徴を再現するモデル構築を行うが、計算には均質半無限弾性体中の深さ 20-40km のプレート境界上に傾斜断層を設定し、断層面上の摩擦力は速度状態依存構成則に従うものとした。また発展則にはスローネス則 (Dietrich, 1979) を用い、準動的計算を行なった。本研究では Kato(2003) に従い、摩擦パラメータ A, B, L に対して、 $A - B < 0$  (速度弱化) かつ摩擦パラメータによって決まる臨界半径 (nucleation radius) に対する断層のアスペリティの半径の比が 1 より少し小さい領域を作ることにより、SSE を再現した。また、断層面のあるプレート境界面の浅部に 1771 年に起きた津波 (明和津波) を伴う大地震の原因となるアスペリティが存在すると考えられ (Nakamura, 2009)、津波石の年代測定から打ち上げられた年代間隔は 150-400 年 (Araoka et al., 2013) で、琉球海溝近傍浅部で数百年間隔で津波地震が発生した可能性がある。その影響も考慮した。

その結果、アスペリティ分布や摩擦パラメータを変えることで SSE の発生周期を調整できることや、浅部のアスペリティが断層面上のすべりにどのような影響を与えるかということが分かった。例えば、80km のサイズのアスペリティで、 $V_{pl}=12.5\text{cm/年}$ 、 $A=50\text{KPa}$ 、 $B=56\text{KPa}$ 、 $L=2.2\text{mm}$  と設定すると、繰り返し間隔約 6 ヶ月の SSE が発生する。また、SSE のすぐ浅部にプレート収束速度に対して 40 % のすべり遅れを持つ固着域を置くことで、SSE により解放されるすべり速度を 11.0cm/年に抑えることができるが、これは固着域の位置・サイズおよびすべり遅れ (固着) の程度による。このことは浅部の固着状態すなわち津波地震の予測の上で有効な情報であり今後更なる検討が必要である。さらに、繰り返し間隔をばらつかせるには、複数のアスペリティをおくことや階層的アスペリティ分布を考える必要がある。

キーワード: スロースリップイベント, 八重山, すべり速度・状態依存則

Keywords: slow slip events, Yaeyama, a rate- and state-dependent friction law

## 紀伊半島での短スパン伸縮計アレイ観測 Array observation of short span strainmeter in the Kii peninsula

加納 靖之<sup>1\*</sup>; 細 善信<sup>1</sup>; 尾上 謙介<sup>1</sup>  
KANO, Yasuyuki<sup>1\*</sup>; HOSO, Yoshinobu<sup>1</sup>; ONOUE, Kensuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大・防災研

<sup>1</sup> DPRI, Kyoto Univ.

紀伊半島や四国周辺では、深部低周波微動あるいは低周波地震の発生域を中心に、同じ時期に地殻変動(伸縮・傾斜変化)の発生が認められている。たとえば、京都大学防災研究所の紀州観測坑での伸縮計観測では、この地殻変動は発生域に近いほど大きく、低周波微動発生域から 30-40 km の距離で、 $10^{-9}$  から  $10^{-8}$  程度のひずみ変化が数日にわたって生じることがわかっている。このひずみ変化は、地球潮汐によるひずみ変化と同程度の大きさである。このようなひずみを観測するには従来の伸縮計(横坑式あるいはボアホール式)が有効であるが、観測点数が限られており、詳細な解析には不十分である。特に紀伊半島西部では観測点が少ない。

伸縮計による多点観測のために、安価で観測点の設置が容易な方法と計器の開発が必要である。そこで従来の数十メートルの基準尺をもつ伸縮計の技術を応用し、基準尺の長さ約 1.5 m 程度の短スパンの伸縮計を開発した。基準尺はスーパーインバーの丸棒で、自由端(変位測定部)側で吊り棒を 1 か所設けている。変位の検出には差動トランスを使用した。安定した観測のためには、固定端および測定部を岩盤に強固に固定することが必要と考え、深さ 50 cm 程度掘削した穴にアンカー(ステンレス棒)をモルタルで固定し、その上部に測器のステージをネジ止めする方式とした。

このような短スパン伸縮計の試験機(1成分)を製作し、京都大学防災研究所の屯鶴峯観測坑(奈良県香芝市)に設置し性能試験を実施した。この試験観測では潮汐変動が明瞭に記録され、遠地地震によるひずみ地震動もとらえている。基準尺の長さが 1.5 m 程度であっても、低周波微動にともなう地殻変動の観測が可能となることが期待される。

基準尺 1.5 m の短スパン伸縮計を田辺市中辺路町に設置し、2012 年 9 月から観測を開始した。この観測点は使わなくなったトンネルを利用している。当初、坑道内の温度変化の影響が大きかったことから、伸縮計を断熱材でおおう、間仕切りを増強するなどの対策をおこなった。そのほか、降雨の影響も受けている。

2013 年 3 月はじめに紀伊半島で低周波地震活動があり、その際の伸縮計データを検討したところ、 $5 \times 10^{-9}$  程度の伸縮変化がみられた。その変化の時系列から、変動源が西から東へ移動したことによって説明できることがわかった。これは、低周波地震活動の移動とも調和的な結果である。

田辺市(旧大塔町)など紀伊半島中西部において新たに短スパン伸縮計の設置をおこなっている。これらの新しい観測点に加え、従来の地殻変動連続観測点も用いて、深部低周波微動の発生域をとり囲むようなアレイ観測網を構築する。データを統合して解析することで、スローイベントについてより詳細な解析をおこなうことができると考えられる。

キーワード: 伸縮計, スロー地震, アレイ観測

Keywords: strainmeter, slow earthquakes, array observation

方解石双晶データを用いた多重逆解法による南スラウェシ・ワラナエ断層帯の応力復元

Reconstruction of paleostress states in the Walanae fault zone in South Sulawesi using the multiple inverse method with

西川 治<sup>1\*</sup>  
NISHIKAWA, Osamu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 秋田大学  
<sup>1</sup> Akita University

Paleostress analysis using the multiple inverse method with calcite twin data was performed in the East Walanae fault (EWF) zone in South Sulawesi, Indonesia. The geomorphic trace of the EWF can be recognised as a distinct line between the Bone Mountains and the Walanae Depression, around which an intensive deformation zone characterised by various scales of faults and folds are developed. Carbonate rocks with numerous calcite twins and mesoscale faults are ubiquitous around the EWF trace. Therefore EWF zone is a useful location for testing the inclusion of calcite twin data in the multiple inverse technique to determine paleostress states. One to three poles of differently oriented twin lamellae and c-axis orientation were measured for each grain from three mutually perpendicular thin sections for 11 samples using a U-Stage optical microscope. The data set for multiple inverse method consists of the attitude of the e-plane, gliding direction and sense of shear of e-twinning. We prepared data files not only for twinned e-planes but also for the remaining untwinned e-planes in a grain with one or two twin sets. We incorporated the untwinned e-plane data for determining stress states with the multiple inverse method using calcite twins. In the analysis, the identified stress states by twinned e-plane data were tested calculating misfit angle  $\beta$ , the angle on the untwinned e-plane between the calculated maximum shear stress direction for every identified stress state and the observed potential gliding direction. It is possible to say that the sampled rocks had never experienced stress states to activate any of the untwinned e-planes. Therefore, if most untwinned e-plane data (95% or more in this study) are incompatible ( $\beta > 30$  degree) with the stress state identified from twinned plane data, then the stress state is viable for both the twinned and untwinned e-planes.

The analysis using calcite twin yielded reliable paleostress states similar and consistent with those from fault-slip data throughout the study area. Dominant and common stress states are characterized by NE-SW-to-E-W-trending  $\sigma_1$  and vertically to moderately-south-plunging  $\sigma_3$  with generally small values of stress ratio  $\phi$ . These stress states were most likely caused by collision of eastern Sulawesi with the Australian fragments since the Pliocene, and they could have activated the EWF as a reverse fault with a dextral shear component, accounting for the contraction deformation structures and landforms along the trace of the fault. Calcite twin and mesoscale faults were activated predominantly during the fold tightening stage and subordinately before folding.

キーワード: 多重逆解法, 方解石双晶, ワラナエ断層帯  
Keywords: multiple inverse method, calcite twin, Walanae fault zone



## 方解石双晶応力計の分解能：応力の方向と絶対値 Capability of calcite twin for estimating stress magnitudes and orientations

山路 敦<sup>1\*</sup>  
YAMAJI, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学  
<sup>1</sup> Kyoto University

方解石の結晶は、内部に e 双晶ができることで、双晶面に沿った剪断歪みをおこす。この面は c 軸に対して 3 回対称をとおよび 3 方向に存在し、剪断方向も結晶学的に特定の方向性を持つ。ひとつの結晶には e 双晶を形成可能な面が 3 方向にあるが、その面で双晶ができてれば twin、できていなければ untwin 面という。双晶面を断層面とみなし、剪断方向を断層変位方向とみなせば、断層の応力インバージョンと同様の考え方ができることがわかる。しかも双晶形成には、双晶面における剪断応力が約 10 MPa を超えなければならないという条件があるために、断層の場合と違って差応力の絶対値の推定まで行われてきた (e.g., Lacombe, 2010)。

方解石の e 双晶による応力インバージョン法を確立するために、e 双晶で応力がどれだけ制約できるかということについて理論的な基礎研究を行った。その結果、次のことがわかった。応力への twin 面/untwin 面による制約は、結晶が経験した差応力が大きくなるほど強く/弱くなる。そして両者の制約の強さは、差応力の増大とともに等しくなる。また、ひとつの結晶には e 双晶形成可能な面が 3 方向あるが、そのうち twin 面であるものの数が多いほど応力への制約は強くなる。しかし untwin 面をデータとして利用するならば、サンプリングバイアスに注意すべきである。バイアスは最大で 25% にも達する。約 200MPa を超える領域では、差応力への分解はなくなる。

キーワード: 方解石多結晶体, 双晶, 応力  
Keywords: twin, calcite aggregate, stress

## 定向性を持つ断層群のすべり傾向係数評価による応力逆解析法の検出能向上 Enhanced detectability of stress tensor inversion from heterogeneous fault-slip data with preferred orientations

佐藤 活志<sup>1\*</sup>  
SATO, Katsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻  
<sup>1</sup> Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

断層面の方位分布は、剪断応力と法線応力の比によって定義されるすべり傾向係数 (Morris et al., 1996) が大きいほど頻度が大きいという定向性を持つ場合がある (例えば, Lisle and Srivastava, 2004). 一方で, 多くの応力逆解析手法は, 断層の変位方向が剪断応力に平行であるという Wallace-Bott (W-B) 仮説に基づいて, 断層の方位から地殻応力を推定する. この仮説は, 岩体中の既存の弱面を利用して滑った断層を解析するのに有利である. なぜなら, 既存の弱面はすべり傾向係数が小さく破壊基準を満たしにくい条件でも滑り得るからである. しかしながら, W-B 仮説の仮定が緩いことは, 応力逆解析法の検出能の低さをもたらしてしまう. 例えば, 共役断層が発達する場合, 共役断層法によれば主応力軸は2方向の断層面を2等分する方向に確定する. ところが, W-B 仮説によれば, 主応力軸は2方向の断層面の成す角の範囲に含まれるとしか制約されない. 共役断層のように定向性を持つ断層データを得たならば, W-B 仮説から逸脱しても, すべり傾向係数が大きいはずだと仮定する方が, 応力への制約条件を厳しくできるのである. 特に, 複数の応力に起因する (不均一な) 断層データを解析する場合には, 高い検出能が求められる. そこで本研究は, すべり傾向係数を加味した応力逆解析法を提案する.

W-B 仮説に基づく応力逆解析法のひとつである Hough 法 (Yamaji et al., 2006; Sato 2006) は, 観察された断層すべり方向と剪断応力ベクトルのなす角に対して単調減少する「適合度」を最大化する手法である. 新手法は, 適合度とすべり傾向係数の積を最大化するように最適応力を探索する. 新手法のテストとして, 解の分かっている模擬データを解析した. 模擬データは, 南北圧縮の逆断層型応力に適合する断層 200 条と, 東西引張の正断層型応力に適合する断層 50 条から成る. 前者の断層面方位はランダムに生成し, 後者の断層面はすべり傾向係数の大きい方位に集中させた. 従来の Hough 法では, 南北圧縮応力しか検出できなかったが, 新手法を用いると両方の応力を検出できた.

天然の断層データへの適用例として, 房総半島東部の後期中新統安房層群を切る小断層群の解析結果を紹介する. この地域の小断層群には, 逆断層型応力と正断層型応力に起因するものが混在している (例えば, Angelier and Huchon, 1987). これらの応力の検出には, 従来は先験的に断層を分類することが必要だったが, 新手法を用いることで自動検出に成功した.

### References

- Angelier, J. and Huchon, P. 1987, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 81, 397-408.  
Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996, *Geology*, 24, 275-278.  
Lisle, R.J. and Srivastava, D.C., 2004, *Geology*, 32, 569-572.  
Sato, K., 2006, *Tectonophysics*, 421, 319-330.  
Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, *Journal of Structural Geology*, 28, 980-990.

キーワード: 応力逆解析, 不均一な断層スリップデータ, すべり傾向係数, 方位分布

Keywords: stress tensor inversion, heterogeneous fault-slip data, slip tendency, orientation distribution

## 余震の発生条件を入れた絶対応力場復元法：2013年淡路島付近の地震（M6.3）への適用 Reconstruction of absolute stress based on a condition of aftershock occurrence

今西 和俊<sup>1\*</sup>; 内出 崇彦<sup>1</sup>  
IMANISHI, Kazutoshi<sup>1\*</sup>; UCHIDE, Takahiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST

地殻内の絶対応力は地震発生機構を理解するうえで不可欠である。本震前の地震の発震機構解と余震の発震機構解が求められ、さらに本震による応力変化も計算できれば、応力変化量の大きさを基準にして絶対応力を推定することができる（例えば、Hardebeck and Hauksson, 2001; Wesson and Boyd, 2007; Yang et al., 2013）。しかし、通常は本震前の地震活動は少ないため、これらの手法を適用できる地域は限られている。本研究では、本震前の発震機構解が無い場合でも、余震が発生する条件の一つを加味することで絶対応力場を復元できる手法を開発したので報告する。

本研究では、余震の発震機構解で示される断層面は既存弱面として本震の前から存在していると考え、この弱面が本震後にずれ動いたということは、その面上に作用するせん断応力と法線応力の比で定義される slip tendency (Morris et al., 1996) は本震後のほうが大きいことが期待される。本研究ではこの条件を考慮し、以下の手順で最適絶対応力場を推定する。

(1) 本震前の絶対応力場は対象領域内で均一と仮定し、その応力テンソルを  $\mathbf{B}$  とする。また、この初期応力に本震による応力変化量を足し合わせることで、本震後の絶対応力場  $\mathbf{A}$  を計算する。

(2) それぞれの余震の断層面に対して、本震前の slip-tendency ( $T_s^b$ ) を応力場  $\mathbf{B}$  を用いて計算する。同様に本震後の slip-tendency ( $T_s^a$ ) は  $\mathbf{A}$  を用いて計算する。 $T_s^a$  の計算に際しては、せん断応力をそのまま使う代わりにせん断応力を余震のすべり方向に投影したものを使うことにする。したがって、 $T_s^a$  は負の値も取りうる。

(3)  $T_s^a > T_s^b$  の条件を満たした余震に対して  $S = \sum T_s^a$  を求める。両方の節面で  $T_s^a > T_s^b$  を満たす場合には、大きいほうの  $T_s^a$  を  $S$  の計算に用いる。

(4) 初期応力場  $\mathbf{B}$  をグリッドサーチしながら (1) ~ (3) を繰り返し、 $S$  が最大になる結果を最適解とする。

この手法の妥当性を確認するためにいくつかの数値実験を行った。 $T_s^a > T_s^b$  の条件を入れなかった場合には複数の解が候補として出力されてしまい解を拘束できなかったが、この条件を考慮した場合には絶対値も含めて正しい解が推定できた。次にこの方法を2013年淡路島付近の地震（M6.3）に適用した。余震の発震機構解はP波初動極性に振幅値の情報も加えることで、M1.5以上の115個の解を決定した。本震のすべりモデルはUchide and Ide (2007)の方法を近地強震記録に適用して推定した。予備的な解析では、本震前の応力場として、最大圧縮軸が西南西—東北東を向いた逆断層場が推定され、差応力は200~300MPaと求まった。

謝辞：淡路島付近の地震の解析では、産総研の観測波形データに加えて防災科研（Hi-net, KiK-net）、気象庁、東大地震研、京大防災研のデータも使用させて頂きました。発震機構解の推定では、東大・井出哲教授のプログラムを参考にしました。応力変化の計算では岡田義光博士のプログラムを使用しました。記して感謝致します。

キーワード: 絶対応力場, 余震, 発震機構解, 2013年淡路島付近の地震, slip-tendency

Keywords: absolute stress field, aftershock, focal mechanism, 2013 Awaji Island earthquake, slip-tendency

ボアホール式傾斜計の降雨による変動の時間変化と地殻最大圧縮応力方位—東北地方太平洋沖地震前後の茨城・福島県境付近のケース  
Motions after rainfall in borehole tiltmeters and the azimuth of crustal stress before and after 2011 Tohoku Earthquake

島田 誠一<sup>1\*</sup>; 木村 武志<sup>1</sup>  
SHIMADA, Seiichi<sup>1\*</sup>; KIMURA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup> NIED

ボアホール式傾斜計では、一般に降雨による影響は観測点により決まった方位への傾動になることが島田（1987）により明らかにされており、この方位（rainfall component）と直行する方位（rainfall-free component; RFF 成分）では降雨による変動は見られない。島田（1987, 1989）は、関東・東海地域のボアホール式傾斜計の観測から、RFF 成分は、水圧破壊法や中規模以上の地震のメカニズム解から求めた地殻最大圧縮応力方位とおおむね一致することを示した。これは、傾斜計を設置したボアホール近傍にある open crack の走向方位がおおむね地殻最大圧縮応力方位と一致するためと考えられる。

本報告では、2011 年の東北地方太平洋沖地震の前後に当たる 2010 年 4 月～12 月及び 2011 年 4 月～12 月・2012 年 4 月～12 月の茨城・福島県境付近の防災科研 Hi-net 高感度加速度計によって得られる傾斜変動データの降雨による変動を調べ、地震前後の地殻主応力の時間変化との関係について考察を試みた。

左図には、2010 年 4 月～12 月の茨城・福島県境付近の 7 観測点の RFF 成分の方位を示す。IWEH（いわき東）観測点では RFF 成分の方位がほぼ南北になっていて、この観測点近傍では東北地方太平洋沖地震発生前から地殻最大圧縮方位が東西方向ではなかったことが示唆される。この観測点より南の観測点では、この観測点に近く、海岸に近い観測点ほど RFF 成分の方位が南北方向に近づいていて、この付近一帯が東北日本の広域の最大圧縮方位である東西方向とは異なる応力場であったことが示唆される。

右図に示す 2011 年 4 月～12 月及び 2012 年 4 月～12 月の期間では、東北地方太平洋沖地震の誘発地震や余震のために地震前に比べて傾斜計にオフセットやオフセット後の大きなドリフトが、本震に近い時間ほど多く見られて、降雨による傾動変動の検出は 2010 年ほど容易ではない。このなかで、HTAH（平田）及び YBKH（矢吹）の両観測点では、RFF 成分の方位には 2010 年と比べてほとんど時間変化が見られない。また IWEH 観測点も 2012 年の方位変化が 2010 年と比べて 10° 程度であまり変化していない。IWWH 観測点では RFF 成分の方位は本震前とは大きく異なり、ほぼ南北方向になっている。DGOH（大子）観測点も本震前に IWWH 観測点と本震前にはほとんど同じだった RFF 成分の方位は、南北方向に大きく近づいている。THGH（高萩）観測点では、2012 年は機械的な異常と考えられる南北成分のノイズが大きく、2011 年の RFF 成分の方位は 2010 年とほとんど変化していないようである。JUOH 観測点では降雨による変動がほとんど見られず、地殻主応力方位が本震後に変化したために地震前に開いていたクラックが閉じてしまったものと考えられる。

茨城・福島県境付近の Hi-net 観測網によって観測された東北地方太平洋沖地震前後の降雨による傾斜変動から、本震前から IWEH 観測点付近の狭い範囲では最大圧縮方位が南北方向であったこと、及び本震後に最大圧縮方位が南北方向に近づく地域が主に西方に広がったことが示されている。

キーワード: ボアホール式傾斜計, 降雨による変動, 地殻応力方位, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: borehole tiltmeter, tilt motions after rainfall, azimuth of crustal stress, 2011 Great Tohoku Earthquake

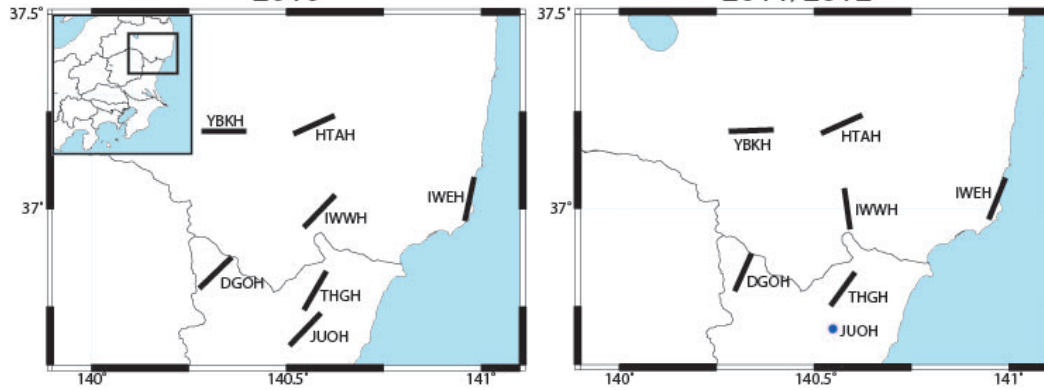


SCG65-05

会場:423

時間:5月2日 10:00-10:15

AZIMUTH OF RAINFALL-FREE COMPONENT  
 2010 2011/2012



## 発電所敷地内破碎帯の評価と応力解析 Evaluation of faults in the site of power plants and stress analyses

重松 紀生<sup>1\*</sup>  
SHIGEMATSU, Norio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター  
<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

原子力規制委員会の「大飯発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合」は、平成25年12月に開催されたピアレビュー会合において、敷地内破碎帯のうちF-6破碎帯は「将来活動する可能性のある断層等」ではないとする結論を得た。この審議の過程では地質データに対する応力逆解析が使われた。そこで、応力逆解析がどのように「将来活動する可能性のある断層等」の判断に使われたかを本講演では紹介する。

既設の発電所敷地内における破碎帯調査の問題として、断層の多くに上載層がなく、また変動地形が明瞭でないなど、通常の活断層評価で使われる変動地形学による評価手法を適用できないという点があげられる。また原子力施設の安全審査においては、活断層か否かが重要で、活動度評価は必ずしも必要ない。断層面上に残された条線データを用いた断層の運動方向とそれに基づく応力解析は、研究途上の側面はあるものの、現象が比較的是っきりしているため、上載層がない場所における断層評価に対して他の手法に比べ使いやすい。

応力解析に基づいて活断層かどうかを判断するための考え方としては、スリップテンデンス (Morris, et al., 1996) のように断層の構造と現在の応力を比較するという考え方と、応力逆解析を活動ステージ分けに利用するという考え方がある。2011年東北地方太平洋沖地震後の日本列島について数多くの議論があるよう、前者の考え方には疑問がある。そこで大飯発電所敷地内破碎帯の調査においては、後者の考え方に従った。活動ステージは同じような応力によって断層が繰り返し動いている期間と考えられる。そこで異なる場所でも、断層に見られる構造が同じ応力によって支配されていると判断できれば、同じ活動ステージの構造と判断した。大飯発電所では、この結果をトレンチ調査の結果と比較することで、将来活動する可能性のある断層等の判断を行った。

キーワード: 発電所, 敷地内破碎帯, 応力逆解析, 活動ステージ  
Keywords: power plant, fracture zones in the site, stress tensor inversion, tectonic stage

## 火山構造性地震の活動度の応力変化依存性と地殻流体の効果 Stress rate dependency and effect of volatile element on seismicity of volcano-tectonic earthquakes

森田 裕一<sup>1\*</sup>  
MORITA, Yuichi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研  
<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo

### 1. はじめに

火山は静穏期にあってもマグマの蓄積を繰り返し、応力の時間変化が通常の場合に比べて極めて大きい。また、マグマの貫入により揮発性成分が地下に放出される。このような応力と揮発性成分の影響で火山構造性地震が発生するため、火山性地震は火山活動をモニタリングする最も有力な方法の一つとして、多く火山で活動監視に利用されている。しかし、色々な影響で発生する火山性地震を定量的に理解し、地震発生機構の解明に利用した、あるいは定量的な火山活動の評価に利用した例はほとんどない。その理由は、観測データの不足、火山性地震発生原因の判別の不足、地震活動度の定量的モデルの未確立などが挙げられる。火山性地震の地震発生数変化の持つ情報をもっと有効に使い、火山活動を含めた地殻状態の「定量的」な評価に用いるべきであると思い、取り組みを始めた。

伊豆大島では多項目の観測網が整備され、地殻変動と地震活動が極めて高精度に観測されている。1~2年周期で発生する間欠的な山体膨張・収縮に同期し、地震活動が時間変化することが観測されている。昨年秋の地震学会及び火山学会でこの地震活動が地殻変動から推定される応力変化を Rate and State Friction Law (RSF 則) に適用すると、一部の期間を除き、定量的に説明できることを示した。今回は、観測値がモデルから外れた理由を考察し、モデルの改良を行った。

### 2. モデルの改良

マグマの蓄積を繰り返す火山周辺のような場所で起こる地震は、応力場が時々刻々変化するので、その時点の応力だけでなく、過去の応力履歴も地震の発生に関与している。このような応力履歴の効果を取り入れた地震発生モデルとして RSF 則がある。基本的には、この RSF 則で、伊豆大島のカルデラ内地下 1~2km で発生する火山構造性地震の活動度を説明できたが、マグマ蓄積の長期的なトレンドが低下した 2011 年以降は、モデルから予想される地震活動度と観測値が大きくずれることが明らかになった。このため、応力変化以外の影響を考慮した。

アイスランド・Northern Volcanic Rift Zone では、深さ 10km 以深の地殻にダイクが貫入した後、ダイク走向の延長上の浅部で微小地震が発生したことが知られ、これはダイクから放出された二酸化炭素が地殻浅部の断層面における封圧を上げたことが原因と考えられている。また、静穏期にあるイタリアブルカノ島の La Fossa 火山では、噴気温度の上昇、つまり揮発性成分の増加と地震活動の上昇に良い相関があることが知られている。このように、貫入したマグマから放出された揮発性成分が、地震活動を高めることがいくつかの火山で知られている。そこで、山体の膨張時に揮発性成分が増加して断層面の封圧が増加する、収縮時には減少するという効果を導入した。また、長期的な山体膨張のトレンドが低下した 2011 年以降は、深部から新たなマグマの供給が少なく、マグマから地下への揮発性成分の供給は少なくなると考え、山体膨張時でも封圧が増加しないモデルを導入した。このモデルにより観測データとモデルがより良く一致することが判った。

### 3. 結論

ここで示したことは、1) 火山周辺の地震活動の変化は、マグマ蓄積による応力場の変化とマグマから地下に揮発性成分が放出される等の効果が相乗して起こる。2) 応力場の変化は、RSF 則に基づいたモデルで定量的に評価できる。3) それで説明できない地震活動の変化は、他の火山の例から揮発性成分による効果が最も有力である。という点である。つまり、逆に言えば、応力場の変化で説明できない地震活動の変化から、地下の揮発性成分の量の変化が推定できる可能性があるということである。ここでは伊豆大島の例を示したが、元となるモデルは一般的なものであり、観測網が整備された火山であれば、どの火山でもこの手法は適用できる。これは、地震活動度の変化の応力変化による応答が事前に判っていれば、噴火前に先行物質として上昇してくると考えられている揮発性成分を検知できる可能性があることを示している。これは今後起こる火山噴火の規模や噴火様式の予測に役に立つことが考えられる。

上記のことは、地震活動度がこれまでと違った意味で、新たな地下状態のモニタリング手法となり得ることを示している。今後は、応力変化以外の効果が、揮発性成分の変化によるものであるか否かを検証するため、火山ガス等を直接的に観測し、モデルを検証することに努めたい。

【謝辞】国土地理院の GNSS データを利用した。記して謝意を述べる。

キーワード: 火山性地震, 地震活動度, 応力変化, 地殻変動, 揮発性成分

Keywords: volcano-tectonic earthquakes, seismicity, stress rate change, ground deformation, volatile element

## 南アフリカ金鉱山の震源の応力場と強度の研究の到達点・課題・将来 Investigation into stress field and strength at hypocenters at South African gold mines

小笠原 宏<sup>1\*</sup>; 加藤 春實<sup>2</sup>; Hofmann Gerhard<sup>3</sup>; Roberts Dave<sup>3</sup>; Clements Trevor<sup>4</sup>; Piper Phil<sup>4</sup>; 矢部 康男<sup>5</sup>; 中谷 正生<sup>6</sup>; 直井 誠<sup>6</sup>

OGASAWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KATO, Harumi<sup>2</sup>; HOFMANN, Gerhard<sup>3</sup>; ROBERTS, Dave<sup>3</sup>; CLEMENTS, Trevor<sup>4</sup>; PIPER, Phil<sup>4</sup>; YABE, Yasuo<sup>5</sup>; NAKATANI, Masao<sup>6</sup>; NAOI, Makoto<sup>6</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>株式会社 3D 地球科学研究所, <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>Groundwork Ltd., <sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>東京大学

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>3DGeoscience Inc., <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>Groundwork Ltd., <sup>5</sup>Tohoku University, <sup>6</sup>The university of Tokyo

南アフリカ(南ア)金鉱山は、震源の至近距離で岩盤挙動をつぶさに観察できるため、1991年にIASPEIで地震の実験場と認められた後、日本と南アとの共同研究が続いている。とりわけ2009年以後は、物的・人的資源がかつてない規模で投入され、他の取り組みでは得られない成果が得られつつある。本発表では、この取り組みの一部の成果である地表下1.0~3.4kmで行われた7つの現場応力測定、応力モデリングの高度化、地震 Back Analysis による震源の応力・強度の拘束などの到達点と課題、将来について、日本と南アの共同研究の成果を中心に概観する。

南アの既存の方法による金鉱山の高応力岩盤での応力は、技術的にもコスト的・時間的にも、現場測定が困難でデータがほとんどなかった。しかし、日本の技術(円錐ひずみ法)を南ア金鉱山の事情に合わせて小型化して導入し、地表下約3.0kmのM1.5の地震被害の付近や、地表下1.0kmであるが周囲が採掘済みである200m x 400mの残柱など、これまで測定も計算機予測も困難であった場所において高い応力の測定を行うことができた。7つの現場で測定された最大主応力は約80MPa~146MPaで、測定地点の岩盤の一軸圧縮強度は約200~300MPaであった。これらの応力測定が可能になったのは、地震発生場では、当然ではあるが、破壊が起こりやすい為に応力測定だけでなくドリリング自体が容易でないが、測定を確実に成功させるための経験も蓄積されたからである。

採掘が少ない地域では、地表下3.4kmまでの初期応力場(採掘前の応力場)のモデルが精緻化され、計算機応力モデリングが原位置測定応力をほぼ再現できていることが確認されつつある。採掘現場付近や地震発生場などの岩盤の挙動をより正確に表現できるような、ピーク強度や残留強度、不均質に関する情報を多点測定で得ることが次の目標である。

鉱山では、比較的大きな地震が発生する度に、発震機構解や統計地震学的な評価などルーチン的な地震解析だけでなく、計算機応力モデリングによって震源断層上の応力や強度の評価も行われている。初期応力場のモデルを現場応力測定によってより正確に押さえることができたため、地震発生場の条件もより正確に理解することができつつある。

2007年12月27日のクリスマス休暇中にJAGUARSのAE観測サイトの直近で発生したML2.1の地震は、地震破壊面が高精度で描き出されたため、計算機応力・地震発生モデリングを評価するのに希有の機会となった。この震源断層を貫通するドリリングが行われ、ボアホール・ブレイクアウト(BB)とコア・ディスクング(DC)の解析によって、応力場を拘束することができ、空間分布パターンは応力計算機モデルと調和的であるが、計算機モデリングの絶対値がやや小さいことや、BBやDCがボアホール中に一様に発生していた訳ではないので、応力か強度が均質ではなかったことも示唆されている。

地震前後の震源付近の変形が、計算機予測よりも石井式歪計の連続観測結果の方が大きく、実際の応力変化の方が計算機予測よりも大きかった可能性についてはポスターで紹介する。

以上のように、南ア金鉱山の地震発生場では、応力や強度や地震発生の理解、測定、予測の高度化が進み始めている。これらを更に進めることができれば、自然地震の応力場をリモート予測する研究によって見ることができるとできない事とを検証する場として南ア金鉱山は重要な役割を果たすと期待される。

キーワード: 南アフリカ金鉱山, 地震発生場, 応力, 強度, 原位置観測

Keywords: SA gold mines, Seismogenic areas, Stress, Strength, In-situ observation



## 南アフリカ金鉱山での地震発生場での歪連続観測に基づく応力時間発展の理解 Comparison of stress modeling with in-situ strain monitoring at seismogenic area in South African gold mines

小笠原 宏<sup>1\*</sup>; 桂 泰史<sup>2</sup>; Hofmann Gerhard<sup>3</sup>; 中谷 正生<sup>4</sup>; 矢部 康男<sup>5</sup>; 石井 紘<sup>6</sup>; 中尾 茂<sup>7</sup>; 大久保 慎<sup>6</sup>; Anthony Ward<sup>8</sup>; Jerry Wienand<sup>9</sup>; Patrick Lenegan<sup>9</sup>; 川方 裕則<sup>1</sup>; 村上 理<sup>1</sup>; 内浦 大海<sup>1</sup>  
OGASAWARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; KATSURA, Taishi<sup>2</sup>; HOFMANN, Gerhard<sup>3</sup>; NAKATANI, Masao<sup>4</sup>; YABE, Yasuo<sup>5</sup>; ISHII, Hiroshi<sup>6</sup>; NAKAO, Shigeru<sup>7</sup>; OKUBO, Makoto<sup>6</sup>; ANTHONY, Ward<sup>8</sup>; JERRY, Wienand<sup>9</sup>; PATRICK, Lenegan<sup>9</sup>; KAWAKATA, Hironori<sup>1</sup>; MURAKAMI, Osamu<sup>1</sup>; UCHIURA, Taka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>立命館大学, <sup>2</sup>株式会社 日立ソリューションズ, <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>東京大学, <sup>5</sup>東北大学, <sup>6</sup>東濃地震科学研究所, <sup>7</sup>鹿児島大学, <sup>8</sup>Seismogen CC, <sup>9</sup>Sibanye Gold Ltd.

<sup>1</sup>Ritsumeikan University, <sup>2</sup>Hitachi Solutions, Ltd., <sup>3</sup>Anglogold Ashanti Ltd., <sup>4</sup>The university of Tokyo, <sup>5</sup>Tohoku University, <sup>6</sup>Tono Research Institute of Earthquake, <sup>7</sup>Kagoshima University, <sup>8</sup>Seismogen CC, <sup>9</sup>Sibanye Gold Ltd.

Compared with continuous in-situ strain monitoring in other mines, we discussed the time evolution of stress in rock mass at a depth of 3.3km for a ~1.5-year period 90m beneath a dip pillar at Mponeng mine. The pillar contained a 30m-thick dyke which a ML2.1 seismic event obliquely bisected. We analyzed the recordings of two multi-component Ishii borehole strainmeters which had been already installed nine months prior to the ML2.1 event. One of the strainmeters was installed in the dyke (gabbros) and the other in the host rock (quartzite) near the dyke contact, both being within a few tens of meters from the ML2.1 rupture plane.

The magnitudes and directions of the principal strain changes were similar for both strainmeters in the period prior to the ML2.1 event. This suggested that the increase in stress in the dyke was significantly larger because the dyke was significantly stiffer than the host rock.

After the ML2.1 event, associated with the start of mining on the eastern side of the strainmeters, the pattern of deformation changed between the two strainmeters.

The above-mentioned characteristics of deformation were compared with numerically modelled deformation by an elastic boundary element method using Map3D Fault-Slip. The magnitude of the Map3D strain changes were, however, several times smaller than the observed strain changes both prior to and after the ML2.1 event. The rock mass just around a stope in deep tabular mining is fractured and behaves time-dependently and non-linearly. Whatever the inelastic deformation, the stress field in an elastic area can be reproduced within reason provided that the boundary condition (deformation, force or stress) is appropriately specified on the elastic-inelastic boundary. Because it is well known that time-dependent inelastic stope closure is much larger than instantaneous elastic stope closure, as a trial, we analyzed a response to an additional forced stope closure using Map3Di (Seismic Integrator version). It was then found that the forced additional stope closure better accounted for both the magnitude and the deformation pattern observed by in situ strain monitoring. We concluded that the effect of inelastic deformation around the stope was significantly larger than the elastic effect induced by the advance of mining faces, and the direct effect of the very close ML2.1 event was not so significant.

A great amount of better maintained data sets of strain are now being accumulated in four gold mines, which will allow us to discuss in further depth.

キーワード: 南アフリカ金鉱山, 地震発生場, 原位置歪連続観測, 応力時間発展

Keywords: SA gold mines, Seismogenic areas, In-situ strain continuous monitoring, Stress time evolution

## 千島弧前弧スリバーの運動に伴う小地震の断層面解の分布 Distribution of fault plane solutions of smaller events associated with the motion of Kuril forearc sliver

平塚 晋也<sup>1\*</sup>; 佐藤 魂夫<sup>2</sup>; 菅原 宗<sup>3</sup>; 今西 和俊<sup>4</sup>

HIRATSUKA, Shinya<sup>1\*</sup>; SATO, Tamao<sup>2</sup>; SUGAWARA, Sou<sup>3</sup>; IMANISHI, Kazutoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北大・理・地震火山研究観測センター, <sup>2</sup> 弘前大学工学研究科, <sup>3</sup> 地球科学総合研究所, <sup>4</sup> 産業技術総合研究所  
<sup>1</sup> ISV, Faculty of Science, Hokkaido Univ., <sup>2</sup> Sci. and Tech., Hirosaki Univ., <sup>3</sup> JGI, Inc., <sup>4</sup> AIST

In order to find the direct evidence of motion of fore-arc sliver along the Kuril trench, we investigated the distribution of fault plane solutions along the estimated boundary of Kuril fore-arc sliver in Hokkaido. Using the P-wave polarity data as well as P- and SH-wave amplitudes, we determined the fault plane solutions of smaller events ( $2.0 < M < 3.5$ ) with the number of P-wave polarity data are 10 or greater. The result is summarized as follows. Along the volcanic front in eastern Hokkaido, strike-slip fault type of events with WNW-ESE trending P-axes are distributed, which is consistent with the motion of Kuril fore-arc sliver along the volcanic front. In the western side of Hidaka Mountains, reverse fault type of events with P-axes sub-parallel to the trench are widely distributed, which is consistent with ongoing process of collision of Kuril fore-arc sliver with northeastern Japan arc. In more detail, we found that reverse fault type of events with NE-SW trending P-axes, which rotates counterclockwise from trench parallel direction are concentrated near the epicenter of 1982 Urakawa-oki earthquake (M7.1). The P-wave velocity perturbation derived from tomography study for the lower portion of the overriding plate show a good correlation with the distribution of events with NE-SW trending P-axes. The seismic tomography study suggests that the lower half of the delaminated lower crust extends to the source region of the 1982 Urakawa-oki earthquake, which may cause counterclockwise rotation of P-axes near the epicenter of 1982 Urakawa-oki earthquake (M7.1).

## 物理検層で検出した透水性亀裂と応力場の関係 Permeable fractures detected by geophysical loggings and their relation to in-situ stress

木口 努<sup>1\*</sup>; 桑原 保人<sup>1</sup>; 佐藤 隆司<sup>1</sup>; 小泉 尚嗣<sup>1</sup>  
KIGUCHI, Tsutomu<sup>1\*</sup>; KUWAHARA, Yasuto<sup>1</sup>; SATOH, Takashi<sup>1</sup>; KOIZUMI, Naoji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産総研  
<sup>1</sup> GSI, AIST

本研究では、産総研が掘削した 16 地点の硬岩地域の孔井について、透水性亀裂の向きと現在の応力場にどのような関係があるのかについて検討した。産総研は、2006 年より紀伊半島から四国周辺において南海トラフで発生する地震の予測研究のための地下水等総合観測点の構築を進め、2013 年までに 16 地点を整備した。各地点では深度約 600m、200m、30m の 3 本の孔井を掘削し、各種の物理検層を実施した。透水性亀裂を含む、孔壁面に認められる全ての亀裂の走向と傾斜角はボアホールテレビュアとボアホールカメラの画像から求めた。また、電気伝導度、速度、温度検層のデータから、透水性亀裂を検出した。応力場については、水圧破碎法により水平主応力値と方位が推定された地点と、水圧破碎法は実施せずに孔壁面の観察からボアホールブレイクアウト等の応力方位の情報を得た地点がある。以下では、水圧破碎法により応力場を評価した 6 地点において検討した結果を示す。6 地点は土佐清水市、新居浜市、熊野市、津市、西尾市、豊田市にそれぞれ位置する。

6 つの各地点で検出した全亀裂は約 2,000 から 5,000 個の範囲であり、そのうち透水性亀裂は約 20 から 30 個である。各地点の全亀裂の向きをそれぞれ表示すると、様々な走向と傾斜角を持つ亀裂が分布する。ここで、走向が最大水平圧縮応力方向に平行で高角（鉛直方向に近い）な傾斜角をもつものを引張り破壊型亀裂、また亀裂の強度を摩擦係数  $\mu$  ( $\mu \geq 0.4$ ) により記述されるクーロンの破壊基準で仮定した走向・傾斜角をもつ亀裂をせん断破壊型亀裂と呼ぶこととする。今回のいずれの地点においても、引張り破壊型あるいはせん断破壊型に対応する亀裂の走向・傾斜角の領域だけを用いて、全亀裂の分布の特徴を説明することは困難である。つまり、現在の応力場と見掛け上相関が無いと思われる向きを持つ亀裂も多数存在する。次に、透水性亀裂についてその走向と傾斜角の分布を調べると、新居浜地点では、引張り破壊型亀裂が卓越する傾向を示し、これは、現在の応力場に強く影響を受けている可能性を示す。一方、新居浜地点以外の 5 地点では、透水性亀裂の向きの分布は全亀裂の分布傾向と類似した特徴を持ち、特に透水性亀裂が現在の応力場の影響を受けているとは言えない。今後、これら以外の地点における全亀裂及び透水性亀裂の向きと応力方位の相関の結果も含めて、地下亀裂の透水性の不均一の要因の解明を進めたい。

キーワード: 透水性亀裂, 物理検層, 応力場, 引張り破壊亀裂, せん断破壊亀裂

Keywords: permeable fracture, geophysical logging, in-situ state of stress, tensile fracture, shear fracture

## 引きはがし付加体における古応力の変化 沖縄四万十付加体始新統嘉陽層の例 Change in paleostress in offscraped accretionary complex, Kayo formation, the Shimanto Belt, Okinawa island

橋本 善孝<sup>1\*</sup>; 本宮 裕平<sup>1</sup>; 氏家 恒太郎<sup>2</sup>  
HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>1\*</sup>; MOTOMIYA, Yuhei<sup>1</sup>; UJIIE, Kohtarō<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高知大学, <sup>2</sup> 筑波大学

<sup>1</sup>Kochi University, <sup>2</sup>Tsukuba University

沈み込み帯における応力状態を理解することは、付加体の発達や断層強度、地震発生のプロセスを明らかにすることに繋がる。本研究の目的は引きはがし付加体である沖縄本島の嘉陽層を対象に小断層スリップデータを用いて古応力の解析を行い、深度を与えることによって応力の半定量化を試みることである。

調査地域である沖縄本島東海岸沿い嘉陽層は主としてタービダイトから形成されており、褶曲・衝上断層によって強く変形している (Ujiie, 1997)。この褶曲に伴う層面すべりが一般的に観察できるほか、層を切る断層も多数見られた。

小断層の断層面の走向と傾斜、断層面に発達しているスリッケンライン・ステップからレイク及び運動のセンスを取得し、スリップデータとした。海岸沿いの調査地域約 2km から合計で 153 個の断層スリップデータを得た。ソフトウェア MIM (Yamaji, 2000) および K-means clustering (Ostubo et al., 2007) を使い、応力解析を行った。また、得られた応力を stress polygon に投影し、深度 5km を与えることによって各応力の大きさの半定量化を試みた。

小断層解析の結果 4 つの応力解を得た。この時、応力比は  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  とする。得られた応力は、KY1) 低角な NE-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.88$ )、KY2) KY3) 高角な NW-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.22, 0.45$ )、KY4) 低角な NW-SE 圧縮 ( $\Phi = 0.65$ ) である。また、4 つの応力解に対応した小断層は、KY1), KY4) では逆断層が多く、KY2), KY3) では正断層しかないことがわかった。4 つの解を stress polygon に投影し、先の断層センスで規制すると、半定量的な応力を得ることができる。この定量された応力を用いて、水平なデコルマ面を仮定したときの剪断応力  $\tau$  は、正断層 (KY2, KY3) ではおよそ 39-60MPa、逆断層 (KY1, KY4) ではおよそ 48-212MPa であった。逆断層の剪断応力は正断層の剪断応力よりも大きいことがわかる。この応力の大きさの差が地震前と地震後の応力解放を示していると考えると、求められる応力解放量は -16.2~173.1[MPa] と求めることができた。一般的に地震の応力解放量 0.03~30[MPa] と言われており、その範囲を含んでかつ大きく逸脱した結果も得られた。一般的な地震の応力解放量で規制すると、正断層で水平応力が 65-110MPa、逆断層で水平応力が 120-170MPa という範囲に絞ることができる。今後は小断層の形成深度を検討し、応力開放量として捉えることそのものの妥当性も含めて、議論していく必要がある。

キーワード: 応力, 小断層解析, 四万十帯, 沖縄

Keywords: Stress, micro-fault inversion, Shimanto Belt, Okinawa



## 東北日本島弧-海溝系の不均質粘弾性モデルの構築 Development of heterogeneous rheological model of the Tohoku Island arc-trench system

武藤 潤<sup>1\*</sup>; 芝崎 文一郎<sup>2</sup>

MUTO, Jun<sup>1\*</sup>; SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 建築研究所国際地震工学センター

<sup>1</sup>Dept. Earth Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>Building Res. Inst.

Subduction zone earthquake cycles can be characterized by various deformation processes taking place around the plate boundary and surrounding area. For example, after slip, viscoelastic relaxation and locking of the plate boundary are three primary processes among them. In order to illuminate the recovery of plate coupling after the Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake and strain budgets of island arc during cycles, the detailed viscoelastic structure of the Tohoku region is developed using seismologically determined subsurface structures and densely measured geothermal gradient data. The model is oriented perpendicular to the Japan Trench and also transects an area of large coseismic slip of the 2011 Tohoku Oki earthquake. Petrological model proposed by the laboratory measurement of seismic velocity of various rocks [Nishimoto et al., 2005] was utilized to infer rheologically major minerals from seismic velocity structures. We used geothermal gradient data from the inland Hi-net borehole [Matsumoto, 2007], as well as geothermal gradient data compiled from around Japan [Tanaka et al., 2004]. The strain-rate-dependent, steady state effective viscosity was calculated using constitutive laws of various rocks under the assumption of homogeneous geologic shortening rate [Sato, 1989]. The calculated viscosity structures show lateral viscosity gradients both parallel and normal to the trench axis. Moreover, the minimum viscosities are predicted to be  $10^{19}$  Pa s in the mantle wedge and  $10^{20}$  Pa s in the oceanic mantle. The values are consistent with previous estimates obtained by postseismic deformation analysis of subduction zone earthquakes with similar magnitudes (Mw ~9). However those minimum values only appear in depths of 30-100 km in the upper mantle and the viscosity increases further with depths because of the pressure hardening effect. Taking the high values of viscosities in shallower part of the lithosphere, the thickness of high viscous layers found to have lateral variations implying the heterogeneous elastic layer thickness. Model viscosity structures of the Tohoku region utilizing realistic temperature and rheological properties of rocks can be used to evaluate the effect of rheological heterogeneity in the postseismic deformation field of the Tohoku-Oki earthquake observed by dense network of geodetic observations. In the presentation, we will mention the detailed information on the choice of the flaw law parameters, and physical and ambient conditions for NE Japan to calculate the viscosity structures. We also show how these heterogeneities affect the crustal deformation of the NE Japan during subduction zone earthquake cycles.

キーワード: 岩石レオロジー, 東北日本弧, 粘弾性緩和, 地震サイクル, 東北沖地震

Keywords: rheology, Tohoku, viscoelastic relaxation, earthquake cycle, Tohoku oki earthquake

## 北海道下の3次元減衰構造：島弧－島弧衝突とM7クラス内陸大地震（その3） Detailed seismic attenuation structures beneath the Hokkaido corner, northern Japan (3)

北佐枝子<sup>1\*</sup>; 中島淳一<sup>2</sup>; 長谷川昭<sup>2</sup>; 内田直希<sup>2</sup>; 岡田知己<sup>2</sup>; 勝俣啓<sup>3</sup>; 浅野陽一<sup>1</sup>; 木村武志<sup>1</sup>  
KITA, Saeko<sup>1\*</sup>; NAKAJIMA, Junichi<sup>2</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>2</sup>; UCHIDA, Naoki<sup>2</sup>; OKADA, Tomomi<sup>2</sup>; KATSUMATA, Kei<sup>3</sup>  
; ASANO, Youichi<sup>1</sup>; KIMURA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究  
院附属地震火山研究観測センター

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>ISV, Hokkaido University

### 1. Introduction

In the Hokkaido corner, the Kuril fore-arc sliver collides with the northeastern Japan arc. Using travel-time data compiled from the nationwide Kiban seismic network and a dense temporary seismic network [Katsumata et al, 2002], Kita et al. [2012] determined high-resolution 3D seismic velocity structure beneath this area for deeper understanding of the collision process of the two fore-arcs. In this study, we merged waveform data from the Kiban-network and from the temporary network, and estimated the seismic attenuation structure to understand seismotectonics and collision process beneath Hokkaido.

### 2. Data and method

We estimated corner frequency for each earthquake by the spectral ratio method of coda waves [e.g. Mayeda et al., 2007]. Then, we simultaneously determined values of  $t^*$  and the amplitude level at low frequencies from the observed spectra after correcting for the source spectrum. Seismic attenuation ( $Q^{-1}$  value) structure was obtained, inverting  $t^*$  values and employing the 3-D ray-tracing technique of Zhao et al. [1992]. The study region covers an area of 41-45N, 140.5-146E, and a depth range of 0-300 km. We obtained 154,293  $t^*$  at 316 stations from 6,196 events ( $M_j > 2.0$ ) that occurred during the period from Aug. 1999 to Dec. 2012. Horizontal and vertical grid nodes were set with spacing of 0.1-0.3 degrees and 10-30 km, respectively.

### 3. Results

The calculated stress drops are distributed from 0.1 to 100 MPa. Stress drops of intraslab earthquakes increase with focal depth. The values of stress drops of events in the slab mantle tend to be larger than those in the slab crust at depths of 80 to 170 km, which might contribute to understanding of the physical nature of intraslab earthquakes.

Seismic attenuation structure is imaged for the region above the subducting Pacific slab at depths down to ~80 km. For the forearc side of the eastern and western parts of Hokkaido, high- $Q_p$  zones are generally imaged at depths of 10 to 80 km in both the crust and mantle wedge above the Pacific slab. In contrast, low- $Q_p$  zones are clearly imaged in the mantle wedge of the backarc side. They are distributed in deeper parts and reach the Moho beneath the volcanic front. Locations of these low- $Q_p$  zones correspond to the low- $V_p$  and low- $V_s$  zones imaged by Zhao et al. [2012]. These suggest that the upper head of the mantle-wedge upwelling flow is detected beneath Hokkaido also by our seismic attenuation imaging.

In the Hokkaido corner, to the west of the Hidaka main thrust a broad low- $Q_p$  zone is imaged at depths of 0-60 km. Location of this broad low- $Q_p$  zone almost corresponds to that of the low- $V$  zone in the collision zone found by Kita et al. [2012]. Fault planes of the 1970 M6.7 and 1982 M7.1 earthquakes are located at the edges of a broad low- $Q_p$  zone, being in contact with a high- $Q_p$  zone at 10 to 35 km. These results suggest that the occurrence of these anomalously deep and large inland earthquakes is related to the presence of hydrous minerals or fluids.

The subducting oceanic crust beneath the Hidaka region is imaged as a low- $Q$  zone whose location corresponds to the low- $V_p$  and low- $V_s$  zone of Kita et al. [2012], suggesting the existence of hydrated materials at the top of the slab. Just above the slab surface, moderately low- $Q$  zones are imaged at depths of 90 to 100 km beneath eastern and southern Hokkaido and at depths of 110 to 130 km beneath the corner, which are located at depths deeper than the upper plane seismic belt. These observations suggest the existence of the hydrated mantle wedge by the aqueous fluids supplied from the oceanic crust right below.

キーワード: 地震波減衰構造, 地震テクトニクス, 島弧衝突過程, スラブ内地震の応力降下量

Keywords: Seismic attenuation structure, Seismotectonics, arc-arc collision process, Stress drops of intraslab earthquakes

## 中越地域の地殻変動に基づく歪み集中機構の考察 Crustal deformation in the Mid-Niigata area and its implication for strain concentration

鷺谷 威<sup>1\*</sup>; Meneses Angela<sup>1</sup>  
SAGIYA, Takeshi<sup>1\*</sup>; MENESES, Angela<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>Nagoya University

The Mid-Niigata area is located within the concentrated strain belt along the eastern margin of the Japan Sea. This area suffered from two large earthquakes, the 2004 Chuetsu and the 2007 Chuetsu-oki earthquakes. Based on GPS velocity data calculated from daily coordinate time series of GEONET, we identified significant time dependence of the interseismic crustal deformation patterns before, between, and after these two earthquakes. Modeling results of the deformation pattern changes are summarized as follows. 1) Contraction before 2004 occurred between the source regions of the two earthquakes and it was attributed to aseismic faulting across almost the whole elastic layer, implying that the observed strain was largely inelastic. This interpretation is also supported from a fact that the historical seismic energy release in this area is much smaller than that expected from geodetic strain accumulation. 2) After two earthquakes, aseismic faulting seems to have continued without explicit time decay. The aseismic faulting is estimated close the source fault of the main shocks, implying that postseismic strength recovery did not occur on the main shock fault or a nearby parallel fault was activated to accommodate regional contraction. This is consistent with an idea that the upper crust in this area is segmented to smaller blocks and the mechanical behavior is very sensitive to external stress changes.

キーワード: 歪み集中, 新潟・神戸構造帯, 2004年中越地震, 2007年中越沖地震, 非地震性すべり, 非弾性変形

Keywords: Strain concentration, Niigata-Kobe Tectonic Zone, 2004 Chuetsu earthquake, 2007 Chuetsu-oki earthquake, aseismic faulting, inelastic deformation

## プレート境界の摩擦強度が支配する沈み込み帯のテクトニック応力場 Tectonic stress fields in subduction zones governed by frictional strength of plate interfaces

松浦 充宏<sup>1\*</sup>; 野田 朱美<sup>2</sup>; 寺川 寿子<sup>3</sup>; 深畑 幸俊<sup>4</sup>

MATSU'URA, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>; NODA, Akemi<sup>2</sup>; TERAKAWA, Toshiko<sup>3</sup>; FUKAHATA, Yukitoshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 統計数理研究所, <sup>2</sup> 構造計画研究所, <sup>3</sup> 名古屋大学環境学研究科, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Institute of Statistical Mathematics, <sup>2</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc., <sup>3</sup>Nagoya University, <sup>4</sup>Kyoto University

Tectonic crustal motion in plate convergence zones varies from mountain building (e.g., Himalaya) to back-arc spreading (e.g., Mariana) [1, 2, 3]. Such difference in tectonic crustal motion reflects the diversity of tectonic stress fields. So our question is what causes the diversity of tectonic stress fields in plate convergence zones. Recently, from a theoretical study [4], we revealed that the tectonic stress field consists of basically two different sorts of stress fields; one of which is a horizontally compressional stress field due to frictional resistance at plate interfaces, and another is a horizontally tensile stress field due to steady plate subduction. On a geological timescale, the former can be regarded as constant in time, but the latter increases with time. So, if the earth's crust were infinitely strong, tectonic stress fields in plate convergence zones would become tensile in time everywhere. Actually, the earth's crust includes a number of defects with low strength, over which inelastic deformation (brittle fracture and/or plastic flow) occurs so as to release the tectonic stress caused by mechanical interaction at plate interfaces. From these considerations, we may conclude as follows. When the plate interface is very weak in comparison with the earth's crust, a horizontally tensile stress field becomes dominant, which causes back-arc spreading as in the case of Mariana. When the plate interface is very strong, a horizontal compressional stress field becomes dominant, which causes mountain building as in the case of Himalaya. Tectonic stress fields in most subduction zones, where the strength of plate interfaces are comparable to that of the earth's crust, are between these two extreme cases.

### References

- [1] Takada, Y. and M. Matsu'ura, 2004. A unified interpretation of vertical movement in Himalaya and horizontal deformation in Tibet on the basis of elastic and viscoelastic dislocation theory, *Tectonophysics*, 383, 105-131.
- [2] Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 2006. 3-D simulation of tectonic loading at convergent plate boundary zones: Internal stress fields in northeast Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 163, 1803-1817.
- [3] Hashima, A., Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, 2008. 3-D simulation of tectonic evolution of the Mariana arc-back-arc system with a coupled model of plate subduction and back-arc spreading, *Tectonophysics*, 458, 127-136.
- [4] Matsu'ura, M., A. Noda, and T. Terakawa, 2013. Strength of plate interfaces and tectonic stress fields in subduction zones, *Seismological Society of Japan 2013 Annual Meeting*, D22-08, Yokohama.

キーワード: 沈み込み帯, テクトニック応力場, プレート境界, 摩擦強度, 造山運動, 背弧拡大

Keywords: subduction zone, tectonic stress field, plate interface, frictional strength, mountain building, back-arc spreading



## GPS 時系列データの逐次インバージョンによるプレート間カップリング変化の推定 Sequential inversion of GPS time series data to estimate spatiotemporal change in inter-plate coupling

野田 朱美<sup>1\*</sup>; 松浦 充宏<sup>2</sup>

NODA, Akemi<sup>1\*</sup>; MATSU'URA, Mitsuhiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 構造計画研究所, <sup>2</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc., <sup>2</sup>Institute of Statistical Mathematics

To estimate steady increase rates of slip deficits at plate interfaces, first, we obtain linear trends of the time series of GPS daily coordinate data by removing seasonal variations and coseismic and postseismic changes due to episodic events. Then, we invert the linear trends (surface displacement rates at GPS stations) into steady slip-deficit rate distribution on a plate interface with completely relaxed slip-response functions for an elastic-viscoelastic layered half-space model under gravity (Noda et al., 2013, GJI). Noda et al. (SSJ 2012 Annual Meeting) demonstrated that this method is applicable to GPS time series data in northeast Japan for the interseismic period (March 1997-February 2008) before the 2008 Ibaraki-oki (Mw6.8) and Fukushima-oki (Mw6.9) earthquakes. After these events, the trends of GPS time series data gradually change with time (Suito et al., 2011, EPS), indicating spatiotemporal change in interplate coupling preceding the 2011 Tohoku-oki mega-thrust earthquake.

The change in slip-deficit rate distribution disturbs a steady stress state in the asthenosphere, and so we need to use the viscoelastic transient slip-response functions for the analysis of GPS time series data after the 2008 events (Noda et al., 2013, GJI). An exact treatment of the viscoelastic inverse problem to estimate cyclic slip processes at a plate interface has been given by Fukahata et al. (2004, GJI), but it is not applicable to the present problem because the change in slip-deficit rate distribution is not a cyclic but transient process. So, we propose a simple inversion technique, called sequential inversion of GPS time series data, to estimate spatiotemporal changes in slip-deficit rates at plate interfaces. A similar sequential inversion technique has been used by Lubis et al. (2013, GJI) for the analysis of afterslip distribution following the 2007 southern Sumatra earthquake (Mw8.5) on the assumption that the asthenosphere has been in a steady stress state until the 2007 event.

In the present study, we estimate the spatiotemporal change in interplate coupling by applying the sequential inversion technique to GPS time series data for March 2008-February 2011, and reveal the slip history at the North American-Pacific plate interface off Tohoku during the 14 years before the 2011 Tohoku-oki mega-thrust earthquake.

キーワード: GPS 時系列データ, 逐次インバージョン, 過渡的な粘弾性応答, プレート間カップリング変化, 2011 年東北沖地震

Keywords: GPS time series data, sequential inversion, viscoelastic transient response, change in interplate coupling, the 2011 Tohoku-oki earthquake

## 中期中新世における TTT 三重会合部の移動と西南日本地殻の急成長 Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid crustal growth in SW Japan

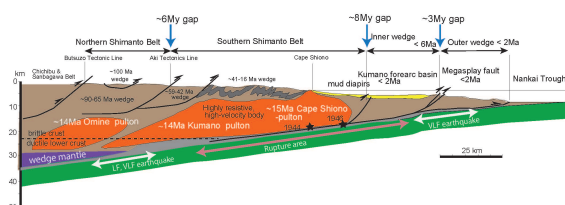
木村 学<sup>1\*</sup>; 橋本 善孝<sup>2</sup>; 北村 有迅<sup>3</sup>; 山口 飛鳥<sup>4</sup>; 高下 裕章<sup>1</sup>

KIMURA, Gaku<sup>1\*</sup>; HASHIMOTO, Yoshitaka<sup>2</sup>; KITAMURA, Yujin<sup>3</sup>; YAMAGUCHI, Asuka<sup>4</sup>; KOGE, Hiroaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 高知大学, <sup>3</sup> 鹿児島大学, <sup>4</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Kochi University, <sup>3</sup>Kagoshima University, <sup>4</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

We review recent progress in geological and geophysical investigation in SW Japan, the Nankai Trough and the Philippine Sea Plate (PSP), and propose a comprehensive hypothesis for the Miocene tectonics of the Nankai Trough. New interpretations are as follows: Near-trench magmatism in the outer zone of SW Japan might have various reasons. The possibility of an arc-arc collision in particular should be examined, in addition to the previous model of an oceanic ridge and hot PSP subduction. The indentation structure at Capes Ashizuri, Muroto in Shikoku, and Shiono on the Kii Peninsula may be explained by the collision of the active arc or topographic peaks such as seamounts, contrary to the previous "kink-folding" model due to recent E-W compression. This inference is drawn from comparison between the many modern examples of seamount collision and sandbox analogue experiments. Crustal components of SW Japan might consist mainly of igneous plutonic rocks, in contrast to the previous inference of Cretaceous to Tertiary accretionary complexes. This is especially the case in the outer zone to the north of Capes Ashizuri, Muroto and Shiono. This is inferred from geophysical observation of gravity anomalies, velocity and resistivity, together with geological estimations of caldera age and the size of its root pluton. Episodic crustal growth due to intrusion of igneous rock and subduction of the PSP may have stopped after ~11 Ma and restarted at ~7-8 Ma. New accretionary prism was again developed after ~6 Ma. This inference is suggested by recently conducted ocean drilling program.



## 沈み込み帯における火山列と高重力異常の位置関係 Spatial relationship between the volcanic chain and high gravity anomalies in subduction zones

深畑 幸俊<sup>1\*</sup>  
FUKAHATA, Yukitoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

島弧-海溝系の主要な特徴としては、地震分布、地形、重力異常、火山列の4つがまず挙げられる。地形と重力異常は共に海溝で低く島弧で高くなる。島弧における地形および重力異常の高まりは、海洋プレートの沈み込みに伴う力学的相互作用によって理論的に説明することができる (Sato & Matsu'ura, 1993, GJI; Hashimoto et al., 2004, PAGEOPH)。地形は過去の様々な履歴を引きずるため、理論モデルと比較する観測量としては、地形よりもフリーエア重力異常の方が性質が良い。長波長のフリーエア異常は基本的にテクトニクス力による重力平衡からのずれを表していると考えられる。

火山は、大半の島弧で存在し、通常は火山フロントに沿って列状に並ぶ。従って、フリーエア重力異常と火山列の位置関係に基づいて島弧?海溝系を分類するのは極めて自然なことである。重力異常の高まりと火山列は、共に海溝にほぼ平行に走るため、両者の分布は、一列に一致する場合としない場合とに分類できる筈である。そのような考えに基づいて島弧を分類した結果を以前の連合大会でも発表した (深畑, 2008)、両者の位置関係を論じる上で、十分な客観性が担保されていないという問題があった。特に、高重力異常の位置をどのように認定するかが難しかった。そこで、今回は、より客観的かつ定量的に重力異常の高まりの位置を認定することを試みた。その結果、多くの島弧では前回の認定と変わらなかったものの、伸張場にあるいくつかの島弧では高重力異常がブロードに分布し、その位置を特定の場所に定義することが難しいことが分かった。新たに認定した高重力異常の位置に基づき、それと火山列との位置関係を議論し、島弧地形の成因について考察する。

キーワード: 島弧, 沈み込み帯, 重力異常, 火山フロント  
Keywords: island arc, subduction zone, gravity anomaly, volcanic front

## 養老 - 鈴鹿 - 布引山地の隆起・削剥史：アパタイト FT 解析に基づく制約 Uplift and denudation history of the Yoro-Suzuka-Nunobiki Mountains: Constraints from apatite FT thermochronology

末岡 茂<sup>1\*</sup>; 堤 浩之<sup>2</sup>; 田上 高広<sup>2</sup>; 長谷部 徳子<sup>3</sup>; 田村 明弘<sup>3</sup>; 荒井 章司<sup>3</sup>; 柴田 健二<sup>1</sup>  
SUEOKA, Shigeru<sup>1\*</sup>; TSUTSUMI, Hiroyuki<sup>2</sup>; TAGAMI, Takahiro<sup>2</sup>; HASEBE, Noriko<sup>3</sup>; TAMURA, Akihiro<sup>3</sup>; ARAI, Shoji<sup>3</sup>  
; SHIBATA, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 原子力機構, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 金沢大学

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Kanazawa University

養老 - 鈴鹿 - 布引山地は、近畿の逆断層卓越地域（近畿三角帯；Huzita, 1962）と中部の横ずれ断層卓越地域（中部傾動地塊；桑原, 1968）との構造境界上に位置しており、西南日本内帯の第四紀テクトニクス解明の鍵となる地域である。本地域の地下には浅い尾根状のフィリピン海スラブ（伊勢湾 - 湖北スラブ）が沈み込んでおり、これが東進するアムールプレートとの間に一種の衝突帯を形成することにより、構造境界が形成されているという説が提唱されている（三好・石橋, 2008）。養老 - 鈴鹿 - 布引山地の東西では、中新世以降に東海層群と古琵琶湖層群の堆積盆が形成され、それぞれの堆積本の中心が北上してきたことが知られている（例えば、横山, 1995；吉田, 1990）。一方、養老 - 鈴鹿 - 布引山地については、断層活動により大局的には堆積盆地の沈降と対になって隆起したという説（岡田, 2004）と、堆積盆地の形成以降に独立に隆起したという説（太田・竹村, 2004）があるように、形成の過程やメカニズムには未解明の点が多い。

本研究では、アパタイト FT 解析により、養老 - 鈴鹿 - 布引山地の主に南北方向における隆起・削剥史の違いの検出・解明を試みている。2014 年 1 月現在、養老山地 1 地点、鈴鹿山脈 8 地点、布引山地 1 地点の解析がほぼ完了しており、その要点は以下の通りである：1) アパタイト FT 年代は 47~30Ma の値を示す、2) アパタイト FT 年代は鈴鹿山脈中部~南部でもっとも若く、南北双方向に系統的に古くなる、3) アパタイト FT 年代と FT 長に基づいた熱履歴解析の結果、鈴鹿山脈中部~南部では最近数 Ma の急冷が検出されるが、鈴鹿山脈北部、養老山地、布引山地では検出されない、4) 本研究で検出された鈴鹿山脈中部~南部の急冷は、鈴鹿山脈の隆起開始（約 1.3Ma；横山, 1995）以降の削剥を反映していると解釈できる。上記の成果をさらに南方でも検討するために、現在、布引山地 7 地点において追加のアパタイト FT 解析を実施中であり、講演当日にはこれらの結果も踏まえた議論を行う予定である。

キーワード: 養老 - 鈴鹿 - 布引山地, アパタイト FT 法, 削剥, 近畿三角帯東縁

Keywords: Yoro-Suzuka-Nunobiki Mountains, apatite fission-track thermochronology, denudation, eastern margin of the Kinki Triangle



## 褶曲の波長と振幅の自己アフィン性 Self-affinities for Amplitude and Wavelength of Folds

菊地 和平<sup>1\*</sup>; 長濱 裕幸<sup>1</sup>

KIKUCHI, Kazuhei<sup>1\*</sup>; NAGAHAMA, Hiroyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University

地形は、異なる倍率で見た場合においても、その形状が同じように見えるスケール不変性を持っている。そのような地形に対して Matsushita and Ouchi (1989a, b) は、自己アフィン解析を行った。その結果、地形が方向によって異なったスケーリング指数により定義される自己アフィン性を持つことを報告した (Matsushita and Ouchi 1989a, b)。Kikuchi et al. (2013) は、その自己アフィン性が普遍的に地形・褶曲において存在するかの検証を行うために、Matsushita and Ouchi (1989a, b) の解析の方法を、東北本州弧の地形・褶曲に適用した。この分析により褶曲が、振幅と波長において異なったスケーリング指数により定義される自己アフィン性を持つことを報告している (Kikuchi et al., 2013)。

褶曲に対して Shimamoto (1979) は、次元解析の Buckingham の Pi 定理を適用し、波長と層の厚さの関係を導いている。しかし、Shimamoto (1979) では、Kikuchi et al. (2013) で報告されている褶曲の振幅と波長に対する自己アフィン性が指摘されていない。そこで、褶曲の次元解析において自己アフィン性を導くために、Barenblatt (1979) の Incomplete self-similarity 理論を援用した。この理論を使うことにより従来の褶曲の次元解析で考慮されてこなかったゼロまたは無限大になり考慮されてこなかった量を考慮することができる。その量を考慮した結果、褶曲における波長 ( $a$ ) と振幅 ( $L$ ) の関係を次のように導出した：

$$L^{(1-d)} \propto a.$$

Kikuchi et al. (2013) で得られたハースト指数  $H$  と  $d$  との関係は、次式で表現される。

$$1-d=H.$$

ここでハースト指数  $H$  は、振幅と波長に関するスケール指数の比で、 $d$  は Incomplete self-similarity 理論から得られたべき指数である。この  $d$  が 0 でない ( $H \neq 1$  となる) 場合は、スケールされる方向によってスケーリングの違いがある自己アフィン性であることを意味する。この場合は、方向により褶曲の形成のされ方が違ったものと考えられる。もしこの指数  $d$  が 0 である場合、ハースト指数は、 $H = 1$  でスケールされる方向に違いがない自己相似性であることを意味する。この場合は、方向により褶曲の形成のされ方の違いはなかったと考えられる。褶曲はテクトニックな応力場と重力により形成され、その形成過程が等方的か異方的かの違いにより自己相似性、自己アフィン性が表れると考えられる。

### 参考文献

Barenblatt, G.I. (1979) *Consultants Bureau*, New York.

Kikuchi, K., K. Abiko, H. Nagahama, H. Kitazato, and J. Muto (2013) *Acta Geophysica*, **61**, 6, pp. 1642-1658.

Matsushita, M. and S. Ouchi (1989a) *Physica D*, **38**, 1, pp. 246-251.

Matsushita, M. and S. Ouchi (1989b) *Journal of the Physical Society of Japan*, **58**, 5, pp. 1489-1492.

Shimamoto, T. (1974) *Tectonophysics*, **22**, pp. 253-263.

キーワード: 褶曲, 自己アフィン, Buckingham の Pi 定理, Incomplete self-similarity

Keywords: Fold, Self-affinity, Buckingham's Pi-theorem, Incomplete self-similarity theory

## なぜ箱根山は異形で、房総沖三重会合点で海溝軸が最も西寄りなのか～フィリピン海プレートは(やはり)関東平野の奥深くに～ Reason for strange appearance of Mt. Hakone, and Reason why the Boso Triple Junction has moved to the west most

間瀬 博文<sup>1\*</sup>  
MASE, Hirofumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 所属なし  
<sup>1</sup> none

(図面を参照のこと)

プレート(以下P)収束帯の温度構造が陸地を形成するがその先頭は火山である(2)。上昇するマグマの上で垂れるスラブ(以下S)は存在できない。マグマはSを地表まで支え上げ突き破る。その際上側のPは共存できず切開され脇へ押し遣られる。富士山はフィリピン海(以下PHS)Pの北端を貫き、陸側Pの切開の先端点で、駿河・相模トラフの起点をなす。(以上(1))一方箱根山・三原山は相模トラフの位置決めをしていると考える。

”東海S”は富士山の北側まで、に対し”相模S”は関東の奥深くまで沈み込んでいるように見える(3)。一枚の板として不自然である。GPSが捉えた地殻変動は伊豆半島が西進、に対し伊豆諸島や関東南部は北進成分が大きい(4)。東経135～140度では、特に140度の断面は太平洋側を北上させる(南北圧縮)力が発生する温度構造の条件を満たすことが分かった。つまりPHSPは”相模S”側だけが過去に大きく沈み込んで現在の状況になったと考える。

では境界となる亀裂(横ずれ断層)はどこか。箱根山の北側にSの沈み込みを象徴する地震の多発帯がある(5)。その分布状況は、西側の縁をなぞれば緩やかなラインで箱根山・三原山を結ぶことができる(図面赤破線)。多発帯を東西に二分する南北方向の空白ラインは箱根山を通る(図面青破線)。赤破線で滑っていた時期もあったが三原山以南で断層が得られず青破線に移行したと考える。箱根山・伊豆半島東方沖・伊豆諸島の並びはマグマを足掛かりとして亀裂が南方まで伸び易い。”相模S”の西端は青破線までと考える。

箱根山は伊豆諸島以東のPHSPの西端で沈み込みの起点の意味を持つ。山体の地下数KMでは、長年東半分がPが活発に北進、そして沈み込む。つまり南方から物質が押し寄せ、北方へ物質が吸出される作用が働く。箱根山の外輪山やその内外の地形について西半分は平凡な反面、東半分は個性的である。南部はふっくらと盛り上がりX字状の溝は圧縮力による断層と思われ、北部は引き摺り出された跡の様な巨大な溝が北方へ延びる(10)。

一方、房総沖三重会合点で海溝軸が最も西寄りなのはなぜか。西進する太平洋Pはその上に載る陸側PとPHSPを東西方向に圧縮するが南北は伸張作用となる。陸側PとPHSPの重なり部は、ずれて重なりが浅くなり、太平洋Pに対する上盤は南北に伸びる。その分東西圧縮による海溝軸の西進は容易になる。陸側PとPHSPそして太平洋Pは東西に窮屈となり褶曲やつぶれが発生する。それでさらに海溝軸が西進し易くなる。普段のストレスは褶曲やつぶれに吸収され巨大地震が発生しても海溝軸は東へ戻りにくい。これが「海溝軸西寄り」の原因である。安定した宮城沖の海溝軸に対し、福島・茨城沖のそれが西へなびいている(6)根本の理由がこれで示された。

参考文献

(1) 間瀬博文(2009)/プレート内の自壊から始まる南海地震が関係する地域のシステム～沈降できないプレートと単独活動できない東海地震～/地震学会2009年/P3-64

(2) 間瀬博文(2012)/島弧と海盆を形成し維持する力～なぜ西日本は海盆でないのか～/地球惑星科学連合2012年/SCG67-P06

(3) 遠田晋次(2005)/関東直下の新しいプレート構造の提案/図1/従来のモデル(Noguchi1999)/産総研活断層研究センター/研究成果2005年06月10日

(4) 国土地理院/地殻変動アニメーション1996年4月～1999年12月鳥瞰図

(5) 気象庁/地震・火山月報(防災編)/平成13年12月/東海・南関東地域の地震活動/図5

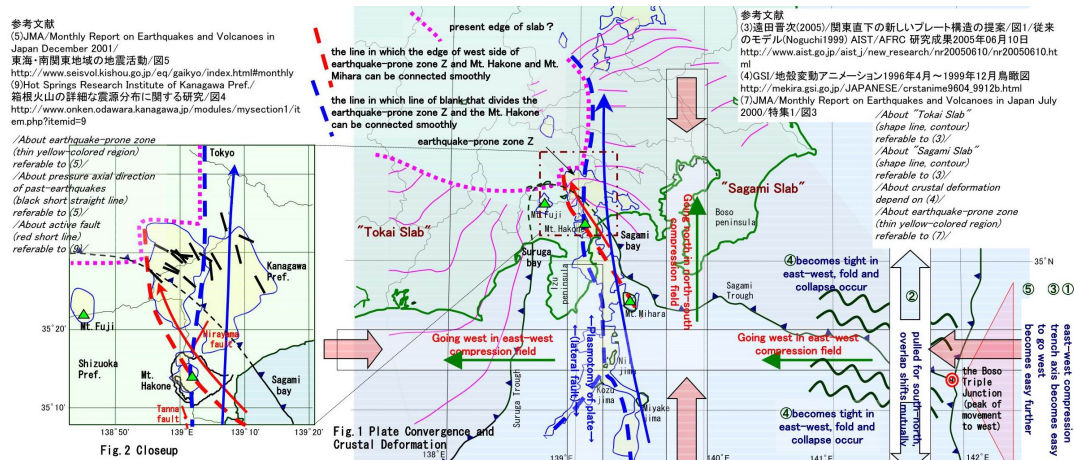
(6) 間瀬博文(2013)/東北地方太平洋沖地震が茨城県沖の海溝海側斜面でやったこと～海溝軸、瞬間転移か～/地震学会2013年/P2-45

(10) ウィキペディア(Wikipedia)箱根山/箱根山の地形図

SCG66-P04

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30



## 海水の増加によって海洋底は拡大した The Ocean Floor was Expanded by Increasing Seawater

間遠 伸一郎<sup>1\*</sup>  
MADO, Shinichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 間遠総合学術研究所  
<sup>1</sup>MAROSA

### はじめに

本論は、プレートテクトニクス基礎にある、海洋底拡大説の根拠を、明らかとなった事実と推論とによって否定することを目的とする。既に、S.Mado, 2013<sup>[3]</sup>において、海洋底拡大説の論拠の一つとなっている海嶺を挟む地磁気異常の縞模様が、従来言われているような地球磁場の周期的反転を記録したものではなく、全く異なる別のメカニズムで形成されたものであることは述べた。従って、海洋底拡大説の論拠の一つは否定されているが、本論では、もう一つの根拠である海洋底岩盤の拡大そのものを否定する。

### 問題の所在

プレートテクトニクスはウェゲナーの大陸移動説を端緒にしなが、その後の議論によって進化を遂げ、海洋底拡大説をもとにして概ね現在の理論に落ち着いた。しかし、その海洋底拡大説が、海洋底の岩盤自体の拡大を意味する限り、誤りであることが判明した。それは、海洋底が拡大したのは、海洋底の岩盤が拡大したからではなく、海水が増大したために過ぎないことが分かったからである。その結果、プレートテクトニクスの根拠の一つが失われた。

### 海洋底拡大説

プレートテクトニクスは、海洋底拡大説をもとにして整えられた。プレートの運動速度は、地磁気異常の縞模様のパターンから、海嶺での拡大速度を読み取ることによって求められた。海洋底の玄武岩やその上の微化石の年代が、中央海嶺から離れるにつれて古くなっているほか、地磁気異常の縞模様から推定される海洋底の年代とよく一致し、大西洋では海洋底拡大が年間 2cm の速度で進んだことが実証されたとされた。<sup>[1],[2]</sup>

### 海面上昇と海水の増大

海洋底拡大説が見逃していた重大な事実、海面上昇の事実がある。海底の詳細な地形のデータによって、海底の岩盤が形成された時から今までに、少なくとも 6000m を超える海面上昇があったことが分かる。

海底には多数の太古の河の跡が残されており、その水深は 6000m 以上にも達する。例えば、釧路川の延長は水深 6000m 以上の日本海溝付近の海底にも認められるし<sup>[Fig1-B]</sup>、糸魚川の延長は水深 3500m の日本海の最深部にも認められるのである<sup>[Fig1-A]</sup>。

つまり、海洋の海水の大半は海洋の岩盤が形成された後に生成されたものであり、海底の岩盤が形成された後に海水が大きく増大した結果、海面が大きく上昇して現在の海面に達した。海水の増大の原因として考えられるのは、地殻変動である。地殻変動によって、地殻を構成する岩石から水が絞り出されたものと考えられる。そして、おそらく、その海水の増大は、現在も続いている。その結果、大変ゆっくりとはあるが、海面が徐々に上昇し続けているのである。この事実は、海洋底拡大説では、全く考慮されていない。

つまり、海水が増大するにつれて、海面が上昇し、それとともに海底も拡大したのである。海底の岩盤が拡大したのではなく、海水が増大することによって海底が拡大したのである。

海嶺の付近で年代が新しくなるのは、そこが高くなっているため、水面下に没したのが新しいからである。

### 結論

海洋底拡大説は、海洋底の岩盤自体が長い時間をかけて広がったと主張しているが、海洋底の岩盤の年代と海洋底の年



SCG67-01

会場:414

時間:5月1日 14:15-14:30

代の間には関係が無い。それは、海洋底の拡大が、実は、海水の増加に起因していたからである。海水が増加して、海水面が上昇するにつれ、海底が拡大した。だから、プレートテクトニクスの重要な証拠の一つが根拠のないものであることが明らかになったのである。

#### 参考文献

[1] Maxwell, A. & Von Herzen, R. et al. 'Deep Sea Drilling in the South Atlantic', SCIENCE, Volume 168, pp.1047-1059, 29 May 1970.

[2] Dietz, R. 'Continent and Ocean Basin Evolution by Spreading of of the Sea Floor', NATURE, Volume 190, pp.854-857, June 3, 1861.

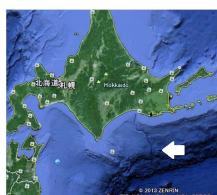
[3] Shinichiro Mado, 'It was not switching global geo-magnetic fields that created the alternating anomalies over oceanic ridges', ABSTRACT of Japan Geoscience Union Meeting, SEM36-P01, 2013.

キーワード: 海洋底の年代推定, 海水面の上昇, 海水の増加, 海洋底の拡大

Keywords: Dating the Ocean Floor, Rise in the Sea Level, Increase of Seawater, Expansion of the Ocean Floor



A



B

Fig 1

## ルイビル海山列が深部マントル起源である証拠 Noble gas evidence of deep plume origin of the Louisville hotspot

羽生 毅<sup>1\*</sup>  
HANYU, Takeshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Louisville seamount chain has been considered to be one of the long-lived hotspot tracks on the Pacific plate, but its magmatic source has not been well understood. I report noble gas compositions of the drill cores from four of the five seamounts drilled during IODP Expedition 330. Because the samples are aged (50-74 Ma), a stepwise crushing test for noble gas extraction from olivine phenocrysts and submarine glasses was made to assess contamination of post-eruption radiogenic nuclides. This test confirmed extraction of magmatic noble gases with minimal release of post-eruption radiogenic nuclides from the olivine samples; however, this was not always the case for the glass samples. The  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in the olivine phenocrysts range from a value similar to those of mid-ocean ridge basalts (MORB) to slightly elevated ratios up to 10.6 Ra. Although these ratios are not as high as those observed in other ocean island basalts, two Louisville seamount basalts exhibit a primordial Ne isotopic signature that can be clearly discriminated from MORB Ne. The He and Ne isotopic compositions of the Louisville seamount basalts can be explained by the mixing of less degassed mantle and depleted upper mantle with different He/Ne ratios. The presence of the less degassed mantle component in the source of the Louisville seamounts documents the deep origin of the mantle plume.

One of the major objectives of the IODP Expedition 330 was to test the geodynamic model that predicts lateral advection of mantle plumes in the convecting mantle [Koppers et al., G-cubed, 2004; Steinberger and Antretter, G-cubed, 2006]. This model assumes a primary mantle plume that is rooted deep in the mantle, and the trajectory of a plume conduit is influenced by the overall mantle flow, which can be monitored by the hotspot drift on the Earth's surface [Tarduno et al., Science, 2009]. The paleomagnetic and dating results from IODP Expedition 330 verified the geodynamic modeling predictions for the Louisville seamount chain together with the Hawaiian-Emperor seamount chain [Koppers et al., Nat. Geosci., 2012]. The present noble gas data gives a guarantee for the deep-rooted Louisville plume assumed in the geodynamic model.

キーワード: ルイビル海山, マントルプルーム, 深部マントル, 希ガス, 海洋掘削

Keywords: Louisville seamount, mantle plume, deep mantle, noble gases, IODP

「ふつうの海洋マントル」プロジェクトによって明らかになった海洋マントルの構造：序報  
Preliminary result of the oceanic mantle structure revealed by "Normal Oceanic Mantle Project"

一瀬 建日<sup>1\*</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>; 杉岡 裕子<sup>2</sup>; 伊藤 亜妃<sup>2</sup>; 竹尾 明子<sup>1</sup>; 歌田 久司<sup>1</sup>; 川勝 均<sup>1</sup>; 利根川 貴志<sup>2</sup>; 田中 聡<sup>2</sup>  
ISSE, Takehi<sup>1\*</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>; SUGIOKA, Hiroko<sup>2</sup>; ITO, Aki<sup>2</sup>; TAKEO, Akiko<sup>1</sup>; UTADA, Hisashi<sup>1</sup>; KAWAKATSU, Hitoshi<sup>1</sup>; TONEGAWA, Takashi<sup>2</sup>; TANAKA, Satoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The oceanic mantle is an important region to understand the Earth system, because more than 2/3 of the surface is covered by oceanic area. Since 1990s, we have operated several seafloor observations by using newly developed long-term broadband ocean bottom seismometers (BBOBSs) in the northwest and central part of the Pacific Ocean. These observations have revealed the structures in and around the subduction zone in the Pacific Ocean and in the Pacific superswells, respectively. However, we have no observation and result in the normal oceanic regions. To reveal the normal oceanic mantle structure from observational approach, we conduct a long-term observation called "Normal Oceanic Mantle Project" (NOMan project) from 2010, deploying ocean bottom geophysical (seismic and electromagnetic) instruments in the northwestern Pacific Ocean. We conduct two arrays in that region. One is northwest side of the Shatsky Rise (Area A) and the other is southeast side of the Shatsky Rise (Area B). Sea floor age of Area A is 125 - 135 Ma, that of Area B is 135 - 145 Ma, so that the shear wave structures of those area should be similar.

By using seismograms of the NOMan project, other BBOBS observations, and permanent broadband seismic stations on land, we have determined the three-dimensional shear wave velocity structure of the upper mantle in the northwestern Pacific Ocean to reveal this area to be really normal. We used a surface wave tomography technique in which multimode phase speed of the surface wave are measured and inverted for a 3-D shear wave velocity structure by incorporating the effects of finite frequency and ray bending.

Our obtained model shows that lateral heterogeneity of each area is not strong and that average structures are different in two areas. Area A is consistent with previous models, whereas Area B is faster than previous models. We think for the present that Area A seems to be normal oceanic mantle, though Area B is not. We will recover all BBOBSs in this year. These BBOBS's data enable us to obtain more reliable mantle structures.

キーワード: 上部マントル, 広帯域海底地震計, 表面波, トモグラフィー

Keywords: upper mantle, BBOBS, surface wave, tomography

広帯域海底地震探査による海洋リソスフェア/アセノスフェアシステムの地震波速度異方性構造推定  
Seismic anisotropy in the oceanic lithosphere/asthenosphere system estimated by the broadband ocean bottom seismology

竹尾 明子<sup>1\*</sup>; 一瀬 建日<sup>1</sup>; 西田 究<sup>1</sup>; 川勝 均<sup>1</sup>; 塩原 肇<sup>1</sup>; 杉岡 裕子<sup>2</sup>; 伊藤 亜妃<sup>2</sup>; 歌田 久司<sup>1</sup>  
TAKEO, Akiko<sup>1\*</sup>; ISSE, Takehi<sup>1</sup>; NISHIDA, Kiwamu<sup>1</sup>; KAWAKATSU, Hitoshi<sup>1</sup>; SHIOBARA, Hajime<sup>1</sup>; SUGIOKA, Hiroko<sup>2</sup>; ITO, Aki<sup>2</sup>; UTADA, Hisashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 海洋開発機構地球内部ダイナミクス領域  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>IFREE, JAMSTEC

The uppermost mantle structure beneath the oceanic basins is essential to discuss the oceanic lithosphere/asthenosphere system, the most simple and representative system of the theory of plate tectonics. Seismic anisotropy within the oceanic lithosphere and asthenosphere is especially important, as it reflects the flow and deformation in the uppermost mantle. Previous structural studies have been, however, limited in terms of the depth range: the top of lithosphere at depths of ~10-20 km by refraction surveys, and the structure deeper than ~30 km by surface-wave tomography studies. There has been no discussion from the top of the lithosphere continuously to the asthenosphere, which needs the broadband analysis of surface waves at periods of 3-100 s. In addition, there has been limited discussion about the intensity of seismic anisotropy because of the difficulty of estimating the absolute value of seismic anisotropy by surface-wave tomography studies.

We have developed a new multi-band method to analyze surface waves in broadband array records of ocean bottom seismometers for determining seismic anisotropy structure at depths of ~10-100 km quantitatively (Takeo et al 2013 JGR, submitted to GJI). The method uses the ambient noise cross-correlation method for analyzing surface waves at periods of 3-30 s and to determine structure at depths shallower than ~50 km, as well as the array analysis method of teleseismic waveforms at longer periods for determining deeper structures.

In previous studies, we have applied the multi-band method to records obtained in three oceanic regions: the Shikoku Basin region (Takeo et al. 2013 JGR), the southwestern region of the Shatsky Rise (Takeo et al. submitted to GJI) and the French Polynesia region (Takeo et al. 2012 SSJ Fall Meeting). In this study, we applied the same method to the records of broadband ocean bottom seismometers obtained by the normal oceanic mantle (NOMan) project at two oceanic regions (northwestern and southeastern regions of the Shatsky Rise) from 2010 to 2013. By combining the results for five oceanic regions with different seafloor ages between 20 and 155 Ma, we can discuss the seismic structure and its anisotropy in the oceanic lithosphere and asthenosphere, and the deformation of mantle related to plate motions.

The results for five oceanic regions can be summarized into five points: (i) the high-velocity lid and the low velocity zone corresponds to the oceanic lithosphere and asthenosphere, (ii) the transition from the lithosphere to the asthenosphere occurs at depths of 40-90 km, (iii) the average intensity of S-wave radial anisotropy is 3-6 % at depths of 10-150 km with the velocity of horizontally propagating and vertically polarized S-wave slower than the horizontally polarized S-wave, (iv) the intensity of S-wave azimuthal anisotropy at depths of 10-100 km is weaker than that of S-wave radial anisotropy and weakens with depths, and (v) the azimuth of maximum S-wave velocity is not perpendicular to ancient spreading axis in general. These results indicate complex deformation system in the present and ancient oceanic asthenosphere related to the presence of partial melting, the unusual fabric of olivine and so on. We will summarize these results and discussions, and will also present the potential of the broadband ocean bottom seismology to elucidate structure and deformation in the oceanic lithosphere/asthenosphere system and in other oceanic systems such as hotspots, mid-ocean ridges and subduction zones.

キーワード: 表面波, 地震波干渉法, 異方性, プレートテクトニクス  
Keywords: surface wave, ambient noise, anisotropy, plate tectonics



## 不均質な海洋リソスフェアを伝わる高周波数 Po/So 波の地域性と原因 Locality and cause of the characteristics of high-frequency Po/So wave propagating in heterogeneous oceanic lithosphere

古村 孝志<sup>1\*</sup>; ケネット ブライアン<sup>2</sup>  
FURUMURA, Takashi<sup>1\*</sup>; KENNETT, Brian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> オーストラリア国立大 地球科学研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup> Research Schoole of Earth Sciences, The Australian National University

### はじめに

海洋性リソスフェアを遠距離まで良好に伝わる高周波数の Po/So 波は、リソスフェアの厚さや不均質性に敏感であることから、海洋底の深部地下構造の推定への活用が期待できる。前研究 (古村・Kennett, 2013JpGU 大会; Kennett & Furumura, 2013, Gephys. J. Int.) では、北太平洋を伝播する Po/So の大震幅かつ長いコーダを持つ波群の成因を、海底地震観測データの解析と、地震波伝播の 2 次元差分法 (FDM) シミュレーションにもとづき評価した。そして、Po/So の成因として、海水層での P 波の多重散乱と、海洋リソスフェア内に発達した横長の短波長不均質構造 (ラミナ構造) における高周波数 ( $f > 2\text{-}5\text{Hz}$ ) 強い前方散乱・トラップ現象を明らかにした。同様の結論は、近年の Shito et al. (2013) による深発地震の解析と FDM シミュレーションからも示された。

本研究では、前研究に引き続き海洋リソスフェアの大きな不均質構造 (トランスフォーム断層、断裂対、プレート境界など) に伴う、Po/So 波の急激な減衰とそのメカニズムを評価し、Po/So 波を用いた海洋底構造探査の可能性について議論する。

### 海域地震観測データで見た、Po/So 波伝播の地域性

東大地震研半球データセンター (OHP DMC) が公開する北太平洋の海底地震観測データと、IRIS データセンター (IRIS DMC) が提供する陸海観測データから、太平洋全域の Po/So 波の伝播特性を調べた。日本に近い北太平洋の東側では、3000km 以上にわたって Po/So 波が良好に観測されるのに対し、東側 (北米大陸側) と南太平洋では Po/So 伝播が弱く、特に So 波の距離減衰が大きい。伝播の地域性は、プレートの年代と良く対応し、年代が若くリソスフェアが薄い海域ほど So の減衰が大きいことがわかった。たとえば、ハワイサンフランシスコ間の海底に設置された、Hawaii-2 観測点 (H2O) では、北米大陸西海岸からの伝播がきわめて弱いものに対して、ハワイ方向からの Po/So 波は明瞭であり、しかも伝播速度に + 数% の強い速度異方性も検出できた。

### 不均質なリソスフェアを伝わる Po/So 波の FDM シミュレーション

東太平洋海嶺から湧き出した海洋プレートは、北米西海岸のトランスフォーム断層を経て、海洋リソスフェアの厚さを増しながら北太平洋に東進しており、リソスフェアの水平不均質性が大きい。また、北太平洋東部には断裂帯が多数存在する。こうした、不均質なリソスフェア構造と So 波の伝播・特性を FDM シミュレーションから評価した。

シミュレーションモデルは、前研究 (Kennett & Furumura, 2013) と同様に、Serenio (1985) による速度構造モデル (4km 厚の海水層、厚さ 0.5km の堆積層 ( $V_s = 1.15\text{km/s}$ )、5km 厚の海洋地殻) をベースとし、海洋地殻、リソスフェア、アセノスフェアには von Karman 型の、速度 ( $V_p$ ,  $V_s$ ) 揺らぎを与えた。FDM 計算は、海洋研究開発機構の地球シミュレータを用いて行ない、周波数 10Hz までの地震動を評価した。

シミュレーションの結果から、So 波の伝播はリソスフェアの厚さに非常に敏感であり、年代が古くリソスフェアが厚い (100km) 北太平洋の東側のモデルでは、1500km 以上にわたって大震幅の So 波の波群が伝わるのに対して、年代が若くリソスフェアの薄い (~30km 程度) 海域では、高周波数地震動がアセノスフェアに流出し、わずか数百 km の伝播で Po 波と同程度にまで So 波が急減する。特に、海嶺で発生する地震では So 波がリソスフェア内で散乱により成長する前にアセノスフェアへの S 波エネルギーの流出が大きく、加えて、薄いリソスフェアの伝播途中で So 波の減衰が大きい。

同様の So 波減衰メカニズムは、短波長不均質構造 (ラミナ構造) が弱い (揺らぎが小さい) 場合や、内部減衰が大きい ( $Q_s$  が小さい) 場合でも確認され、So 波を用いた海洋低下の温度や Q 構造の推定への有効性が確認できた。いっぽう、断裂帯やトランスフォーム断層をイメージした、海洋プレート厚の急変や、薄い低速度・高減衰 (Low-V/Low-Q) 層の陥入による影響は小さく、Po/So 波伝播に与える影響が小さいことも確認できた。不均質リソスフェア内で強い散乱 (拡散) を起こして広がる Po/So 波のエネルギー分布に対して、小さなスケール (数~数十 km) の小さなスケールの速度・減衰異常は影響を与えないためである。ただし、断裂帯やトランスフォーム断層を斜めに通過する場合や、これに沿って伝わる場合についての影響は、今後 3 次元モデルを用いたシミュレーションによる評価が必要である。

## プチスポットの配列と海洋プレートの変形構造 Distribution of petit-spot volcanoes in relation to deformation and structures on a subducting plate

平野 直人<sup>1\*</sup>; 中西 正男<sup>2</sup>

HIRANO, Naoto<sup>1\*</sup>; NAKANISHI, Masao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 東北アジア研究センター, <sup>2</sup> 千葉大学 大学院理学研究科

<sup>1</sup>Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, <sup>2</sup>Graduate School of Science and Technology, Chiba University

Tiny submarine volcanoes, known as petit-spots, occur in regions of plate flexure prior to subduction and seamount-loading (Hirano *et al.*, 2006, 2013). The surface morphology and distribution of petit-spot monogenetic volcanoes are influenced by the stress field in the lithosphere. The magmas produced by the accumulation of melt originating from asthenosphere just below the site of plate-flexure, are able to rapidly ascend to the surface from the base of the lithosphere (Hirano *et al.*, 2006; 2011; Valentine & Hirano, 2011). As monogenetic petit-spot volcanoes are too small to be detected by satellite altimetry, their study requires a research vessel equipped for shipboard acoustic multibeam surveys. Although previously surveyed areas are limited to the regions off the Japan Trench, the eruption ages of petit-spot volcanoes in this region represent monogenetic eruptions over a period of >9 Myr over a large area, and the eruptions are related to the outer rise bathymetry. Such tiny volcanoes are ubiquitous in regions of plate flexure worldwide, and have been recently reported from the Tonga Trench (Hirano *et al.*, 2008), the Basin and Range province (Valentine & Hirano, 2010), south of Greenland (Uenzelmann-Neben *et al.*, 2012), the Chile Trench (Hirano *et al.*, 2013), an accretionary complex in Costa Rica (Buchs *et al.*, 2013), and submarine French Polynesia (Hirano *et al.*, submitted).

The spatial distribution of submarine petit-spot volcanoes remains poorly constrained because shipboard bathymetry has not covered the entire northwestern Pacific Plate. If petit-spot volcanoes occur only in regions of plate flexure, then tiny submarine volcanoes should appear homogeneously on the submarine surface of outer rises. However, areas devoid of volcanoes and lava have been found surrounding areas of petit-spot volcanoes (i.e., sites A?C in Hirano *et al.*, 2006), indicating that the local characteristics of the lithosphere, in addition to plate flexure, control the occurrence of petit-spot volcanoes. Here we report that the distribution of petit-spot volcanoes is controlled by the tectonic structure of the seafloor. We conducted submersible dives along the linearly distributed petit-spot knolls by JAMSTEC *Shinkai6500* in April 2014. Areas with tectonic fabrics appear on the subducting Pacific Plate off the Japan Trench, including a ridge-perpendicular fabric zone (RPPFZ), ridge-parallel abyssal hills (RPRAH), and subducting 'horst and graven' structures (HAGS) (Nakanishi *et al.*, 2011). At Site C, which is a trench-oceanward slope offshore from Soma City, Fukushima Prefecture, the trend of the Japan Trench changes from N?S in the north to NE?SW in the south, where two areas of trench-parallel HAGSs are intersecting in a complex manner (Nakanishi *et al.*, 2011). The distribution of young volcanic cones of more than 80 petit-spots, reported from Site C by Hirano *et al.* (2008), seems to be controlled by the fabrics of RPPFZ and RPRAH, the trends of which are continuous with the HAGS to the north and south along the trench-oceanward slope, respectively. Although the RPPFZ is not recognized as a fracture zone, its trend is sub-parallel to that of the neighboring Nosappu and Kashima fracture zones (Nakanishi, 1993). As the RPPFZ and RPRAH that control the petit-spot distribution are clearly original structures of the lithosphere (in contrast to HAGS), the occurrence of petit-spot eruptions is possibly related to lithospheric structures.

キーワード: プチスポット, アルカリ玄武岩, 太平洋プレート, アウターライズ, リソスフェア

Keywords: petit-spot, alkali-basalt, Pacific plate, outer rise, lithosphere

## 南インド洋の地磁気異常再考 Magnetic Anomalies in the Southern Indian Ocean Revisited

野木 義史<sup>1\*</sup>; 佐藤 太一<sup>2</sup>; 羽入 朋子<sup>3</sup>  
NOGI, Yoshifumi<sup>1\*</sup>; SATO, Taichi<sup>2</sup>; HANYU, Tomoko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 独立行政法人産業技術総合研究所, <sup>3</sup> 総合研究大学院大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3</sup>Graduate University for Advanced Studies

Magnetic anomalies in the Southern Indian Ocean are vital to understanding initial breakup process of Gondwana. However, seafloor age estimated from magnetic anomalies still remain less well-defined because of the sparse observations in this area. To understand the seafloor spreading history related to the initial breakup process of Gondwana, vector magnetic anomaly data as well as total intensity magnetic anomaly data obtained in the Enderby Basin, Southern Indian Ocean, are used. The strikes of magnetic structures are deduced from the vector magnetic anomalies.

Magnetic anomaly signals, most likely indicating Mesozoic magnetic anomaly sequence, are obtained almost parallel to WNW-ESE trending lineaments just to the south of Conrad Rise inferred from satellite gravity anomalies. Most of the strikes of magnetic structures indicate NNE-SSW trends, and are almost perpendicular to the WNW-ESE trending lineaments. Mesozoic sequence magnetic anomalies with mostly WNW-ESE strikes are also observed along the NNE-SSW trending lineaments between the south of the Conrad Rise and Gunnerus Ridge. Magnetic anomalies originated from Cretaceous normal polarity superchron are found in these profiles, although magnetic anomaly C34 has been identified just to the north of the Conrad Rise. However, Mesozoic sequence magnetic anomalies are only observed in the west side of the WNW-ESE trending lineaments just to the south of Conrad Rise and not detected to the east of Cretaceous normal superchron signals. These results show that counter part of Mesozoic sequence magnetic anomalies in the south of Conrad Rise would be found in the East Enderby Basin, off East Antarctica. NNE-SSW trending magnetic structures, which are similar to those obtained just to the south of Conrad Rise, are found off East Antarctica in the East Enderby Basin. However, some of the strikes show almost E-W orientations.

Moreover, the thickness of the crust increase just to the north of the Conrad Rise and clear magnetic anomaly signals considered to be magnetic anomaly C34 in this region may indicate continental-ocean boundaries while taking dredged continental origin rock samples at the Ob seamount into account. Therefore, magnetic anomaly C34 identified in the Indian Ocean must be reconsidered. These suggest complicated ridge reorganization occurred during initial breakup of Gondwana in the Indian Ocean.

キーワード: 地磁気異常, インド洋, ゴンドワナ, 大陸地殻

Keywords: magnetic anomaly, Indian Ocean, Gondwana, continental crust

## 地磁気三成分異常に基づくパラオ海盆の起源と西フィリピン海盆拡大モデルの改良 Origin of the Palau Basin and a revised spreading model of the West Philippine Basin deduced from three-component magnet

佐々木 智弘<sup>1</sup>; 山崎 俊嗣<sup>2\*</sup>; 石塚 治<sup>3</sup>

SASAKI, Tomohiro<sup>1</sup>; YAMAZAKI, Toshitsugu<sup>2\*</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 筑波大学大学院生命環境科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所地質情報研究部門

<sup>1</sup>University of Tsukuba, <sup>2</sup>AORI, University of Tokyo, <sup>3</sup>GSJ, AIST

The western part of the Philippine Sea (PHS) plate was occupied by the West Philippine Basin (WPB) in the north and the Palau Basin (PB) in the south. The WPB is generally considered to have opened from about 50 to 30 Ma, but the details are still unclear; in particular the origin and age of the PB was unknown. Studying the history of the WPB is important for understanding better the initiation and evolution of the IBM Arc. Here we discuss the spreading history of the WPB using new data on three-component magnetic anomaly and swath bathymetry acquired in the PB as well as those obtained previously by JAMSTEC fleets in the southern WPB. NS-trending magnetic boundaries and seafloor fabrics occur in the PB, indicating the formation by EW seafloor spreading. With a constraint from a <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of 40.4 Ma obtained from the northernmost part of the PB, we interpret that the observed magnetic anomalies correspond to polarity reversals from C16n1r to C18n/C18r (35.6 to 38/39 Ma). Previous models of WPB spreading incorporated a spreading-rate decrease around 40 Ma from about 4.4 to 1.8 cm/year. Our study in the southern WPB, however, suggests that the decrease is unnecessary for correlating observed three-component anomalies to the GPTS. A typical profile along 130E corresponds to C16r to C21 (36.3 to 45.3 Ma). The cessation age of the spreading in our interpretation, about 35 to 37 Ma, is older than the previous estimation (about 30 to 33 Ma). It was difficult to constrain rotation of the PHS plate from the magnetic anomaly skewness.

Keywords: Philippine Sea plate, West Philippine Basin, Palau Basin, magnetic anomaly, seafloor spreading



## 西フィリピン海盆内背弧海盆玄武岩組成とマントルダイナミクスとの関係 The composition of back-arc basin basalts in the West Philippine Basin and association with mantle dynamics

原口 悟<sup>1</sup>; 石井 輝秋<sup>2\*</sup>

HARAGUCHI, Satoru<sup>1</sup>; ISHII, Teruaki<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学工学部, <sup>2</sup> 深田地質研究所

<sup>1</sup>(Faculty of Engineering, University of Tokyo, <sup>2</sup>Fukada Geological Institute

フィリピン海プレートは数次に渡る背弧海盆拡大によって拡張してきたが、このうち 25~15Ma に拡大した四国海盆について、拡大時に背弧側より enrich したマントルが流入したことが九州パラオ海嶺、現伊豆弧両方の基盤岩組成から示された (Ishizuka et al., 2011, Haraguchi et al., 2012)。さらに、原口他 (2013 年合同大会、火山学会秋季大会) は DSDP Leg58, ODP Leg131 等の四国海盆内の掘削試料からマントル流入の進行を考察した。本研究では、四国海盆拡大に先行する西フィリピン海盆の背弧海盆玄武岩に検討対象を拡大し、基盤岩組成からマントルダイナミクスを考察したい。

西フィリピン海盆での国際海洋掘削計画 (Deep Sea Drilling Project: DSDP) による掘削は四国海盆と同じく第 31 節が最初で、その後第 59 節、統合海洋掘削計画 (Ocean Drilling Program: IODP) 第 195 節で掘削が行われた。また、拡大軸附近ではよこすか Y9611 航海でしんかい 6500 による潜航、かいいい KR9801 航海ではドレッジによる基盤岩採取が行われている (e.g. Fujioka et al., 1999)。本研究では、これらの採取試料のうち DSDP Leg58 Site446 および ODP Leg195 Site1201 で採取された基盤岩の全岩組成分析を新規に行い、先行研究による四国海盆基盤岩の分析値と比較する。

Site1201 は西フィリピン海盆東部、セントラルベーズンフォールトの北約 500km、九州パラオ海嶺の西約 50km の位置にあり、物理探査点 WP-1 の設置を主目的として掘削された。厚さ 500m 以上の堆積物に覆われているのが特徴である。基盤岩は九州パラオ海嶺に近いにもかかわらず島弧的な特徴が見られず、西フィリピン海盆の BABB である。SiO<sub>2</sub> 量が 49~53 wt% の範囲、MgO 量は 5~8 wt% の範囲で、四国海盆の Site442~444 の基盤岩に類似するが、TiO<sub>2</sub> 量は 0.9~1.0 wt% で、四国海盆基盤岩が 1.2~1.8 wt% なのに対して顕著に低い。アルカリ元素は Na<sub>2</sub>O が 1.6~2.8 wt%、K<sub>2</sub>O が 0.1~1.6 wt% で、四国海盆基盤岩と比べると K<sub>2</sub>O は類似するが Na<sub>2</sub>O は顕著に低い。微量元素は Cr が 320~420ppm と顕著に高く、未分化であることが伺えるのに対して、Sr, Y, Zr が低い。また、Zr/Y 比、Nb/Zr 比も低く、Ishizuka et al. (2011) および Haraguchi et al. (2012) による「四国海盆拡大前の deplete したマントル」の存在が示唆される。

Site446 は大東海嶺と沖大東海嶺の間の南大東海盆西部に位置している。堆積物の厚さは 360m で、基盤岩は掘削孔最下部の約 60m から採取された。音響調査から、この火山岩は基盤ではなく、堆積物中への貫入岩体と考えられる、この火山岩体は、アルカリ系列に属する他、TiO<sub>2</sub> 量が 4~5 wt% 以上と極めて高いのが特徴で、高い TiO<sub>2</sub> 量は西フィリピン海盆北部のウルダネタ海台のプレート内火山活動や、近傍の大東海嶺、沖大東海嶺 (Ishizuka et al., 2013) にも認められないものである。このため、40Ma 頃に西フィリピン海盆西部で活動したとされるマントルプルーム (Dechamps and Laremund 2002) とは異なる化学的特徴を持つプルームが複数回活動していた可能性がある。

これらの分析結果とフィリピン海プレート内他地域のデータを比較し、マグマ起源物質および 30Ma 以前のマントルダイナミクスを考察したい。

キーワード: 背弧海盆玄武岩, 液相濃集元素比, マグマ起源物質, マントルダイナミクス

Keywords: Backarc basin basalts, Incompatible element ratio, Parent material of magma, Mantle dynamics

## 海洋性島弧における地殻内マグマ長距離移動 Long-distance magma transport from oceanic island arc volcanoes

石塚 治<sup>1\*</sup>; 下司 信夫<sup>1</sup>; 川邊 禎久<sup>1</sup>; 荻津 達<sup>1</sup>; 辻野 匠<sup>1</sup>; 坂本 泉<sup>2</sup>; Taylor Rex<sup>3</sup>; 荒井 晃作<sup>1</sup>; 中野 俊<sup>1</sup>  
ISHIZUKA, Osamu<sup>1\*</sup>; GESHI, Nobuo<sup>1</sup>; KAWANABE, Yoshihisa<sup>1</sup>; OGITSU, Itaru<sup>1</sup>; TUZINO, Taqumi<sup>1</sup>; SAKAMOTO,  
Izumi<sup>2</sup>; TAYLOR, Rex<sup>3</sup>; ARAI, Kohsaku<sup>1</sup>; NAKANO, Shun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>産総研, <sup>2</sup>東海大学, <sup>3</sup>University of Southampton

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan/AIST, <sup>2</sup>Tokai University, <sup>3</sup>University of Southampton

Long-distance lateral magma transport away from volcanic centers is emerging as a common phenomenon where the regional stress regime is favorable. It should also be recognized as an important factor in the construction and growth of island arcs, and a potential trigger for devastating eruptions. In this contribution, we report on recent investigations into the magma dynamics of Izu-Oshima volcano: an active basaltic volcano with an extensive fissure system.

Geophysical observations in the Izu-Bonin intra-oceanic island arc indicate that magma periodically is moved away from the main basaltic composite volcanoes. When Miyakejima erupted in 2000, seismic activity migrated about 30km northwestward from the volcanic centre (Geshi et al., 2002). This event is interpreted to reflect magma injection and dike propagation at a depth range between 12 and 20km (Kodaira et al., 2002). Long-distance lateral magma transport has also been identified at the Nishiyama volcano on Hachijojima Island using petrological, geochemical and structural studies of satellite vents (Ishizuka et al., 2008). Nishiyama has provided evidence for two types of magma transport: Primitive magma moving laterally for >20km in the middle to lower crust (10-20km deep) and short distance transport (<5km) from shallow, differentiated magma reservoirs. Of these the long-distance transport seems to be controlled by a regional extensional stress regime, while short distance transport may be controlled by the local stress regime resulting from the load of the main volcanic edifice.

Izu-Oshima is flanked by numerous, subparallel NW-SE trending submarine ridges extending up to 22 km to the NW and SE from the center of the volcano. During a recent diving survey we have identified that these ridges are fissures which erupted basaltic spatter and lava flows. Furthermore, lavas are petrographically similar along each ridge, while there are noticeable differences between ridges. The subparallel ridges are observed to transect a series of knolls, the Izu-Tobu monogenetic volcanoes (ITMV), which are dispersed across this area of the rear-arc. However, there is a consistent petrographic difference between these seamounts and the ridges.

We have found similar, and in some cases a matching, geochemistry between the submarine ridges and subaerial ridges of eruptions found ascending the flanks of Izu-Oshima. This implies that the subaerial ridges and submarine ridges together represent the track of a magma transport episode away from the storage system beneath the central volcano.

ITMV and the transecting ridges are found to have quite distinct geochemical characteristics, indicative of different magma sources. Yet, they are essentially found interspersed in outcrop. The most appropriate scenario for their development is one where ITMV are fed by an "in-situ" underlying source, while the NW-SE ridges are fed by lateral magma transport from Izu-Oshima. Unlike Nishiyama volcano, Izu-Oshima does not show a compositional variation along the length of the ridges, and has no evidence of primitive magmas. Hence, the magma transport is likely to be derived from a crustal chamber where crystal fractionation and plagioclase accumulation has taken place.

## 南海トラフにおける海底地殻変動観測—東北地方太平洋沖地震後の経過報告— Seafloor geodetic observation along the Nankai Trough - Progress report after the 2011 Tohoku-oki earthquake -

佐藤 まりこ<sup>1\*</sup>; 渡邊 俊一<sup>1</sup>; 横田 裕輔<sup>1</sup>; 氏原 直人<sup>1</sup>; 石川 直史<sup>2</sup>; 望月 将志<sup>3</sup>; 浅田 昭<sup>3</sup>  
SATO, Mariko<sup>1\*</sup>; WATANABE, Shun-ichi<sup>1</sup>; YOKOTA, Yusuke<sup>1</sup>; UJIHARA, Naoto<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tadashi<sup>2</sup>; MOCHIZUKI,  
Masashi<sup>3</sup>; ASADA, Akira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>2</sup> 海上保安大学校, <sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所  
<sup>1</sup>Hydrogr. and Oceanogr. Dept. of Japan, <sup>2</sup>Japan Coast Guard Academy, <sup>3</sup>IIS, Univ. of Tokyo

海上保安庁海洋情報部では、東大生産技術研究所の技術協力の下、主に日本海溝及び南海トラフ沿いの海域において、GPS / 音響結合方式による海底地殻変動観測を行っている。これまでに、海洋プレートの沈み込みに伴う地殻変動や地震に伴う地殻変動を検出し、学会等で報告してきた。

南海トラフにおいては、2002～2004年に、御前崎沖から室戸岬沖にかけての海域に6点の海底基準点を設置し、測量船による繰り返し観測を行ってきた。その結果、2011年3月の東北地方太平洋沖地震前までの観測から、各海底基準点の移動速度として西北西方向に2～5cm/年の速度が得られ、場所による速度の違いが示唆されていた。

さらに、同地震後には、南海トラフで発生する地震の震源域全域をカバーするため、四国沖を中心に海底基準点を9点増設し、地震後の地殻変動の検出を目指して観測を継続している。既設6点を含む全15点で移動速度が得られれば、プレート間の固着状況の空間変化が検出できると期待される。

海底基準点の増設から約2年が経過し、多くの海底基準点でフィリピン海プレートの沈み込みによると考えられる西向き及び北向きの地殻変動が捉えられはじめている。また、場所による移動速度の違いも見えてきている。

本講演では、南海トラフで実施している海底地殻変動観測について、東北地方太平洋沖地震後の経過報告を行う。

キーワード: 海底地殻変動観測, 海底測地, 南海トラフ

Keywords: Seafloor geodetic observation, Seafloor geodesy, Nankai Trough

## 2011年東北地方太平洋沖地震後の海底地殻変動 Postseismic seafloor movements following the 2011 Tohoku-oki earthquake detected by GPS/acoustic positioning

渡邊 俊一<sup>1\*</sup>; 佐藤 まりこ<sup>1</sup>; 横田 裕輔<sup>1</sup>; 氏原 直人<sup>1</sup>; 石川 直史<sup>2</sup>; 望月 将志<sup>3</sup>; 浅田 昭<sup>3</sup>  
WATANABE, Shun-ichi<sup>1\*</sup>; SATO, Mariko<sup>1</sup>; YOKOTA, Yusuke<sup>1</sup>; UJIHARA, Naoto<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tadashi<sup>2</sup>; MOCHIZUKI,  
Masashi<sup>3</sup>; ASADA, Akira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>2</sup> 海上保安大学校, <sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所

<sup>1</sup>Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, <sup>2</sup>Japan Coast Guard Academy, <sup>3</sup>Institute of Industrial Science, University of Tokyo

海上保安庁では、GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を実施し、繰り返し観測を実施してきた。東北地方太平洋沖地震の発生後には、その余効変動を把握するため、定期的に観測を実施している。2014年1月までには、各海底基準点で9-15回の観測を実施した。

各海底基準点は東北地震前に設置したものを使用している。Sato et al. (2011)は、地震の前後の観測から、震央付近に位置するMYGI及びその北北東約70 kmに位置するKAMS海底基準点がそれぞれ24 m, 23 m 東南東に移動していたことを示し、震央付近の領域下で大きなすべりが発生したことを明らかにした。また、震源域南部のCHOS及びFUKUでは1-5 m程度と、比較的小さな変動であったことも示している。

地震後の繰り返し観測の結果、CHOS及びFUKUについては、余効すべりに伴う、時間とともに減衰する東南東向きの変動が捉えられた。これは、陸域の観測結果(Ozawa et al., 2012)と整合的である。一方、MYGI及びKAMSは、ほぼ一定速度で西北西方向に移動している。これは、余効すべりに伴う変動とは全く異なる。また、MYGIの西方約50 kmに位置するMYGWでは南向きの変動が検出されたが、この方向は、プレートの収束方向とほぼ直交している。上下方向の変動については、CHOS以外の観測点で沈降していることが観測された。

このように、海底の測地観測からは、非常に複雑な地殻変動分布が検出されている。本発表では、得られた最新の観測成果について報告する。

キーワード: 海底地殻変動観測, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: seafloor geodetic observation, the 2011 Tohoku Earthquake



## 受託研究「海底地殻変動観測の高度化」における東北大学の研究成果 A summary of the achievement in the project for advanced GPS/acoustic survey

木戸 元之<sup>1\*</sup>; 藤本 博己<sup>1</sup>; 日野 亮太<sup>1</sup>; 太田 雄策<sup>2</sup>; 長田 幸仁<sup>1</sup>; 飯沼 卓史<sup>1</sup>; 東 龍介<sup>1</sup>; 和田 育子<sup>1</sup>; 鈴木 秀市<sup>2</sup>; 富田 史章<sup>3</sup>; 今野 美冴<sup>3</sup>

KIDO, Motoyuki<sup>1\*</sup>; FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>; HINO, Ryota<sup>1</sup>; OHTA, Yusaku<sup>2</sup>; OSADA, Yukihiro<sup>1</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>1</sup>; AZUMA, Ryosuke<sup>1</sup>; WADA, Ikuko<sup>1</sup>; SUZUKI, Syuichi<sup>2</sup>; TOMITA, Fumiaki<sup>3</sup>; IMANO, Misae<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 東北大学 地震噴火予知研究観測センター, <sup>3</sup> 東北大学 理学研究科

<sup>1</sup>IRIDeS, Tohoku Univ., <sup>2</sup>RCPEV, Tohoku Univ., <sup>3</sup>Sci., Tohoku Univ.

GPS/acoustic survey is known as a most probable way to measure the crustal deformation of seafloor far from the coasts, where dense GPS network is not available. We, Tohoku University, together with Nagoya University and Japan Coast Guard dedicated in GPS/acoustic survey for more than decade. MEXT has been strongly promotes our activities though financially support as governmental project. We summarize individual topics in the project.

For the moored buoy, collaborating with JAMSTEC and JAXA, we have started long-term continuous and realtime seafloor geodetic survey at Kumano-nada. At the early stage of the project, we employed a small buoy, which can be also used as towing survey, at off-Miyagi site. Because the size of battery is limited, sea-trials was lasting only for two days. However, using this platform, we developed an automatic ranging system and simple on-demand operation technique via UHF communication. In 2012, we have started developing a automatic ranging system in a realistic working condition using a time-proven platform, m-TRITON buoy, operated by JAMSTEC. Together with JAMSTEC and JAXA, satellite communication part and GPS positioning part have been shared for multi-purpose. Tohoku University group concentrate acoustic ranging part and onsite data processing to compute precise traveltimes. Using a limited onsite resource in the buoy, we have eliminated unnecessary and redundant procedure and data as possible. The first sea-trial took place in 2013 for four months and the ongoing second trial has started in 2014 for six months. In the second trial, acoustic ranging data has been successfully transmitted to onshore station every week and we can monitor it from our laboratory.

For the Autonomous Surface Vehicle (ASV) system, we aimed to develop an automatic survey system, which can also be used simultaneous measurements from other platform, such as a research vessel, for improve the ranging accuracy with multi-acoustic-paths. In our system, vehicle is like an unmanned boat (2.4m long and 400kg in weight), whose propulsion system is driven by electric power from onboard diesel generator lasting for a week. As the ASV system demonstrates sufficient performance for our use in GPS/acoustic survey, it can be a candidate of multi surface platform for simultaneous ranging to achieve high accuracy GPS/acoustic measurement taking the spatial sound speed variation into account.

After the Tohoku-Oki earthquake in 2011, the project has an extra mission that significantly enhance the survey framework, especially in deep seafloor (>5000m) near the trench axis. In this extra mission, we have developed a new type of seafloor transponder that works at over 5000m depth and its acoustic communication range is greater than 15km. We made 86 transponders in total and constructed 20 new GPS/acoustic station along the Japan Trench in 2012. In addition, we chartered a research ship for about 50 days per year to construct and observe the new stations. At present we have carried out four times of campaign surveys during 2012-2013. At these new stations, we conducted both moving and stationary surveys, the former generally took several hours and the latter 12 hours for each station. We found a problem in acoustic property in the new transponders, which can be corrected with post-processing shown in Azuma et al. (2014, JpGU). Campaign surveys ranges only about one year, but we have observed post-seismic movement at selected stations. These results are reported in Tomita et al. (2014, JpGU). The new transponders are hybrid type so that Japan Coast Guard has started to make measurements with their own system at several stations above.

This work has been supported by MEXT project for advanced GPS/acoustic survey. Staffs in RCPEV and IRIDeS, Tohoku University gave dedicated support and collaborative operation in the onboard and GPS surveys. The construction and surveys in the new stations were collaboration with Nagoya University.

キーワード: 海底地殻変動観測, 係留ブイ, 自航式ブイ, 日本海溝

Keywords: GPS/acoustic, moored buoy, autonomous surface vehicle, Japan trench

## 海底地殻変動観測による東北地方太平洋沖地震の余効変動検出 Detection of post-seismic movement after Tohoku-oki Earthquake using GPS/Acoustic technique

富田 史章<sup>1\*</sup>; 木戸 元之<sup>2</sup>; 長田 幸仁<sup>2</sup>; 東 龍介<sup>2</sup>; 藤本 博己<sup>2</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 飯沼 卓史<sup>2</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 和田 育子<sup>2</sup>  
TOMITA, Fumiaki<sup>1\*</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>2</sup>; OSADA, Yukihito<sup>2</sup>; AZUMA, Ryosuke<sup>2</sup>; FUJIMOTO, Hiromi<sup>2</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>2</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; WADA, Ikuko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測 (GPS/A 観測) は、陸上の測地観測では得られない海底の変動を直接測定することのできる測位技術である。GPS/A 観測により、2011 年東北地方太平洋沖地震時に海溝近くでの巨大な地震時変位を直接捉える (Kido et al., 2011; Sato et al., 2011) など、陸上から 150km 以上離れた海溝近傍の測位に成功している。

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、我々は地震後の余効変動を捉えるため、日本海溝沿いに新たに 20 点の海底地殻変動観測点を設置した。既設の観測点を含めると合計 23 点となる。我々はこれらの観測点において、地震後 4 回のキャンペーン観測 (2012/9, 2012/11, 2013/8, 2013/10) を実施した。

我々の観測では、各観測点を構成する 3~6 台の個々の海底局位置を求めるための移動観測と、求めた海底局間の相対位置を固定し、その海底局アレイ中心位置を推定し最終的な変位を得るための中心定点観測との 2 通りを行っている。しかしながら、以下に述べる 2 つの問題により、精密な測位結果を求めることが困難となっていた。

1 つ目は、相互相関波形の乱れである。GPS/A 観測における音響測距解析では、送信信号と受信信号の相互相関をとり、その最大ピークの時刻を往復走時として読み取っている。しかし、相互相関波形が 0.3 - 0.5ms 程度の間隔で複数のピークを持ち、それぞれのピークの振幅が海上局と海底局の位置関係に応じて変化している様子が見られた。我々は、複数ピークからショット毎に最前のピークを検出するアルゴリズムを開発し、走時の読み取り誤差を改善した。この問題の詳細と対処法に関しては、東・他 (2014, JpGU) で報告する。

2 つ目は、音響送受波器と GPS アンテナの相対位置の推定精度である。今回の観測では、舷側にポールを設置し、その先に音響送受波器を取り付けていたが、GPS アンテナとの相対位置の事前計測が困難であり、初期値として仮定した暫定位置関係に 1m 程度のオフセットが発生していた。音響送受波器の水平方向のオフセットの影響は、アレイ解析結果に船のヘディングに応じて系統的に表れるため、この性質を利用し、水平方向に関しては 5cm 程度の精度でオフセットを補正することができた。鉛直方向のオフセットは音速の補正に含まれるため、アレイの水平位置の推定への影響は小さいと考えられる。しかしながら、現在のオフセット推定精度では信頼性の高い測位結果を得るには不十分なため、より高精度なオフセット推定を行う方法を検討する必要がある。

本予稿執筆時点では、4 回のキャンペーン観測の内、取得データ量の多い 2012/9 と 2013/7 のデータのアレイ中心位置精密解析を行っているが、上記の補正処理を行うことで、10 観測点での暫定的な変位を得ることに成功している。その結果はおおよそ、宮城沖では陸向き、三陸沖では海溝向きの挙動を示した。本発表では、解析手法の概要を説明するとともに、未処理の 2012/11 と 2013/10 の観測データも含め測位解析を進め、余効変動の最新の推定結果について報告する。

キーワード: 海底測地, 東北地方太平洋沖地震, 日本海溝, 余効変動

Keywords: seafloor geodesy, Tohoku-oki Earthquake, Japan Trench, post-seismic movement

## 海底測地観測を用いた巨大地震発生域の固着回復過程の解明 Understanding recoupling process using a seafloor geodesy in megathrust earthquake zone

長田 幸仁<sup>1\*</sup>; 伊藤 喜宏<sup>2</sup>; 木戸 元之<sup>1</sup>; 日野 亮太<sup>1</sup>; 飯沼 卓史<sup>1</sup>  
OSADA, Yukihito<sup>1\*</sup>; ITO, Yoshihiro<sup>2</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>; HINO, Ryota<sup>1</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 京都大学 防災研究所

<sup>1</sup>IRiDes, Tohoku University, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University

東北日本沖の日本海溝は太平洋プレートの沈み込みにより大きな被害をもたらすプレート境界型地震が発生する場所として知られている。2011年東北地方太平洋沖地震では、海溝軸に近づくにつれ急激に大きくなる地震時変位が海底測地観測により捉えられている (Kido et al., 2011; Sato et al., 2011)。このことから巨大地震発生メカニズムを理解する上で海溝近傍での地殻変動観測の重要性が示唆される。

2013年5月10?23日の日程で実施されたKR13-09航海において、2011年東北地方太平洋沖地震の浅部滑り域の直上に地殻歪み速度を調べる目的で海溝陸側斜面、海溝軸、海側斜面の3カ所にそれぞれ1台の海底間音響測距装置を設置し、4ヶ月にわたり機器間の距離の時間変化をモニタリングした。この観測で技術的に困難な点は、1つは海溝軸を挟むように設置するためには、基線長3 km以上で計測することである。従来の海底間音響測距装置は、基線長1 kmを想定したものであったが、基線長を伸ばすため音響信号の受信感度を向上させる改良を施した。改良した装置を用いた試験観測をKR13-04航海で実施し、基線長3.5 kmで音響測距ができることを確認している。もう一つは海底付近の温度深度勾配により音波の波線が下方に曲がるために音源を4~4.5mほど立ち上げると同時に、基線間に音波を遮る地形が存在しないことを確認することが重要である。さらに音源を立ち上げることで増大した底層流の抵抗を回避して長期安定した設置状態を確保する事である。そこで立ち上げ脚の下部とアンカーの間にユニバーサルジョイントを設け装置が自由に傾くことができるようにすることにより、底層流の抵抗が設置部分に不安定をもたらすトルクを与えないように配慮した。また音波の波線を確認するため、投げ入れ設置した3台中1台をかいこう7000により0.5km程度移動させ再設置した。装置の回収は、KH-13-05 (白鳳丸) 航海にて行い、3台とも回収に成功した。

今回回収した装置により、3つの基線のうち海溝軸陸側斜面-海側斜面間 (基線長約7 km) と海溝軸-海側斜面 (基線長約3.6km) で約4ヶ月間のデータを取得できたことが確認された。しかし陸側斜面-海溝軸は、音響波線が地形により遮断される場所に落下してしまったことが投入直後の位置決めで確認されていたが、回収後確認した実データでも測距が成立していない結果が確認された。今後得られた2基線のデータを解析し、日本海溝近傍の地殻変動を考察する予定である。

キーワード: 海底地殻変動, 日本海溝

Keywords: seafloor crustal movement, Japan Trench

## 高潮流域下におけるリアルタイム津波・地殻変動観測ブイシステムの海域試験 Sea trial of tsunami and crustal movement observation buoy system in real-time under environment with high speed sea cur

高橋 成実<sup>1\*</sup>; 石原 靖久<sup>1</sup>; 福田 達也<sup>1</sup>; 越智 寛<sup>1</sup>; 田原 淳一郎<sup>1</sup>; 森 尚仁<sup>1</sup>; 木戸 元之<sup>2</sup>; 太田 雄策<sup>2</sup>; 日野 亮太<sup>2</sup>; 武藤 勝彦<sup>2</sup>; 橋本 剛正<sup>3</sup>; 本橋 修<sup>3</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>

TAKAHASHI, Narumi<sup>1\*</sup>; ISHIHARA, Yasuhisa<sup>1</sup>; FUKUDA, Tatsuya<sup>1</sup>; OCHI, Hiroshi<sup>1</sup>; TAHARA, Jun'ichiro<sup>1</sup>; MORI, Takahito<sup>1</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>2</sup>; OHTA, Yusaku<sup>2</sup>; HINO, Ryota<sup>2</sup>; MUTOH, Katsuhiko<sup>2</sup>; HASHIMOTO, Gosei<sup>3</sup>; MOTOHASHI, Osamu<sup>3</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Japan Agency for for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

(独) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC), 東北大学, (独) 宇宙研究開発機構 (JAXA) は共同で津波と地殻変動をリアルタイム観測するためのブイシステムの開発を 2011 年から進めている。南海トラフから南西諸島海域など地震発生域海溝軸付近を念頭に巨大地震発生に伴う津波と地殻変動をリアルタイムでかつ必要な時にデータを収集できるオンデマンドのシステムを目指している。このシステムは、水圧計と音響伝送装置をインストールした海底局、地殻変動観測用の海底トランスポンダーアレイ、位置データや海底から音響伝送されるデータの収集と衛星通信をつかさどるブイから構成される。津波の観測は海底下の水圧計とブイ上の Precise Point Positioning (PPP)、地殻変動は海底トランスポンダーアレイと水圧計、ブイ上の 4 つのアンテナの GPS データを用いて観測する。しかし、日本周辺の地震発生帯は黒潮など高潮流域下にある。このような環境で観測するためには、DART など採用されている緊張係留ではなくスラック係留を採用することが必要である。しかし、スラック係留を採用すると、音響通信の手法やブイの仕様、低消費電力を実現するための工夫等、様々な技術開発が必要になる。昨年度は試作機を製作し、熊野灘沖の海溝軸陸側域において、約 3 か月の海域試験を実施した。その結果、5.3 ノットもの強潮流域下でもブイが走錨せず、定常的な観測が可能であることを確認した。一方で、音響通信や衛星通信、ブイ上のロガー、漁具等に対するブイシステムの耐久性などに課題があることも明らかになった。これらの課題に取り組み、現在、半年の海域試験を実施中である。観測期間を 3 か月から半年に延長するため、電源は多く積む必要があるが、それに応じてスラック比、アンカー重量などを再設計して熊野灘沖に再び設置した。また、今回は海底局の水圧計ロガーに津波モードを実装した。JAMSTEC の地震津波・観測監視システムの水圧計データをもとに、津波検知のシステムを検討、海底局の水圧計ロガーに導入した。長時間平均と短時間平均の比でトリガーをかけるシステムであるが、これまで大潮時にも誤作動することなく、観測を継続中である。本講演では、現在のブイシステムの改訂内容を示し、取得されつつある水圧データを示し、このシステム開発の現状と課題、今後の開発方針を紹介する。



## 海底局マルチ測距による海底地殻変動観測の効率化に向けた検討 Study for improving efficiency in seafloor geodetic observation by means of multi acoustic ranging

横田 裕輔<sup>1\*</sup>; 佐藤 まりこ<sup>1</sup>; 渡邊 俊一<sup>1</sup>; 石川 直史<sup>2</sup>  
YOKOTA, Yusuke<sup>1\*</sup>; SATO, Mariko<sup>1</sup>; WATANABE, Shun-ichi<sup>1</sup>; ISHIKAWA, Tadashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>2</sup> 海上保安大学校

<sup>1</sup>Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, <sup>2</sup>Japan Coast Guard Academy

海上保安庁海洋情報部では、東京大学生産技術研究所の技術協力のもと、2000年からGPS／音響結合方式による海底地殻変動観測を行っている。本観測は、「キネマティックGPS (KGPS) 測位」と「音響測距観測」を組み合わせるもので、測量船を使用して通常1観測点あたりおよそ1日かかる観測を年間2～4回実施し、センチメートルの精度で海底基準点の移動量を求めている。これまでに、2005年宮城県沖の地震(M7.2)の地震発生からひずみの蓄積開始に至るまでの一連の海底の動き、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う海底での地殻変動などを捉えることに成功している。

本観測は、東北地方太平洋沖地震の発生を受け、海溝型大規模地震への防災という観点から、より広範囲に密な観測が行われることが期待されている。今後、観測網の大規模化、観測の高頻度化を進めるにあたって、観測時間の短縮が求められる。そこで海上保安庁海洋情報部では、海底局に対して約10秒間隔で1局ずつ音響測距を行っている現在の手法から、複数の海底局に対してまとめて音響測距を行う手法に改め、観測時間を短縮することを検討しており、今後導入する予定である。本発表では、新しい手法と、その結果、海底地殻変動観測の効率化がどの程度可能となるかについて検討し、報告する。

キーワード: 海底地殻変動観測, 音響測距

Keywords: seafloor geodetic observation, acoustic ranging

東北日本の熱流量異常を説明する熱モデル：海溝軸に向かって厚くなる透水層内で起こる熱水循環による熱の汲み上げ  
Hydrothermal heat mining due to the aquifer thickening toward the trench axis: A model for the Japan Trench

川田 佳史<sup>1\*</sup>; 山野 誠<sup>1</sup>; 島 伸和<sup>2</sup>  
KAWADA, Yoshifumi<sup>1\*</sup>; YAMANO, Makoto<sup>1</sup>; SEAMA, Nobukazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>ERI, Univ of Tokyo, <sup>2</sup>Kobe University

**観測：**日本海溝には、年代 135 Myr の太平洋プレートが速度約 8 cm/yr で沈み込む。このような古い年代のプレート上の熱流量は、中央海嶺で形成された海洋プレートが海底面から冷やされる熱伝導過程を考えた場合、50m W/m<sup>2</sup> 程度と予想される (Stein and Stein, 1992)。これに対して、これまでに観測された熱流量値は 50-120 mW/m<sup>2</sup>、平均値は 70 mW/m<sup>2</sup> である (Yamano et al., 2008)。この日本海溝では、プレート最上部数 km に高  $V_p/V_s$  の層が観測されている (Fujie et al., 2013)。この層は、海溝の 150 km 海側から海溝にかけて徐々に厚くなっている。熱流量に異常が生じる範囲と、地震波速度に異常が生じる範囲は同程度であり、何らかの関連があることが推察される。

**仮説：**海洋プレートを構成する玄武岩の浸透率が、最上部数 100 m で熱水循環を引き起こす程度に高いことが知られており、この層は透水層と呼ばれている。我々は、Fujie et al. (2013) が観測した高  $V_p/V_s$  の層の厚化は、高浸透率の層が厚くなった結果であると考えた。この考えの元、透水層が時間と共に厚くなる系での熱対流モデルを作り、どのような熱流量異常が生じるかを計算した。

**結果：**日本海溝に対する典型的なパラメータを用いて計算を行った。その結果、透水層の厚化とともに熱流量が増加することが分かった。すなわち、Yamano et al. (2008) が観測した高熱流量異常 20 mW/m<sup>2</sup> を説明することができる。この熱流量異常の原因は、時間とともに厚くなる透水層の下からの熱の汲み上げである。深くなるほどプレート温度が高いこと、熱対流が起こる透水層はほぼ等温に置かれることを念頭に置くと、透水層が下方に厚くなることは等温の部分が高温の領域に浸食していくことを意味する。厚くなりつつある透水層は、下方から次々にやってくる熱を強制的に上側に放出することで等温の状態を保つ。このことで、透水層の上側にある堆積層は熱を受け取って温度が上がり、したがって熱流量もまた上がる。

キーワード: 熱水循環, 熱流量, 日本海溝, 地震発生帯  
Keywords: hydrothermal circulation, heat flow, the Japan Trench, seismogenic zone

## インド洋ロドリゲス三重会合点かいいいフィールド熱水域における地震波速度構造と地震活動調査 Seismic structure and seismicity survey at the Kairei hydrothermal vent field in the Indian Ocean

佐藤 利典<sup>1\*</sup>; 高田 裕能<sup>1</sup>; 今井 裕輝<sup>2</sup>; 野口 ゆい<sup>1</sup>; 河野 昭博<sup>1</sup>; 山田 知朗<sup>3</sup>; 篠原 雅尚<sup>3</sup>  
SATO, Toshinori<sup>1\*</sup>; TAKATA, Hiroyoshi<sup>1</sup>; IMAI, Yuki<sup>2</sup>; NOGUCHI, Yui<sup>1</sup>; KOUNO, Akihiro<sup>1</sup>; YAMADA, Tomoaki<sup>3</sup>; SHINOHARA, Masanao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 千葉大学理学部, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba Univ., <sup>2</sup>Dep. Science, Chiba Univ., <sup>3</sup>ERI, Univ. Tokyo

### 1. Introduction

In the first segment of the central Indian Ridge from the Rodriguez triple junction, the Kairei hydrothermal vent field exists and extrudes hydrothermal fluid with richer hydrogen content compared to other hydrothermal vents in the world. Around the Kairei hydrothermal field, serpentinized peridotite and troctolites, and gabbroic rocks were discovered. These deep-seated rocks exposed around the Kairei field may cause the enrichment of H<sub>2</sub> in the Kairei fluids. At the Kairei field, a hydrogen-based subsurface microbial ecosystem and various hydrothermal vent macrofauna were found. In the TAIGA Project (Trans-crustal Advection and In situ reaction of Global sub-seafloor Aquifer), this area is a representative field of TAIGA of hydrogen. To investigate how the deep-seated rocks (originally situated at several kilometers below seafloor) are uplifted and exposed onto seafloor, and the hydrothermal fluids circulate in subsurface, we conducted a seismic refraction/reflection survey and seismicity observation with ocean bottom seismometers (OBSs).

### 2. Observation

We conducted a seismic survey around the Kairei hydrothermal field from January 27 to March 19 in 2013 using S/V Yokosuka of Jamstec. We used 21 OBSs, an air gun (GI gun) and a single channel streamer cable. Deployed intervals of OBSs are about 7.5 km, and 2 km near the Kairei field. Survey lines are 5 lines NNW-SSE direction parallel to the ridge axis, 5 lines E-W direction, and 5 lines NNE-SSW direction. Line lengths are from 7 km to 30 km. In addition, we conducted other 5 lines pass around the point just above the Kairei hydrothermal field and the Yokoniwa Rise. The air gun was a GI gun with 355 cu. in. (5.5 l), and the shot interval was 40 s (about 100 m).

### 3. Results

From seismicity observation, we found many micro earthquakes in this area. A swarm of micro earthquakes exists at a location about 1 km northwest of the Kairei field. The swarm has a NNW-SSE strike, parallel to the ridge axis. The depth of the swarm is very shallow (~4 km from seafloor). This swarm may be related to the hydrothermal activities of the Kairei field. At the first segment of the central Indian Ridge, many micro earthquakes occurred. The depth of these events is deeper than that of the swarm near the Kairei field.

### Acknowledgements

We thank the captain and the crew of S/V Yokosuka of Jamstec for their support. This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (Grant Number 20109002, TAIGA project).

キーワード: 海底下の大河, 熱水地域, 地震活動, インド洋三重会合点

Keywords: TAIGA, hydrothermal area, seismicity, Triple junction in the Indian Ocean

## ホウ素同位体比を用いた沖縄トラフ海底熱水中のホウ素の起源の解明 Origin of boron in Okinawa Trough hydrothermal fluids using B isotope as a tracer

土岐 知弘<sup>1\*</sup>; 蝦名 直也<sup>1</sup>; 新城 竜一<sup>1</sup>; 石橋 純一郎<sup>2</sup>  
TOKI, Tomohiro<sup>1\*</sup>; EBINA, Naoya<sup>1</sup>; SHINJO, Ryuichi<sup>1</sup>; ISHIBASHI, Jun-ichiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学, <sup>2</sup> 九州大学

<sup>1</sup>University of the Ryukyus, <sup>2</sup>Kyushu University

沖縄トラフは、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込んでいる琉球弧における背弧海盆であり、複数の海底熱水系が見ついている。海底熱水系の周辺には、海底熱水鉱床が分布していると考えられており、有用な金属も多く含まれている。このような海底熱水鉱床の形成メカニズムや濃集過程を知るためにも、海底熱水循環の経路やその周辺の地質に関する情報、さらにはそれらの温度環境を把握することは大変重要である。沖縄トラフには、ユーラシア大陸から大量の陸源性堆積物が供給されており、海底熱水中の化学組成においても海底堆積物の影響が見られると考えられている。堆積物由来の化学物質としては、メタンやアンモニアの他にホウ素 (B) も挙げられる。B には二つの安定同位体が存在するが、堆積物中には <sup>10</sup>B が選択的に取り込まれることや、<sup>11</sup>B の方が液相に対して高い溶解性を示すことなどが知られている。本研究では、沖縄トラフに見ついている複数の海底熱水系から採取した海底熱水中のホウ素同位体比を調べ、海底熱水が反応した海底下における固相のホウ素同位体比及び反応温度に関する情報を導き出すことを目的としている。

海底熱水試料は、WHATS 採水器を搭載した Hyper Dolphin やしんかい 6500 を用いて、伊平屋北海丘、伊是名海穴 (JADE サイト及び HAKUREI サイト)、鳩間海丘、第四与那国海丘から採取した。試料は、船上においてメッシュサイズ 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いてろ過し、HNO<sub>3</sub> を添加して持ち帰った。測定に先だって、5 mL のコニカルバイアル瓶を用いてホウ素を単離し、50 ppb のホウ素が含まれている溶液 0.5~1 mL とした。測定は、Thermo Fisher SCIENTIFIC 社製のマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置 Neptune plus を用いて行い、標準試料 NBS SRM 951 (<sup>11</sup>B/<sup>10</sup>B = 4.0056 ± 0.5) を用いて規格化した。分析精度は ± 0.3% 以内である。

沖縄トラフ海底熱水中には、堆積物のない中央海嶺における海底熱水系と比べると、ホウ素濃度が高く、<sup>10</sup>B に富んでいた。また、フィールド間においても違いが見られ、第四与那国海丘で最も <sup>10</sup>B に富んでおり、伊是名海穴における JADE 及び HAKUREI サイトがこれに続く値を取り、伊平屋北海丘及び鳩間海丘における海底熱水中のホウ素同位体比 ( $\delta^{11}\text{B}$ ) が最も <sup>10</sup>B に乏しかった。海底熱水中の  $\delta^{11}\text{B}$  と、これまで報告されているメタンの炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ ) とは極めて強い相関を示した。このことから、 $\delta^{11}\text{B}$  の変動要因は、 $\delta^{13}\text{C-CH}_4$  と同様の変動要因である可能性が示唆された。 $\delta^{13}\text{C-CH}_4$  の変動要因は、海底堆積物中の有機物が熱分解して生成するメタンと、微生物が生成するメタンの混合比率であると考えられている。このことから、 $\delta^{11}\text{B}$  も高温で堆積物と反応したか、低温で堆積物と反応したかを表している可能性が示唆された。

You et al. (2001) において、水熱実験から示された固相と液相の同位体分別と反応温度との関係を用いて、反応温度を見積もった。固相の  $\delta^{11}\text{B}$  としては、沖縄トラフの海底表層で採取された海底堆積物の  $\delta^{11}\text{B}$  (- 5.4 及び - 2.2 ‰) を用いて行った。その結果、解の得られない海底熱水系があることが示された。そこで、堆積物からの B の溶出についての下限温度と考えられる 50 °C から、熱水が海底下において臨界点を達する 400 °C までの間で解を持ちうる固相の  $\delta^{11}\text{B}$  を見積もると、- 20~- 10 ‰といった範囲の  $\delta^{11}\text{B}$  を持つ固相と反応すれば解を持ちうることを示された。このことから、反応した固相の  $\delta^{11}\text{B}$  は、沖縄トラフの表層堆積物よりも <sup>10</sup>B に富んだ物質であることが明らかとなった。海底堆積物は熱水変質を受けると、ホウ素同位体比が <sup>10</sup>B に富むことが示されている。このことから、沖縄トラフ海底熱水中の B の起源は、表層堆積物よりも熱水変質が進んだ海底堆積物である可能性が示された。また、反応温度としては、伊平屋北海丘が最も低く、鳩間海丘、伊是名海穴 (JADE 及び HAKUREI サイト)、第四与那国海丘における海底熱水系がこれに続く。このことから、伊平屋北海丘及び鳩間海丘の涵養域には大量の堆積物があり、これらから低温で溶出したホウ素が熱水中に供給されていると考えられる。一方、第四与那国海丘における海底熱水系の場合は、涵養域のみならず、反応域にまで堆積物の分布が達しているために、高温で堆積物から溶出したホウ素が熱水中に供給されていることが示唆された。

キーワード: 海底熱水, 沖縄トラフ, ホウ素同位体比

Keywords: hydrothermal fluid, Okinawa Trough, boron isotope



## 薩摩硫黄島における浅海域熱水由来の鉄とシリカに富むマウンドの構造解析 The structure of iron- and silica-rich mounds at hydrothermal environment in shallow marine, Satsuma Iwo-Jima

倉富隆<sup>1\*</sup>; 清川昌一<sup>1</sup>; 池原実<sup>2</sup>; 後藤秀作<sup>3</sup>; 星野辰彦<sup>4</sup>; 池上郁彦<sup>1</sup>; 蓑和雄人<sup>1</sup>  
KURATOMI, Takashi<sup>1\*</sup>; KIYOKAWA, Shoichi<sup>1</sup>; IKEHARA, Minoru<sup>2</sup>; GOTO, Shusaku<sup>3</sup>; HOSHINO, Tatsuhiko<sup>4</sup>; IKEGAMI, Fumihiko<sup>1</sup>; MINOWA, Yuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学, <sup>2</sup>高知大学海洋コア総合研究センター, <sup>3</sup>産業技術総合研究所, <sup>4</sup>海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Kyushu University, <sup>2</sup>Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, <sup>3</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>4</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

薩摩硫黄島は九州より南へ約 38 km に存在する鬼界カルデラの北西端に位置する火山島であり、流紋岩質の硫黄岳と玄武岩質の稲村岳の 2 つの後カルデラ火山が存在している。島の周囲の海水は熱水と海水の混合によって褐色または白色を呈している。島内南西部に位置する長浜湾の海底下からは熱水 (pH = 5.5, 55-60 °C, Si: 51.74 ppm, Fe: 191.00 ppm) が湧出しており (四ヶ浦・田崎, 2001), 鉄とシリカに富むマウンドが成長している。また、長浜湾内の堆積物は 1 年間で約 33 cm と非常に速い速度で堆積している (Ninomiya and Kiyokawa, 2009, Kiyokawa et al., 2012)。本研究において、我々は X 線 CT スキャン, FE-SEM, 薄片による構造観察と EDS, XRF, XRD, そして DNA の分析によって興味深い知見が見出した。サンプルはマウンドから直接採取した 20-30 cm の塊を用いた。当サンプルは肉眼によって表面を覆っている黒色で硬い層と泥質で褐色の柔らかい層に分類した。比較のために遠心分離器によって海水から採取した浮遊物粒子の観察および分析も行った。

X 線 CT スキャン観察から、黒色の層は高密度層、褐色の層は低密度層と定義した。マウンド内部は 3~4 cm 程度の凸状構造の集合体で形成されており、各低密度層は高密度層の殻によって覆われていた。低密度層内部は直径約 1 mm の多量の空洞が複雑に通っている。薄片の鏡下観察から、各層ともにフィラメント状の構造を持ち、その向きは互いに直交していた。また、低密度層から高密度層に向かうに従ってフィラメント状構造に付着する褐色粒子 (約 20 μm) の数が増加していた。FE-SEM 観察から、高密度層のフィラメント状構造は直径約 1~2 μm の粒子が連結した桿菌状の構造をなしていた。一方、低密度層は紐状の構造が多量に観察でき、その表面には直径約 0.5 μm 未満の粒子が付着していた。この紐状の構造は螺旋状、リボン状、ツイスト状の 3 タイプに分類した。長浜湾を褐色にしている浮遊物粒子も同様に観察すると、直径 0.5 μm 未満の微小粒子の凝集物であり、マウンドの主となる形成物である紐状の形態は確認されなかった。XRD, XRF の分析結果は、高密度層 (Si: 26.8 %, Fe: 56.0 %) はフェリハイドライトとオパール A で構成されており、また低密度層 (Si: 36.5 %, Fe: 43.5 %) はフェリハイドライト、オパール A, 石英, クリソバライト, トリディマイトで構成されていた。DNA 分析の結果は、ゼータプロテオバクテリア綱に属する鉄酸化菌として知られる *Mariprofundus ferrooxydans* が卓越した生物環境であることを示した。

長浜湾におけるマウンドの形成過程における初期形態としての低密度層が無機と生物的反応によって形成される。低密度層形成時にはシリカ鉱物として硫黄岳起源の火山灰が混入している。低密度層内部で観察された紐状の構造は好中性の鉄酸化菌が形成したストークであると考えられる。このような鉄酸化菌は熱水と海水が混合する酸化還元境界部を好んで生息すると言われている (Chan et al., 2011)。外部の高密度層の殻はこれらの生物活動によって形成された可能性がある。高密度層の殻の内側では無機、生物的反応が継続することで低密度層より相対的に高い鉄含有率を持つ高密度層が形成される。

低密度層と高密度層が形成されるプロセスが複数回繰り返されることで内部に熱水の通り道である空洞を持った凸状の集合体が形成される。当地域におけるマウンドの高い成長速度はおそらく鉄酸化菌の活動の影響を大きく受けている。

キーワード: 熱水, 水酸化鉄, 鉄酸化バクテリア, 浅海域

Keywords: hydrothermal activity, iron-hydroxide, iron-oxidizing bacteria, shallow marine

## リアルタイム津波・地殻変動観測ブイシステムを用いた海底地殻変動観測 GPS/acoustic measurement using a multi-purpose moored buoy system

今野 美冴<sup>1\*</sup>; 木戸 元之<sup>2</sup>; 太田 雄策<sup>1</sup>; 福田 達也<sup>3</sup>; 越智 寛<sup>3</sup>; 高橋 成実<sup>3</sup>

IMANO, Misae<sup>1\*</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>2</sup>; OHTA, Yusaku<sup>1</sup>; FUKUDA, Tatsuya<sup>3</sup>; OCHI, Hiroshi<sup>3</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> (独) 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup> IRiDeS, Tohoku University, <sup>3</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

現在、南海トラフの震源域直上における地殻変動のモニタリングと津波の早期検出へ向けて、JAMSTEC・JAXA・東北大学による、係留ブイを用いたリアルタイム津波・地殻変動連続観測システムの開発および試験観測が行われている。これは、海底に設置した圧力計で津波と鉛直地殻変動を、精密単独測位により海面高および係留ブイの位置をそれぞれモニターし、さらにブイ-海底局間の音響測距と合わせた GPS / 音響結合方式で水平地殻変動を検出するというものである。得られるデータは衛星通信を用いて陸上基地局へ送信されるため、リアルタイムで連続的に津波・地殻変動を観測することが可能となる。2013年には初回の試験観測が熊野灘で実施され、システムの改良後、2014年に2度目の試験観測を実施中である。本発表では、このうち GPS / 音響結合方式の音響測距に特有の問題について取り上げ、2013年の観測時に得られた音響測距データの解析から今後の音響測距部分のシステムの改良内容を提案し、2014年の観測で取得されつつあるデータについても報告する。

音響測距に使用される音響波形をそのまま陸上に伝送することは、容量の面で現実的ではなく、ブイ上で処理された結果のみを送ることが要求される。ブイ上の低消費電力機器で必要な処理を行うため、(1) 収録波形から必要最小限の部分を切り出し、波形処理後に (2) 必要最小限の情報のみを陸上に伝送する必要がある。(1) に関して現行システムでは、音響測距で得られた受信波形を、ブイの暫定位置と各海底局位置から算出した理論走時の  $\pm 20\text{ms}$  の測距信号切り出し窓によって切り出す。その後、精密な観測往復走時を得るため切り出した受信波と送信波の相互相関波形を計算する。音響ノイズの状況によっては、必ずしも最大相関位置が正しい走時であるとは限らないので、最大相関ピークを中心とした  $1\text{ms}$  の窓幅で切り出し、相関波形そのものを陸へ送信する (2)。相関波形は  $8\text{bit} \cdot 100\text{kHz}$  であるので、1 波形あたり  $101\text{byte}$  の容量となる。

理論走時推定精度に影響を及ぼす GPS の NMEA 出力で得られる暫定位置精度および平均海中音速の不確定性についてその振れ幅を勘案した結果、(1) の切り出し幅  $\pm 20\text{ms}$  は必要最低限であり、すべての測距について確実に切り出すためには、 $\pm 30\text{ms}$  程度が望ましいことがわかった。一方、陸上に送信する相関波形については、相関ピークの包絡線は  $1\text{ms}$  に収まっており、 $1\text{ms}$  の切り出し幅は妥当であると考えられる。しかし、海面反射などにより、見かけの相関ピークが現れることが確認されており、その場合、切り出し幅の調整だけでは対応できず、別途正しい相関ピークを検出するアルゴリズムの開発が必要である。海面反射が発生する条件に付いて実データにもとづく検証を行い、音波の入射角とトランスデューサの指向性で説明できることが判明し、現在この仮説に基づく、相関ピーク自動検出アルゴリズムを検討している。

キーワード: 海底地殻変動, 係留ブイ

Keywords: crustal deformation, moored buoy

## 陸域および海域の地殻変動速度を用いた南海トラフ沿いのすべり欠損速度のインバージョン解析 Inversion analysis for slip deficit rate along the Nankai Trough using on- and offshore crustal velocities

渡部 豪<sup>1\*</sup>; 田所 敬一<sup>1</sup>; 安田 健二<sup>1</sup>; 藤井 越百<sup>1</sup>; 生田 領野<sup>2</sup>; 奥田 隆<sup>1</sup>; 久野 正博<sup>3</sup>  
WATANABE, Tsuyoshi<sup>1\*</sup>; TADOKORO, Keiichi<sup>1</sup>; YASUDA, Kenji<sup>1</sup>; FUJII, Cosumo<sup>1</sup>; IKUTA, Ryoya<sup>2</sup>; OKUDA, Takashi<sup>1</sup>; KUNO, Masahiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 静岡大学理学部, <sup>3</sup> 三重県水産研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Department of Geosciences, Shizuoka University, <sup>3</sup>Mie Prefecture Fisheries Research Institute

南海トラフでは、プレート境界型巨大地震が 100-150 年の繰り返し周期を持って発生していることがよく知られている。最近では、GEONET 等により、精密かつ詳細な地殻変動が捉えられるようになったが、依然として海域で起こる地殻変動に関しては、それらの検知能力やすべりの解像度は低いままである。このような背景のもと、2000 年頃より実用化に向けて開発が進められてきた、GPS と音響測距技術を組み合わせた海底地殻変動観測が、現在では、海域で起こる地殻変動の推定に対して、有効かつ必要不可欠なツールとして認識されるようになる。

本研究では、2004 年から 2012 年に行われた海底地殻変動観測結果を示すとともに、それらの地殻変動速度と陸域の GEONET の地殻変動速度を用いて、先験情報付きのインバージョン解析より、南海トラフ沿いのすべり欠損速度の推定を行った。この結果、四国沖合では、50 mm/yr を超えるすべり欠損速度の大きい領域が存在し、これらは、紀伊半島沖合で、およそ 30-50 mm/yr に減少することが示された。さらに、伊勢湾以東から駿河湾にかけての領域では、およそ 10-30 mm/yr になることが明らかとなった。ただし、駿河湾内部にすべり欠損速度が ~40 mm/yr となる領域も存在した。続いて、南海トラフ沿いの海底観測点が将来的に増設されることが明らかであるので、それらの位置情報を用いて、すべりの解像度について調べた。海域観測点の増加に伴い、全体的に海域のすべりの解像度が向上することが示された。しかし、それでも、足摺岬沖合、室戸岬沖合、紀伊半島沖合の海溝付近の解像度は依然として低いままで、地震間の歪蓄積状況のさらなる把握には海溝付近の観測が必要であると言える。

キーワード: GPS/音響, 南海トラフ, 地殻変動, すべり欠損速度, すべりの解像度

Keywords: GPS/Acoustic, Nankai Trough, crustal deformation, slip deficit rate, slip resolution



## 海底地殻変動データ解析の高精度化・自動化に向けた測距信号走時読み取り手法の検討 Development and examination of new methods for traveltime detection in GPS/A geodetic data to high-precise and automatic

東 龍介<sup>1\*</sup>; 富田 史章<sup>2</sup>; 飯沼 卓史<sup>1</sup>; 日野 亮太<sup>1</sup>; 木戸 元之<sup>1</sup>; 藤本 博己<sup>1</sup>; 長田 幸仁<sup>1</sup>; 太田 雄策<sup>3</sup>; 和田 育子<sup>1</sup>  
AZUMA, Ryosuke<sup>1\*</sup>; TOMITA, Fumiaki<sup>2</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>1</sup>; HINO, Ryota<sup>1</sup>; KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>; FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>; OSADA, Yukihito<sup>1</sup>; OHTA, Yusaku<sup>3</sup>; WADA, Ikuko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 東北大学地震・噴火予知研究観測センター  
<sup>1</sup>IRDeS, Tohoku Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Science, Tohoku Univ., <sup>3</sup>RCPEVE, Tohoku Univ.

近年培われてきた GPS - 音響結合方式による海底地殻変動観測技術の向上の恩恵もあり、我々は 2011 年東北地方太平洋沖地震のメカニズムの真相解明に大きく近づいている。しかしながら、現状では陸上 GPS 観測に比べ精度が 2 桁ほど劣るために、より高精度な変位の検出に向けた様々な誤差要因の洗い出しが必要である。本研究では、その一つとして測距信号の走時読み取りに関する問題に注目した。

従来の海底地殻変動解析手法では、船上局から送信する音響測距信号と海底局からの返信信号との相関が最大となる時刻を観測走時として読み取り、これをもとに海底局位置の推定およびアレイ重心位置の推定を行ってきた。ところが、船体-海底局の位置関係(斜め距離、波線の入射角)に応じてマルチパスの現れ方が変化するために後続波の相関係数の方が最大となる場合もあり、処理後に視認で再読み取りしてデータの品質向上をはかっていた。東北沖地震後に日本海溝周辺に増設した観測網の膨大なデータを一括処理するには、こうした低効率な方法では限界があり、別のコンセプトによって高精度かつ機械的な処理アルゴリズムを構築する必要がある。我々の研究グループでは、従来の相関波形解析手法をもとに次の 2 つのコンセプトに沿ってそれぞれ新しい手法の開発・検討を進めてきた。

1) 相関係数が最大となる走時を読み取り、理論波形によりデコンボリュートする。そののち、残った相関波形に対し同様の処理を行う。この処理をピーク値が任意の閾値を下回るまで繰り返し、全イタレーションで得た走時のうち最短の走時を観測走時とする。

2) ショット毎に得られる相関波形同士の相関を元にクラスター分析を行い、分類された各クラスター内からモデル波形を選出する。モデル波形から相関係数の最大となる走時、および手動検出で与える真の走時との差を見積り、それを補正量としてクラスター内の波形に適用することで観測走時を得る。

また、構造探査で用いる解析ツールを利用して相関波形の読み違いの有無を視覚的に容易に確認できるようにした。上記 2 つの自動処理手法を導入することで、従来法にみられる数百マイクロ秒程度の読み違いを回避できることを確認できた。この走時差は斜め距離にして約 0.3 m にもおよぶことから、海底局位置の精密推定精度の向上が期待できる。一方で、どちらの手法においても相関係数に対する閾値の設定に任意性があり、最適なパラメータ設定をどのように行うかが今後の課題となる。

キーワード: 海底地殻変動観測

Keywords: ocean bottom geodetic observation

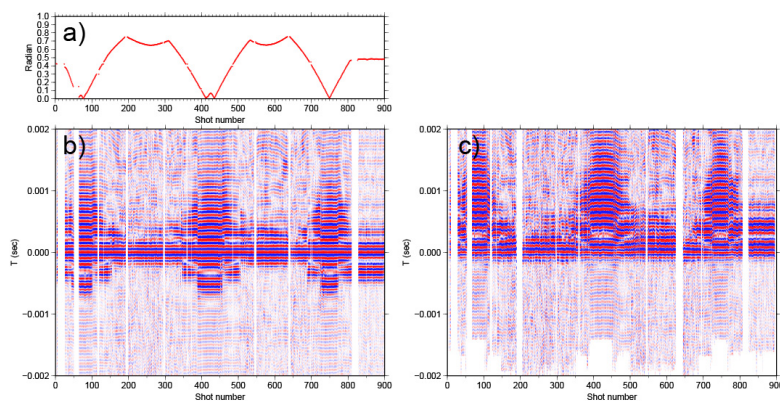


Fig. Incident angle of transmitted signals (a). Pasted correlation waveforms analyzed by reading maximum peak (b) and reading iteratively-deconvolved peak (c). Each trace was moved out by the observed traveltime.



## 長期海底ラドン濃度連続計測のための NaI ガンマ線分光装置の開発 A NaI spectrometer for long-term radon measurement at the sea floor

蜷川 清隆<sup>1\*</sup>; 豊田 新<sup>1</sup>; 藤原 泰誠<sup>1</sup>; 中川 益生<sup>1</sup>; 山本 勲<sup>1</sup>; 熊谷 英憲<sup>2</sup>; 木下 正高<sup>2</sup>; 久保 信<sup>3</sup>  
NINAGAWA, Kiyotaka<sup>1\*</sup>; TOYODA, Shin<sup>1</sup>; FUJIWARA, Taisei<sup>1</sup>; NAKAGAWA, Masuo<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Isao<sup>1</sup>; KUMAGAI, Hidenori<sup>2</sup>; KINOSHITA, Masataka<sup>2</sup>; KUBO, Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 岡山理科大学理学部応用物理学科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構, <sup>3</sup> クリアパルス株式会社

<sup>1</sup>Okayama University of Science, <sup>2</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>3</sup>CLEAR-PULSE

日本列島においては数十年以内に東海・東南海・南海における巨大地震が予想されており、人命及び社会的基盤の被害軽減のためにも、海溝型地震の機構と地震発生帯において起きている物理的・化学的プロセスを理解することは極めて重要な科学的課題である。1995年の兵庫県南部地震において、地震の前に空气中及び地下水中ラドン濃度が増加したという観測結果を踏まえ、この研究では、予想される東南海地震の震源域である熊野灘沖海底において、ガンマ線計測によって連続的に水中のラドン濃度の測定を行い、微小地震との相関を調べて、地殻の変動に対する地殻内の流体の応答についての基礎的な研究に資することを目的としている。

これまでの海底ガンマ線計測は潜水船でその場所に赴き、到着時点の線量を測定するのみであった。しかし、地震との相関を調べるために、ガンマ線の時間的変動を調査することを目的とする。このために、平成24年度から、電池駆動式でデータを自動的に内部に記録できる海底設置型 NaI ガンマ線分光装置の検討を重ね、設計し、この1月にほぼ完成した。2月に予備測定をおこない、ソフト、ハード面の改良をおこなって、4月から9月にわたる期間、熊野灘沖の海底の湧水域に設置し、ガンマ線の時間変動を約4.6カ月間以上計測する計画である。

長期海底ラドン濃度連続計測のための NaI ガンマ線分光装置の仕様は以下のようにした。

名称 深海用低消費電力型  $\gamma$  線記録装置

PMT 用高圧電源 +1000V MAX プログラムで電圧を制御できる

増幅器 電荷増幅器、記憶容量 1Gbit (NOR Flash)

通信 RS-232C 921,600bps、消費電流 on 110mA, off 10mA

動作 初期設定を PC との通信で行った後通信を切断し、電源電圧が低下するまで自動的にスペクトル、温度、電源電圧データを収集し保存する。電力削減のために間欠運転モードを備えている。電源電圧が低下あるいは記憶装置容量の限界に達した場合は自動的に測定を停止し電源を切断する。データ収集後 PC と接続し保存したデータを読み出せる。

電源 単三アルカリ電池 30本 6段 9V

キーワード: ラドン, 海底, 長期連続計測, NaI

Keywords: Radon, sea floor, long-term measurement, NaI

## 複数ブイを用いた海底地殻変動観測のためのMEMS-gyroのタイムスタンプ実験 Time stamp experiment of MEMS-gyro for the observation of seafloor crustal deformation using multi-buoy system

向山 遼<sup>1\*</sup>; 生田 領野<sup>1</sup>; 田所 敬一<sup>2</sup>; 永井 悟<sup>2</sup>; 渡部 豪<sup>2</sup>

MUKAIYAMA, Haruka<sup>1\*</sup>; IKUTA, Ryoya<sup>1</sup>; TADOKORO, Keiichi<sup>2</sup>; NAGAI, Satoru<sup>2</sup>; WATANABE, Tsuyoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学理学研究科, <sup>2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科地震火山センター

<sup>1</sup> Graduate school of science, Shizuoka University, <sup>2</sup> Earthquake research center, Graduate school of environmental study, Nagoya University

現在、名古屋大学と静岡大学の研究グループはGPS/音響方式の海底地殻変動観測のさらなる精度向上のため、複数のブイによる新たな観測手法の開発を行っている。この手法では、現行の観測で船が担っている役割を全て係留したブイに任せている。ブイの位置をGPSで決定し、ブイの底部にあるトランスデューサから音波を海底局に向かって送り、音波が海底局から戻ってくるまでの往復走時を計測する。往復走時の半分の片道走時に海中の音速を掛けて、海底局までの距離を推定している。2012年11月に静岡県駿河湾で初めて複数ブイの観測を行った。観測結果を解析すると、走時残差のばらつきが約0.2msと大きくなった(向山ほか2013JPGU)。近似計算から、この誤差は波に揺られて変化するブイの姿勢を測定していなかったため生じたものだと考えられる。そこで、2013年11月の駿河湾で行われた複数ブイの観測では、ブイの姿勢を測定するMEMS-gyroの導入を行った。使用したMEMS-gyroはCrossbow社のNAV-440CAである。海底地殻変動観測における姿勢測定には、いつその姿勢だったのかという時刻の情報が重要である。MEMS-gyroの時刻情報は付属しているGPSから得ているものであるが、その精度がどの程度正確なのかは不明である。そこで、GPSアンテナとMEMS-gyroを同じ回転台の上に乗せて回転運動させ、GPSアンテナの座標から計算した中心角とMEMS-gyroで測定された中心角の相互相関をとり、GPSの時刻とMEMS-gyroの時刻の差を求める実験を行った。具体的には1時間間隔で回転台を手動で3分間回転させる実験を3セット行った。この結果、GPSの時刻よりもMEMS-gyroの時刻の方が速いことが分かった。3セットのうち初めの2回はGPSとMEMS-gyroの時刻の差が約38msと安定していたが、最後の3セット目では、58msと初めの2回よりも時刻の差が大きくなった。また、GPSアンテナとMEMS-gyroの角度の差を求めると、初めの2回は90度と安定していたが、最後のセットでは85度と異なる値となった。前2回と最後のセットとの違いは、回転台を動かした速度である。回転運動の速度が大きくなるとMEMS-gyroがうまく反応できない可能性があることが分かった。回転速度が大きくなった時に時刻の差に違いが生じた原因を探るため、①MEMS-gyroの角速度のカットオフ周波数と重力補正のための角速度閾値を変化させた時に、GPSとMEMS-gyroの時刻の差がどう変化するか、②回転運動の速度を制御した時にどの程度の速度でGPSとMEMS-gyroの時刻の差に違いが生じるのかの2点について追実験を行ったのでその結果も報告する。

キーワード: 海底地殻変動観測, ブイ, GPS, MEMS-gyro, タイムスタンプ, 回転実験

Keywords: Seafloor crustal deformation, buoy, GPS, MEMS-gyro, Time stamp, Rotation experiment

## DONET データを用いた海洋重力波の 3 年にわたる観測 Three year observations of ocean infragravity waves by broadband seismometers and pressure gauges of Japanese seafloor n

東野 陽子<sup>1\*</sup>; 西田 究<sup>2</sup>; 深尾 良夫<sup>1</sup>; 藤 亜希子<sup>1</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>  
TONO, Yoko<sup>1\*</sup>; NISHIDA, Kiwamu<sup>2</sup>; FUKAO, Yoshio<sup>1</sup>; TO, Akiko<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI

海洋重力波 (IG 波) は、数分の周期と 10 数 km の波長を持つ長周期の波である。本研究では、南海トラフに設置されている DONET のデータのうち、広帯域地震計上下動記録と圧力計記録を用いて、IG 波の検出を試みた。アレー解析の一つであるスラントスタックの手法を用いて 1 日ごとの卓越する IG 波を検出し、3 年間の変化を見た。IG 波のシグナルは海底変動と圧力変動が非常に良く一致しており、伝播速度は観測点の設置している海底の深さ 2000m で予測される理論速度に一致している。シグナルの強さは方位によって大きく異なる。台風のような嵐のような天候の日を除くと、IG 波は東南方向から伝播してくる波、つまり、南海トラフの東南側の深い海を伝播し、トラフを横切る波が最も卓越する。最大振幅をもつ IG 波の到来方向は日によって南南東と東南東に別れる。南南東の到来方向を持つ波は東南東から伝播してくる波に比べ、より深い海を伝播するため長周期成分が卓越している。IG 波の振幅は季節変化を示し、冬に高く夏に低い値をとる。台風の影響を見ると、台風の進路方向から入って来る波と、その波が海岸線で反射し海岸線と南海トラフを通る北東?東北東方向から来る波が生じているのが分かる。このような場合、北東?東北東方向からくる波の方が強い振幅を示すことが多く見られた。

キーワード: 海洋重力波, 南海トラフ, DONET  
Keywords: Infragravity wave, Nankai Trough, DONET

## AUV 観測による海底地形データを用いた船観測による海底地形変動推定の空間分解能・誤差評価 Evaluation of resolution and estimation error of vessel-based seafloor displacement observation using AUV bathymetry

富士原 敏也<sup>1\*</sup>; 正木 裕香<sup>1</sup>; 山本 富士夫<sup>1</sup>  
FUJIWARA, Toshiya<sup>1\*</sup>; MASAKI, Yuka<sup>1</sup>; YAMAMOTO, Fujio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

調査船によるマルチナロービーム音響測深の海底地形調査は、あらゆる海底調査の基本情報として行われており、近年では地球科学的に重要な海域には既存データが存在する機会が多い。それゆえに、海底火山噴火、海底地すべりや海溝型巨大地震が起こった後に海底地形調査が行われ、以前の地形との差を調べることで、海底地形のダイナミックな変動が報告されるようになった [e.g. Fujiwara et al., Science 2011]。これらの研究において、地形変動解値の不確かさを確認しておくことは重要であるが、しかし、それは必ずしもよくわかっていない。なぜなら、空間分解能、測深精度に制限のある海底地形データ同士を比較するためである。船（海面）からの計測では、水深（海底と測深機との距離）が音響測深の空間分解能と精度を決める大きな要因であり、水深に応じて空間分解能と測深精度が低下する。自律型無人探査機（AUV）による海底地形調査では、AUV が海底に近づいて計測することにより、高空間分解能、高測深精度の地形データが得られる。そこで本研究では、船と AUV 調査が行われている沖繩トラフ伊平屋北海丘海域の海底地形データを用いて、船観測による海底地形変動推定に関する空間分解能・誤差評価を行った。

AUV「うらしま」による海底地形調査は、2007年5月の「よこすか」YK07-07 航海で行われた [山本ほか, 海洋調査技術学会・第21回研究成果発表会 2009]。マルチナロービーム音響測深機は SEABAT 7125 である。調査船「よこすか」による調査は、2006年7月18日から24日にかけて YK06-09 航海で行われ、音響測深機 SeaBeam 2112 により計測した [Masaki et al., JAMSTEC R&D 2011]。「よこすか」は調査域を各々の一定速度で6回通過して海底地形データを取得した。本研究では各測線をそれぞれ1回の調査データとして用いる。ビーム方角（鉛直線と音波ビームの成す角）は調査域内で40°以内である。

「うらしま」計測による海底地形を見ると、調査域の地形は西側が山地（最浅約870m）、東側は盆地（最深約1070m）になっており、水深の平均・中央値は1010mである。山腹付近に直径約30m、比高約10-20mの熱水チムニーマウンド群が確認でき、その形状と詳細な分布が明らかになった。水深が増すと音波ビームが海底面に投影された範囲（フットプリント）が大きくなり、測深値はフットプリント内の地形に影響され平滑化されるため、大きなフットプリントでは海底地形の空間分解能が低下する。水深1000mでの「よこすか」の計測では、35×35m~43×55mのフットプリントの大きさになる。船の海底地形データでは、フットプリント以下の規模の地形、例えば熱水チムニーマウンド群の存在は捉えることができない。また地形の形状は測深点分布と測深値のばらつきに影響されており、各測線の調査で少しずつ差がある。「うらしま」データを「真」の地形と見立てて「うらしま」と「よこすか」の測深差を調べると、測深差は平均値の周りに正規分布に近いばらつきを示し、その標準偏差は2.67-3.08mであった。したがって、「よこすか」データの測深精度は水深の約0.2-0.3%とみなせる。

AUV 海底地形データを用いて船の海底地形データを模造し、よって測深値の確度の場所による違いがない、測深点に位置誤差がない条件で、変動“前後”の比較による海底地形変動の推定試験を行った。船計測のフットプリントを考慮して平滑化した「うらしま」地形を、「よこすか」調査の測深点位置で抽出した。その抽出値に正規分布 ( $\sigma=3$  m) に従う乱数を足し合わせ、変動“前”海底地形データを作成した。次に「うらしま」データの緯度・経度位置を一様に動かして、水平地形変動を模擬する。その「うらしま」データを平滑化し、別の「よこすか」調査の測深点位置で抽出し、正規乱数を足して、変動“後”データを作成した。水平地形変動の推定には、Fujiwara et al. [2011] の方法を用いた。その結果、水平地形変動推定値の精度は、与えた測深値のばらつき ( $\sigma$ ) 程度であることがわかった。実際の観測に引きなおすと、水平地形変動推定値の精度は、測深精度（水深の約0.2-0.3%）程度と考えられる。上下地形変動の模擬には、海底地すべりを模したような地形の凸凹を「うらしま」データに加えた。結果、地形変動が約150m以上の水平規模あるとき、与えた測深値のばらつき以上の高低差があれば、識別できることがわかった。実際の観測に引きなおすと、フットプリントの数倍程度の水平規模、測深精度以上の高低差があれば、上下地形変動が識別できると考えられる。

キーワード: マルチナロービーム音響測深, 海底地形変動, 伊平屋北海丘, AUV うらしま, 調査船よこすか  
Keywords: Multi-narrow beam bathymetry, seafloor displacement, Iheya-North knoll, AUV Urashima, R/V Yokosuka



## 第一奄美海丘における AUV を用いた海底地形調査と熱水性プルームの発見 Bathymetric survey and discovery of hydrothermal plume in the Daiichi-Amami Knoll using autonomous underwater vehicle

南宏樹<sup>1\*</sup>; 小原 泰彦<sup>2</sup>  
MINAMI, Hiroki<sup>1\*</sup>; OHARA, Yasuhiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部海洋調査課, <sup>2</sup> 海上保安庁海洋情報部海洋研究室

<sup>1</sup>Hydrographic Surveys Division, Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, <sup>2</sup>Ocean Research Office, Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

琉球弧の火山フロント上には多数の火山地形が海底に存在する。奄美大島の北西沖 70km の海底の第一奄美海丘もその一つである。同海丘においてこれまで詳細な海底地形調査は行われておらず、その形状や大きさの詳細は不明であった。海上保安庁による測量船及び自律型潜水調査機器 (AUV) を用いた調査の結果、詳細な海底地形が明らかになるとともに、同海丘の海底から熱水噴出が存在する可能性が高いことを発見した。

### 1. 調査手法

調査は 2013 年 8 月から 9 月にかけて、海上保安庁の測量船「拓洋」及び同船搭載の AUV「ごんどう」を用いて実施した。測量船「拓洋」のマルチビーム音響測深機で概査を実施し、その後、AUV「ごんどう」搭載のマルチビーム音響測深機及びサイドスキャンソナーで詳細な調査を実施した。

### 2. 海底地形

拓洋の調査により、第一奄美海丘は火山性の高まりであることが明らかになった。頂部には平坦な面と直径約 1.6 km のカルデラや複数の中央火口丘が存在する。また中央火口丘の近くには周囲から 40 m 程度深くなっている火口状の凹地が存在する。海丘の比高はおよそ 500-700 m であり、頂部の最浅所の水深は 245 m であった。

### 3. 熱水性プルーム

拓洋が取得したマルチビーム音響測深機のウォーターカラムデータを解析した結果、頂部の火口状の凹地に非常に明瞭な熱水性プルームが音響的に確認された。熱水性プルームは凹地の縁で特に明瞭であった。一部の熱水性プルームは水深約 350 m の海底から海面近くまで明瞭に表れていた (目視では海面に変色水等の異常は確認されなかった)。また凹地だけでなく付近の火口丘の斜面からも熱水性プルームは確認された。凹地に AUV「ごんどう」を潜航させ、海底からの高度 40-50 m で詳細な調査を行った結果、プルームの湧出地点付近の海底には小さな凹地が多数分布していることが判明した。更にサイドスキャンソナーの音響画像も AUV 直下の熱水性プルームの存在を音響的に明瞭に捉えた。

### 4. 水温

凹地において AUV「ごんどう」が海底からの高度 40-50 m で水温を観測したところ、明瞭な温度上昇は見られなかったが、測量船「拓洋」の XBT による観測では、海底付近において温度差 2℃を超える水温の上昇が見られた。熱水性プルームが音響的に確認されたことを併せて考えると、第一奄美海丘において熱水が噴出している可能性が高い。

### 5. 調査の意義

本調査では、測量船による概査、AUV による精査と段階を追って、沖縄トラフの火山フロント上にある海丘の地形の詳細及び熱水性プルームの存在を明らかにした。熱水性プルームの発見は、海底熱水鉱床や化学合成生態系が存在する可能性を示しており、海底資源確保の観点からも重要である。また得られた詳細な海底地形は科学的調査や資源探査等の基盤となる情報であり、本調査は、海丘の活動史・成因の理解、海底資源確保に向けた今後の海底調査の第一歩といえる。

キーワード: 第一奄美海丘, 海底火山, プルーム, AUV, 海底地形

Keywords: Daiichi-Amami Knoll, submarine volcano, plume, AUV, bathymetry

## 伊豆小笠原弧ベヨネース海丘の地形・地質およびテクトニクスと黒鉱型鉱床胚胎の要因 Topography, geology, tectonics and ore deposit of the Bayonnaise knoll caldera, Izu-Ogasawara arc

本荘 千枝<sup>1\*</sup>; 浦 環<sup>1</sup>; 浅田 昭<sup>3</sup>; 金岡 秀<sup>3</sup>; 永橋 賢司<sup>3</sup>  
HONSHO, Chie<sup>1\*</sup>; URA, Tamaki<sup>1</sup>; ASADA, Akira<sup>3</sup>; KIM, Kangsoo<sup>3</sup>; NAGAHASHI, Kenji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 九州工業大学社会ロボット具現化センター, <sup>3</sup> 東京大学生産技術研究所海中工学国際研究センター

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup> Center for Socio-Robotic Synthesis, Kyushu Institute of Technology, <sup>3</sup> Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

伊豆小笠原弧の火山フロントではこれまでに、明神海丘カルデラ、明神礁カルデラ、スミスカルデラ、水曜海山、海形海山などの複数の火山で海底熱水活動が確認されている。これらに対し、背弧リフト帯において唯一確認されている熱水域が、ベヨネース海丘カルデラの白嶺サイトである。我々は、白嶺熱水域周辺で行われた深海巡航探査機「うらしま」による深海マルチビームおよびサイドスキャン観測の結果から、ベヨネース海丘カルデラの地形・地質およびテクトニクスと白嶺鉱床胚胎の要因について考察した。

調査域であるカルデラの南側半円部分（東西×南北幅＝約 3km × 2km）の主な地形要素は、外側から、山体斜面および急峻なカルデラ壁、平坦なカルデラ底、3つのピークを持つ中央火口丘とそれらが取り囲む中央凹地である。精密海底地形図からは、カルデラ壁南東部ではすでに大規模な斜面崩壊が発生し、その崩壊斜面上に白嶺鉱床が分布していること、また、対するカルデラ壁南西部では現在斜面崩壊が進行中で、今後南東部と同程度の崩壊が予想されることなどが窺える。また中央火口丘の本体である東部の山体は、頂部に小さい平坦面を持つドーム状の形状を持ち、熔岩円頂丘と推測される。ドームの上部は凹凸に富む凸形斜面、下部は滑らかで等齊～凹形斜面からなるが、北東斜面は上部から下部まで比較的単調な平板状であり、大規模な崩壊のあったことが窺われる。また、カルデラ底の西部には大小7つの円形の凹地が北西～南東方向に連なっており、これら凹地の周囲には火山性碎屑物の飛散・堆積によると思われる緩斜面があることなどから火口列と推測され、北東～南西方向の伸張場であることを示唆している。

カルデラ全体の地形観測に加え、白嶺熱水サイトの特徴を数値化し抽出するため3つの解析を行った。サイドスキャン画像については、GLCM (Gray-Level Co-Occurrence Matrix) を用いてテクスチャを数値化し、クラスタ分析により底質分類を行った。白嶺サイトは、高いエントロピーと低い同質性 (homogeneity) を特徴とする1グループに明瞭に分類され、中央火口丘本体（東山体）の上部および東～北東斜面の広い部分も同グループに分類された。同グループは他に、中央火口丘南山体の上部、白嶺サイト北東のカルデラ壁斜面、崩壊微候のあるカルデラ壁南西部、火口列凹地周辺などにも分布している。マルチビーム測深データについては、白嶺サイトに見られるチムニー・マウンド様の微地形を抽出するため、波数フィルターを用いて短波長地形が卓越するエリアを調べた。また、白嶺サイトのマルチビーム反射強度画像には、チムニーからの反射と思われる特徴的な斑状模様が確認され、同じく波数フィルターを用いて斑状模様の分布を求めた。これらの解析で得られた白嶺サイトと似た特徴を持つエリアは主に、白嶺サイト～中央火口丘～火口列というカルデラを南東～北西方向に横断するゾーンに分布する。

伊豆小笠原弧リフト帯はセグメント化した凹地が南北に連なって構成されており、ベヨネース海丘が位置するのは、北明神リフトと呼ばれる、南北にやや長い長径約 20km の楕円型凹地の北東縁部である。本研究で示されたカルデラ内の火口列の走向、熱水又は火山性微地形の分布、顕著な斜面崩壊域の分布は、カルデラを南東～北西方向に横切る北明神リフトの円周上にあり、同リフトが環状の断層構造を持つ可能性を窺わせる。北明神リフトの周囲には、ベヨネース海丘を含め7つの海丘が凹地を取り囲むように分布しており、現在熱水活動が確認されているのはベヨネース海丘のみであるが、陥没地形の環状断層上に酸性岩からなる火山体があり、火山体の中に鉱床が存在するという構造は、秋田県北鹿地域における地質構造と黒鉱鉱床分布との関係とよく似ている。ベヨネース海丘白嶺サイトは同地域の鉱床生成当時の姿であるかもしれない。

キーワード: 海底熱水鉱床, 伊豆小笠原リフト帯, マルチビーム, サイドスキャン, GLCM, 黒鉱鉱床  
Keywords: hydrothermal deposit, Izu-Ogasawara rift, multibeam sonar, side scan sonar, GLCM, Kuroko deposit

## 南部マリアトラフ内スネイル熱水サイトの比抵抗構造 Electrical resistivity structure of the Snail site at the Southern Mariana Trough spreading center

松野 哲男<sup>1\*</sup>; 木村 真穂<sup>2</sup>; 島 伸和<sup>2</sup>  
MATSUNO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; KIMURA, Maho<sup>2</sup>; SEAMA, Nobukazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 神戸大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Kobe University

The electrical resistivity of the oceanic crust is sensitive to the porosity of the crust and the fluid temperature within crustal fractures and pores. The spatial variation of the crustal porosity and the fluid temperature that is related to a hydrothermal circulation can be deduced by revealing an electrical resistivity structure of the oceanic crust involving a hydrothermal site. We carried out a magnetometric resistivity experiment using an active source to reveal an electrical resistivity structure of the oceanic crust at the Snail site on the ridge crest of the Southern Mariana Trough. Active source electric currents were transmitted along and across the ridge axis in a 4000 m<sup>2</sup> area including the Snail site. Five ocean bottom magnetometers were deployed around the Snail site as receivers to measure the magnetic field induced by the transmission of the active source electric currents. The amplitude of the induced magnetic field was calculated by maximizing data density and the signal to error ratio in the data, and locations of the transmissions were determined using several types of calibration data. An optimal 1-D resistivity structure of the oceanic crust, averaged over the experimental area, was deduced by least squares from the data of the amplitude of the magnetic field and the location of the transmission. After calculating magnetic field anomalies, which are deviations of the observed amplitude from the prediction of the optimal 1-D resistivity model, an optimal 3-D resistivity structure was deduced from the magnetic field anomalies through trial and error 3-D forward modeling. The optimal 1-D resistivity structure is a two-layer model, which consists of a 5.6 Ω-m upper layer having a 1500 m thickness and a 0.1 Ω-m underlying half-space. Using Archie's law and porosity profiles of the oceanic crust, the resistivity of 5.6 Ω-m at depths ranging from 800 to 1500 m suggests the presence of high-temperature fluid related to the hydrothermal circulation. The resistivity of 0.1 Ω-m below 1500 m depth may represent a magma mush that is a heat source for the hydrothermal circulation. The optimal 3-D resistivity structure includes a conductive anomaly (0.56 Ω-m in approximately 300 m<sup>2</sup> area down to 400 m depth) just below the Snail site, two resistive anomalies (56 Ω-m with slightly larger volumes than the conductive anomaly) adjacent to the conductive anomaly on the across-ridge side, and three conductive anomalies away from the Snail site. The conductive anomaly just below the Snail site suggests hydrothermal fluid, and the adjacent resistive anomalies suggest areas of low porosity. The size and distribution of the conductive and resistive anomalies near the Snail site constrains the size and style of the hydrothermal circulation.

Keywords: electrical resistivity structure, temperature and porosity, oceanic crust, hydrothermal circulation, magnetometric resistivity method

## 反射法地震探査による伊豆小笠原島弧前弧域の形成初期構造イメージング Crustal Imaging of initial structure in Izu-Ogasawara forearc region obtained by seismic reflection survey

山下 幹也<sup>1\*</sup>; 野 徹雄<sup>1</sup>; 佐藤 壮<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 三浦 誠一<sup>1</sup>; 石塚 治<sup>1</sup>  
YAMASHITA, Mikiya<sup>1\*</sup>; NO, Tetsuo<sup>1</sup>; SATO, Takeshi<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; MIURA, Seiichi<sup>1</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

島弧進化を理解する上で地殻改変過程を知ることは重要である。その地殻改変を理解するためには初期の島弧地殻の状態を明らかにする必要がある。伊豆小笠原島弧は島弧進化過程を知る最も適した場所であるとされ数多くの岩石学的・地球物理学的研究が行われてきた。これまでの岩石学的研究により伊豆小笠原島弧の最も海溝に近い場所に形成初期の岩石が分布していると言われており、海洋底掘削により gabblo から forearc basalt, boninite に至る地質情報を得ることで、伊豆小笠原島弧における地殻改変過程を知ることが可能になる。そこで本研究ではこの掘削を実現するためにこれまで潜航調査で boninite や forearc basalt が得られている地点周辺で地震探査を行い、島弧の初期構造における 3 次元的速度構造と浅部反射構造を得ることが目的である。海洋研究開発機構では深海調査研究船「かいらい」を用いた 2011 年 1 月～3 月の KR11-01 および KR11-05 航海において反射法地震探査を実施し、南北方向の基盤の凹凸や薄い堆積層が確認できた。しかし東北地方太平洋沖地震で中断となったため、2014 年に予定されている掘削に向けた掘削点の審査に必要な東西測線の取得ができなかった。そのため、2013 年 4 月の KR13-07 航海において IBr11 および IBr11n の 2 つの東西測線を設定し、データ取得を行った。IBr11 測線は四国海盆から西之島トラフ、金曜海山、小笠原トラフ、智島北方の小笠原海嶺を横断する測線である。IBr11n 測線は IBr11 測線の北側に平行する形で掘削点候補点を横断するように設定した。調査仕様は従来と共通である。得られた結果から掘削候補点周辺の空間的な火山性堆積物の分布や基盤の拡がりが見らかになった。掘削点直下では基盤を含めた 4 つのユニットに分類することができ、海底調査との比較からユニット I・II は火山碎屑堆積物、ユニット III が basalt, ユニット IV が gabblo/peridotite と推測される。また金曜海山北側では堆積層全体が西に傾動した構造や、小笠原海嶺では隆起によると思われるブロック状に変形した構造が確認された。本講演では掘削点近傍の空間的構造を示すとともに、本調査域における背弧～前弧までの特徴について南北との比較を議論する。

キーワード: 反射法地震探査, 伊豆小笠原前弧, 島弧初期構造

Keywords: MCS survey, IBM forearc, initial arc structure



中部伊豆弧, 第四紀玄武岩の島弧横断方向変化 - 明神火山及び明神リフト, 青ヶ島リフトの例 -  
Across-arc geochemical variation of Quaternary Basalts dredged from central part of Izu-arc

吉田 尊智<sup>1\*</sup>; 岡村 聡<sup>1</sup>; 坂本 泉<sup>2</sup>; 足立 佳子<sup>3</sup>; 池田 保夫<sup>4</sup>; 新城 竜一<sup>5</sup>; 菅原 誠<sup>6</sup>  
YOSHIDA, Takanori<sup>1\*</sup>; OKAMURA, Satoshi<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Izumi<sup>2</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>3</sup>; IKEDA, Yasuo<sup>4</sup>; SHINJO, Ryuichi<sup>5</sup>; SUGAWARA, Makoto<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 北海道教育大学札幌校, <sup>2</sup> 東海大学海洋学部, <sup>3</sup> 新潟大学研究推進機構超域学術院, <sup>4</sup> 北海道教育大学釧路校, <sup>5</sup> 琉球大学理学部, <sup>6</sup> 三菱マテリアルテクノ株式会社

<sup>1</sup>Hokkaido University of Education Sapporo, <sup>2</sup>Tokai University, <sup>3</sup>Niigata University, <sup>4</sup>Hokkaido University of Education Kushiro, <sup>5</sup>Ryukyuu University, <sup>6</sup>Mitsubishi Materials Techno Corporation

伊豆・小笠原弧は、フィリピン海プレートの東縁に位置し、本州中部域から南方に約 1200km、幅 400km の広がりを持つ東北日本弧に匹敵する大きさを持った島弧である(西村・湯浅 1991)。島弧は全体として海面下に顔を隠しており、北部では伊豆大島や三宅島に代表される火山フロント(VF: volcanic front)の火山島が海面上に見られるが、南にいくにつれ VF 火山も海面下に没する。VF のすぐ西側には、VF にほぼ平行に伸び、急崖で囲われた幅 20-30km の凹地状地形を示す活動的背弧リフト帯(AR: active rift)が存在する。Ishizuka et al. (2003b) による火成岩の Ar-Ar 年代データから 1Ma 以降の新しい火成活動は、VF と AR にのみ限定される。本研究では、伊豆弧の第四紀 VF の明神火山、同火山の西方に存在する AR の明神リフト及び青ヶ島リフトからドレッジによって採取された玄武岩の地球化学的データを報告する。本研究の玄武岩は、海溝からの距離とともに Ba/La 比, Sr, Nd, Hf 同位体比が減少する一方で、(La/Sm) N 比の増加する明瞭な島弧横断方向の化学組成変化を示す。微量元素比, Sr, Nd, Hf 同位体比の特徴から VF 玄武岩は、沈み込むスラブからマントルウェッジへ aqueous fluid が付加した結果 flux melting が引き起こされ発生したと考えられる。一方で、AR 玄武岩は、含水スラブの部分溶融による supercritical melt (e.g. Kessel et al. 2005) がマントルウェッジへ付加したことによる flux melting の結果もたらされたと結論付けられる。VF 玄武岩に含まれるカンラン石中のクロムスピネルの化学組成(Cr#=0.75 程度でマントルと平衡)から VF 玄武岩と共存した融け残りマントルは、ダナイトと推定される。同様にクロムスピネルの組成から、AR 玄武岩では、海溝からの距離とともに部分溶融度は低下することが示唆される。Tollstrup et al. (2010) は四国海盆拡大後の島弧火成活動のうち背弧雁行海山列(WS: western seamount chain)、及び背弧海丘群(BAK: back-arc knolls)の玄武岩の成因には supercritical melt, AR および VF の玄武岩の成因には aqueous fluid の寄与があったと結論付けており本研究と結論を異にする。彼らの議論において活動年代と火成活動範囲は考慮されておらず、WS および BAK の活動の際に玄武岩の発生に寄与したと考えられる supercritical melt は現在の活動には関与しないことになる。Bryant et al. (2003) によって、15Ma 以降 VF の玄武岩の活動が続いていることが明らかになっており、Ishizuka et al. (2003b) が示した WS, BAK の活動範囲が活動年代と共に東進することは、現在に向かって島弧火成活動の幅が狭くなっていったことを意味する。本研究での VF と AR の玄武岩の発生に関与するスラブ流体の違いは、15Ma から 3Ma の間にスラブ沈み込み角度が 30 度から 45 度に変化した(Honda et al., 2007) ことによって supercritical melt の発生位置が東進し、かつて WS, BAK の活動に関与したとされる supercritical melt が現在では AR の玄武岩発生に寄与しているとする考えと調和的である。

キーワード: 玄武岩, 伊豆・小笠原弧, 島弧横断方向変化, 明神礁, 明神リフト, 青ヶ島リフト

Keywords: basalt, Izu-Bonin arc, geochemical across-arc variation, Myojin seamount, Aogasima rift, Myojin rift

## 明神火山周辺から採取された酸性岩の多様性 - 伊豆弧の島弧地殻の不均質 - The variety of silicic rocks around the Myojin volcano, central Izu-Bonin arc

吉田 尊智<sup>1\*</sup>; 岡村 聡<sup>1</sup>; 坂本 泉<sup>2</sup>; 足立 佳子<sup>3</sup>; 池田 保夫<sup>4</sup>; 新城 竜一<sup>5</sup>; 菅原 誠<sup>6</sup>

YOSHIDA, Takanori<sup>1\*</sup>; OKAMURA, Satoshi<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Izumi<sup>2</sup>; ADACHI, Yoshiko<sup>3</sup>; IKEDA, Yasuo<sup>4</sup>; SHINJO, Ryuichi<sup>5</sup>; SUGAWARA, Makoto<sup>6</sup>

<sup>1</sup>北海道教育大学札幌校, <sup>2</sup>東海大学海洋学部, <sup>3</sup>新潟大学研究推進機構超域学術院, <sup>4</sup>北海道教育大学釧路校, <sup>5</sup>琉球大学理学部, <sup>6</sup>三菱マテリアルテクノ株式会社

<sup>1</sup>Hokkaido University of Education Sapporo, <sup>2</sup>Tokai University, <sup>3</sup>Niigata University, <sup>4</sup>Hokkaido University of Education Kushiro, <sup>5</sup>Ryukyuu University, <sup>6</sup>Mitsubishi Materials Techno Corporation

伊豆・小笠原弧は、フィリピン海プレートの東縁に位置し、本州中部域から南方に約 1200km、幅 400km の広がりを持つ東北日本弧に匹敵する大きさを持った島弧である(西村・湯浅 1991)。火山フロント(VF)のすぐ西側には、VF ほぼ平行に伸び、急崖で囲われた幅 20-30km の凹地状地形を示す活動的背弧リフト帯(AR)が存在する。VF の大島や三宅島は主に玄武岩を噴出してきたことがよく知られている一方で、伊豆・小笠原弧には、神津島や新島、明神礁に代表され、噴出相の大部分が珪長質岩石から成る火山が存在する(Tamura et al., 2009)。近年、伊豆・小笠原弧中部域では、島弧地殻の物理探査が行われ、VF 下の地震波構造によるモホ面の深さは 20km で、本島弧の下には P 波速度が 6.0-7.0km/s の層が広がっていることが明らかとなった(e.g. Suyehiro et al., 1996)。P 波速度が 6.0-7.0km/s に対応する岩石種は、神縄断層で本州弧に衝突している丹沢コンプレックスや VF の火山岩中に捕獲岩として含まれるトータル岩の地震波伝播速度が最も類似することから 6.0-7.0km/s 層はトータル岩質の深成岩から構成されていると推定されている(Suyehiro et al., 1996)。本研究では、大陸地殻形成との関連性が示唆される伊豆弧の酸性火成活動について検討することを目的として、中部伊豆弧の VF 火山である明神山及び活動的背弧リフトの明神リフトから採取された酸性岩の岩石学的考察を行う。本調査地域に産する酸性岩は、横軸に Zr、縦軸に Zr/Y 比をとった図によって大きく 3 つのグループに大別される。本研究では、Zr/Y 比の低い type 1、Zr/Y 比が中程度の type 2、Zr/Y 比の高い type 3 に分類した。同一の採取地点から種々の組み合わせで複数種の酸性岩が産することがあり複雑なマグマ発生条件が示唆される。type 1 は主として VF に産出し、一部 AR の VF 寄りの 2 地点においても採取された。type 2 は VF から AR にかけて広く産出し type 3 は AR にのみ産出する。

type 1 は、低い Zr/Y 比、高 Ba 含有量で特徴づけられ、Sr, Nd 同位体比において VF 玄武岩と同様の特徴を示すが、Hf 同位体比において同地域の VF 玄武岩と異なり、むしろ VF 火成岩中の苦鉄質岩ゼノリスと同様の同位体比を持つ。type 2 は、東経 139 度 47 分を境に性質が変化する。VF 及び VF 寄りの AR から産する type 2 は、中程度の Zr/Y 比、低 Ba 含有量で特徴づけられ、四国海盆拡大後の火成岩と異なった同位体比特徴を持つ。一方、より背弧域の type 2 は、軽希土類に富み、VF の type 2 に比べ低い Sr 同位体比、高い Nd, Hf 同位体比を持つ。type 3 は、高い Zr/Y 比、低い Ba 含有量で特徴づけられ、Sr, Nd 同位体比において AR 玄武岩と同様の特徴を示すが、Hf 同位体比において同地域の VF 玄武岩と性質が異なる。さらに四国海盆拡大後の火成岩、AR 玄武岩及び前弧域の ODP ボーリングコアの火成岩(Straub et al., 2010)とも同位体比特徴を異にする。

3 タイプの酸性岩は、Na<sub>2</sub>O vs ASI の図において玄武岩質起源物質の部分溶融実験のデータ(e.g. Sisson et al., 2005)との整合性が高く、玄武岩質の下部地殻の溶融物であることが示唆される。しかし、本研究の流紋岩と同じ地点から採取された玄武岩とは全て Hf 同位体比組成が異なり、起源物質として考えることができない。そのため、現伊豆弧で活動する全てのタイプの酸性岩は、過去の活動によって形成された島弧地殻物質の再溶融によって形成されていると考えられる。type 1 は、VF 火成岩中に含まれる苦鉄質岩ゼノリスと同様の Sr, Nd, Hf 同位体比を示すことから 15Ma 以降続く VF 玄武岩の活動(Bryant et al., 2003)によって形成された古い下部地殻の部分溶融によってもたらされたと考えられる。type 2 は漸新世のタービダイトと性質が類似するが、type 2 のうち背弧域の AR に産するものは、Hf 同位体比が明瞭に高く、Hf 同位体比が高いことで特徴づけられるフィリピン海プレートの影響を受けていると考えられる。type 3 と同様の同位体比特徴を持つ地球化学的データは、前弧域の ODP のボーリングコアの研究においてこれまで報告されておらず、背弧域特有の起源物質の存在を示唆する。type 3 の起源物質の検討には、今年の 3 月から始まる IODP のプロジェクトによる伊豆弧背弧域における掘削での地球化学的データの蓄積が期待される。本研究では、同一地点において多様な酸性岩が再溶融によって産出することに加え、一部フィリピン海プレートの影響を受けたものが存在することが明らかになった。そのため現伊豆弧下の島弧地殻は、フィリピン海プレートを基盤として約 50Ma 続く島弧火成活動に起因するマグマのアンダープレATINGによってパッチ状に地殻物質の不均質が存在する可能性が高い。

キーワード: 酸性岩, 伊豆・小笠原弧, 明神火山, 明神リフト, 青ヶ島リフト  
Keywords: acidic rock, Izu-Bonin arc, Myojin volcano, Myojin rift, Aogashima rift

## 大陸棚調査で判明した小笠原海台の速度構造的特徴 General remarks of velocity structures of the Ogasawara Plateau, revealed by the Continental Shelf Survey of Japan

金田 謙太郎<sup>1</sup>; 西澤 あずさ<sup>1\*</sup>; 及川 光弘<sup>1</sup>; 森下 泰成<sup>1</sup>

KANEDA, Kentaro<sup>1</sup>; NISHIZAWA, Azusa<sup>1\*</sup>; OIKAWA, Mitsuhiro<sup>1</sup>; MORISHITA, Taisei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部

<sup>1</sup>JHOD

大陸棚調査の一環として、2004-2008 年の間、海上保安庁は日本の南方海域において地殻構造探査を実施してきた。この間に調査した総探査測線数は約 100 本におよび、これらの解析結果からは、日本周辺海域の多様性に富んだ地殻・マン托ルの速度構造が明らかになり、国連大陸棚委員会への延長大陸棚申請の貴重な資料となったばかりでなく、地球科学的にも貴重なデータとなった。これらのデータを基に作成した我が国の延長大陸棚申請は 2008 年 11 月に提出され、2012 年 4 月には、国連が日本の延長大陸棚を認める勧告を發出している。本大会では、我が国の延長大陸棚として認められた海域の一つである小笠原海台海域に焦点を当て、これまでに海上保安庁が地殻構造探査で取得した当海域の速度構造をまとめ、判明した小笠原海台の構造的特徴について言及する。

大陸棚調査による大規模な地殻構造探査が開始される前までは、小笠原海台の構造はほとんど解明されていなかったが、10 を超える測線において海底地震計を使用した屈折法地震探査及びマルチチャンネル反射法地震探査を実施した結果、1) 太平洋プレート上に位置する小笠原海台はマリアナ海溝、伊豆・小笠原海溝を越え、フィリピン海プレートに衝突している、2) 小笠原海台の地殻の最大厚は約 25 km 程で、伊豆・小笠原弧とほぼ同等の地殻の厚さを持つ、3) 小笠原海台南東方に広がる平坦な大洋底では、広範囲に渡り、下部地殻内に低速度構造が存在している、といった小笠原海台の特徴的な地殻構造が明らかになった。

その後、構築した速度構造モデルが MCS プロファイルの記録と整合的になるよう両者を重ね合わせて構造を検討し、地殻やマン托ル内からの様々な反射波・後続波を用い、より詳細な速度構造モデルを取得できるよう再解析を実施したところ、1') 小笠原海台とフィリピン海プレート (母島海山) との境界面の構造、2') 小笠原海台形成時のアンダープレートティングに起因していると考えられる、海台直下に認められるマン托ル内反射面の構造、3') 海台南東部に広がる低速度構造のより詳細な分布を確認することができた。

キーワード: 地殻構造, 小笠原海台, 大陸棚調査, 地震探査

Keywords: velocity structure, Ogasawara Plateau, seismic experiment



## 北西太平洋の深海底における音響特性評価 Acoustic characterization of abyssal plain, northwestern Pacific region

沖野 郷子<sup>1\*</sup>; 本荘 千枝<sup>1</sup>; 町田 嗣樹<sup>2</sup>; 及川 光弘<sup>3</sup>; 中村 謙太郎<sup>4</sup>  
OKINO, Kyoko<sup>1\*</sup>; HONSHO, Chie<sup>1</sup>; MACHIDA, Shiki<sup>2</sup>; OIKAWA, Mitsuhiro<sup>3</sup>; NAKAMURA, Kentaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>2</sup> 早稲田大学創造理工学部, <sup>3</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>4</sup> 東京大学工学系研究科  
<sup>1</sup>AORI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>School of Creative Science and Engineering, Waseda University, <sup>3</sup>Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, <sup>4</sup>School of Engineering, The University of Tokyo

The old seafloor covered by pelagic sediment has not attracted large scientific attention and remained untouched for many years, however, the recent studies on intra-plate volcanism as well as the increasing interest in deep-sea natural resources focus spotlight on the abyssal plains. We analyzed the multi-beam bathymetry, beam intensity, and side-scan images of abyssal plain in the northwestern Pacific, around the Minami-Torishima (Marcus) Island. The data were collected by Japan Coast Guard as part of Japanese EEZ survey and by R/V Yokosuka for decades. The beam intensity data from multi-beam echo sounder were processed to create a backscatter mosaic without geometric distortion. The mosaic shows a large variation of acoustic characteristics in whole study area. The high backscattering areas at the foot of large seamounts likely reflect the distribution of volcanoclastic sediments and debris. We can also recognize another type of high backscattering areas in flat seafloor, where neither remarkable seamounts nor knolls exist. The latter type partly corresponds to the area where the high concentration of rare-earth elements were reported and may suggest a thin cover of uppermost soft sediment layer. We try to integrate the backscattering mosaics and the statistic analysis of bathymetry and to establish a new method of acoustic characterization of abyssal plain. We also plan to compare our results with piston core samples as ground references and to discuss the sedimentation process and the relationship with intra-plate volcanism on old seafloor.

Keywords: marine acoustics, muti-beam echo sounder, backscattering intensity, abyssal plain



## 地磁気三成分測定に基づく中央海嶺での海底拡大の安定性の検証 Spreading stability at the mid-ocean ridges derived from 3D magnetic survey

松本 剛<sup>1\*</sup>; 佐藤 幸隆<sup>1</sup>; 野木 義史<sup>2</sup>  
MATSUMOTO, Takeshi<sup>1\*</sup>; SATOH, Yukitaka<sup>1</sup>; NOGI, Yoshifumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学理学部, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>University of the Ryukyus, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

船上地磁気 3 成分磁力計 (Shipboard Three Component Magnetometer: STCM) は地磁気を 3 成分のベクトル量で測定するので、全磁力測定よりも多くの情報を得る事が可能である。過去の研究では、中速拡大海嶺に分類される南東インド洋海嶺での STCM データの解析の結果、海底地形と拡大の安定性について関係がある事を示した。そこで本研究では他の中央海嶺でも同様の事が言えるのか、東太平洋海嶺, Explorer 海嶺, 南東インド洋海嶺, 大西洋中央海嶺で得られた STCM データの解析を行い、地磁気異常値から片側拡大速度と磁気境界走向を求めることで海底地形と海底拡大の安定性に関係が見られるかの検証を行った。その結果、海嶺軸に高まりがある東太平洋海嶺では西側では拡大速度と磁気走向の値はほぼ一定の値であるのに対し、東側では拡大速度の変化と、磁気走向のばらつきが顕著に見られた。また、中軸谷が発達している大西洋中央海嶺では両側に安定して拡大しており、磁気走向のばらつきもあまり見られず、海底地形と拡大の安定性については特に関係は見られなかった。さらに Explorer 海嶺においては拡大速度の変化は見られたが、磁気走向のばらつきが小さかった。よって拡大速度と安定性についても特に関係は見られない。次に南東インド洋海嶺での磁気境界走向を求めると同じ場所で異なる走向の値を示した。この結果から、磁気境界走向のばらつきが大きくなるのは拡大方向のばらつきというよりも地磁気異常を正確に捉えられていないと考えられる。さらに海底拡大を支配する要因として周囲のプレート配置や運動についてもシミュレーションを行ったが、明確な関係は見られなかった。したがって、海底拡大の安定性はプレートの配置や運動とプレートの引っ張り、そしてマントルからのマグマの供給のバランスによって成り立っていると考えられる。

キーワード: 大洋中央海嶺, 拡大速度, 地磁気 3 成分測定

Keywords: mid-ocean ridge, spreading rate, 3D magnetometry

## 海底地形および地磁気異常から推測される, 中琉球における火山フロントの西方移動

### Detailed bathymetry and magnetic anomaly in Central Ryukyu: Implications on westward shift of volcanic front after 2.1Ma

佐藤 太一<sup>1\*</sup>; 小田 啓邦<sup>1</sup>; 石塚 治<sup>1</sup>; 荒井 晃作<sup>1</sup>  
SATO, Taichi<sup>1\*</sup>; ODA, Hirokuni<sup>1</sup>; ISHIZUKA, Osamu<sup>1</sup>; ARAI, Kohsaku<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, AIST

Detailed bathymetry and magnetic anomaly were obtained by GH12 cruise in 2012 using R/V Hakurei, in the southern part of Central Ryukyu. Volcanic structures such as caldera were observed on the southwestward extension of the present-day volcanic front, implying recent volcanic front of the Ryukyu arc. Furthermore, bathymetric highs which are sub-parallel to the recent volcanic front were observed and is located ~20 km east. These are accompanied by spotted magnetic anomalies, which continue to Kume-jima via Aguni-jima Islands to the south, suggesting an existence of an ancient volcanic front. The ages of volcanic rocks from these Islands suggest that the magmatic activity along the ancient volcanic front had been active at least until ~2.1 Ma. The magmatic anomalies connecting two volcanic fronts suggest that a volcanic front have moved gradually westward. This shift would be explained by the termination of asthenospheric upwelling and/or rapid retreat of Ryukyu Trench.

キーワード: 琉球弧, 火山フロント, 沖縄トラフ, 地磁気異常, 海底地形

Keywords: Ryukyu arc, Volcanic front, Okinawa Trough, magnetic anomaly, seafloor bathymetry

## 九州南方沖鬼界カルデラにおける,カルデラの陥没に伴う堆積盆の進化 Evolution of depositional basin accompanied by recurring caldera collapses in Kikai caldera, southern-off Kyushu, Japan

池上 郁彦<sup>1\*</sup>; 蓑和 雄人<sup>1</sup>; 倉富 隆<sup>1</sup>; 清川 昌一<sup>2</sup>; 大岩根 尚<sup>3</sup>; 中村 恭之<sup>4</sup>; 亀尾 桂<sup>5</sup>  
IKEGAMI, Fumihiko<sup>1\*</sup>; MINOWA, Yuto<sup>1</sup>; KURATOMI, Takashi<sup>1</sup>; KIYOKAWA, Shoichi<sup>2</sup>; OIWANE, Hisashi<sup>3</sup>; NAKA-MURA, Yasuyuki<sup>4</sup>; KAMEO, Katsura<sup>5</sup>

<sup>1</sup>九州大学理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学理学研究院地球惑星科学部門, <sup>3</sup>三島村, <sup>4</sup>海洋研究開発機構, <sup>5</sup>東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Mishima-mura, <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, Tokyo University

Kikai caldera (Matsumoto, 1943) is a mostly submerged highly active caldera volcano located in 40 km off Kyushu Island. The caldera is recognized as the product of 7300 cal. BP super-colossal eruption with Akahoya tephra (Machida and Arai, 1978; Fukuzawa, 1995) which is widely distributed along the western part of Japan. Previous studies for near-vent onshore geology strongly suggests such a large eruption was not occurred only once, but multiple times in the Kikai caldera (Ono et al., 1982).

In Kikai caldera, 24 lines of multi-channeled seismic reflection surveys were held in two survey cruises (KT-10-18 and KT-11-11) in 2010 and 2011 using R/V Tansei-maru of JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology). The acquired seismic data for subseafloor structures spotted thick sedimentary basin at the eastern margin of the caldera. The basin covers 70 square km of the 20 km-wide caldera and is next to caldera rim fault. The infill of the basin is characterized by the group of onlapping stratified deposits named B which maximum thickness is more than 600 m. The B-sequence has two major depositional discontinuities in the middle and the top. The lower one is paraconformity and the upper one is disconformity though, the both of them are associated with similar deformation of the basin itself. The deformation is characterized by 1. Dragged-up reflectors along the caldera rim fault, and 2. Slight outward rotation of the deposits. Both characteristics intensify along the depth, which means lower deposits were experienced much more deformation.

The both two types of the deformation suggest the basin was experienced at least two major subsidence event. The former dragged-up structure is interpreted as the incomplete slip of the caldera rim fault for the relief of the subsidence, while the latter rotation shows the slippages were slightly listric. The displacements of the subsidence events could be estimated from the top and bottom of the dragged-up structures, as more than 100 m in the lower-older event and more than 50 m in the upper-newer event. The subsidence would be an abrupt event, as the paraconformity was formed in the lower-older event. The most likely candidate for such a significant subsidence is caldera collapse. As therefore, the basin might be the one of the pre-caldera structure, and it has been experienced multiple caldera collapse events in the past.

キーワード: カルデラ, 反射法探査, 鬼界カルデラ, アカホヤ  
Keywords: caldera, seismic reflection survey, Kikai caldera, Akahoya

## 海底泥火山の地形から推定される海底下物質移動 Estimates on fluid migration and material recycling via offshore mud volcanoes

喜岡 新<sup>1\*</sup>; 芦 寿一郎<sup>1</sup>  
KIOKA, Arata<sup>1\*</sup>; ASHI, Juichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup> Atmos. Ocean Res. Inst., U. Tokyo

現在、海底泥火山は世界中で 300~400 程度確認されており、この数の 2 倍以上の存在が推測されている。泥火山は、地下深部の圧力上昇がトリガーとなって、深部起源の含礫泥が海底下まで運ばれて噴出・形成される。そのため泥火山は、深部掘削することなく地下深部の情報を得ることができる有用なツールである。本研究では、現在確認されている海底泥火山のカタログを作成し、海底泥火山が流体移動や物質循環にどの程度貢献しているのか評価することを目指す。

キーワード: 海底泥火山, 流体移動, 物質循環, 過剰間隙水圧

Keywords: Submarine mud volcanoes, fluid migration, material recycling, overpressure



## 新しい海洋堆積物コアデータベース “COEDO” New Marine Sediment Core Database ”COEDO”

中野 幸彦<sup>1\*</sup>; 市山 祐司<sup>1</sup>; 堀川 博紀<sup>1</sup>; 富山 隆将<sup>1</sup>; 佐藤 悠介<sup>2</sup>; 兼次 藤子<sup>2</sup>; 荻堂 絵利子<sup>2</sup>; 高江洲 佑樹<sup>2</sup>; 長山 杏梨<sup>2</sup>; 大城 達<sup>2</sup>

NAKANO, Yukihiko<sup>1\*</sup>; ICHIYAMA, Yuji<sup>1</sup>; HORIKAWA, Hiroki<sup>1</sup>; TOMIYAMA, Takayuki<sup>1</sup>; SATO, Yusuke<sup>2</sup>; KANESHI, Toko<sup>2</sup>; OGIDO, Eriko<sup>2</sup>; TAKAESU, Yuki<sup>2</sup>; NAGAYAMA, Anri<sup>2</sup>; OSHIRO, Satoshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> (株) マリン・ワーク・ジャパン

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Marine Works Japan Ltd.

海洋研究開発機構(JAMSTEC)はデータ・サンプルの取り扱い方針を定め、([http://www.jamstec.go.jp/j/database/data\\_policy.html](http://www.jamstec.go.jp/j/database/data_policy.html))保有するデータ・サンプルの保管、管理、公開及び利用の促進を行っている。堆積物コアに関する情報は2008年から”JAMSTEC コアデータサイト”(旧サイト)で公開を行ってきた。これまで、利便性やデータ・サンプルの付加価値を高めるために、様々な改良を行ってきたが、サイトの内部構造がHTML ベースページの集合体であるなど、機能強化を行う上で仕様上の限界に達した。そのため、新たにデータベースを構築しデータ移行を行い、2014年1月に公開した。

新しいデータベースの主な特徴を紹介する。

<名称>

**JAMSTEC 堆積物コアデータベース (COre Electronic Database of Ocean floor; COEDO)**

<URL >

<http://www.godac.jamstec.go.jp/coedo/j/>

<検索方法>

地図検索とその他条件(航海番号、日付、公開データ種など)の複合検索

旧サイトの検索方法は、地図検索(一般ユーザー向け)または、航海番号から検索(乗船研究者向け)のどちらかを択する必要があり、欲しいデータにたどり着くまで手間がかかった。COEDOでは1画面の中に地図検索とその他の条件による複合検索を行えるようにまとめた。また、地図検索にGoogle maps APIを利用する事により、幅広いユーザーが視覚的にかつ簡単に利用できるようになった。さらに、データを利用したいユーザーは、各種データによる絞り込みをすることにより、早く簡単にデータにアクセスできるようになった。JAMSTECの航海に乗船した研究者や内部ユーザー向けの機能として、航海番号や首席研究者、船舶名などからの検索機能も搭載した。

<公開しているデータ種>

メタデータ(航海番号、採取日、首席研究者、船舶名、採取位置、水深など)

コア写真、スキャンイメージ、コア柱状記載、ソフトX線写真、X線スキャンイメージ、物性データ(ガンマ線透過率から求めた密度、P波伝播速度、帯磁率、測色値、せん断応力、コーン貫入抵抗など)、関連論文・文献情報、化学分析データへのリンク

今後、利便性向上へ向けて機能強化を行う検討をすすめている。

- ・コア年代情報の収集・整理を行い、見やすい形での表示・検索機能追加。
- ・高知コア研究所のサンプル情報ページとの統合。
- ・旧サイトで取り扱ってなかった新しいデータの公開。

また、既存ユーザーへの利便性向上のみならず、新しいユーザーの獲得を目指した活動を始めている。JpGUは横浜市と共催で、横浜市の中高生を対象に、次世代を担う研究者輩出を目的とした、特別実習(データベース実習+コア観察実習)を慶応義塾高等学校で開催する。JAMSTECは講義(講師派遣)とサンプルを提供するという形で協力する。実習では、COEDOを利用して従来よりもスムーズに堆積物コアの情報を得て、検索したコアを実際に観察し、深海と地球に関する最先端の研究にアプローチすることによって、生徒の興味・好奇心向上につなげる。なお、JAMSTECのデータベース検索を利用したコア観察実習は初の試みである。データベースは、JAMSTECの一般公開などで随時紹介しているが、この実習に協力する事によって、教育目的のユーザーの増加が期待できる。

キーワード: 堆積物, コア, サンプル, データベース, 海洋, 地質学

Keywords: JAMSTEC, marine sediment core, database, ocean floor, piston corer, geology

## 深海映像・画像に対する地質学的アノテーション Geological Annotation for the Deep-Sea Images

伊禮 一宏<sup>1\*</sup>; 荻堂 盛誉<sup>1</sup>; 嘉陽 牧乃<sup>1</sup>; 仲村 亮<sup>1</sup>; 田中 克彦<sup>2</sup>; 北山 智暁<sup>2</sup>; 齋藤 秀亮<sup>2</sup>; 華房 康憲<sup>2</sup>  
IREI, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; OGIDO, Moritaka<sup>1</sup>; KAYO, Makino<sup>1</sup>; NAKAMURA, Makoto<sup>1</sup>; TANAKA, Katsuhiko<sup>2</sup>; KITAYAMA,  
Tomoaki<sup>2</sup>; SAITO, Hideaki<sup>2</sup>; HANAFUSA, Yasunori<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (株) マリン・ワーク・ジャパン, <sup>2</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Marine Works Japan LTD., <sup>2</sup>JAMSTEC

独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 国際海洋環境情報センター (GODAC) では、JAMSTEC が保有する潜水調査船や無人探査機を用いた深海調査によって撮影された映像や画像を収集・保管・公開するとともに、膨大な情報の中から利用者が容易に目的の映像や画像を探し出せるように、地質環境や生物名を示すアノテーション (キーワード) を付与してデータベースに登録している。これらの映像や画像とアノテーションは、JAMSTEC の潜航調査により撮影された映像や画像を公開するデータサイトである「深海映像・画像アーカイブス (J-EDI) \*1」からインターネットに配信されている。

深海調査に関わる研究者らは J-EDI で配信している深海調査の映像や画像を研究や講演の素材、航海・調査潜航の計画策定などに利用することができる。また、深海生物の映像や画像はその生態等を知る上で貴重なデータであるだけでなく、撮影地点における生物の存在根拠となるため、生物種名のアノテーションが付与された映像や画像は海洋生物の多様性・分布情報を扱う統合データサイトである「Biological Information System for Marine Life (BISMAL) \*2」を介して生物分布の可視化や生物観察記録に利用されている。

登録しているアノテーションの内容は映像や画像から被写体を同定できる範囲としており、アノテーションの登録操作は、データベースに予め用意した語彙の中からアイコンや分類名の階層ツリーを用いて適する語を選択する方式としている。深海底の地質環境を示すアノテーションは、全映像約 120,000 件のうち、約 41,000 件の映像と、95 種類の用語が登録されている。

我々は特に固体地球科学分野での深海映像や画像の利用範囲を広げるために、潜航調査に関する文献などを活用することで、より詳細な内容のアノテーションの登録を試みたが、その登録には多くの時間を費やすことが判明した。効果的に作業を進めるには、付与するアノテーションを利用拡大につながるものに絞り込む必要があると考えている。

本発表では、深海調査により撮影された映像や画像に付与した深海底の地質環境を示すアノテーションの現状と深海映像や画像の利用範囲拡大に向けた取組みについて報告する。

\*1 <http://www.godac.jamstec.go.jp/jedi/>

\*2 <http://www.godac.jamstec.go.jp/bismal/>

キーワード: 深海映像画像, 地質環境, アノテーション

Keywords: deep-sea video and photo, geological environments, annotation

## 地震探査による日本海・日本海盆南縁部および海陸遷移域の $V_p/V_s$ 構造 $V_p/V_s$ ratio in the southernmost Japan Basin and its transition area, Japan Sea deduced from the seismic survey

佐藤 壮<sup>1\*</sup>; 野 徹雄<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
SATO, Takeshi<sup>1\*</sup>; NO, Tetsuo<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

北西太平洋の背弧海盆の1つである日本海では、形成過程を考察するために、多くの海底地震計(OBS)を用いた屈折法・広角反射法地震探査(OBS探査)が行われ、その結果、日本海各地域の地殻構造が明らかになっている。日本海の北部から東部に位置する日本海盆では、海洋底拡大によって形成した海洋性地殻が存在している(Hirata et al., 1992)。さらに近年行われた地震探査では、青森県西方沖に位置する日本海盆南縁部においても、海洋底拡大によって形成した地殻構造が存在していることが示されている(No et al., submitted)。一方、日本海盆南縁部と大陸棚部との間の海陸遷移域の地殻構造は、標準的な海洋性地殻より厚くなっている(No et al., submitted)。しかしながら、この厚い海洋性地殻の成因については、よくわかっていない。この海陸遷移域に分布する厚い海洋性地殻の成因を明らかにすることは、日本海形成過程、および東北日本弧背弧側の進化過程の理解を促進できると考えられる。本研究では、厚い海洋性地殻の成因を明らかにするために、青森県西方沖および男鹿半島北方沖の日本海盆南縁部から大陸棚部にかけて行われたOBS探査で得られたOBS記録より、日本海盆南縁部から海陸遷移域、および大陸棚部にかけての領域のP波、S波速度構造、および $V_p/V_s$ 構造を求めた。

青森県西方沖、および男鹿半島北方沖の日本海盆南縁部から日本海東縁の大陸棚部に至る海域においてOBSとエアガンアレーを制御震源として用いたOBS探査が実施された(佐藤・他, 2013 連合大会; No et al., submitted)。この探査で海盆域や海陸遷移域に設置したOBSの鉛直動成分記録では、地殻内や最上部マントルを通過した屈折波、地殻内反射面やモホ面からの反射波、一方、水平動成分記録では、基盤で変換したと考えられるPPS波やPSS波が確認できる。本研究では、基盤で変換したと考えられるPPS波、およびPSS波の走時を用いて、海盆南縁部から大陸棚部にかけての堆積層と地殻内のS波速度構造を求め、求めたS波とP波速度構造(No et al., submitted)より、 $V_p/V_s$ 比を求めた。

青森県西方沖の日本海盆南縁部では、堆積層内の $V_p/V_s$ 比は4~8の値であり、水平方向に変化に富んでいる。海盆南縁部の地殻内では、地殻上部、下部の $V_p/V_s$ 比はそれぞれ約1.85, 1.8の値であった。また、厚い海洋性地殻が存在している遷移域では、地殻上部の $V_p/V_s$ 比はおおよそ1.85の値を示している。これらの $V_p/V_s$ 比の値から、海盆南縁部の地殻全体、および遷移域の地殻上部は海洋性地殻起源と考えられる。No et al. (submitted)のP波速度構造の解釈とも調和的であり、日本海盆南縁部から海陸遷移域にまで、日本海拡大によって形成された海洋性地殻が及んでいることが推測される。



## 地震探査による日本海の地殻構造研究の最近の成果と今後の展開 Crustal structure study of the Sea of Japan: Recent results and future perspectives

野 徹雄<sup>1\*</sup>; 佐藤 壮<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 石山 達也<sup>2</sup>; 佐藤 比呂志<sup>2</sup>; 高橋 成実<sup>1</sup>; 及川 信孝<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>1</sup>  
NO, Tetsuo<sup>1\*</sup>; SATO, Takeshi<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>2</sup>; TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>; OIKAWA, Nobutaka<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo

近年、日本海では、東京大学地震研究所が実施した二船式地震探査(佐藤・他, 2007)、海陸統合地震探査(東京大学地震研究所, 2013)、石油天然ガス・鉱物資源機構の物理探査船「資源」による日本海における基礎物理探査(e.g. 石油天然ガス・鉱物資源機構, 2013)など、様々な新しい地震探査データが取得され、日本海の地殻構造研究は新しい段階に入ってきている。

さらに、「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」などのプロジェクトにより、日本海東縁において地震探査を実施し、地殻構造研究の側面から地震発生帯の研究を進めてきた。調査は、能登半島沖から西津軽沖にかけての大陸棚から大和海盆・日本海盆に至る海域で、マルチチャンネル反射法地震探査と海底地震計(OBS)による地震探査を行ってきた。これらの調査観測研究の結果、OBSによるP波速度構造から日本海東縁の地殻構造は少なくとも3つ(島弧地殻・厚い海洋地殻・海洋地殻)に区分できた(e.g. Sato et al. 2014; No et al. submitted)。島弧地殻は大陸棚・佐渡島・白山瀬・佐渡海嶺などの領域に分布し、厚い海洋地殻は大和海盆・富山トラフ・日本海中部地震震源域付近～日本海盆南東部に分布し、海洋地殻は日本海盆(厚い海洋地殻の領域より西側)に位置する。これらの地殻構造の区分とひずみ集中帯の分布を重ねてみると、島弧地殻の中にひずみ集中帯が分布しているタイプ、島弧地殻と厚い海洋地殻の境界付近にひずみ集中帯が分布しているタイプ、厚い海洋地殻と海洋地殻の境界付近にひずみ集中帯が分布しているタイプの3つに分けられることもわかった。さらに、北部(秋田沖～西津軽沖)と南部(新潟沖～山形沖)でも地殻構造とひずみ集中帯の関係には違いがあり、日本海東縁における北部と南部での地震活動の違いに関係している可能性が得られた(海洋研究開発機構, 2013)。これらの最近取得されたデータやそれに伴う研究は、日本海における地震研究や長期評価に対して、より精度の高い議論や評価の見直しに寄与できるものと考えている。

2013年度から、日本海の地震調査研究に関わるプロジェクトがいくつか新たにスタートした。その1つである「日本海地震・津波防災プロジェクト」では、2014年度以降調査空白域である北海道西方沖や能登半島沖以西の日本海において、地震探査を実施し、新たなデータを加えた日本海での地殻構造研究を実施する予定である。この研究によって、日本海の地震断層の位置や大きさの精度を向上させ、加えて、活断層をはじめとする地震断層を形成する要因となっている日本海の地殻構造や構造発達の問題に取り組む。その結果として日本海の地震発生帯の全体像をとらえる情報を得たい。

キーワード: 日本海, 地殻構造, 反射法地震探査, 海底地震計

Keywords: the Sea of Japan, crustal structure, MCS, OBS



## 日本海地震・津波調査プロジェクト: 上越-北陸沖地殻構造探査の成果 Results of 2013 Off-Joetsu and Hokuriku survey for the integrated research project on seismic and tsunami hazards around

佐藤 比呂志<sup>1\*</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 白石 和也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 武田 哲也<sup>3</sup>  
SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; SHIRAIISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> (株) 地球科学総合研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI. Inc., <sup>3</sup>NIED

はじめに:

日本海側の地域では明瞭な沈み込み帯は形成されておらず、津波や強震動を引き起こす活断層が多数分布している。これらの活断層の深部延長から発生する地震や津波を予測するためには、具体的な震源・波源モデルの構築が必要である。また、日本海沿岸地域の多くは、海底から隆起した地域であり、活断層が分布する可能性が高い。こうした背景から、2013年度から文部科学省は「日本海地震津波調査プロジェクト」を開始した。このプロジェクトでは、日本海の沖合から沿岸域及び陸域にかけての領域で、津波の波高予測を行うのに必要な、日本海の津波波源モデルや沿岸・陸域における震源断層モデルを構築するための観測データを取得する。このプロジェクトの一環として、2013年には二船式反射法地震探査・海陸統合探査を上越沖・北陸沖にかけて地殻構造調査を実施した。

地殻構造調査:

ケーブル船と発震船からなる二船式で、9測線、測線長計715kmの区間について反射法地震探査データを取得した。魚津から富山トラフを横切り能登半島東方沖にいたる測線では、陸上15kmと3kmのベイケーブルを設置し、延長103kmの海陸統合測線(T1)とした。発震船のエアガン容量は3020 cu.inch、ケーブル船は2km、156chのケーブルを曳航し、480cu.inchのエアガンを交互発震させた。最大オフセット距離はT1測線で12km、その他の測線では4?8kmとした。T1の陸上測線では、50m間隔で受振器を設置し、陸上では大型バイプロサイズ4台を用いて発震を行った。

地質学的な解釈: 飛騨山脈の北縁から富山トラフを横断する海陸統合測線(T1)では、富山トラフ下ではP波速度5km/sec層が海面下5kmに位置し、飛騨山脈と合わせた高度差は8kmに及ぶ。この海岸線付近の地下4?5kmには南に傾斜する大規模な断層が形成されている。また、能登半島の南東縁には東西走向の北傾斜の逆断層が形成されている。この構造は、新潟-佐渡海峡などの日本海拡大期の中絶リフトの構造と類似している。中越?上越沖では、中絶リフト内に堆積した厚い新第三系中に断層関連褶曲が形成されている。能登半島沖から金沢沖では、正断層の再活動による反転構造が顕著である。とくに能登半島以西の地域では、中期中新世のほぼ南北方向からの短縮変形を被る。第四紀以降の再活動は選択的であり、中新統の褶曲は鮮新統の非変形堆積層に被服される。本学会において、構造探査の成果については、佐藤ほか、石山ほか、加藤ほかで詳しく報告する。

キーワード: 日本海, 震源断層, 地殻構造, 反射法地震探査, 北陸沖, 上越沖

Keywords: Sea of Japan, source fault, crustal structure, seismic reflection profiling, Off-Joetsu, off-Hokuriku

## 1998-2000年北海道トランゼクトデータの再解析による日高衝突帯の構造 IV Lithospheric Structure of the Hidaka Collision Zone, Hokkaido, from Reanalysis of 1998-2000 Hokkaido Transect Data IV

岩崎 貴哉<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>2</sup>; 伊藤 谷生<sup>3</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 平田 直<sup>1</sup>; 在田 一則<sup>4</sup>; 野田 克也<sup>5</sup>; 藤原 明<sup>5</sup>; 阿部 進<sup>5</sup>; 菊池 伸輔<sup>6</sup>; 鈴木 和子<sup>7</sup>

IWASAKI, Takaya<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>2</sup>; ITO, Tanio<sup>3</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; ARITA, Kazunori<sup>4</sup>; NODA, Katsuya<sup>5</sup>; FUJIWARA, Akira<sup>5</sup>; ABE, Susumu<sup>5</sup>; KIKUCHI, Shinsuke<sup>6</sup>; SUZUKI, Kazuko<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 千葉大学, <sup>3</sup> 帝京平成大学, <sup>4</sup> 北海道大学, <sup>5</sup> 地球科学総合研究所, <sup>6</sup> 石油資源開発株式会社, <sup>7</sup> シュランベルジュ

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Chiba University, <sup>3</sup>Teikyo Heisei University, <sup>4</sup>Hokkaido University, <sup>5</sup>JGI. Inc., <sup>6</sup>JAPEX, <sup>7</sup>Schlumberger Ltd.

The Hidaka region in the central part of Hokkaido Island, Japan, is known as an arc-arc collision zone ongoing from the middle Miocene. In 2012, we started reinterpretation for a series of seismic reflection/refraction surveys from 1994 to 2000 in this collision zone. In this analysis, we used integrated and sophisticated processing and analysis techniques, including CRS/MDRS method for seismic reflection data and refraction tomography both very dense arrival time data from both the reflection and refraction/wide-angle reflection data. The most important finding so far obtained is a clear image of the NE Japan Arc subducting eastward under the northern part of the collision zone. However, the following problems are remained unsolved.

(1) Shallow structure beneath the Hidaka Collision zone is still unsolved. Particularly, the structure just east of the Hidaka Main Thrust is not sufficiently evaluated from our seismic data.

(2) Delamination of the Hidaka crust as in the southern part of this collision zone is not unclear. Our CRS/MDRS processing for the reflection data provided no positive evidence for the delamination.

(3) Deeper collision structure of the NE Japan Arc and the Kuril Arc is still not constrained. It is necessary to elucidate the subducting structure of the NE Japan Arc from amplitude data as well as travel time data.

In this paper, we focus the items (1) and (3) from seismic refraction/wide-angle reflection approach. Previous refraction tomography elucidated a thick (4-5 km) undulated sediments in the hinterland, the outcrop of crystalline crust beneath the Hidaka Metamorphic Belt with higher  $V_p$  and  $V_p/V_s$  and an enormously thick (>8-10 km) sedimentary package beneath the foreland. In order to obtain the more reliable structure model, we intensively revised the travel time data obtained both from seismic reflection/wide-angle reflection line and reflection lines. The seismic tomography using these revised data sets indicate a clearer high velocity (>6.1 km/s) anomaly just east of the HMT. We also recognized some wide-angle reflections around 5-10 km depth beneath the HMT, from which we expect to determine the finer structure at the collision front. Our present analysis indicates the wide-angle reflection data sample a part of the lower crust of the subducting NE Japan Arc beneath the fold-and-thrust belt. According to the preliminary result, its velocity is ranging from 6.5-7.0 km/s. By combining the amplitude analysis, we expect to estimate the more reliable Moho depth of the NE Japan Arc than in the previous analyses.

キーワード: 制御震源地震探査, 衝突, 島弧, 地殻構造, リソスフェア

Keywords: active source seismic experiment, collision, arc, crustal structure, lithosphere

## 稠密地震観測による東北地方南東部下の地殻構造 Seismic crustal structure beneath the southeastern part of northeast Japan by dense seismic array observation

蔵下 英司<sup>1\*</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 東中 基倫<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>  
KURASHIMO, Eiji<sup>1\*</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; HIGASHINAKA, Motonori<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研, <sup>2</sup> 地科研

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI, Inc.

2011年東北地方太平洋沖地震は、東北地方内陸部を含む広大な領域に応力変化をもたらし、誘発地震発生などの大きな影響を及ぼしている。今後の地震発生のポテンシャルを評価する為には、プレートや内陸地震の震源断層の形状などを明らかにすることが必要不可欠である。そこで、活断層の深部形状・地殻構造を明らかにする目的で、文部科学省の受託研究「東北地方太平洋沖で発生する地震・津波の調査観測」の一環として、バイブレータ震源を用いた深部地殻構造探査が福島県相馬郡新地町から刈田郡七ヶ宿町に至る55kmの測線で実施された(佐藤・他, 2013)。得られた反射法断面図からは、双葉断層や福島盆地西縁断層の深部形状に関する知見が得られつつある(佐藤・他, 2013)。さらに深部の地殻から上部マントルに至る詳細な構造を理解するためには、制御震源と自然地震を組み合わせた総合的な解析が有効である。深部地殻構造探査測線を含む福島県相馬郡新地町から山形県高島町に至る約70kmの区間には、オフラインレコーダ(篠原・他, 1997)を40台設置し、2012年8月16日から12月24日まで連続収録を行っている。これら臨時観測点では、バイブレータ震源からの信号に加えて自然地震が観測されている。そこで、制御震源と自然地震の両方の観測データを用いてトモグラフィー解析(Thurber and Eberhart-Phillips, 1999)を行った。解析を行うにあたって、各臨時観測点で得られた記録は連続記録である為、解析に使用するイベントリストに基づいたデータ編集作業が必要である。研究対象地域(緯度37.2°-38.5° N; 経度139.6°-141.3° E)では、気象庁一元化震源カタログによると、観測期間中に2,956個の震源が決定されている。これら自然地震とバイブレータの発震時刻に従って、連続記録からイベント毎へのデータ編集を実施した。その後、臨時観測点の波形データと測線周辺の40点のテレメータ観測点で得られている波形データとの統合作業を行った。このように作成したイベントデータから、測線近傍で発生した200個の自然地震を抽出し、P波・S波の手動検測を行った。また、バイブレータ震源を観測したデータに対しては、発震点毎に垂直重合処理、震源波形との相関処理を行った後に、P波初動の検測作業を行った。得られたP波速度構造からは、測線東部と測線中央部よりやや西側の浅部に低速領域が確認できる。このような測線下の浅部における速度構造の変化は、表層地質と良く対応している。

キーワード: 稠密地震観測, 地震波トモグラフィー, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: dense seismic array observation, seismic tomography, the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

## 重力測定に基づく双葉断層北部周辺の浅部地質構造の推定 Shallow geologic structure around the northern part of the Futaba Fault, northeast Japan, based on gravity survey

越谷 信<sup>1\*</sup>; 照井 匡子<sup>2</sup>; 米澤 健汰<sup>1</sup>; 佐藤 比呂志<sup>3</sup>; 加藤 直子<sup>3</sup>; 阿部 進<sup>4</sup>; 東中 基倫<sup>4</sup>  
KOSHIYA, Shin<sup>1\*</sup>; TERUI, Kyoko<sup>2</sup>; YONEZAWA, Kenta<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>3</sup>; KATO, Naoko<sup>3</sup>; ABE, Susumu<sup>4</sup>; HI-  
GASHINAKA, Motonori<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 岩手大学工学部, <sup>2</sup> 岩手大学工学研究科, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所, <sup>4</sup> 地球科学総合研究所

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Iwate Univ., <sup>2</sup> Graduate School of Engineering, Iwate Univ., <sup>3</sup> ERI, Univ. of Tokyo, <sup>4</sup> JGI, Inc.

### 1. はじめに

双葉断層は数百 m の破砕帯を伴う阿武隈山地の東縁を画する断層で、白亜紀および古第三紀に大規模な左横ずれ断層として活動したといわれている。この断層は、NNW-SSE 走向で、北部では割山ホルストを境に東西 2 条の断層に分かれる。前期から中期中新世には、東西方向の引張応力場のもとで西側の断層が正断層として活動し、半地溝を形成し、崖錐性角礫や碎屑性堆積物により埋積された。その後、右横ずれ断層として活動した後、現在は西側隆起成分をもつ左横ずれ断層として活動しているとされている。このように双葉断層の活動史は複雑であり、それぞれの活動に伴う地質構造との関連は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では重力調査により、地下密度構造を推定し、反射法地震探査や屈折法地震探査の結果とあわせて、地下地質構造の推定を行った。

### 2. 重力測定・解析

重力調査は、福島県相馬郡新地町から宮城県伊具郡丸森町に至る東西約 12km の測線 1 と宮城県亶理郡山元町から角田市に至る約 13km の測線 2 で行った。測定点数はそれぞれ 71 および 60 で、測定点間隔は 200m を基本とした。使用した重力計は、LaCoste & Romberg 社製 G 型重力計 (G824) である。観測点の標高は、主に電子レベルを使用して測定し、一部 RTK-GPS を用いた。取得したデータの処理は、概ね地質調査総合センター (2004) に従っているが、球面ブーゲー補正の補正範囲は、地形補正の補正範囲に合わせて 45km とした。また、ブーゲー補正および地形補正に用いた仮定密度は、調査地域の地質や屈折法地震探査の結果を考慮して、2.20 g/cm<sup>3</sup> とした。得られたブーゲー異常に対して、広域的な重力異常の影響を取り除くためトレンド補正を行った。

### 3. 結果

いずれの測線においても、トレンド補正後のブーゲー異常値は、先新生界の基盤岩が分布する割山ホルストで最大となり、その西側でいくつかの極大値を示す。

### 4. 密度構造モデルと地質構造

密度構造モデルでは、調査地域の地質を考慮して、密度の異なる 4 層 (第 1 層: 2.00g/cm<sup>3</sup>, 第 2 層: 2.20g/cm<sup>3</sup>, 第 3 層: 2.55g/cm<sup>3</sup>, 第 4 層: 2.67g/cm<sup>3</sup>) を仮定した。上位から第 1 層は表層構成層や鮮新統, 第 2 層は中新統, 第 3 層は中新統の礫岩, 第 4 層は基盤岩類に相当する。割山ホルストの西側では第 2 層と第 3 層の間に、東側では第 2 層と第 4 層の間に上下が逆転する部分があると推定した。

割山ホルストの西側に分布する下部から中部中新統は、西側の双葉断層によって東縁を画されており、さらに西側ではいくつかの伏在する正断層で変位を受けている。また、西側の双葉断層から派生した断層により、第 2 層と第 3 層が逆断層変位を受けている。東側の双葉断層は西側の双葉断層のショートカット断層と位置づけられる。

講演ではこれらの断層と地質構造発達史との関連を示す予定である。

文献

地質調査総合センター, 2004, 日本重力 CD-ROM, 第 2 版.

キーワード: 双葉断層, 重力異常, 活断層

Keywords: Futaba fault, gravity anomaly, active fault



## 北陸地域の活断層・変動地形と地殻構造の特徴 Structural characters of active faults, crustal architecture, and permanent deformation of the Hokuriku region

石山 達也<sup>1\*</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 武田 哲也<sup>2</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>  
ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>2</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Eathquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

北陸地域に分布する活断層は、富山トラフの長軸と平行な概して北北東走向の逆断層であり、日本海拡大時に形成された背弧リフトの西部に位置している。これらは新潟地域などの日本海側の逆断層と同様に背弧リフトの構造に規制された活構造であると予察されるが、その実態については未解明である。文部科学省の「日本海地震津波調査プロジェクト」の一環として、2013年に上越・北陸沖での地殻構造調査が実施された(佐藤ほか、本大会)。本講演では、変動地形・地質構造の特徴と構造探査データに基づき、北陸地域の活断層・変動地形と地殻構造の特徴について述べる。新生代以降の北陸地域の地形・地質を概観すると、その特徴は(1)富山トラフ東側の隆起・傾動帯(飛騨山地北西縁)(2)富山平野、砺波平野などの沈降域と新第三系・第四系からなる丘陵、(3)富山トラフ西側の隆起帯(能登半島)に大別される。富山トラフを横断する構造探査では、このような地形・地質的特徴に対応して、富山トラフは構造的な低所に、その両側の飛騨山地北西縁および能登半島は構造的な高所をなしていることが分かった。さらに、Hi-netのデータを用いた地震波トモグラフィによる速度構造を見ると(Matsubara and Obara, 2011)、富山トラフの地下には、北部フォッサマグナと同様の地殻の薄化現象が認められ、日本海拡大時の主要なリフト軸の一つであったと考えられる。(2)の逆断層は、このようなリフト軸近傍の最も活発な正断層運動と、比較的厚い地溝充填堆積物が生じた場所に分布しており、このような構造に規制された活構造と理解される。また、重力異常データを見ると、富山平野・砺波平野などの堆積平野下に伏在する逆断層が数多くあると考えられる。さらに重要な点として、2013年に実施された構造探査では、富山トラフと東側の飛騨山脈の間には大規模な逆断層が見出された。(1)はこのような背弧リフトの端部を規制する地殻規模の断層に起源を持つ逆断層運動による隆起・傾動帯である可能性が高い。飛騨山地北西縁部に分布する新第三系の同斜構造は、両白山地北西縁に北西方向に続く。この縁辺の平野部では段丘面の傾動や海成段丘面の分布が認められており、crustal wedgeによる隆起・変形を反映している可能性がある。また、2013年の構造探査では富山トラフと能登半島の間にも大規模な逆断層が見つかり、能登半島の隆起に寄与した可能性がある。このように、(1)・(3)の地形・地質学的な特徴と、深部構造探査による地殻構造の特徴には共通して説明できる点が多く、また隣接する北部フォッサマグナや新潟地域など中絶した背弧リフト帯の構造および第四紀のテクトニクスの特徴との類似点が多く認められる。

## 首都圏直下のフィリピン海スラブの相転移と温度 Phase changes and temperature of the subducted crust of Philippine Sea slab beneath Kanto, Japan

石川 正弘<sup>1\*</sup>; 中川 茂樹<sup>2</sup>; 酒井 慎一<sup>2</sup>; 平田 直<sup>2</sup>; 佐藤 比呂志<sup>2</sup>; 笠原 敬司<sup>3</sup>  
ISHIKAWA, Masahiro<sup>1\*</sup>; NAKAGAWA, Shigeki<sup>2</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>2</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>2</sup>; KASAHARA, Keiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学大学院環境情報研究院, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>Graduate School of Environment Information Sciences, Yokohama National University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction

フィリピン海プレートは本州の下に沈み込む。しかし、フィリピン海プレートの東縁には海洋性島弧（伊豆小笠原マリアナ弧）が存在するために、関東直下では伊豆小笠原弧の火山フロントから前弧域がフィリピン海スラブとして沈み込んでいる。首都圏では過去にマグニチュード8級の巨大地震が発生しており（1703年元禄地震や1923年関東地震等）、フィリピン海スラブ上面が関東地震震源断層に相当する可能性が高い（Sato et al., 2005）。また、首都圏ではフィリピン海スラブ内で発生するスラブ内地震も想定される。したがって、相模トラフから沈み込んだフィリピン海プレートの構成物質と物性を推測することは、首都直下地震を考察する上でも重要である。今回の発表では、首都直下地震観測網（MeSO-net）による地震波トモグラフィー（Nakagawa et al., 2011）と岩石の鉱物組み合わせの相平衡計算の結果に基づき、首都圏直下のフィリピン海スラブの構成岩石を推測し、沈み込みに伴う海洋地殻の相転移とスラブ温度を検討した。

首都直下地震観測網（MeSO-net）による地震波トモグラフィー（Nakagawa et al., 2011）に基づく、首都圏直下のフィリピン海スラブ（地殻）は深さ30 kmと40 kmで段階的にP波速度が上昇している。これらの2段階のP波速度の上昇は沈み込んだ海洋地殻（フィリピン海スラブ）の相転移に対応すると予想される。2段階目の速度上昇では、P波速度は周囲のマントルと同等な速度まで上昇しており、沈み込んだ海洋地殻（フィリピン海スラブ）がエクロジャイトに相転移したと推測される。伊豆弧の前弧玄武岩の化学組成を用いて鉱物組み合わせの相平衡計算をTheriak-Dominoソフトウェアを用いて計算した結果、やや暖かいスラブの沈み込みに伴い約30 kmで沈み込んだ前弧地殻がざくろ石角閃岩に相転し、約40 kmでさらにエクロジャイトに相転移したと考えると地震波トモグラフィーから得たフィリピン海スラブの速度を説明することが可能である。今回の計算では、スラブが冷た過ぎても熱過ぎても深さ約30 kmと約40 kmでの段階的なP波速度の上昇を説明することは出来ない。なお、講演では具体的にスラブ温度について言及するが、今回のスラブ温度の推定は地震波速度と鉱物組み合わせの相平衡計算を組み合わせた手法であり、従来の熱伝導計算による温度構造モデルとはまったく異なるものである。

キーワード: スラブ, 相転移, スラブ温度, 関東, フィリピン海プレート, 地殻  
Keywords: slab, phase change, slab temperature, Kanto, Philippine Sea Plate, crust

## 重力から見た別府湾ならびに周辺の地下構造 Geologic structure in and around the Beppu Bay estimated by gravity analysis

山北 聡<sup>1\*</sup>; 工藤 健<sup>2</sup>; 伊藤 谷生<sup>3</sup>  
YAMAKITA, Satoshi<sup>1\*</sup>; KUDO, Takeshi<sup>2</sup>; ITO, Tanio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 宮崎大学教育文化学部, <sup>2</sup> 中部大学工学部理学教室, <sup>3</sup> 帝京平成大学現代ライフ学部  
<sup>1</sup>University of Miyazaki, <sup>2</sup>Chubu University, <sup>3</sup>Teikyo-Heisei University

1988~1990年に京都大学理学部と(株)地球科学総合研究所によって行われた別府湾ならびに豊後水道における海上反射法地震探査の成果(由佐ら, 1992)は、九州における中央構造線の構造ならびに随伴する堆積盆地の形成に関する研究の新たな展開の契機となった(山北ほか, 1995; Ito et al., 1996)。しかし、由佐ら(1992)の示した領家帯の速度は花こう岩と変成岩から構成される同帯の速度としては低過ぎ、領家帯上面の形状は良いものの領家帯下の中央構造線(MTL)の傾斜角が小さく評価されている懸念があった。また、別府湾奥部が反射法測線群の端部であることから別府湾堆積盆地構造が完全には解明されずに残されていた。一方、別府湾内ならびに周辺には由佐ら(1992)が提供したものを含めてたくさんの重力データが存在しており(地質調査所編, 2000; Gravity Research Group in Southwest Japan, 2001); 正確な反射断面データと結合することで、別府湾堆積盆地の構造を解明することが期待される。幸い昨秋、多重反射を抑制しつつ速度構造を再決定したうでの豊後水道測線(J測線)再処理断面が物理探査学会において新たに報告された(阿部ほか, 2013)。そこでこの再処理断面と重力データを用いて、陸域で朝見川断層(AF)を横切り、別府湾中央部をG測線にそってN70E方向に走り、別府湾中央断層(BCF)を横断して、別府湾口にいたる約35kmの地下構造を推定する作業を行った(図A)。構成する地質体は、三波川層(Sm,  $\rho=3.0\text{g/cm}^3$ )、領家帯(Rk,  $\rho=2.8\text{g/cm}^3$ )、別府湾新規堆積物下部層(BI,  $\rho=2.6\text{g/cm}^3$ )、同上部層(Bu,  $\rho=2.4\text{g/cm}^3$ )である。地質体の境界については、J測線再処理結果ならびに既存の地質学的データから中央構造線(MTL)の地下における位置と形状、ならびに朝見川断層の陸上位置のみを与え、他は重力データと適合するように試行錯誤を繰り返して得られたのが、図Bである。由佐ら(1992)のFig.9に示されたG測線の基盤(領家帯)上面形状(最奥部は不明)はこの重力解析から得られた領家帯上面とほとんど一致していることから図の信頼性は非常に高いと判断される。そこでこの図を基に、由佐ら(1992)の成果も取り入れて別府湾堆積盆地の構造を考察した結果、以下の点が明らかとなった。

1. 別府湾堆積盆地の中心部分(湾奥部)はいずれもリトリックな正断層である北東傾斜の朝見川断層系(AFS)と南西傾斜の別府湾中央断層系(BCFS)によって形成されている。両断層系とも由佐ら(1992)のFig.9の示すとおり別府湾新規堆積物中にロールオーバー構造を伴っている。

2. AFSは3つの断層(I, II, III)によって構成されいずれも地下のMTLに収斂する。断層AFS-IIが新規堆積物最上部まで切断しているかどうかは、反射法測線Gの西端部に近い不明である。鉛直変位の総計についてはAFの西側に新規堆積物がどの程度存在するか、さらに領家帯上面がどの程度侵食されてきたかによっても変わるが3000mに達する可能性がある。

3. BCFSを構成するBCFS-IとBCFS-IIの2つの断層は、図が小縮尺のため読み取り難いが新規堆積物上部(Bu)底面をそれぞれ250m, 150m程度鉛直変位させ、最上部層まで切断している。しかし、いずれも新規堆積物下部(BI)底面、すなわち基盤の領家帯を切断していない。

4. MTLとそれに接続するAFSの活動により上盤(領家帯)が図上で東側に運動することによって別府湾堆積盆地が形成・成長したと判断される。BCFSはこのプロセスのなかで新規堆積物内に形成され、盆地成長に寄与している断層群である。

以上の結果は、山北・伊藤(1999)が提示した、開放性屈曲を伴う傾斜した断層面をもつ横すべり断層による堆積盆地形成モデルと、大局的には合致する。同モデルでは、堆積体内部に形成される主断層とは逆傾斜の副次的断層群の効果については、考慮していなかったが、別府湾堆積盆地では一定の効果は有している。ただし、副次的断層群としてのBCFSは堆積盆地の基盤を切断しておらずその寄与量はそれほど大きくはない。

今後、山北・伊藤(1999)のモデルによる別府湾堆積盆地形成過程の解明を更に進めるため、以下のような検討が必要であろう。

1. MTLが低角化する深度を確定する。
2. MTLに沿う運動における水平成分と鉛直成分の比率を見積もる。

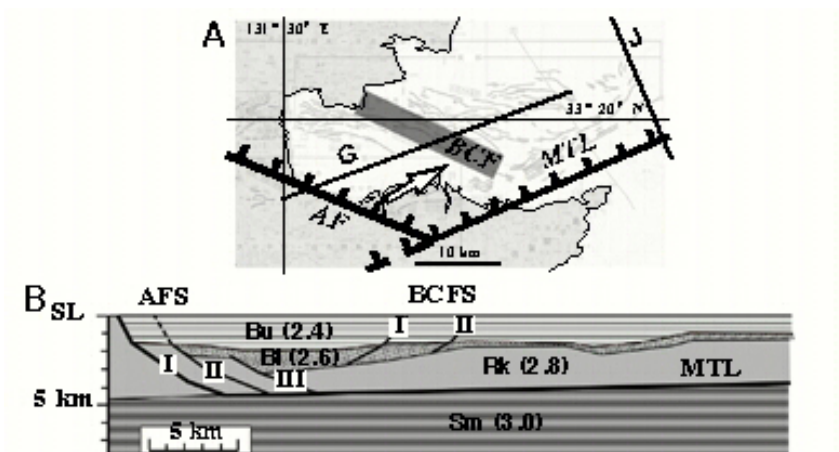
このことをすすめるためにも、京都大学と(株)地球科学総合研究所が行った反射法地震探査データ再処理作業の進捗を期待したい。

キーワード: 重力解析, 別府湾, 中央構造線, 朝見川断層, 別府湾中央断層  
Keywords: Gravity analysis, Beppu Bay, MTL, Asamigawa Fault, Beppu Bay Central Fault

SCG68-09

会場:502

時間:4月30日 11:15-11:30





## アルカリ玄武岩及び捕獲岩から推定する西南日本下部地殻の構造・発達史 Structure and evolution of the lower crust constrained from alkaline basalts and xenoliths in southwest Japan

井形 瑛梨<sup>1\*</sup>; 大森 聡一<sup>2</sup>; 岩森 光<sup>3</sup>  
IGATA, Eri<sup>1\*</sup>; OMORI, Soichi<sup>2</sup>; IWAMORI, Hikaru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 放送大学, <sup>3</sup> 独立行政法人 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo institute of technology, <sup>2</sup>The open university of Japan, <sup>3</sup>Japan Agency for Marine-Earth and Technology

The continental crust is unique to the Earth and, in spite of its small mass, is geochemically an important reservoir, concentrating about half of the radiogenic heat producing elements. In order to understand the differentiation history of the Earth, it is essential to decipher how and when the continental crust has been formed.

In contrast to the upper continental crust, which has been well surveyed with direct means, the lower continental crust is largely unknown in terms of composition, mineralogy and age distribution of formation. In this study, we investigate the xenoliths that have been derived possibly from the lower crust, in terms of petrology (mineral assemblages and their composition, modal abundances and bulk composition) and geochronology (zircon U-Pb age dating of both the xenoliths and the host basalt). Study area is located on the Kibi Plateau in southwest Japan. The xenoliths are classified into 4 types by petrography and EPMA analysis; Type 1, pyroxenite; Type 2, eclogitic gabbro; Type 3, anorthosite; Type 4, kyanite/garnet-bearing felsic granulite. Pseudosection and mineral stability analyses were performed by a thermodynamic program "Perplex". These analyses have revealed that pyroxenite is stable beneath the Moho and its seismic velocity estimated from pseudosection ranges from 7.23 to 7.65 km/s. Therefore pyroxenite corresponds to the olivine-pyroxenite layer under the Moho. Gabbro was formed at 8-10 kbar and 873-940 K and its velocity is higher than pyroxenite. Granulite is stable at 7.5- kbar and about 1000 K and its velocity is very low. In spite of the density gap between the eclogitic gabbro and granulite (3900 and 2740 kg/m<sup>3</sup>), the analysis suggests that the felsic granulite exhibits a higher equilibration pressure and may even underlay the eclogitic gabbro. Moreover, composition of the lower crust becomes more felsic than previously thought.

Ages of the eclogitic gabbro xenolith and the host basalt coincide, showing 70 Ma. It is argued that the subducted sediments (now appear as felsic granulites) were subducted and underplated to the bottom of the lower crust during the last 30 million years or so. If such a mechanism operates worldwide, then the continental crust may have an intermediate to felsic composition even without a hypothetical process of lower crustal delimitation.

The authors thank T. Hirata, K. Tani, JI. Kimura and Q. Chang for U-Pb zircon age dating.

## アジョイントトモグラフィーによる東アジアの三次元地震波速度構造の推定 Three-dimensional seismic velocity structure beneath East Asia using adjoint tomography

三好 崇之<sup>1\*</sup>; 大林 政行<sup>1</sup>; 東野 陽子<sup>1</sup>; 坪井 誠司<sup>1</sup>  
MIYOSHI, Takayuki<sup>1\*</sup>; ODAYASHI, Masayuki<sup>1</sup>; TONO, Yoko<sup>1</sup>; TSUBOI, Seiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JAMSTEC

東アジアは大小さまざまなプレートが集合するテクトニックに複雑な地域である。従来、トモグラフィー研究では波線論に基づき三次元不均質構造モデルが推定されてきたが、波動理論に基づくインバージョンから三次元不均質構造モデルの構築を行うことが可能であることが示された（例えば、大林ほか、2010 SSJ; 三好ほか、2013 SSJ）。本研究では、複雑な構造を有する東アジア地域の三次元地震波速度構造の推定をより厳密に行うことを目的として、スペクトル要素法による波形計算を実施し、アジョイントトモグラフィー法によって波形インバージョンを行った。

解析で使用した地震は、2001年1月以降に発生したM5.5以上のもので、Harvard CMTカタログよりhalf durationが5秒以内の161地震を選んだ。インバージョンでは東アジア地域で収録された広帯域地震観測記録を使用し、1地震の平均観測点数は約180点である。理論波形はスペクトル要素法（Komatitsch and Tromp 2001）を用いて三成分の変位波形を計算した。インバージョンの初期構造モデルはObayashi et al. (2009)による走時インバージョンから推定された三次元P波速度構造である。観測波形と理論波形について12.5-100秒と30-150秒のバンドパスフィルタを施し、実体波と表面波の位相を切り出した。地震波速度に関するパラメータのカーネルは、アジョイント法による単純化（Liu and Tromp 2006）を利用して計算を実施し、最急降下法によりインバージョンを行った。大規模計算を要する理論波形計算とカーネル計算は、京コンピュータ等のスーパーコンピュータの256CPUコアで実施した。1回の反復に要する計算時間は約10万CPU時間である。

反復は現在までに4回実施した。修正された構造モデルで計算された理論波形は、観測波形を再現するように改善され、VR値は初期モデルよりも10%程度向上した。インバージョンによって沈み込んだプレート構造など大局的な地下構造モデルが得られ、初期構造モデルよりも速度が数%程度小さいモデルが得られた。また、PREMを基準モデルとしてP波とS波の速度偏差比を求めたところ、深さ100kmでは東アジアの広域でやや高い値(>1.4)を有することがわかった。

本研究は、HPCI戦略プログラム（分野3）「防災・減災に資する地球変動予測」の「地震の予測精度の高度化に関する研究」の一部として行われました。謝辞：地震波形データの一部に防災科学技術研究所広帯域地震観測網F-netの波形データを使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: アジョイント法, トモグラフィー, 地震波速度構造, 東アジア  
Keywords: adjoint method, tomography, velocity structure, East Asia

## ラウ背弧海盆における地殻形成：典型的な海洋地殻からより分化した海洋地殻への遷移

### Seismological evidence for a transition from "hydrous" oceanic crust to typical oceanic crust in the Lau back-arc basin

新井 隆太<sup>1\*</sup>; ダン ロバート<sup>1</sup>  
ARAI, Ryuta<sup>1\*</sup>; DUNN, Robert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ハワイ大学  
<sup>1</sup>University of Hawaii

The Lau back-arc basin, associated with subduction of the Pacific plate beneath the Indo-Australian plate at the Tonga Trench, provides a superb study area to understand the interaction between plate subduction and back-arc spreading: Subducting oceanic lithosphere induces mantle corner flow within the mantle wedge above the subducting plate and releases a large amount of water and other elements into this wedge, producing heterogeneous chemical compositions and fluid gradients beneath the back-arc basin. While petrological studies suggest that the heterogeneity in the mantle source composition, mainly caused by slab-derived fluids, plays an important role for melt supply to the back-arc ridges, variations in thickness and internal structure of crust formed along back-arc ridges are poorly documented. On the basis of seismic tomography analyses, we present a structural model of crust formed along the Eastern Lau Spreading Center within the Lau back-arc basin as evidence for a transition from a "hydrous" type of oceanic crust to a more typical oceanic crust. The seismic data indicate that as the back-arc spreading center moved away from the active arc, the crust thinned from 8-9 km to ~7 km, the lower crust changed from high P wave velocity values (7.2-7.4 km/s) to typical values for oceanic crust (7.0-7.2 km/s), and the upper-crustal volcanic layer changed from a thick low-velocity layer to a thinner layer with more typical wave speeds. The seismic results, in combination with other geophysical and geochemical data, suggest that crustal formation along the ELSC is strongly controlled by the influence of slab water: When a spreading center is near the active arc, water from the downgoing slab is entrained in the melting zone beneath the back-arc ridges where it enhances melting. Thereafter, the water enhances crustal differentiation within sub-ridge magma chambers. This creates an anomalous "hydrous" form of oceanic crust with a thick felsic volcanic layer and a mafic/ultramafic lower crust - features that are not typically observed in crust formed at mid-ocean ridges. The Lau basin has a zoned structure with an abrupt transition from this type of oceanic crust to more typical oceanic crust, which resulted from a rapid change in the influence of slab water as the ridge moved away from the arc. The unique geodynamic setting of the Lau basin, such as proximity of the back-arc ridges to the volcanic arc (<100 km), the relatively low subduction angle of the slab (~45 degrees), and the fast subduction rate at the Tonga trench (>20 cm/yr), probably operate to effectively deliver slab-derived water far beyond the volcanic arc to the back-arc ridges and produce this "hydrous" oceanic crust in the back-arc basin. The abundance and high rate of production of the "hydrous" crust suggests that such crust may make up a significant proportion of the arc-like crust that forms continents. Keywords: Back-arc basin, Crustal differentiation, Oceanic crust, Slab water, Seismic tomography, Eastern Lau Spreading Center

## 地殻変動・地震活動からみた北部フォッサマグナ地域の地体構造 Tectonic province of the northern Fossa Magna region based on the crustal movement and seismic activity

今井 雄輝<sup>1\*</sup>; 竹内 章<sup>2</sup>  
IMAI, Yuki<sup>1\*</sup>; TAKEUCHI, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学教育部, <sup>2</sup> 富山大学大学院理工学研究部

<sup>1</sup>Graduate school of Science and Engineering for Education, University of Toyama, <sup>2</sup>Graduate school of Science and Engineering for Research, University of Toyama

北部フォッサマグナ地域は、日本海東縁ひずみ集中帯（岡村, 2002）と新潟-神戸構造帯（Sagiya *et al.*, 2000）が重複した場所に位置し、過去に 1847 年善光寺地震（M7.4）や 2004 年新潟県中越地震（M6.8）などの地殻内地震が発生した地域である。地殻変動と地震活動が活発な本地域の現行テクトニクスを議論する上では、地殻の活動特性とその区域性を示す「地体構造」の理解が重要である。しかし、本地域の地体構造モデルは十分に明らかになっておらず、深さ方向も含めた 3 次元の詳細な地体構造を明らかにする必要がある。そこで本研究では、近年の地殻変動と地震活動に基づき、本地域の地体構造を明らかにすることを目的とする。

北部フォッサマグナ地域の地殻変動を明らかにするため、国土地理院 GEONET の GPS 観測データを GAMIT 10.4 を用いて解析し、2007 年 10 月から 2011 年 3 月までの約 3 年 6 ヶ月間の水平ひずみ分布を求めた。また、気象庁一元化震源データを使用し、深さ 40 km 以浅における東西方向の震源断面図を作成した。これらのデータから本地域の地体構造について議論する。

2011 年東北地方太平洋沖地震直前までの約 3 年 6 ヶ月間の水平ひずみ分布では、主に北西-南東方向の短縮ひずみが卓越し、新潟-神戸構造帯に対応すると考えられるひずみ集中域は、新潟平野から松本盆地にかけて連続する。このひずみ集中域の東縁は、新潟平野東縁部を北北東-南南西方向に走る新発田-小出構造線（山下, 1970）の位置におおよそ対応し、本構造線東側の越後山脈ではひずみ速度は小さい。竹内（1999）は活断層からみた地体構造区（活断層区）を示しているが、ひずみが大きな信越～新潟堆積盆は逆断層区に対応し、ひずみが小さな中央隆起帯は横ずれ断層区に対応している。また、東西方向の震源断面において地震発生層の深さ分布に注目すると、中央隆起帯や越後山脈が位置する横ずれ断層区では地震発生層下限の深度は 10 - 15 km と浅いが、逆断層区では深さ 20 - 30 km まで深くなっている。さらに地震発生層の上限深度にも変化が見られ、北部フォッサマグナの厚い堆積層に対応する P 波低速度領域内では地震発生数が少なく、地震発生層は低速度領域を避けるように下方へ落ち込む。

以上の結果より、堆積盆地と中央隆起帯の境界部において、ひずみ分布と地震発生層深度分布の明瞭な空間変化があることが明らかになった。地殻の活動特性が大きく変化している箇所では、異なる 2 つの構造区が隣接していることが考えられる。構造境界付近では 1847 年善光寺地震、2004 年新潟県中越地震、2011 年長野県北部地震などの地殻内地震が発生しているが、構造区境界では地殻物性が大きく変化することで応力集中が起きやすく、構造区内部で発生する地震よりも大きな地震が発生する可能性が考えられる。

今後は構造境界の深部延長に注目し、より詳細な地体構造の解明を目指す。さらに、地殻変動・地震活動の時間変化を見ることが、地体構造の挙動変化についても議論していきたい。

キーワード: 地体構造, 北部フォッサマグナ, 地殻変動, 地震活動, 地震発生層

Keywords: tectonic province, northern Fossa Magna, crustal movement, seismic activity, seismogenic layer



## 日本海地震・津波調査プロジェクト: 金沢-能登沖地殻構造探査の成果 Results of 2013 Off-Kanazawa and Noto peninsula survey for the integrated research project on seismic and tsunami hazard

佐藤 比呂志<sup>1\*</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 白石 和也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>1</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>  
SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; SHIRAIISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>1</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup>(株) 地球科学総合研究所  
<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI. Inc.

はじめに:

日本海沿岸地域での津波の波高予測・強震動予測を行うための「日本海地震津波調査プロジェクト」が、文部科学省によって開始された。このプロジェクトの一環として、2013 年度には上越?北陸沖での地殻構造調査を実施した(佐藤ほか, 本大会)。ここでは、2013 年に実施した能登半島西方沖から金沢沖での調査結果について、2007 年能登半島沖地震の震源域での反射法地震探査結果(佐藤ほか, 2007)も含めて報告する。

反射法地震探査:

2013 年 10 月に、ケーブル船と発震船からなる二船式で反射法地震探査データを取得した。本調査海域では、4 測線、測線長計 245km の区間についてデータを取得した。発震船のエアガン容量は 3020 cu.inch、ケーブル船は 2 km、156ch のケーブルを曳航し、480cu.inch のエアガンを交互発震させた。最大オフセット距離は 4 km とした。2007 年に能登半島沖地震の震源域で実施した反射法地震探査では、発震船で使用したエアガン容量は 1500 cu.inch である。

地質学的な解釈: 北陸地域は、東北日本と同様、日本海拡大期に伸張変形を受け、基本的にはこの時期に形成された正断層群によって構造規制を受けている。2007 年能登半島地震の震源断層を含め、活断層のほとんどは正断層に起源をもっている(佐藤ほか, 2007)。2007 年能登半島地震の傾斜は 60° であり、逆断層成分と横ずれ成分をもつすべりが発生した。能登半島以西では、東北日本では見られない特徴として、後期中新世の短縮変形がある。これは、南海トラフにおいて形成年代が新しい四国海盆の沈み込みが停滞したために背弧側に短縮変形が集中したことによる(eg. Kimura et al., 2005)。金沢沖の測線では、基礎試錐「金沢沖」との対比で明らかのように、褶曲した中新統を、変形を示さない鮮新統が不整合に覆っている。第四紀以降の再活動は選択的であり、鮮新統より上位の地層に成長層を形成させている。

キーワード: 日本海, 震源断層, 地殻構造, 反射法地震探査, 金沢沖, 能登沖

Keywords: Sea of Japan, source fault, crustal structure, seismic reflection profiling, Off-Kanazawa, Off-Noto Peninsula

## 日本海地震・津波調査プロジェクト: 上越沖地殻構造探査の成果 Results of 2013 Off-Joetsu survey for the research project on seismic and tsunami hazards around the Sea of Japan

加藤 直子<sup>1\*</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 白石 和也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>

KATO, Naoko<sup>1\*</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; SHIRAIISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所

<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, <sup>2</sup> JGI, Inc.

日本海沿岸地域での津波の波高予測・強震動予測を行うために文部科学省の「日本海地震津波調査プロジェクト」が、2013年度より開始された。このプロジェクトの一環として、2013年度には上越-北陸沖での地殻構造調査を実施した(佐藤ほか, 本大会)。上越沖の測線は、2010年と2011年にひずみ集中帯の重点的調査の一環として実施した構造探査測線の海域延長に相当する。ここでは、両者の調査結果を総合した反射法地震探査断面を提示し、中-上越地域の地殻構造について報告する。

2013年9-10月に、ケーブル船と発震船からなる二船式で反射法地震探査データを取得した。ここで扱う測線は、ひずみ集中帯地殻構造探査「2010年東山-三島測線」の海域延長で、佐渡島南方の米山-小木隆起帯を横断し富山トラフにいたる55kmの区間(H2)、「2011年六日町-直江津測線」の海域延長で、直江津沖から能登半島東方沖に至る135kmの区間(H1)、直江津沖から富山湾の七尾沖にいたる115kmの測線(T2)の東部区間から構成される。発震船のエアガン容量は3020 cu.inch、ケーブル船は2 km、156chのケーブルを曳航し、480cu.inchのエアガンを発震船のエアガンと交互に発震させた。二船間の最大オフセット距離はH1・H2では8km、T2では6 kmとした。「2010年東山-三島測線」と「2011年六日町-直江津測線」の高エネルギー発震点上の計20点で、海上発震をオフラインレコーダーで受振し、スーパーギャザーを構築した。また、深部構造のイメージングのためにT2測線沿いの海岸20点にオフラインレコーダーを設置し、エアガン発震を受振した。ひずみ集中帯での測線については、海底着底ケーブルを使用して探査した海陸統合断面であるため、二船式海上反射断面と接合し、ほぼ連続的な統合断面を作成した。

調査地域の地殻構造は、トモグラフィーや制御震源による調査から、大陸性地殻からなる佐渡島や能登半島に対して、富山トラフ・佐渡海盆から新潟堆積盆地の西部は、海洋性地殻に近い組成を有すると考えられている。こうした地殻構造の差異は、その変形様式に現れており、H1の能登半島東方では、日本海形成期初期の正断層群が高い密度で分布する。これに対して、中絶リフトである海洋地殻的な富山トラフ・佐渡海盆内では断層関連褶曲が形成されているが、垂直変位量は少ない。この大陸地殻と海洋性地殻境界部には、リフト軸部の外側方向に傾斜した逆断層が形成されている。小木海脚は両端を逆断層で限られたポップアップ構造を示し、東縁の断層は堆積層の下部に伏在して、くさび状の断層を伴う。リフト東部の東山-三島測線では、thin-skinned型の複雑な短縮変形を示している。基本的な地質構造は、中越沖地震を発生させた東傾斜の逆断層による短縮変形が発達する。

## 日本海地震・津波調査プロジェクト: 富山トラフ横断海陸統合探査測線 Onshore offshore, deep seismic survey across the Toyama trough

石山 達也<sup>1\*</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 白石 和也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 武田 哲也<sup>3</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>  
ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; SHIRAISHI, Kazuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>3</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所研究開発部, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>R&D Department, JGI, Inc, <sup>3</sup>NIED

はじめに: 日本海沿岸地域での津波の波高予測・強震動予測を行うために、文部科学省の「日本海地震津波調査プロジェクト」が開始された。このプロジェクトの一環として、2013年度には上越?北陸沖での地殻構造調査を実施した(佐藤ほか, 本大会)。富山県宇奈月から北方に富山トラフを横断し、能登半島東方沖に至る測線において、海陸統合深部地殻構造探査測線を実施した。ここでは、富山湾や能登半島北方の二船式反射法地震探査の成果も合わせて紹介する。

反射法地震探査: 富山県宇奈月からほぼ北方 15km 区間に、受振点間隔 50m、陸上探査測線を設定し、海域には 3km にわたって海底着底ケーブルを設置し、150m 間隔での大型バイブレータ 4 台の発震と、エアガン発震を受振した。この北方では能登半島東方沖に至る 85km 区間に渡って、ケーブル船と発震船からなる二船式で反射法地震探査データを取得した。発震船のエアガン容量は 3020 cu.inch、ケーブル船は 2 km、156ch のケーブルを曳航し、480cu.inch のエアガンを発震船のエアガンと交互に発震させた。二船間の最大オフセット距離は海陸統合測線 (T1) では 12 km、富山湾を東西に横切る測線 (T2) では 6 km、能登半島北方海域では 4 km とした。

地質学的な解釈: 富山トラフは、標高 3000m 級の飛騨山地と能登半島の間位置する水深約 1000m の舟状海盆である。これに対応して、富山トラフは構造的な低所に、その両側の飛騨山地北西縁および能登半島は構造的な高所をなしている。すなわち、海陸統合測線の屈折トモグラフィーの解析結果では、P 波速度 5km/sec 層が海面下 5km に位置し、飛騨山脈と合わせた高度差は 8km に及ぶ。陸上のトラフ充填堆積物は一様な北傾斜の構造を示し、この北傾斜の構造は沿岸から 5km まで及ぶ大規模なものである。黒部川扇状地の頂部下 4km 付近では、速度構造の逆転がみられ、南傾斜の断層の存在が推定される。沿岸から 5km 北方の地下 7km にはほぼ水平な深部反射が存在する一方、陸域では北傾斜の反射面が卓越することからも、南傾斜の大規模な断層の存在が示唆される。この断層は堆積層中に伏在し、浅部まで断ち切るような断層にはなっていない。富山トラフの北縁の能登半島との境界部には堆積層に明瞭な変位を与える北傾斜の逆断層が存在する。このようなトラフ両縁がトラフの外側に傾斜した逆断層によって特徴づけられる構造は、佐渡から越後山地に至る中絶トラフの短縮変形構造とよく似ている。この他、富山湾内の断面では七尾沖の北北東走向の地表まで変形を及ぼす断層の存在が明らかになった。能登半島東方から北方沖にかけては日本海形成期のハーフグラベン再活動が顕著である。

## 琉球弧下レシーバー関数による構造解析 Structure analysis of the Ryukyu arc by the receiver function

新城 安尚<sup>1\*</sup>; 中村 衛<sup>1</sup>  
ARASHIRO, Yasuhisa<sup>1\*</sup>; NAKAMURA, Mamoru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 琉球大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Ryukyu University

琉球弧は、南東側にフィリピン海プレートがユーラシアプレートに沈み込む境界である琉球海溝、北西側に伸張場で形成された構造的な背弧海盆として考えられている南海トラフ (Letouzey and Kimura, 1986) を持つ九州南方から台湾東方に至る島弧である。この琉球弧における主要な火山活動はトカラ列島に代表される火山フロント上の活動の他に、背弧海盆である沖縄トラフの形成に伴った活動が想定されている (Kimura, 1985)。また、沖縄トラフの火成活動に関する調査から、沖縄トラフ下において、地殻の伸張だけでなく、性質の異なるマントルの上昇流入が起きていると提唱されている (Shinjo *et al.*, 1999)。

琉球弧におけるレシーバー関数を用いた解析 (McCormack *et al.*, 2013) では、F-net 観測点直下のスラブ内異方性構造が明らかにされている。しかし沈み込み方向にスラブ内構造およびウェッジマントル構造がどのように変化するか、不明であった。そこで F-net 広帯域地震計記録に加えて気象庁の短周期地震計記録も合わせて使い、海溝に直交するレシーバー関数解析断面を作成することで、沈み込み方向にスラブの角度がどのように変化するか明らかにした。

レシーバー関数解析では、中部琉球弧に設置された NIED F-NET の広帯域地震計 3 点、および気象庁の短周期地震計 8 点を使用した。解析期間は 2002 年から 2013 年である。解析には M6.0 以上の遠地地震 113 イベントを使用した。

レシーバー関数解析において、本島直下約 40km の深さにイメージングされた速度不連続面は同じ断面で取った気象庁地震源とおおよそ一致した。これは沈み込んだプレート境界を見たものとして考えられる。

キーワード: レシーバー関数, 琉球弧, マントルウェッジ

Keywords: receiver function, Ryukyu arc, mantle wedge