

## 深部反射波抽出に向けた速度不均質構造推定の高精度化 Strategic seismic data processing for extraction of deep crustal reflectors through reconstructed velocity heterogeneity

阿部 進<sup>1\*</sup>; 佐藤 比呂志<sup>2</sup>; 石山 達也<sup>2</sup>; 齊藤 秀雄<sup>1</sup>  
ABE, Susumu<sup>1\*</sup>; SATO, Hiroshi<sup>2</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>2</sup>; SAITO, Hideo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 地球科学総合研, <sup>2</sup> 東大地震研  
<sup>1</sup>JGI, Inc., <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo

沿岸-海陸境界域を含む近年の反射法地震探査では、有線テレメトリー方式の陸域及び浅海域における受振システムと独立型データ収録システムの併用による稠密展開を伴う多チャンネル長大測線(測線長 100~250km)の設定によって、同一測線内の複数の探査対象及び深度に見合った、低重合広角反射法、広域屈折法及び稠密展開反射法の同時取得、海域着底ケーブルを中心とした多成分データ取得によるマルチスケール・マルチモード型調査仕様が実現した。

本研究では、従来型の CMP 重合解析のみでは限界があった深部地殻構造プロファイリングについて、以下の多角的なアプローチをマルチスケール型稠密長大展開データに適用することによって、深部反射波列の抽出とイメージングの高精度化について検証を実施した。第一に、屈折法・反射法統合プロファイリングによる速度推定の高精度化を試みた。屈折トモグラフィー解析に関しては、ランダム化初期モデル手法の採用によって、客観指標による速度構造推定と誤差評価を実施し、反射波及び屈折波フォワードモデリングを併用した総合的な速度モデル構築を行うと共に、広角領域データに対するフルウェーブインバージョンの適用を通じて、短波長不均質構造の抽出を試行した。第二に、広角領域を含む反射法イメージングの改善を目的として、軸波線理論を前提とした MDRS(Multi-dip Reflection Surface)法を含めた最適化重合処理、さらには短波長不均質を含むフルウェーブインバージョンによって推定された速度構造を前提とした重合前深度マイグレーション処理の適用性を検討した。

また、本研究では、国内における深部地殻構造探査データを対象事例として、多様な速度推定情報の複合化を実施すると共に、推定された速度構造の不均質と深部反射波イメージングの解像度について議論を行った。

キーワード: 深部反射波, 速度不均質, フルウェーブインバージョン, 反射法地震探査

Keywords: deep reflection, velocity heterogeneity, fullwave inversion, seismic reflection survey

## 近畿地方北部における地殻内及び最上部マンタルの地震波速度不連続面の推定 Estimation of seismic velocity discontinuity in the crust and uppermost mantle beneath the northern Kinki region

青木 将<sup>1\*</sup>; 飯尾 能久<sup>1</sup>; 澁谷 拓郎<sup>1</sup>; 片尾 浩<sup>1</sup>; 三浦 勉<sup>1</sup>; 米田 格<sup>1</sup>; 澤田 麻沙代<sup>1</sup>  
AOKI, Sho<sup>1\*</sup>; IIO, Yoshihisa<sup>1</sup>; SHIBUTANI, Takuo<sup>1</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>1</sup>; MIURA, Tsutomu<sup>1</sup>;  
YONEDA, Itaru<sup>1</sup>; SAWADA, Masayo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京大・防災研

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

近畿地方北部は、ひずみ集中帯の一部を構成する地域であり、その地下にはフィリピン海プレートが沈み込んでいる。またこの地域では、微小地震活動が活発であり、深さ 25-30 km 付近に S 波反射面の存在が知られている（例えば、青木ほか、2013）。青木ほか（2013）は、反射法により S 波反射面の 3 次元的な分布を明らかにし、マンタルからの流体によってこの反射面が形成されている可能性を指摘した。この流体の供給源として、沈み込むフィリピン海プレートからの脱水が考えられる。海洋地殻中の含水鉱物が脱水分解する際に、温度・圧力条件が重要となるため、プレートの形状や深さを詳細に推定する事が重要である。

沈み込むプレートをイメージングするために、地震波速度不連続面の検出に有効なレシーバ関数解析がよく行われている。澁谷ほか（2013）では、稠密リニアアレイ観測により、主に紀伊半島下のフィリピン海プレートとその周辺の構造を推定している。Ueno et al.（2008）では、本研究地域を含むように中国地方と近畿地方下のモホ面やフィリピン海プレートの深さを推定しているが、定常観測点のみを用いているため解析分解能が低く、局所的な不均質構造との対比を行う事が難しい。近畿地方北部では、2008 年から満点地震計による 45 点の稠密地震観測が行われている。2009 年にはさらに観測点が増強され、現在 89 点の臨時観測点と 81 点の定常観測点による観測が行われている。観測点間隔は約 5 km である。この観測網によって得られたデータを使用する事により、より高分解能な解析を行う事ができると期待される。佐々木（2011）は上記の観測点のうち、56 点で得られたデータを用いて、preliminary な解析を行った。本発表では、この稠密地震観測網によって得られている、2008 年 11 月から 2014 年 3 月の間に発生した、震央距離が 30°~80°、M6.0 以上の遠地地震のデータを使用し、レシーバ関数解析によって得られた地殻及び最上部マンタルの地震波速度不連続面について報告する。また、青木（2013）によって得られている S 波反射面と比較を行い、その関係について議論する。

キーワード: レシーバ関数

Keywords: receiver function

## 琉球海溝南部の地震学的構造 Seismic structure in the southern Ryukyu Trench subduction zone

山本 揚二郎<sup>1\*</sup>; 高橋 努<sup>1</sup>; 海宝 由佳<sup>1</sup>; 石原 靖<sup>1</sup>; 新井 隆太<sup>1</sup>; 仲西 理子<sup>1</sup>; 尾鼻 浩一郎<sup>1</sup>;  
三浦 誠一<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 金田 義行<sup>2</sup>  
YAMAMOTO, Yojiro<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>; KAIHO, Yuka<sup>1</sup>; ISHIHARA, Yasushi<sup>1</sup>; ARAI, Ryuta<sup>1</sup>;  
NAKANISHI, Ayako<sup>1</sup>; OBANA, Koichiro<sup>1</sup>; MIURA, Seiichi<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; KANEDA, Yoshiyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Nagoya University

In the Ryukyu Trench subduction zone, many large earthquakes occurred historically. Recent seismic and geodetic studies indicate that the occurrence of very low frequency earthquake [Ando et al., 2012] and slow slip events [Heki and Kataoka, 2008; Nishimura, 2014] in the southern Ryukyu subduction zone. In addition, the result of offshore geodetic observation showed interplate coupling occurs near the trench [Nakamura et al., 2010], where plausible seismogenic zone of the 1771 Yaeyama earthquake (Mw 8.0) is located [Nakamura, 2009]. These results suggest that the interplate coupling is not so weak and it is possible for the large interplate earthquake to occur in this region. However, not only the fault plane geometry of past large earthquakes but also the local seismic structure is uncertain due to the sparse seismic observation network. To investigate the hypocenter distribution and the subducted plate geometry, we have conducted the passive seismic observation using 6 land stations and 30 ocean bottom seismographs (OBSs) from Nov. 2013 to Mar. 2014, as a part of "Research project for compound disaster mitigation on the great earthquakes and tsunamis around the Nankai trough region".

We performed a seismic tomography to estimate the hypocenter location and plate geometry by using a part of obtained data, although the data picking is still in progress. The initial P-wave model was established by referring the result of active source survey [Arai et al., 2014], and the initial S-wave model was calculated by assuming a  $V_p/V_s$  value of 1.73. As the initial S-wave velocity model did not include the low-velocity sediment layer just beneath the OBSs, we calculated a station correction value for the S-wave arrival data by using the differential times of arrivals between PS converted waves and direct P-waves.

Preliminary result shows northwestern dipping hypocenter distribution and low velocity layer in the forearc region. We interpreted this layer as the subducted oceanic crust. In that case, most of earthquakes located within the oceanic crust and the uppermost oceanic mantle, and the dip angle of plate boundary gradually increased from 10 degrees near the trench axis to 30 degrees beneath the island arc. We will add more data and estimate more detail relationship between earthquake location and plate geometry.

Keywords: The Ryukyu Trench, Ocean bottom seismograph, Seismicity, Plate geometry

## 海底地震計を用いた地震探査による能登半島西方沖・日本海南東部の島弧—背弧海盆域の地殻構造 Crustal structure in an arc-back-arc basin of the southeastern Japan Sea off Noto Peninsula deduced from seismic survey

佐藤 壮<sup>1\*</sup>; 野 徹雄<sup>1</sup>; 三浦 誠一<sup>1</sup>; 小平 秀一<sup>1</sup>; 石山 達也<sup>2</sup>; 佐藤 比呂志<sup>2</sup>  
SATO, Takeshi<sup>1\*</sup>; NO, Tetsuo<sup>1</sup>; MIURA, Seiichi<sup>1</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>2</sup>;  
SATO, Hiroshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東大地震研  
<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo

北西太平洋の背弧海盆の1つである日本海は、約 30 Ma からのアジア大陸からのリフティング、その後の海洋底拡大を含む背弧拡大によって約 12 Ma までに形成し、約 3.5 Ma からは東縁や南西縁部を中心に短縮変形が起きている（例えば、Tamaki et al., 1992; Sato, 1994）。この日本海の背弧拡大と短縮変形のメカニズムについては、基礎資料の1つと考えられる地殻構造が少なかったため、よくわかっていなかった。これらのメカニズムの理解するために、青森県西方～能登半島東方沖にかけての日本海東縁部において地震探査を実施し、その結果、地殻構造の分布と短縮変形によって形成した被害地震の震源断層を含む活断層や活褶曲の分布との対応関係が明らかになった（No et al., 2014; Sato et al., 2014）。しかしながら、上記域以外の日本海では、東縁部で実施した地震探査と同規模なものは行われていないため、上記のメカニズムの理解を深化させるために必要な地殻構造や、構造と活断層や活褶曲との分布の対応関係はよくわかっていない。そこで、詳細な地殻構造や活断層等の分布の対応関係を把握するために、日本海地震津波防災研究プロジェクトの一環として、2014年夏に能登半島西方沖の日本海南東部の沿岸部から背弧海盆である大和海盆に至る海域で、マルチチャンネルストリーマを用いた反射法地震探査（MCS 探査）と OBS を用いた屈折法・広角反射法地震探査（OBS 探査）を実施した。

OBS 探査は能登半島西方沖の大陸棚から大和海盆南部、大和堆にかけて長さ約 350 km の測線において、制御震源として総容量 7,800 cubic inch のエアガンアレーと OBS60 台を使用して行われた。MCS 探査は OBS 探査測線と同一なものを含め 11 測線にて、OBS 探査と同じ制御震源と 444 チャンネルのストリーマケーブルを用いて実施した（野・他, 2015JpGU）。OBS 探査測線は東京大学地震研究所が陸域で実施した地震探査測線（かほく-砺波測線）と接続している。OBS 探査で得られた OBS の記録は良好である。海盆部に設置した OBS の記録では、初動が震央距離約 70 km まで追跡でき、最上部マントルを通過した屈折波である Pn が震央距離約 60 km、モホ面からの反射波である PmP が震央距離約 40 km から明瞭に観測されている。また MCS 探査においても、良好な記録が得られた。

暫定的な結果であるが、能登半島沖の大陸棚部では、海嶺下の地殻全体の厚さは約 24 km である。速度構造の不均質が確認でき、この不均質は一部では深さ約 10 km まで分布している。一方、能登半島西方沖の大和海盆南部の地殻は約 13 km の厚さを持っており、佐渡島北西沖、粟島沖の大和海盆の地殻の厚さよりも薄い。また、大和堆の地殻の厚さは約 21 km と推測でき、この厚さと速度分布から、大陸性地殻の特徴を持っていることが推測される。

## 日本海地震・津波調査プロジェクト:海陸統合地殻構造探査「2014年かほく-砺波測線」による富山堆積盆地の構造 Onshore-offshore deep seismic profiling across the Toyama basin: 2014 Kahoku-Tonami seismic survey

石山 達也<sup>1\*</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 戸田 茂<sup>2</sup>; 越谷 信<sup>3</sup>; 小林 健太<sup>4</sup>; 野 徹雄<sup>6</sup>; 佐藤 壮<sup>6</sup>; 小平 秀一<sup>6</sup>; 白石 和也<sup>6</sup>; 東中 基倫<sup>6</sup>; 阿部 進<sup>1</sup>; かほく 砺波構造探査研究グループ<sup>1</sup>  
ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1\*</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>; TODA, Shigeru<sup>2</sup>; KOSHIYA, Shin<sup>3</sup>; KOBAYASHI, Kenta<sup>4</sup>; NO, Tetsuo<sup>6</sup>; SATO, Takeshi<sup>6</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>6</sup>; SHIRAISHI, Kazuya<sup>6</sup>; HIGASHINAKA, Motonori<sup>6</sup>; ABE, Susumu<sup>1</sup>; RESEARCH GROUP FOR 2014 KAHOKU-TONAMI, Seismic survey<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 愛知教育大学, <sup>3</sup> 岩手大学工学部社会環境工学科, <sup>4</sup> 新潟大学理学部地質科学科, <sup>5</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター, <sup>6</sup> 株式会社地球科学総合研究所

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2</sup>Aichi Educational University, <sup>3</sup>Iwate University, <sup>4</sup>Niigata University,

<sup>5</sup>Research and Development center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>6</sup>JGI, Inc

文部科学省「日本海地震津波調査プロジェクト」のプロジェクトの一環として、2014年度に山陰沖から北陸地域において、震源断層の分布・形状と地殻構造を解明する目的で、海陸統合および沿岸域における地殻構造調査が実施された。本発表では、富山県八尾から呉羽丘陵・砺波平野・宝達山地を横断し、石川県かほく市沖に至る測線で実施した海陸統合深部地殻構造探査の結果について報告する。

今回の地殻構造探査の特色は、水平解像度の向上による複雑な地質構造のイメージングを図るため、多数の独立型収録器を駆使し、深部構造探査としては稠密な25m間隔の受振・発震を実現したことである。測線は、富山県八尾町から石川県かほく市高松にいたる15km区間に、受振点間隔25mの陸上探査測線を設定すると共に、海域延長部には2.5kmにわたって海底着底ケーブルを設置し、25m間隔での大型バイブレータ4台およびエアガン(容量3020cu.inch)の発震記録を受振した。また、屈折法による速度構造の推定のため、陸上区間10点(約5km間隔)において、100-150 sweepの集中発震を実施した。これらをもって海陸統合測線(KT01)を構成した。また、測線の一部に当たる砺波平野中部・宝達山地東麓部の約10km区間では、更に12.5m間隔で独立型収録器と中型バイブレーターによる稠密発震を行い、高分解能反射法のデータを取得した。

KT01測線が横断する砺波平野下では、P波速度が5km/secを超える層が海水準下5kmに分布している。このことは、富山トラフの南西延長にあたる砺波平野の新第三系堆積盆地が、2013年に実施した飛騨山脈の北縁から富山トラフを横断する海陸統合測線(T1)(佐藤ほか、2013)で明らかになった富山トラフと同等の規模と構造差を有することを示す。堆積盆の両側は、南東および北西に傾斜する正断層によって区切られており、新潟-佐渡海峡などの日本海拡大期中絶リフトの構造と類似する。高清水断層、法林寺断層、石動断層といった平野縁辺に分布する逆断層の上盤側に見られる褶曲構造は、これら新第三系の堆積盆を境する正断層の再活動によって形成された反転構造である。さらに、砺波平野やかほく市沿岸部では、先新第三系基盤岩類および新第三系の分布高度を大きく食い違わせる構造が伏在しており、その直下には逆断層が存在していると推定される。上述の高分解能浅層反射法探査の結果によれば、このうち砺波平野に伏在する逆断層は第四系大桑層・埴生層相当および更に上位の層準まで変形させており、活動的であると考えられる。また、測線西部の日本海沿岸部には、基盤岩類とこれより上位の堆積物の分布高度を大きく食い違わせる西向き単斜構造が分布し、その下には東傾斜の伏在断層の存在が推定される。

かほく 砺波構造探査研究グループ: 池口直毅・山内紘一・田中伸一・坂 守・宮川幸治・田上貴代子・辻 浩・渡辺 茂・安藤美和子(東京大学地震研究所)・日高功揮・大内 貫・山田 遼(岩手大学)・小野藍生・佐藤 光・香取拓馬・飯田圭輔・粉川真人(新潟大学)

キーワード: 日本海, 震源断層, 地殻構造, 反射法地震探査, 堆積盆地

Keywords: Sea of Japan, seismic source fault, crustal structure, seismic reflection survey, sedimentary basin

## 1998-2000年北海道トランゼクトデータの再解析による日高衝突帯の構造 VI Lithospheric Structure of the Hidaka Collision Zone, Hokkaido, from Reanalysis of 1998-2000 Hokkaido Transect Data VI

岩崎 貴哉<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>2</sup>; 伊藤 谷生<sup>3</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 平田 直<sup>1</sup>; 在田 一則<sup>4</sup>;  
野田 克也<sup>5</sup>; 藤原 明<sup>5</sup>; 阿部 進<sup>5</sup>; 菊池 伸輔<sup>6</sup>; 鈴木 和子<sup>7</sup>  
IWASAKI, Takaya<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>2</sup>; ITO, Taniao<sup>3</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>;  
HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; ARITA, Kazunori<sup>4</sup>; NODA, Katsuya<sup>5</sup>; FUJIWARA, Akira<sup>5</sup>; ABE, Susumu<sup>5</sup>;  
KIKUCHI, Shinsuke<sup>6</sup>; SUZUKI, Kazuko<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 帝京平成大学, <sup>4</sup> 北海道大学総合博物館, <sup>5</sup> 地球科学総合研究所, <sup>6</sup> 石油資源株式会社, <sup>7</sup> シュランベルジュ

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>3</sup>Heisei Teikyo University, <sup>4</sup>The Hokkaido University Museum, Hokkaido University, <sup>5</sup>JGI, Inc., <sup>6</sup>JAPEX, <sup>7</sup>Schlumberger Ltd.

The Hokkaido Island, located in the southernmost part of the Kuril trench region, has been under a unique tectonic environment of arc-arc collision due to the oblique subduction of the Pacific (PAC) plate. At the time of middle Miocene, the Kuril forearc sliver started to collide against Northeast (NE) Japan arc to form the Hidaka collision zone (HCZ) with complex structural features including the westward obduction of the crustal rocks of the Kuril arc (the Hidaka metamorphic belt (HMB)) along the Hidaka main thrust (HMT) and a thick foreland fold-and-thrust belt.

Re-analyses for a series data sets of seismic reflection/refraction experiments in HCZ, which started in 2012, are aimed to construct a more detailed collision model through new processing and interpretation techniques. A multi-disciplinary project of the 1998-2000 Hokkaido Transect, crossing the northern part of the HCZ in EW direction, collected high-quality seismic data on a 227-km seismic refraction/wide-angle reflection profile and three seismic reflection lines. Our reprocessing/re-analyses revealed interesting collision structure ongoing in the northern part of the HCZ. The westward obduction of the Kuril arc crust was clearly imaged along the HMT. This obduction occurs at a depth of 27-30 km, much deeper than in the southern HCZ (23-25 km). The CRS/MDRS processing to the reflection data firstly succeeded in imaging clear reflection events associated with the lower crust/Moho within the NE Japan arc descending down to the east. Gently eastward dipping structures above these events (in a depth range of 5-10 km) are interpreted to be fragments of Cretaceous subduction/arc complexes or deformation interfaces branched from the HMT.

The refraction/wide-angle reflection analysis including amplitude calculations revealed a series of eastward dipping interfaces at depths of 15-30 km east of the HMT, some of which show a very large Vp contrast exceeding 0.5-1.0 km/s. The subducted NE Japan arc meets the Kuril arc 20-40 km east of the HMT at a depth of 20-30 km. The above mentioned high Vp contrasts may result from the mixture of the upper crustal (low Vp) materials of the NE Japan arc and lower crustal (high Vp) materials of the Kuril arc.

Seismic reflection image in the southern HCZ reprocessed by almost the same techniques confirms a clear crustal delamination, where the upper 23-km crust is thrust up along the HMT while the lower part of the crust descends down to the subducted PAC plate. At the moment, the results in the northern HCZ do not provide positive evidence on shallow crustal delamination as found in the case of the southern HCZ, probably presenting important information on "3D structure" of the HCZ.

キーワード: 日高衝突帯, 千島弧, 東北日本弧, 地殻剥離

Keywords: Hidaka Collision Zone, Kuril Arc, NE Japan Arc, Delamination

## 3D比抵抗モデリングによる日高衝突帯南部の地殻構造および流体分布 Crustal structure and fluid distribution beneath the southern Hidaka collision zone based on 3-D resistivity modeling

市原 寛<sup>1\*</sup>; 茂木 透<sup>2</sup>; 山谷 祐介<sup>3</sup>; 橋本 武志<sup>2</sup>; 上嶋 誠<sup>4</sup>; 小川 康雄<sup>5</sup>

ICHIHARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>; MOGI, Toru<sup>2</sup>; YAMAYA, Yusuke<sup>3</sup>; HASHIMOTO, Takeshi<sup>2</sup>; UYESHIMA, Makoto<sup>4</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 北海道大学大学地震火山研究観測センター, <sup>3</sup> 産業総合研究所, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所, <sup>5</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, <sup>3</sup>Advanced Industrial Science and Technology, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>5</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

Erimo area, south end of Hokkaido Island is located on the south part of Hidaka collision zone where Kurile and the north-eastern (NE) Japan arcs are collided. This area is an attractive research field to understand mechanism of continent evolution and deep inland earthquakes because 1) ultra-mafic rocks are outcropped although the delamination hypothesis of Kurile arc indicates uplift and down lift of upper-middle and lower crust rocks, respectively, and 2) inland earthquakes occurs anomalously depth (e.g. 1970 Hidaka earthquake M6.7). We conducted wideband and long-period magnetotelluric surveys at 27 sites in the Erimo area and obtained 3-D resistivity models based on inversion procedure. Reliable features of the inverted models and their interpretations are as follows. 1) A low resistivity zone (C-1) is distributed beneath the Hidaka main thrust (HMT) and extends to the upper most part of subducting Pacific slab. The high seismicity in the subducting slab in C-1 implies dehydration embrittlement. The C-1 around arcs boundary implies upwelling fluid along the HMT, which may affect the deep inland earthquake. 2) Ultra-high resistivity zone (R-1), which probably reflects dry metamorphic rocks, is distributed underneath the Hidaka metamorphic belt. The boundary between C-1 and R-1 is spatially consistent to the boundary between the delamination wedge and delaminated upper-middle crust (Ito, 2000). It supports the proposed collision model based on seismic surveys.

Figure caption: (a) Locations magnetotelluric stations. (b) A vertical cross-section of inverted resistivity model beneath the line X-X'. Gray lines denote geological boundaries based on seismic surveys (Ito 2000). White circles denote hypocenter between 2000 and 2012 by JMA. (c) Interpretation of the resistivity model.

Keywords: Hidaka collision zone, magnetotellurics, dehydration embrittlement, inland earthquake

## 弾性波速度測定による日高衝突帯の地殻構成岩石の推定 Crust composition in the Hidaka Metamorphic Belt estimated from seismic velocity by laboratory measurements

山内 紘一<sup>1\*</sup>; 石川 正弘<sup>2</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>; 豊島 剛志<sup>3</sup>  
YAMAUCHI, Koichi<sup>1\*</sup>; ISHIKAWA, Masahiro<sup>2</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>; TOYOSHIMA, Tsuyoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 横浜国立大学, <sup>3</sup> 新潟大学

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The university of Tokyo, <sup>2</sup>Yokohama National University, <sup>3</sup>Niigata University

リソスフェアのダイナミクスを理解する上で、構成岩石の推定は重要な課題となる。地殻構成岩石の推定には、実際の地殻深部の条件下で、弾性波速度測定による岩石物性値と制御震源や自然地震による弾性波速度構造を比較する方法が有効である。

北海道日高変成帯は島弧衝突帯であり、地殻の上部約 23km が衝上露出している (Komatsu et al., 1983)。この地域では、制御震源を用いた屈折法・広角反射法構造探査 (Iwasaki et al., 2004) により、詳細な P 波速度構造が求められている。さらに、反射断面図における地殻構造の解釈が行われており (伊藤, 2000; Iwasaki et al., 2014)、反射面の連続性から地表に露出している岩石が深部まで連続的に追跡することができるため、弾性波速度を用いた地殻を構成する岩石の推定には好条件を有している。そこで本研究では、日高変成帯の岩石を用いて弾性波速度測定を行い、P 波速度構造モデルおよび地震波トモグラフィの岩石学的な解釈を行った。

日高変成帯で採取した岩石を対象に最大圧力 1.0GPa、最高温度 400 °C において弾性波速度を測定した。例えば、0.5GPa、25 °C 条件下での花崗岩、トーナル岩、片麻岩、角閃岩、グラニュライトの P 波速度は、5.88km/s、6.02~6.34km/s、6.34、6.41~7.05km/s、7.41km/s である。また、測定した SiO<sub>2</sub> 量との相関がトーナル岩に関して得られた。

構成岩石の推定のため、弾性波速度と密度より算出した音響インピーダンスにおいて、トーナル岩と角閃岩の境界は中部地殻で明瞭な反射面となる結果が得られ、深部反射法地震探査データ (Iwasaki et al., 2014) と調和する。これより、日高変成帯における P 波速度構造モデルとの速度比較を行うと、中部地殻、下部地殻に対してそれぞれ、トーナル岩、角閃岩が調和的であった。また、実験より算出した岩石の V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> 比と V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub> 比構造 (Matsubara and Obara, 2011) との比較により同様の傾向が得られた。

次に、日高変成帯で採取した岩石の速度データを用いて、千島弧における P 波速度構造モデル (Nakanishi et al., 2009) と比較した。日高変成帯よりも比較的浅部の島弧上部地殻、中部~下部地殻に対してそれぞれ、トーナル岩、角閃岩が調和的であった。地震波トモグラフィ (Matsubara and Obara, 2011) における日高変成帯と千島弧の比較により、厚い千島弧下部地殻には、より苦鉄質な岩石が推定され、異なる構造を有することが推定される。

キーワード: 弾性波速度, 日高変成帯, 音響インピーダンス, トーナル岩, 角閃岩

Keywords: elastic wave velocity, Hidaka Metamorphic Belt, acoustic impedance, tonalite, amphibolite



## 伊豆衝突帯下に沈み込むスラブのジオダイナミクス Geodynamics of subducting slab under Izu collision zone

石川 正弘<sup>1\*</sup>; 坪川 祐美子<sup>1</sup>; 本多 聡子<sup>1</sup>  
ISHIKAWA, Masahiro<sup>1\*</sup>; TSUBOKAWA, Yumiko<sup>1</sup>; HONDA, Satoko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学環境情報研究院

<sup>1</sup>Yokohama National University

フィリピン海プレートは本州の下に沈み込む。しかし、フィリピン海プレートの東縁には伊豆小笠原マリアナ弧が存在するために、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う関東周辺のテクトニクスは複雑になっている。南関東の房総半島や三浦半島周辺では付加体が発達する一方、南関東の西部の丹沢山地では伊豆小笠原弧の地殻物質が大規模に衝突付加している(伊豆衝突帯)。JpGU2014の発表では、岩石の弾性波速度実験と岩石の鉱物組み合わせの相平衡計算の結果に基づき、伊豆衝突帯直下のスラブ構成岩石を検討したが、様々な問題点が浮かび上がってきたので、JpGU2015の発表では、伊豆衝突帯直下のジオダイナミクスについて改めて検討する。

フィリピン海プレート東縁に分布する伊豆小笠原弧の地殻構造は伊豆衝突帯の地殻構造を理解する上で重要な鍵となる。丹沢山地等に産する深成岩類の弾性波速度測定実験から得られたP波速度とSuyehiro et al. (1996)の構造探査から得られた北部伊豆小笠原弧のP波速度構造を比較すると、トータル岩のP波速度は伊豆小笠原弧中部地殻のP波速度と同程度であり、トータル岩が伊豆小笠原弧中部地殻の主要構成岩石であると推定される。また、丹沢産の角閃石はんれい岩とパキスタン(コヒスタン島弧下部地殻断面)産のガプロノーライトのP波速度と伊豆小笠原弧で得られたP波速度を比較すると、下部地殻上層の主要構成岩石として角閃石はんれい岩を、また、下部地殻の主要構成岩石として角閃石輝石はんれい岩やガプロノーライトが推測されてきた。伊豆小笠原弧の構成岩石モデルとSato et al.(2005)の伊豆衝突帯の地殻構造を総合的に解釈すると、伊豆小笠原弧の下部地殻(角閃石はんれい岩等の苦鉄質岩石)は熱いスラブとして本州下に沈み込んでいると推測される。本発表では、丹沢山地のはんれい岩の化学組成を用いてTheriak-Dominoの相平衡計算プログラムで鉱物組み合わせと含水鉱物中のH<sub>2</sub>O量を計算し、伊豆衝突帯直下のジオダイナミクスに関する問題点を議論する。

問題のひとつは、スラブ中における含水鉱物(角閃石等)の安定領域とソリダスの関係である。超高温な地温勾配のスラブの沈み込みの場合、角閃石は30 km以浅で脱水が完了すると推測される。丹沢山地下において微小地震が沈み込むスラブ内(30 km以浅)で発生しており、スラブの脱水反応に伴う脱水脆性化によって説明できるように一見思える。しかし、フィリピン海スラブの地温勾配は火山フロントに位置する伊豆衝突帯下で最も高温であると予想されるので、火山フロントに位置する伊豆衝突帯から東西方向に遠ざかるほどフィリピン海スラブの地温勾配は相対的に低くなると推測される。このようなスラブが沈み込む場合、角閃石の脱水が完了する前にスラブは部分融解条件に達するので、沈み込みながらメルトを生成する環境になる。実際には、伊豆衝突帯北部にはそれに相当する火山活動が存在しない。スラブ融解しない程度に地温勾配を仮定すると、スラブ脱水は連続的に進行し、深さ50-60 km以深で角閃石が消失する(zoisiteはなお安定)。一般的なスラブ内地震はスラブの脱水反応・脱水脆性化によって説明がなされてきているが、丹沢山地直下で発生している微小地震(30 km以浅)は丹沢山地北部や関東山地直下ではほとんど発生していないことから、スラブの脱水脆性化が起因とは考えられない。丹沢山地直下のスラブ内で発生している微小地震の深さはスラブがガーネット安定領域に入る深さに相当するので、沈み込む伊豆弧下部地殻が高密度な含ガーネット岩石(候補:ざくろ石グラニューライトまたはざくろ石角閃岩)に相転移する際に地震が発生すると解釈することが妥当である。一方、含ガーネット岩石に相転移後も脱水が継続すると予想されるにもかかわらず非震性スラブとして沈み込む背景には、スラブが通常の海洋スラブと比較してかなり高温であること、塑性領域に入っていることが関連しているのかもしれない。

キーワード: 伊豆衝突帯, フィリピン海スラブ, ジオダイナミクス

Keywords: Izu collision zone, Philippine Sea slab, geodynamics

## 地震波速度および比抵抗からの流体分布の推定 Estimation of fluid distribution from seismic velocity and electrical resistivity

渡辺 了<sup>1\*</sup>; 牧村 美穂<sup>1</sup>  
WATANABE, Tohru<sup>1\*</sup>; MAKIMURA, Miho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学研究部

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

Geophysical mapping of fluids in the crust is critical for understanding crustal dynamics. Pore-fluids play important roles in geodynamic processes including seismic activities. Though a lot of studies have suggested the existence of aqueous fluids in the crust, the fluid distribution has not been quantitatively constrained. Seismic velocity and resistivity should be combined to make a quantitative inference on fluid distribution. It is impossible to infer the amount of fluid only from seismic velocity. Since the lithology of a study region is usually unknown, elastic properties of the rock matrix must be assumed. The fluid amount cannot be inferred only from electrical resistivity, either. The inference of the fluid amount requires the assumption on the fluid resistivity. The fluid amount estimated from resistivity must be identical to that estimated from seismic velocity. The combination of velocity and resistivity can thus constrain the rock matrix and fluid conductivity.

We propose a new method for estimating the amount of fluid from seismic velocity and resistivity. It utilizes an empirical relationship between the normalized resistivity and crack density parameter, which was obtained from measurements of elastic wave velocity and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock under confining pressures (Makimura and Watanabe, Poster session). Resistivity is normalized by the fluid resistivity. If we assume a lithology for the study region, we can estimate the crack density parameter from observed velocity. Using the empirical relation, we can obtain the normalized resistivity. Comparing the normalized resistivity with observed resistivity, we can obtain the fluid resistivity. If the fluid resistivity is an unrealistic value, we must modify the assumed lithology. Both the lithology and fluid resistivity can be constrained through these procedures.

The applicability and limitation of the empirical relation should be studied both experimentally and theoretically. In experimental studies, the relation should be studied in different rock types. A theoretical work on the network of grain boundary cracks will give us a basis of the relation.

キーワード: 地震波速度, 比抵抗, 流体  
Keywords: seismic velocity, resistivity, fluid

## いわき誘発地震帯での3次元比抵抗イメージング 3-D Resistivity imaging of source regions of the Iwaki normal faulting sequences

上嶋 誠<sup>1\*</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 市来 雅啓<sup>3</sup>  
UYESHIMA, Makoto<sup>1\*</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; ICHIKI, Masahiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center Tokyo Institute of Technology,

<sup>3</sup>Graduate School of Science, Tohoku University

Following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, M9.0, several areas of the inland Japan were activated due to significant change of the stress field. Among all, intense swarm-like seismicity associated with shallow normal faulting was induced in Ibaraki and Fukushima prefectures in the boundary area between Kanto and Tohoku districts, Japan. In order to elucidate a high-resolution model of crustal resistivity structure in this region and to get insights on causes of those induced earthquakes, MT surveys were performed in Jan. 2012 and from Dec. 2013 to Jan. 2014, by using Phoenix and Metronix Wideband MT instruments.

After estimating impedance tensors and induction vectors with the aid of the BIRRP code (Chave and Thomson, 2004), a 3-D phase tensor (PT) and induction vector (IV) inversion code was applied to the dataset. In order to investigate the influence of the initial model on the final structural model, we did several inversion runs with initial resistivity values ranging from 20 to 2000 Ohm-m. All the inversion runs could get respective final models with RMS of around 2. Although some differences in the final models are detected, overall characteristics and scales (in length and intensity) are similar for all the final models. Generally, induced earthquakes are distributed in the higher electrical resistivity zones. We delineated a separate low-resistivity anomaly directly beneath the hypocenter of the largest earthquake in the sequence (the M7.0 Iwaki earthquake), indicating crustal fluids in this region. Together with previously obtained seismic image (Kato et al., 2013), we hypothesize that strong crust underwent structural failure due to the infiltration of crustal fluids into the seismogenic zone from deeper levels, or stress accumulation on the edge of the isolated weak portion, causing the Iwaki earthquake.

キーワード: 3次元比抵抗構造, いわき誘発地震震源域, 地殻流体の局在

Keywords: 3-D resistivity structure, source region of the Iwaki earthquake, localized crustal fluids

## 岩手宮城内陸地震震源域の3次元比抵抗構造と地殻変動との関連 3D Resistivity Structure around the Epicenter of Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake and Crustal Deformations

鈴木 惇史<sup>1\*</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 齋藤 全史郎<sup>1</sup>; 潮田 雅司<sup>2</sup>  
SUZUKI, Atsushi<sup>1\*</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; SAITO, Zenshiro<sup>1</sup>; USHIODA, Masashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター

<sup>1</sup>Department of earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake (M 7.2) was an unusually large earthquake, which occurred near the volcanic regions. To understand the mechanism of inland earthquakes, it is important to study the structure around the area. Okada et al. (2012) observed aftershocks precisely and estimated the seismic velocity structure. Iinuma et al. (2009) detected coseismic and aseismic slips with GPS observations. Mishina (2009) and Ichihara et al. (2014) conducted 2-D and 3-D MT surveys respectively. However, the MT station distributions of the previous MT surveys were sparse. We carried out denser surveys and showed more precise resistivity structures around the area. We conducted MT surveys at 66 stations (59 stations from October until November in 2012 and 7 stations from October until November in 2014) around the area and estimated 3-D resistivity structures using inversion code of Siripunvaraporn and Egbert (2009) with full impedance tensor as response functions. The result of our final resistivity structures is similar to the one in Ichihara et al. (2014), but is more complex. We found a low resistivity zone to the northeast of Mt. Kurikoma below 3km depth. This anomaly is connected with a low resistivity zone located under Mt. Kurikoma below 10km depth. The locations of aseismic and co-seismic slips in Iinuma et al. (2009) correspond to the locations of low resistivity and high resistivity zones in our model respectively. This may represent that low resistivity zones are brittle and high resistivity zones are ductile.

キーワード: 岩手宮城内陸地震, 比抵抗構造, マグネトテルリクス, 流体, 変形, 余効変動

Keywords: Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, resistivity structure, magnetotellurics, fluid, deformation, post seismic deformation

## 2008年岩手宮城内陸地震の震源域における地震波速度構造と断層破壊挙動 Seismic velocity structure and fault rupture behavior in the source region of the 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake

青柳 恭平<sup>1\*</sup>; 木村 治夫<sup>1</sup>; 阿部 信太郎<sup>2</sup>  
AOYAGI, Yasuhira<sup>1\*</sup>; KIMURA, Haruo<sup>1</sup>; ABE, Shintaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電中研, <sup>2</sup> 産総研  
<sup>1</sup> CRIEPI, <sup>2</sup> AIST

奥羽脊梁山地は東北日本弧の中軸をなす東西圧縮の歪み集中帯であり、脊梁山地と両側にある平野との境界にはそれぞれ南北走向の活断層帯が認められる。しかし、一連のように見える断層帯でも、活動性に部分的な差異があり、地震時の破壊区間はしばしば制限される。我々は、断層破壊の規制要因が地殻構造にある可能性を想定し、稠密微小地震観測に基づく地震波トモグラフィ解析から、速度構造と既往地震の破壊域端部との関係を検討してきた(青柳・木村, 2014JpGU, 青柳ほか, 2014地震学会)。本発表では、特に岩手宮城内陸地震の震源域に着目して、速度構造と断層挙動との関係を議論する。なお、観測と解析の概要については、上記2つの予稿をご参照頂きたい。

### <震源域周辺の速度構造>

震源域周辺の地震発生層における速度構造の特徴は、栗駒山の西部から南部にかけて密集するカルデラ群(三途川、鬼首、鳴子カルデラなど)の分布に対応して、顕著な低  $V_p/V_s$  領域が認められることである。こうした特徴は、Nakajima and Hasegawa (2003) がすでに報告しており、彼らは熱水など水蒸気に富んだ構造であることを推定している。一方、その北東側の領域には、高  $V_p/V_s$  領域が認められる。両者の境界はWNW-ESE方向であり、秋田県湯沢市から栗駒山の数km北側を通過し、岩手・宮城県境に達する。これより北東側の高  $V_p/V_s$  領域の中では唯一、栗駒山の東部から北北東に向かって低  $V_p/V_s$  領域が存在しており、余震はこの低  $V_p/V_s$  領域に卓越して発生している。この低  $V_p/V_s$  領域の北東縁は、北上低地西縁断層帯南部の分布域に対応する高  $V_p/V_s$  領域に接しており、震源域の北端部は、この速度境界と一致している。

### <地震発生層の速度分布>

地震発生層の速度分布を明らかにするため、個々の震源位置での地震波速度のヒストグラムを調べた(N=1101)。地震発生層の速度分布の上下限10%ずつを除く大半の部分は、 $V_p$ が5.8~6.15km/s、 $V_s$ が3.45~3.7km/s、 $V_p/V_s$ 比が1.64~1.70に分布する。地震発生層はいわゆる  $V_p \sim 6$ km/s 層に対応しており、特に  $V_p/V_s$  比が1.73よりも顕著に小さいことが特徴である。高圧下で測定された岩石速度(Christensen, 1996)と比較すると、この地域における地震発生層は、花崗岩類から構成されている可能性が高い。

### <地震発生深度の変化>

震源域の地震発生層の深さ分布を明らかにするために、個々の震源の深さのヒストグラムを調べた。上位5%を除いた深さの上限(いわゆるD5)は2.9km、下位5%を除いた深さの下限(D95)は9.0kmである。この値は、同じ解析で得られた陸羽地震の震源域の深さ分布(D5が3.3km、D95が11.7km)と比較して、特に下限の深さが浅くなっている。さらに、上述した栗駒山北方の構造境界の南側のみに限定すると、D5が2.8km、D95が7.8kmであり、下限はより顕著に浅くなる。このような震源域の走向に沿う地震発生層の下限深度の変化は岡田ほか(2008)が報告しており、鬼首や鳴子などの火山に対応した高温領域が地下浅部に達するために、脆性-延性境界が浅くなっていると解釈されている。

### <構造変化と断層破壊挙動>

前述したWNW-ESE方向の顕著な速度境界では、余震分布の深さだけでなく、水平方向にも左ステップする変化が認められる。布原ほか(2010)は、この境界を東北地方にいくつか見られるWNW-ESE系の断層のひとつであると指摘した。この系列の断層は、日本海拡大時の反時計廻りの回転運動に伴って形成された差別的横ずれ断層と推定されており、黒鉱の分布などに10~20kmの左横ずれが認められている。また、青柳ほか(2012)は、震源域を南北に縦断する深部反射法地震探査の結果、この位置に構造的な急変部を認めている。これより北側では地表から地下5km程度までは反射イベントが卓越しているが、南側では地下2km以深には反射イベントがほとんど見られない。地震発生層の深度変化は、この構造的な変化とよく対応している。したがって、そこには何らかの大きな構造境界が存在する可能性が高い。ただし、地震時の破壊はこの構造境界で停止されず、その南北に広がった。その原因は、南北の地質体が横ずれ転移した結果、地震発生層(低  $V_p/V_s$  領域)が連続的になっているためだと解釈される。一方で、震源域の北端部は、高  $V_p/V_s$  領域に接している。この速度境界部は平泉付近から横手市付近まで断続的に認められ、やはりNNW-SSE走向の左横ずれ断層を見ている可能性が高い(青柳ほか, 2014)。地震時の破壊が北端部で停止した原因は、地震発生層(低  $V_p/V_s$  領域)

SCG57-13

会場:国際会議室

時間:5月28日 09:45-10:00

が、この境界部で不連続になっているためと解釈される。

キーワード: 岩手宮城内陸地震, 地震波速度構造, 地震発生層, 断層破壊挙動

Keywords: Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, seismic velocity structure, seismogenic layer, fault rupture behavior

## 神城断層周辺の地殻変動と2014年長野県北部地震 Crustal deformation around the Kamishiro fault and its implications for the 2014 Northern Nagano earthquake

鷺谷 威<sup>1\*</sup>; 寺谷 尚子<sup>1</sup>; 西村 卓也<sup>2</sup>; 矢来 博司<sup>3</sup>; 水藤 尚<sup>3</sup>  
SAGIYA, Takeshi<sup>1\*</sup>; TERATANI, Naoko<sup>1</sup>; NISHIMURA, Takuya<sup>2</sup>; YARAI, Hiroshi<sup>3</sup>; SUITO, Hisashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 国土地理院

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Geospatial Information Authority of Japan

The Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (ISTL) is a major geologic boundary intersecting the Japanese mainland into the north-eastern and the southwestern parts. It is also an active fault system that is supposed to have a high seismic potential. We have conducted dense GPS observation and identified a highly localized E-W contraction

around the Kamishiro fault at the northern ISTL. Kinematic modeling of this deformation pattern suggests that the fault is dipping to the east and accommodating the E-W contraction by aseismic faulting below the depth of 2-4 km.

On November 22, 2014, a Mw 6.3 earthquake occurred at the Kamishiro fault. The hypocenter is located at a depth of 5 km and surface rupture appeared for about 9 km along the fault trace. Considering the pre-seismic deformation pattern and aseismic fault slip at depth, this earthquake is considered to rupture the remaining shallow locked part. Thus no further large earthquake is not anticipated in this area in the near future although much larger event is expected to occur along the whole ISTL.

This earthquake caused a heavy damage on a small neighborhood called Horinouchi. It should be noted that the same neighborhood had experienced a severe damage by another earthquake in 1714. Considering that the locked portion is limited to the shallowest 5 km and strain rate around this area is very large, it is possible that the same fault segment was reactivated in 300 years, which is an unusually short recurrence interval as a intra-plate active fault. This example demonstrates an importance of dense as well as precise geodetic observation for seismic hazard evaluation and understanding the crustal seismogenesis.

キーワード: 神城断層, 2014年長野県北部地震, GPS, 地殻変動

Keywords: Kamishiro Fault, 2014 Northern Nagano Earthquake, GPS, crustal deformation

## 2014年長野県北部の地震の複雑な断層 Urgent seismic observation for the 2014 Northern-Nagano Prefecture Earthquake and complex fault system

酒井 慎一<sup>1\*</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>; 高橋 浩晃<sup>2</sup>; 松本 聡<sup>3</sup>; 神薊 めぐみ<sup>3</sup>;  
岡田 知己<sup>4</sup>

SAKAI, Shin'ichi<sup>1\*</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Hiroaki<sup>2</sup>;  
MATSUMOTO, Satoshi<sup>3</sup>; KAMIZONO, Megumi<sup>3</sup>; OKADA, Tomomi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 北海道大学理学研究院地震火山研究観測センター, <sup>3</sup> 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>4</sup> 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

<sup>1</sup>Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2</sup> Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>3</sup> Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>4</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

2014年11月22日22時8分頃、長野県北部を震源とするマグニチュード6.7 (Mw6.2)の地震が発生した。本震発生後、余震域の広がりに応じて、九州大学、北海道大学、東北大学と共に臨時観測点を設置し、一部をテレメータ化して、現在は、17ヶ所で観測を続けている。12月中旬にオフライン観測点の一部を回収し、周辺のテレメータ観測点とともに震源決定を行った。震源決定に用いた速度構造は、この付近で行われた人工地震探査の結果を元にした一次元速度構造である。白馬村では、この地震発生の4日前の11月18日18時頃から、M3程度を最大規模とする小さな群発地震活動があったため、11月20日から震源域の直上にオフライン観測点を設置していた。その記録を用いて解析を行ったため、本震の破壊開始点を始めとする余震分布を高精度で得ることができた。その結果、本震の位置は、気象庁一元化震源に比べて約2.5km東にずれた。本震周辺の震源は、高角な東傾斜の面上になり、これが本震の地震断層と考えられる。しかし、余震は、この面以外にも分布していて、鉛直に分布するものや西傾斜になるものもあり、複雑な断層群を形成している。本震の発震機構解は、北西-南東方向に圧力軸をもった逆断層と考えられるが、地震断層面は、単純な一枚の面とはいえないようである。

キーワード: 2014年長野県北部の地震, 臨時地震観測, 震源分布, 複雑な断層面

Keywords: 2014 Northern-Nagano Prefecture earthquake, urgent aftershock observation, precise aftershock distribution, multi-fault system



## 2014年11月22日長野県北部の地震 (Mj6.7) 震源域の稠密余震アレイ観測による余震分布と地殻構造 Aftershock distribution and crustal structure in and around the source area of the 2014 northern Nagano Pref. earthquake

蔵下 英司<sup>1\*</sup>; 平田 直<sup>1</sup>; 岩崎 貴哉<sup>1</sup>; 酒井 慎一<sup>1</sup>; 小原 一成<sup>1</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 佐藤 比呂志<sup>1</sup>  
KURASHIMO, Eiji<sup>1\*</sup>; HIRATA, Naoshi<sup>1</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>; SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>; OBARA, Kazushige<sup>1</sup>;  
ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; SATO, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大地震研

<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo

2014年11月22日22時8分頃、長野県北部の深さ約5kmを震源とするマグニチュード6.7 ( $M_{JMA}6.7$ )の地震が発生した。この地震の余震域の西側には、糸魚川-静岡構造線の一部である神城断層の北部が位置しており、地表で確認されている活断層との関係を明らかにすることは、活断層の活動評価を行うにあたって重要である。また、高精度な余震分布や震源域付近の不均質構造は、地震発生様式を考える為に必要不可欠な情報である。そこで、3次元速度構造と余震分布を明らかにする目的で、余震域を含む領域に臨時地震観測点を約1km間隔で163箇所を設置し、独立型地震観測システム (GSX-3システム) を用いた稠密余震アレイ観測を実施した。また、地表断層付近には、10-20m間隔でトラップ波等の観測のために64点の観測点を設置した。観測は、2014年12月3日から2014年12月21日まで実施し、各観測点では、固有周波数4.5 Hzの地震計によって上下動及び水平動の3成分観測を行った。サンプリング周波数は250 Hzで行なった。気象庁一元化震源リストによると、余震域を含む研究対象地域 (緯度35.5°-37.1° N; 経度136.7°-139.0° E) では977個の地震の震源が決定されている。これら地震の震源時刻に従って、本観測で得た連続記録から地震毎へのデータ編集を実施した。その後、臨時観測点の波形データと本観測網周辺の40点のテレメータ観測点で得られている波形データとの統合作業を行った。このようにして作成した地震波形データから、震央ができるだけ均等に分布するように100イベントを抽出し、P波・S波の手動検測を行った。得られた走時データを用いてトモグラフィー解析 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) を実施し、3次元速度構造と余震分布を求めた。トモグラフィー解析の初期モデルには、連携震源決定法 (Kissling et al., 1994) を用いて得た1次元速度構造モデルを使用した。得られた余震分布からは、本震の震源付近で東傾斜の余震分布が確認できる。また、神城断層を横切るP波速度構造の東西鉛直断面図から、神城断層の深部延長に東傾斜の低速度領域が確認できる。

謝辞: トモグラフィー解析をおこなうにあたっては、東京大学の波形データに加え、気象庁、防災科学技術研究所、京都大学のデータを利用しました。震源リスト作成には、気象庁と文部科学省が協力してデータを処理した結果 (気象庁一元化処理震源リスト) を使用させて頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

キーワード: 稠密自然地震観測, 地震波トモグラフィー, 神城断層, 余震分布

Keywords: dense seismic array observation, seismic tomography, Kamishiro fault, aftershock distribution

## 山陰ひずみ集中帯における稠密 GNSS 観測網の構築 Construction of a dense GNSS array in the San-in shear zone

西村 卓也<sup>1\*</sup>; 細 善信<sup>1</sup>; 三浦 勉<sup>1</sup>; 米田 格<sup>1</sup>; 小池 俊貴<sup>1</sup>

NISHIMURA, Takuya<sup>1\*</sup>; HOSO, Yoshinobu<sup>1</sup>; MIURA, Tsutomu<sup>1</sup>; YONEDA, Itaru<sup>1</sup>; KOIKE, Toshiki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

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

### はじめに

国土地理院の GNSS 連続観測網 (GEONET) のデータ解析から、山陰地方の島根県東部から鳥取県にかけて顕著な地殻変動集中域 (以下、山陰ひずみ集中帯) が存在していることが明らかになった (西村, 2014)。我々は山陰ひずみ集中帯の詳細地殻変動を明らかにし、ひずみ集中のメカニズムを解明することを目的として、2014 年 8~12 月に山陰ひずみ集中帯を横断するように、13 箇所の新規 GNSS 観測点を設置し、連続観測を開始した。本講演では、既存 GNSS 観測網から明らかになった山陰ひずみ集中帯及びその周辺の地殻変動と新規に設置した観測点の概要について報告する。

### 山陰ひずみ集中帯の特徴と地震活動

2005-2009 年における山陰地方及びその周辺の GEONET 観測点速度分布には、以下のような特徴が認められる。①太平洋側で顕著に見られるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う北西方向の地殻変動の北限は、中国地方の瀬戸内海沿岸に位置し、中国山地ではその影響がほとんど見られない。②兵庫県北部を基準とすると、鳥取県と島根県東部の日本海沿岸では、東向きに約 4mm/年の変動が見られるが、内陸部では変動が小さい。この変動が急変する地帯を山陰ひずみ集中帯と呼ぶ。GNSS データから得られた速度分布とひずみ速度分布から、山陰ひずみ集中帯は右横ずれ運動を示すせん断帯が日本海沿いに長さ 200km 以上に渡って連続するように見えるが、せん断帯の幅は一定ではない。観測点速度の東西成分をひずみ集中帯に直交する断面に投影すると、鳥取県東部では隣り合う GEONET 観測点 (約 20km) の間で約 4mm/年の速度の違いがあり変動帯の幅が最も狭いが、鳥取県西部から島根県東部では、同じ変動速度を 50~70km 程度の幅でまかなっているように見える。

多くの先行研究が示すように、山陰地方の微小地震分布には日本海に沿って地震の活発な帯が認められるが、山陰ひずみ集中帯はこの地震帯に対応している。ただし、微小地震の集中帯は鳥取県から島根県東部だけでなく、さらに西方の山口県まで連続しているが、島根県西部以西では顕著な地殻変動は見られない。また、微小地震の震源分布には、ひずみ集中帯や地震帯の走向 (ほぼ東西) とは斜交する北北西-南南東方向の配列も見られる。鳥取県西部地震はそのような斜交する地震活動域で発生した左横ずれの地震であるが、このような微小地震の配列は全体としては右横ずれのせん断帯内部に生じるリーデルせん断帯 R2 で説明できる可能性がある。なお、これらの斜交する地震活動が見られる場所では、ひずみ集中帯の幅が広い傾向がある。

### GNSS 観測点の新設と GNSS データ収集・解析システム

山陰ひずみ集中帯の地殻変動の詳細なパターンを明らかにするためには、現在の GEONET の平均配点密度 (20~25km) では不十分である。そこで、我々はひずみ集中帯を横切る 3 測線 (鳥取市付近、鳥取県倉吉市から岡山県真庭市、米子市付近) において、13 点の観測点を新設した。観測開始は、鳥取県倉吉市の 3 点で 2014 年 8 月、それ以外の 10 点は 2014 年 12 月である。GNSS 受信機は Trimble 5700 を用い、外部データロガー (三浦・出町, 2014) とデータ専用通信 SIM カードにより、Compact RINEX 形式の 1 秒サンプリングデータが京都大学防災研究所に毎日転送されている。日座標値の算出には、GNSS 基線解析ソフトウェア GIPSY6.2 を用い、整数値バイアス推定精密単独測位法 (PPP-AR) により、周辺の GEONET 観測点とともに約 2 週間遅れで日座標値の推定結果を得ることができる。地殻変動のベクトル図と時系列は、web (<http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~nishimura/monitoring.html>) にて公開中である。観測開始から 1 ヶ月以上が経過したが、新設点の日座標値の再現性は周辺の GEONET 観測点と同程度と良好であり、観測条件や設置状況が適切であることが確認できた。観測開始から間もないため地殻変動のパターンを議論することはできないが、8 月に設置した観測点間で変位速度が異なるようにも見えることから、データの蓄積により詳細地殻変動が明らかになることが期待できる。

### 謝辞

観測点の設置にあたり、鳥取市教育委員会、倉吉市教育委員会、境港市教育委員会、南部町教育委員会、日野町役場、日南町役場、真庭市教育委員会にご協力頂きました。上記の各機関に感謝いたします。

キーワード: ひずみ集中帯, GNSS, 地殻変動, 山陰地方, 内陸地震

Keywords: strain concentration zone, GNSS, Crustal deformation, San-in district, inland earthquake

NIED 国際地震観測網データを用いて推定したフィリピン地殻内応力の空間変化: フィリピン断層の不均質すべりによる影響  
Strong spatial variations of stress within the Philippines produced by slip heterogeneity along the Philippine fault

吉田 圭佑<sup>1\*</sup>; プリード ネルソン<sup>1</sup>; 福山 英一<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Keisuke<sup>1\*</sup>; PULIDO, Nelson<sup>1</sup>; FUKUYAMA, Eiichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

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

A detailed knowledge of the stress state of crust is a key factor to understand earthquake occurrence. Previous studies showed that the stress patterns are primarily controlled by the plate boundary forces [e.g. Zoback et al., 1989]. However, it has also been pointed out that observed complicated stress field is affected by other factors. To address this point it is important to investigate the stress state of various tectonic regions around the world.

The Philippines is located in a region of high crustal seismicity, bounded to the east and west by oblique subduction zones. In the last few years, seismic and volcanic observation network have substantially improved in the Philippines in particular during the SATREPS cooperative project "Enhancement of Earthquake and Volcano Monitoring and Effective Utilization of Disaster Mitigation Information in the Philippines" between PHIVOLCS and NIED. Using waveform from regional broadband seismic stations, moment tensor solutions are routinely determined at NIED. In this study, we investigated the stress states in the Philippine archipelago by using those moment tensor solutions.

As a first step, we classified focal mechanisms into three groups: 1) events within the overriding plate, 2) those along the interplate, and 3) those within the subducting plate. Then we applied the stress tensor inversion method developed by Michael (1987) to focal mechanisms within the overriding plate. The estimated  $\sigma_1$ -axis is oriented to WNW-ESE, which is parallel to the slip vectors of the interplate events.

In order to investigate the spatial distribution of stress across the archipelago, we performed additional stress tensor inversions by dividing the entire region in sub-regions eastern and western of a stripe containing the NNE-SSW striking Philippine fault, which is a 1200km long strike-slip fault cutting through the islands. Additionally the region was subdivided along the strike of the fault. In the central and eastern sub-regions,  $\sigma_1$ -axis are parallel to the orientations of relative plate motions. On the other hand, in the western region, orientations of  $\sigma_1$ -axis are significantly different from those of the relative plate motions. In particular, the orientations of  $\sigma_1$ -axis in southern part (Bohol) are substantially different from those of the relative plate motions. Also, the orientations of  $\sigma_1$ -axis in northern part (Mindoro) are different from those in the entire Philippines.

The  $\sigma_1$ -axes and  $\sigma_3$ -axes in Bohol and Mindoro are opposite. The  $\sigma_1$ -axis in Bohol and  $\sigma_3$ -axis in Mindoro are almost parallel to the strike of the Philippines fault, which is consistent with the stress produced by left-lateral slip on the central part of the Philippines fault. This range corresponds to the Masbate fault characterized by a larger number of moderate-sized earthquakes, while the northern and southern extensions correspond to the segments which have generated several historical earthquakes [Bessana & Ando, 2005]. Our study suggests that more strain is released along the Masbate fault by moderate-sized events, while the northern and southern extensions are accumulating more strain which may be released as large earthquakes in the future. From the calculated stresses produced by the Philippines fault, based on dislocations in an elastic half-space model [Okada, 1992], as well as assuming an interplate coupling, we successfully reproduced the spatial features of stress orientations.

We also propose that a model considering the bending deformation of the overriding plate is also able to roughly explain the observed  $\sigma_1$ -axes, based on a 2D finite element modeling, although it does not explain the strike-slip stress regime. By taking account of oblique subduction effects, we may reproduce the observations in more detail. However, we prefer the strike-slip on the Philippines fault as the cause of stress variation, because this simple model alone can sufficiently explain all the observations.

キーワード: フィリピン, メカニズム解, 応力テンソルインバージョン, 応力モデリング  
Keywords: the Philippines, focal mechanisms, stress tensor inversions, stress modeling

## 発震機構解から推定した九州内陸の応力場 (2) Spatial heterogeneities of deviatoric stress in Kyushu, Japan, inferred from the focal mechanism (2)

松本 聡<sup>1\*</sup>; 大倉 敬宏<sup>2</sup>; 宮崎 真大<sup>1</sup>; 清水 洋<sup>1</sup>; 安部 祐希<sup>3</sup>; 井上 寛之<sup>2</sup>; 中元 真美<sup>1</sup>; 吉川 慎<sup>2</sup>; 山下 裕亮<sup>3</sup>

MATSUMOTO, Satoshi<sup>1\*</sup>; OHKURA, Takahiro<sup>2</sup>; MIYAZAKI, Masahiro<sup>1</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>; ABE, Yuki<sup>3</sup>; INOUE, Hiroyuki<sup>2</sup>; NAKAMOTO, Manami<sup>1</sup>; YOSHIKAWA, Shin<sup>2</sup>; YAMASHITA, Yusuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山センター, <sup>2</sup>京都大学火山研究センター, <sup>3</sup>東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Aso Volcanological Laboratory, Kyoto Univ., <sup>3</sup>Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

九州内陸では別府-島原地溝において微小地震活動が非常に活発である一方、活断層である日奈久断層付近や2005年福岡県西方沖地震(M7)震源域において高い地震活動度を示している。本研究では震源および発震機構推定の精度向上させるため、地震観測点を展開してデータを取得した。このデータを九州地域の九州大学・京都大学のルーチン観測・臨時観測、防災科学技術研究所 Hi-net, 気象庁によるデータとともに処理を行った。

解析した地震は1993年1月から2013年7月までの深さ20km以浅に発生した地震を用い、震源はSaiga et al. (2010)による3次元速度構造を用いて震源の再決定を行った。福岡県西方沖震源域においてはHori et al. (2006)による構造を用いた。発震機構解はP波初動極性を用いて決定し、このうち、精度の良い9177個を選んだ。

応力場は微小地震の発震機構解をもちいて応力テンソルインバージョンを行って推定した。緯度・経度方向に0.15°のグリッドを設定し、グリッド内の応力を一様とした。得られた結果は九州内では共通の特徴として、最小主圧縮応力( $\sigma_3$ )が安定しており、最大および中間主圧縮応力が近接している特徴を示す。空間分布は、九州内を大きく3つに分ける特徴を持っている。南部は四国の中央構造線延長上から八代海に抜けるせん断帯によって区分されている。この地域は最小主圧縮応力が北北西-南南東になっている。さらにせん断帯近傍の活断層に対して $\sigma_3$ 軸がほぼ垂直になっている。これらはせん断帯の活断層のせん断応力が開放されていることを示している。中部はいわゆる別府島原地溝帯に対応しており、ほぼ南北の $\sigma_3$ と正断層あるいは一軸伸張( $\sigma_1 \approx \sigma_2$ )の応力場を示している。これらは別府や島原半島における地溝の形状と整合的な応力場である。北部は地溝帯より北の領域であり、再び北北東-南南西張力場になっている。この地域では地表活断層に対して応力場がせん断応力を強く働かせる向きになっている。

以上のように九州は大きく3つの地域に応力場の特徴が分けられ、これらが地殻活動と密接に関係している可能性を示唆している。

キーワード: 応力場, 九州, 発震機構

Keywords: stress field, Kyushu, focal mechanism

## 地殻応力に対する断層の応答性から推定される日本列島における断層活動場の時間発展 Development of fault activity in Japan estimated from the response of the faults to the tectonic stress field

宮川 歩夢<sup>1\*</sup>; 大坪 誠<sup>2</sup>  
MIYAKAWA, Ayumu<sup>1\*</sup>; OTSUBO, Makoto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, <sup>2</sup> 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geoinformation (IGG), Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute of Earthquake and

日本列島, 特に東北地方において現在のような応力場(東西圧縮)を獲得したのは, 3.5Ma 頃と考えられている(Sato et al., 1994). 一方で, 日本列島において, 1Ma より最近に現在の活動様式で活動を開始した活断層が多く存在することが知られている(道家ほか, 2012). これらの研究結果は, 日本列島がある応力場におかれてから, その応力場に応答した断層活動が開始するのに, 数 Ma の時間経過が必要であることを示唆する. そこで我々は, このような地殻応力に対する断層が応答する過程を, 断層活動場の成熟過程として検討する. 本発表では, 日本列島における現在の地殻応力場に対して, 地殻内の断層の力学的応答性を求め, 断層成熟過程の空間変化と地質学的・測地学的変動場の関係について議論する.

日本列島における地殻応力は, F-net による震源メカニズムに対して応力逆解析を行い推定した. また, 活断層と地質断層(活断層と認定されていない地質学的な断層)について, 地殻応力に対する断層の応答性を slip tendency (Morris et al., 1996) を用いて計算した. その結果, 東北地方においては地殻応力に対して活動性が高い断層のほとんどが, 応力に応答して活断層化しているのに対して, 中部・近畿地方では地殻応力に対して活動性が高くても活断層化していない断層が存在した. このことは, 東北地方では断層活動場として成熟し, 中部・近畿地方では地殻応力に対する断層の応答が十分に進行しておらず, 断層活動場として未成熟な状態に有ることを示唆する. このような, 東北地方と中部・近畿地方における断層活動場としての成熟度の違いは, 東北地方で観察される地質学的歪や中部・近畿地方で観測される測地学的歪の分布と整合的である. 特に逆断層について道家ほか(2012)も, 中部地域の多くの逆断層型活断層について現在の運動になったのが, 東北日本のそれより遅い 1 Ma 以降であることを指摘している. すなわち, 東北地方では断層活動や褶曲として地質学的歪が記録されるほど地殻変形が進行していることから, 断層活動場としての成熟度が高いものと考えられる. それに対して, 現在測地学的に歪集中が進行している中部・近畿地域では, 断層活動場としての成熟度が低いものと考えられる.

Sato, H. The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan  
Journal of Geophysical Research, 1994, 99, 22261-22274

道家涼介; 谷川晋一; 安江健一. 日本列島における活断層の活動開始時期の空間的特徴. 活断層研究, 2012, 37: 1-15.

Morris, A.; Ferrill, D. & Henderson, D. Slip-tendency analysis and fault reactivation Geology, 1996, 24, 275-278

キーワード: 断層活動, ひずみ集中帯, 地殻応力

Keywords: crustal deformation processes, tectonic zone, fault activity

## 中央構造線露頭から見た断層内部構造の発達過程 Evolution of fault zone architecture during the exhumation of the Median Tectonic Line in SW Japan

重松 紀生<sup>1\*</sup>; 亀高 正男<sup>2</sup>; 稲田 徳之<sup>2</sup>; 宮脇 昌弘<sup>2</sup>; 東郷 徹宏<sup>1</sup>; 藤本 光一郎<sup>3</sup>  
SHIGEMATSU, Norio<sup>1\*</sup>; KAMETAKA, Masao<sup>2</sup>; INADA, Noriyuki<sup>2</sup>; MIYAWAKI, Masahiro<sup>2</sup>; TOGO, Tetsuhiro<sup>1</sup>;  
FUJIMOTO, Koichiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 産業技術研究所活断層・火山研究部門, <sup>2</sup> 株式会社ダイヤコンサルタント, <sup>3</sup> 東京学芸大学

<sup>1</sup>Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST, <sup>2</sup>Dia Consultants Co. Ltd., <sup>3</sup>Tokyo Gakugei University

日本の陸上において最大の断層である中央構造線は、長い履歴を持ち、延性領域から脆性領域までの異なる条件で形成した断層岩が分布する。従って、その解析は物理条件の違いによる多様な断層の挙動の理解につながることを期待される。本研究では三重県松阪市飯高町栗野から田引にかけての林道沿いに見つかった露頭において断層内部構造形成過程について検討した。

栗野・田引露頭では、標高差約 35 m ほどの斜面に、走向方向に約 80 m にわたり中央構造線が露出している。中央構造線の南側(下盤側)に三波川変成岩、北側(上盤側)には和泉層群相当の堆積岩、及び領家帯の畑井トータル岩が分布している。本研究では東西約 10 m の標高差 15 m の範囲について壁面整形を行い、記載を行った。

記載範囲では和泉層群相当の堆積岩と三波川変成岩の岩相境界である中央構造線はほぼ東西走向で北傾斜である。三波川変成岩は中央構造線から 20 m ほどにわたり様々な程度に破碎を被っており、この内部には右横ずれを示す非対称構造が発達している。露頭西部においては、岩相境界およびその下盤数 m の場所に東西走向で北傾斜の剪断面が見られる。下側の剪断面はより明瞭であり主すべり面となっていると考えられる。露頭東端では上側剪断面は和泉層群相当の堆積岩中に伸び、下側の剪断面が和泉層群相当の堆積岩と三波川変成岩の岩相境界となっている。

主すべり面上盤側には、非対称複合面構造が顕著に発達しており右横ずれを示す。この右横ずれ非対称複合面構造は、主すべり面により切られる。主すべり面内部は、黒色鱗片状ガウジ、灰色ガウジ、黒色無構造ガウジと分かれる。このうち灰色ガウジは、露頭全体にわたり主すべり面の中心部に連続的に分布し、さらに他の構造要素とは直線的な境界を持つことから断層帯を構成する最も新しい構造要素と考えられる。黒色鱗片状ガウジはその上盤に、黒色無構造ガウジは下盤に分布する。

右横ずれ非対称複合面構造と黒色鱗片状ガウジとの境界に右横ずれ成分の正断層を示す条線が観察される。黒色鱗片状ガウジ内部には西方向にレーク角を持つ条線が観察される(センス不明)。灰色ガウジ内部には傾斜方向の正断層を示す条線が観察される。なお、部分的に上記構造を切る逆断層性の条線を持つ剪断面が観察される。ただしこの構造は必ずしも中央構造線の断層面と調和的な構造が動いているわけではない。

以上のことから、三重県松阪市飯高町における構造発達は、右横ずれ→右横ずれ正断層→西方向にレーク角を持つ断層運動→傾斜方向の正断層の順序で変化したと考えられる。右横ずれの構造が幅広い範囲での変形であるのに対し、他の構造が狭い範囲に変形が集中することは、変形の物理条件の違いを反映している可能性がある。また今回の結果は、中央構造線の構造発達に関する数多くの研究の結論と調和的というわけではない。これらについて、今後の検討が必要である。

キーワード: 断層内部構造, 断層ガウジ, 断層条線, 正断層

Keywords: fault zone architecture, fault gouge, fault striation, Normal Fault

## 断層帯はどのように成長するのか? : 天然断層岩の観察からの知見 How do fault zones develop?: Findings from the observation of natural fault rocks

竹下 徹<sup>1\*</sup>; 金子 由実<sup>1</sup>; 荒井 駿<sup>1</sup>  
TAKESHITA, Toru<sup>1\*</sup>; KANEKO, Yumi<sup>1</sup>; ARAI, Shun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学  
<sup>1</sup> Hokkaido University

地震は岩石の破壊によって生じるが、内陸型地震は地殻中のどこでも起きるわけではなく、断層に沿って起きることが知られている。したがって、地震活動の問題を考える時、断層構造の発展・進化は重要な研究テーマとなるが、意外にもこの問題について十分な解答が得られていないのが実情である。例えば、断層は当然剪断あるいは破碎帯によって認識されるが、一部の地質学者は断層は弱面であるので、地殻中の変位はそこだけに集中し決して破碎帯の幅は拡大していかないと考えている。しかし、一方で破碎帯の幅は変位量とともに増加していくことが知られている。最近、Schrank et al. (2008) は剪断帯は最初、インタクトな地殻中にかみそりのような断層として発生し、網目状に連結して行って、最後には網目状の剪断帯に囲まれた部分も剪断帯となって、剪断帯の体積(幅)が断層に沿う変位(時間)とともに増加していくというモデルを示した。Takeshita and El-Fakharani (2013) は、三波川変成岩が地殻上部レベルに上昇する、脆性-延性転移の条件で形成されたと考えられる石英片岩中に発達する試料スケールの断層について、Schrank et al. (2008) が示したものと極めて類似する剪断帯の成長過程を明らかにした。この研究によると石英片岩中の微小剪断帯は、最初石英の動的再結晶を伴って形成され、同時に微小剪断帯に沿って侵入して来た流体から白雲母が沈殿するため、ミクロオーダーの微細粒石英と白雲母から構成される多結晶体の幅狭い帯として形成される。時間の経過とともに微小剪断帯は網目状に発達していくばかりか、剪断帯の幅や結晶サイズが増加する。この微小剪断帯の部分は、構成鉱物の粒径が極めて小さいので圧力溶解-沈殿で低応力で変形が進行していると考えられる。このため引き続き変形においては、網目状剪断帯に囲まれた未変形のレンズ状部分に応力が集中し、そこに微小剪断帯が形成され、同様な過程が繰り返されることにより微小剪断帯の体積が増加し、微小断層帯が成長していく。本研究は試料スケールの剪断帯について行われたが、おそらく露頭スケールおよび地図スケールでも同様な過程で剪断あるいは破碎帯が成長して行くと考えられる。破碎帯成長の鍵は2つあって、1つ目は幾何学的に破碎帯が網目状に形成されていくことが重要である。網目状の破碎帯は、これまで地質学者が露頭や試料スケールの断層について観察している事実と合致しているばかりか、地図スケールではセグメントとジョグ構造がこれにあたる。今回は、三重県中央構造線で新たに見つかった小規模なジョグ構造と周辺の変形構造をポスター発表で報告する(荒井ほか、本連合大会)。もう1つは、亀裂形成に伴う流体の浸透と流体を介した岩石の変質作用および圧力溶解沈殿の重要性である。この問題と関連して、破碎帯中の流体を介した物質移動は大変重要なテーマであり、今回、金子ほか(本連合大会)の発表で、中央構造線カタクレサイト中の流体を介した元素移動により岩石が軟化していく過程を議論する。

キーワード: 断層帯の成長, 剪断あるいは破碎帯, 溶解-沈殿クリープ, 網目状断層帯, 脆性-延性転移, 流体を介した物質移動

Keywords: growth of fault zone, shear or fracture zone, dissolution-precipitation creep, anastomosing fault zone, frictional-viscous transition, mass transfer via fluids

## 三重県中央構造線沿いのカタクレーサイト化に伴う流体を介した元素移動 Element migration via fluids with progress of fracturing along the Median Tectonic Line, Mie Prefecture, southwest Japan

金子 由実<sup>1\*</sup>; 竹下 徹<sup>1</sup>; 重松 紀生<sup>2</sup>; 藤本 光一郎<sup>3</sup>

KANEKO, Yumi<sup>1\*</sup>; TAKESHITA, Toru<sup>1</sup>; SHIGEMATSU, Norio<sup>2</sup>; FUJIMOTO, Koichiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院理学院, <sup>2</sup>独立行政法人産業技術総合研究所活断層・地震研究センター, <sup>3</sup>東京学芸大学

<sup>1</sup>Hokkaido University Graduate school of science, <sup>2</sup>Active Fault and Earthquake Research Center, Geological Survey of Japan, National Institute of Advan, <sup>3</sup>Tokyo Gakuji University

断層帯を構成する脆性断層岩(カタクレーサイト)中では岩石内に流体が流れ、流体を介して溶解・沈殿反応が起き、岩石の軟化・硬化が引き起こされると考えられている。本研究は、産総研の松阪飯高観測点で得られた深度473.9mで中央構造線を貫通するボーリングコア試料に見られるカタクレーサイトについて、断層帯における流体を介した元素移動を明らかにした。

三重県の中央構造線においては、上盤の領家帯構成岩石中にマイロナイトとカタクレーサイトが発達している。本研究では得られたボーリングコアのうち、トーナライトを原岩とカタクレーサイト試料(深度439-473m)と未破碎な試料(深度87m・88m・317m・358m)を研究対象とした。

偏光顕微鏡下での微小剪断割れ目密度に基づき、試料のカタクレーサイト化の程度を4段階、「未破碎岩」、「弱破碎岩」、「中破碎岩」、「強破碎岩」に分類した。蛍光X線分析による全岩化学組成結果に対してアイソコン法(Grant, 1986)を使用し、質量変化と元素移動を明らかにした。また、多変量解析の主成分分析を使用し、分散が最大となるように新たな指標を設定することで、元素の挙動の原因を明らかにした。さらにX線回折法結果に対してRockJock(Eberl, D.D., 2003)を使用し、鉱物モード組成を明らかにし、破碎の進展に伴う鉱物組み合わせの変化を詳細に明らかにしたほか、鏡下観察では同定できない微細粒部について、エネルギー分散型X線分析により鉱物同定を行った。

本研究では、Zrを不動元素とし、質量変化を(質量変化)=[(1/S)-1]×100として見積もった。Sはアイソコン図の原点と不動であるZrのプロットを結んだ直線の傾きである。密度の変化がないと仮定したとき、質量増減は体積増減と一致する。アイソコン法による解析に基づく、「未破碎岩と弱破碎岩」、「弱破碎岩と中破碎岩」、「弱破碎岩と強破碎岩」の組み合わせのそれぞれについて、質量増加は21%・33%・52%である。SiO<sub>2</sub>・Na<sub>2</sub>O・K<sub>2</sub>Oは同じような挙動を示し、未破碎岩から弱破碎岩では増加、弱破碎岩から中破碎岩・強破碎岩ではほぼ一定であった。SiO<sub>2</sub>の増加は割れ目への石英の沈殿による石英脈の形成、K<sub>2</sub>Oの増加は斜長石とカリ長石の白雲母化により引き起こされたと考えられる。また、斜長石はアルバイト成分が主であることから、Na<sub>2</sub>Oの増加は、斜長石についてオリゴクレスのアルバイト化によるものであると考えられる。TiO<sub>2</sub>・FeO\*・MnO・MgO・CaOに関しては主に同じ挙動を示し、未破碎岩から弱破碎岩では減少、弱破碎岩から中破碎岩・強破碎岩では増加した。また、LOI・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は破碎度に関わらず一方的に増加した。CaOの増加は濁沸石・ぶどう石、FeO\*の増加は硫化鉄・緑泥石、MgO・MnOの増加は緑泥石、TiO<sub>2</sub>の増加はスフェーンの形成によるものであると考えられる。さらに、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の増加は緑泥石・白雲母・濁沸石の形成、LOIの増加は白雲母・緑泥石の形成によるものであると考えられる。中破碎岩・強破碎岩になると摩擦係数の低い雲母・粘土鉱物(白雲母・緑泥石)や軟らかい鉱物である方解石が大量に形成している。したがって、中・強破碎岩中では、軟らかい鉱物の形成により、岩石が著しく軟化したことが推定される。

キーワード: 中央構造線, 物質移動, カタクレーサイト, アイソコン図, 溶解沈殿反応, 反応軟化

Keywords: Median Tectonic Line, mass transfer, cataclasite, isocon diagram, resolution precipitation reaction, reaction softening



## シュードタキライトとマイロナイトを利用した足助剪断帯変形環境の推定 Estimation of deformation environment of Asume Shear Zone using pseudotachylyte and mylonite

金井 拓人<sup>1\*</sup>; 高木 秀雄<sup>1</sup>  
KANAI, Takuto<sup>1\*</sup>; TAKAGI, Hideo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 早稲田大学

<sup>1</sup> Waseda University

中部地方領家帯の伊奈川花崗岩中に発達する足助剪断帯は、NE – SW 走向で正断層成分を伴った左ずれ剪断帯である(酒巻ほか, 2006)。構成断層岩類はカタクレーサイトのほか、シュードタキライトやウルトラマイロナイトを密接に伴う。今回、(1)シュードタキライトに発達する杏仁状構造を充填する方解石に発達した変形双晶を利用した応力解析と、(2)マイロナイト化した石英のc軸結晶格子定向配列(CPO)パターンを利用した変形温度の推定を行ったので、その結果を報告する。

(1)田振露頭より得られた53MaのFT年代(Murakami et al., 2006)をもつ厚さ11cmのシュードタキライト脈には、多くの杏仁状構造が発達する。この試料では杏仁状構造を充填する鉱物は大部分が石英と方解石で、ほとんどの方解石には直線的な変形双晶が発達する。変形双晶は双晶面における剪断変形であり、小断層と同様に古応力状態の推定に利用することができる。この方法は、石灰岩、大理石、方解石脈、などを中心に利用されてきたが、シュードタキライトに発達する杏仁状構造を充填する方解石に適用した例も報告されている(Craddock and Magloughlin, 2005)。今回、杏仁状構造を充填する方解石から1491個のすべりデータを測定し(一部は金井・高木, 2014で報告済み)、Hough変換を利用した多重逆解法(Yamaji et al., 2006)により、古応力状態を推定した。その結果、足助剪断帯に対して、左ずれの剪断運動を与える応力状態と、正断層運動を生じさせる応力状態の2つが検出された。これらの応力状態はシュードタキライト形成後の応力状態であるが、足助剪断帯の運動センスと調和的であることから、足助剪断帯における岩石の変形に寄与していた可能性が考えられる。

(2)大島露頭には、断層脈と注入脈の両者が延性変形を被ったシュードタキライトが存在する。シュードタキライトの断層脈部と注入脈部それぞれ4ヶ所にみられる多結晶集合体石英を対象に、SEM-EBSD法を用いて結晶方位を測定した。測定にはOxford Instruments社製のHKL CHANNEL5を利用した。その結果、断層脈部では3ヶ所でZ集中、注入脈部では4ヶ所すべてでランダムなCPOパターンが得られた。Z集中のCPOパターンからは350~450℃以下での転位クリープでの変形、ランダムなCPOパターンからは拡散クリープでの変形が推定される(Bouchez, 1977; Takeshita and Wenk, 1988; Sakakibara, 1995)。このようなCPOパターンおよびマイロナイトの産状から、足助剪断帯は破碎-塑性遷移領域(無水条件で約300~400℃; Stockhert et al., 1999)において、シュードタキライトやマイロナイトを形成する変形を繰り返し被ったと考えられる。

### 文献

- Bouchez, K. L., 1977, *Tectonophysics*, **39**, 25-50.  
Craddock, J. P. and Magloughlin, J. F., 2005, *Tectonophysics*, **402**, 153-168.  
金井拓人・高木秀雄, 2014, 日本地質学会第121年学術大会講演要旨, **R15-P4**, 277.  
Murakami, M., Kosler, J., Takagi, H. and Tagami, T., 2006, *Tectonophysics*, **424**, 99-107.  
Sakakibara, N., 1995, *Jour. Sci. Hiroshima Univ.*, **10**, 267-332.  
酒巻秀彰・島田耕史・高木秀雄, 2006, *地質雑*, **112**, 519-530.  
Stockhert, B., Brix, R. M., Kleinschrodt, R., Hurford, J. A. and Wirth R., 1999, *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 351-369.  
Takeshita, T. and Wenk, H. R., 1988, *Tectonophysics*, **149**, 345-361.  
Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 980-990.

キーワード: 足助剪断帯, 破碎-塑性遷移, 杏仁状構造, 方解石変形双晶, 石英c軸ファブリック  
Keywords: Asume Shear Zone, brittle-plastic deformation, amygdale, calcite twin, quartz c-axis CPO

## 塩ノ平断層における断層ガウジの摩擦特性 Frictional properties of Shionohira Fault Gouge

青木 和弘<sup>1\*</sup>; 瀬下 和芳<sup>1</sup>; 田中 義浩<sup>1</sup>; 亀高 正男<sup>2</sup>; 酒井 亨<sup>2</sup>; 岡崎 和彦<sup>2</sup>; 嶋本 利彦<sup>3</sup>  
AOKI, Kazuhiro<sup>1\*</sup>; SESHIMO, Kazuyoshi<sup>1</sup>; TANAKA, Yoshihiro<sup>1</sup>; KAMETAKA, Masao<sup>2</sup>; SAKAI, Toru<sup>2</sup>;  
OKAZAKI, Kazuhiko<sup>2</sup>; SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>2</sup> ダイヤコンサルタント, <sup>3</sup> 中国地震局地質研究所

<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>2</sup>Dia Consultants, <sup>3</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震(以下4.11地震と呼ぶ)によって、いわき市田人町旅人滑石から石住綱木北西に至る約14kmの区間に、北北西から南南東へ延びる地表地震断層が出現し、石山ほか(2011)によって塩ノ平断層と命名された。一方で、旅人滑石より南方は茨城県との県境付近まで同方向のリニアメントが識別されているが、この区間には地表変位は現れなかった。著者らは4.11地震による活動区間と非活動区間との違いに注目した調査・研究を進めており、今回の発表では、活動区間である塩ノ平断層の地表露頭から採取した断層ガウジを用いた低速・高速摩擦試験結果について報告する。

試験機は、中国地震局地質研究所が所有する回転剪断式低速・高速摩擦試験機を用いた。すべり速度は6mm/年~2m/s、温度・圧力条件は熱水圧力容器とTiAlCr合金製ピストンを使用することで500℃、70MPaの超臨界水圧下まで可能である。試料は、塩ノ平断層のうち、別当露頭で確認された結晶片岩中の幅数十cmの厚い断層ガウジから採取したもの、塩ノ平露頭で確認された砂岩と結晶片岩の接する断層面に沿って確認された断層ガウジより採取した。断層ガウジより採取した試料を60℃で20時間乾燥後に乳鉢で強くこすり過ぎないように粉末し、#100の篩で150μm以下の粒径を選別する。その後、TiAlCr合金製の下部ピストン(40mm径)にテフロン・スリーブを設置し、テフロン・スリーブ中に粒径選別した試料をセットした。

試験条件は、断層ガウジ試料の初期圧密を1~5MPa、垂直応力1.0~2.0MPa、すべり速度0.2microns/s~2.1m/sとし、低速・高速摩擦試験を実施した。また、無水及び含水条件下で実施し、更に、摩擦の速度依存性についても求めた。

試験結果から両露頭の断層ガウジは、無水条件下で0.6~0.8程度の高い摩擦係数を示すのに対して、含水条件下では0.1~0.2程度の極めて低い摩擦係数を示した。また、断層ガウジの摩擦係数は速度の増加とともに僅かに増加し、高速ほど摩擦が大きくなる「速度強化」の性質をもつことが明らかになった。

キーワード: 摩擦特性, 断層ガウジ, 塩ノ平断層, 摩擦係数, 低速・高速摩擦試験, 福島県浜通り地震

Keywords: friction properties, fault gouge, Shionohira fault, friction coefficient, low and high velocity friction experiment, Fukushima-ken Hamadori earthquake

## Structural development of the basin associated with bends on the North Anatolian fault in NW Turkey

### Structural development of the basin associated with bends on the North Anatolian fault in NW Turkey

Kurt Hulya<sup>1\*</sup>; SORLIEN Christopher<sup>2</sup>; SEEBER Leonardo<sup>3</sup>; STECKLER Michael<sup>3</sup>; SHILLINGTON Donna<sup>3</sup>; CIFCI Gunay<sup>4</sup>; DONDURUR Derman<sup>4</sup>; OKAY Seda<sup>4</sup>  
KURT, Hulya<sup>1\*</sup>; SORLIEN, Christopher<sup>2</sup>; SEEBER, Leonardo<sup>3</sup>; STECKLER, Michael<sup>3</sup>; SHILLINGTON, Donna<sup>3</sup>; CIFCI, Gunay<sup>4</sup>; DONDURUR, Derman<sup>4</sup>; OKAY, Seda<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Technical University, Department of Geophysics, <sup>2</sup>Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara, <sup>3</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, <sup>4</sup>Dokuz Eylul University, Institute of Marine Sciences and Technology

<sup>1</sup>Istanbul Technical University, Department of Geophysics, <sup>2</sup>Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara, <sup>3</sup>Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, <sup>4</sup>Dokuz Eylul University, Institute of Marine Sciences and Technology

The Marmara Sea in western Turkey contains three subbasins with water depths reaching 1250 m, called from west to east the Tekirdag, Central and Cinarcik basins. These basins are active subsiding marine basins forming along the North Anatolian Fault (NAF) which is 1500 km-long and accommodates the current GPS-derived about 25 mm/yr westward motion of the Anatolian platelet relative to Asia. The Quaternary active Cinarcik basin is representative of the basin that developed in the wake of Tuzla bend along continental transform NAF. The basin is oblique time-transgressive half graben and is bordered by the master northern strand of the transform.

We use existing deep-penetration, low-resolution migrated multichannel seismic reflection (MCS) data and new migrated high-resolution MCS data for seismic stratigraphic interpretations in Cinarcik basin. All the seismic reflection data are used to correlate five stratigraphic horizons which contain stacked low-stand shelf-edge deltas. These five seismic horizons related to the geological boundaries with the known age information are used to calculate thicknesses, depth changes and tilts of the strata within the basin.

The Cinarcik basin has an asymmetric structure and within the basin strata are progressively tilted obliquely toward the bend and toward the border fault, where subsidence is fastest. Yet, nearest the bend is also where the basin is youngest and shallowest. Away from the bend the subsidence rate decreases while the basin get deeper and older. This common pattern is accounted for by time-transgressive basin growth. On the transtensive side of the bend, slip on the transform is oblique normal and the hangingwall side subsides forming the basin. Subsidence continues along the fault and the basin get progressively deeper away from the bend. Eventually, the basin reaches its maximum depth, but can continue to grow longitudinally along the fault.

キーワード: North Anatolian Fault, Marmara Sea, Cinarcik Basin, Multi-Channel Seismic Reflection, Seismic Stratigraphy, Basin Formation

Keywords: North Anatolian Fault, Marmara Sea, Cinarcik Basin, Multi-Channel Seismic Reflection, Seismic Stratigraphy, Basin Formation

## 北アナトリア断層帯下における地殻内粘性率の空間変化 The spatial viscosity variation in the crust beneath the western North Anatolian Fault

山崎 雅<sup>1\*</sup>; Gregory A., Houseman<sup>2</sup>  
YAMASAKI, Tadashi<sup>1\*</sup>; HOUSEMAN, Gregory A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> リーズ大学  
<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>University of Leeds

The GPS velocity profiles across the western North Anatolian Fault (NAF) near the location of the 1999 Izmit rupture are characterised by: (i) before the earthquake, strain rate is localised in a region <100 km wide across the near-fault zone, and (ii) after the earthquake, near-fault relative velocities are up to ~150 mm/yr, being significantly higher than the long-term relative displacement rate of Anatolia with respect to Eurasia (~22 mm/yr). We previously showed that these characteristics can be explained if a localised weak zone (LWZ) in the mid-crust directly beneath the NAF northern strand is embedded in a relatively high viscosity background crustal layer [Yamasaki et al., 2014, *J. Geophys. Res.*, 119, 3678-3699]. This study expands upon the previous study of Yamasaki et al. [2014], investigating in more detail a likely spatial viscosity variation beneath the western North Anatolian Fault (NAF), for which a simplified 3D finite element model is employed to solve the linear Maxwell visco-elastic response to periodically repeating right lateral strike-slip earthquakes under the presence of a constant-rate far-field loading. We tested in this study whether the LWZ in the mid-crust is required to be centred on the NAF northern strand. Horizontal offset of the LWZ from directly beneath the rupture zone of the 1999 Izmit earthquake should be less than ~10% of its width in order to preserve the approximate anti-symmetry of the GPS velocity profiles. We find that a LWZ between the NAF northern and southern strands, which may be expected from the spatial variation of low resistivities in the magnetotelluric (MT) images of Tank et al. [2005, *Phys. Earth Planet. Inter.* 150, 213-225] and Kaya et al. [2013, *Geophys. J. Int.* 193, 664-677], does not explain the GPS velocities. We therefore find no simple one-to-one relation between viscosities and resistivities beneath the western NAF. In this study we also investigate possible depth-variation of the background viscosity structure on which the LWZ centred on the NAF northern strand is superposed, and find that the background viscosities are required to be greater than  $\sim 2 \times 10^{20}$  Pa s at depths shallower than ~30 - 35 km in the 40 km thickness of the crust in order to explain the high strain-rate zone in the pre-seismic velocity profiles.

## 地震間-地震後の東北日本弧における垂直変動のモデル化：レオロジー不均質の効果 Numerical modeling on interseismic and post-seismic vertical deformation of NE Japan: Role of rheological heterogeneity

武藤 潤<sup>1\*</sup>; 芝崎 文一郎<sup>2</sup>; 飯沼 卓史<sup>3</sup>; 西村 卓也<sup>4</sup>

MUTO, Jun<sup>1\*</sup>; SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>2</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>3</sup>; NISHIMURA, Takuya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>3</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>3</sup>Inuma  
Takeshi International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>4</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto  
University

Nation wide deployment of dense geodetic network has clarified the strain accumulation and release processes through the megathrust earthquake cycle for the NE Japan subduction zone system. Prior to the 2011 Tohoku Oki earthquake, vertical deformation was characterized by rapid subsidence in the forearc and gentle uplift in the backarc. The large subsidence is only observed in a latitude range between N37 and N40 degrees. At the Tohoku Oki earthquake, coseismic vertical deformation shows a subsidence simply increasing eastward reaching a 1.2 m on the Oshika Peninsula. Post-seismic deformation over the three years shows concentric distribution of uplift and subsidence around the epicentral area: uplift in the forearc, subsidence in the volcanic front to backarc, and uplift in further backarc to Japan Sea side. The pattern of the observed uplift and subsidence across the island arc in the middle of the NE Japan, crossing the largest slip of the Tohoku Oki earthquake, is opposite that in the interseismic period (Nishimura, 2014). Here, we developed two dimensional and three dimensional finite element models of the NE Japan subduction zone to simulate the vertical crustal deformation during the megathrust earthquake cycle. Two dimensional model transects and three dimensional model includes an area of large coseismic slip of the Tohoku Oki earthquake. Temperature dependent heterogeneous viscosity structures were utilized to investigate the role of rheological heterogeneity (Muto et al., 2013). Deformation along plate boundary is kinematically assigned using the split node method. During interseismic period, backslip is given to a locked portion at a plate convergence rate of 80 mm/year. At the coseismic step, the amount of slip corresponding to slip deficit accumulated during the interseismic period for 500 years is given along the locked portion. Our preliminary models indicate that the pattern of vertical deformation implies the rheological heterogeneity normal to the NE Japan island arc. Especially the model with presence of rheological contrast between thick, cold forearc and weak volcanic front reproduce similar pattern of vertical deformation observed in the interseismic period. Those results strongly suggest that the incorporation of rheological heterogeneity is required to explain the strain accumulation process in three-dimensional subduction zone systems from the geodetic observation.

### References:

Muto, J., B. Shibazaki, Y. Ito, T. Inuma, M. Ohzono, T. Matsumoto, and T. Okada (2013), *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50906.

Nishimura, T. (2014), *J. Disaster Res.*, 3, 294-302.

Keywords: Subduction zone earthquake cycle, post-seismic deformation, interseismic deformation, rheology, finite element model

## 2011年東北沖地震後の奥羽脊梁山脈周辺における粘弾性緩和過程と歪異常のモデル化 Modeling viscoelastic deformation and strain anomaly around the Ou Backbone Range after the 2011 Tohoku-oki earthquake

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>; 松本 拓己<sup>2</sup>; 武藤 潤<sup>3</sup>; 飯沼 卓史<sup>4</sup>; 三浦 哲<sup>5</sup>  
SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Takumi<sup>2</sup>; MUTO, Jun<sup>3</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>4</sup>; MIURA, Satoshi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所, <sup>3</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>4</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>5</sup> 東北大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>2</sup>National Institute for Earth science and Disaster Prevention, <sup>3</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University, <sup>4</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>5</sup>Graduate School of Science, Tohoku University

This study investigates the viscoelastic deformation processes of the northeastern Japan island arc after the Tohoku-oki earthquake by considering the heterogeneous rheological structure. Recently, Shibazaki et al. (2014) calculated the effective viscosity of the Japanese island arc crust and upper mantle, considering the thermal structure obtained by dense geothermal observations using Hi-net boreholes (Matsumoto, 2007) and by Tanaka et al. (2004). They reproduced several elongated low-viscosity regions in the crust and upper mantle of the northeastern Japan arc, striking transverse to the arc, which correspond to hot fingers. Recently, Miura et al. (2014) found a postseismic strain anomaly along the Ou Backbone Range after the 2011 Tohoku-oki earthquake. This postseismic anomaly could have been affected by the existence of low-viscosity anomalies caused by the hot fingers.

We develop a finite element model of the viscoelastic deformation processes after the Tohoku-oki earthquake, considering the realistic crustal and mantle structures, and coseismic fault slip distribution (Iinuma et al., 2012). Our numerical results show that significant extensional viscous deformation occurs in the low-viscosity regions in the crust and upper mantle. This deformation causes significant subsidence in the back-arc region and Ou Backbone Range, but uplift near the Pacific coast. We also try to reproduce the decreases in areal strain along the Ou Backbone Range observed by Miura et al. (2014). In the case where low viscosity zones are extended to the shallower part of the crust, we can reproduce the areal strain decrease which is caused by contraction along the N-S direction. In our model, we cannot reproduce the expansion of areal strain decrease over time along the arc observed by Miura et al. (2014). To model this phenomenon, we would probably need to consider afterslip after the Tohoku-oki earthquake.

キーワード: 東北沖地震, 東北日本弧, 粘弾性緩和過程, 奥羽脊梁山脈, 歪異常

Keywords: the Tohoku-oki earthquake, the northeastern Japan arc, viscoelastic deformation, the Ou Backbone Range, strain anomaly

## 定常的な陸の隆起と海水準変動を考慮した房総半島完新世海成段丘の発達過程シミュレーション Modeling and simulation for the development of Holocene marine terraces in the Boso peninsula

野田 朱美<sup>1\*</sup>; 宮内 崇裕<sup>2</sup>; 佐藤 利典<sup>2</sup>; 松浦 充宏<sup>3</sup>  
NODA, Akemi<sup>1\*</sup>; MIYAUCHI, Takahiro<sup>2</sup>; SATO, Toshinori<sup>2</sup>; MATSU'URA, Mitsuhiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 構造計画研究所, <sup>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc., <sup>2</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>3</sup>The Institute of Statistical Mathematics

房総半島南端部には沼Ⅰ～Ⅳ面と呼ばれる完新世海成段丘が発達している。このうち最低位の沼Ⅳ面は1703年元禄地震の際に離水した浅海底地形(波食棚から海食台付近)であることが知られており、元禄段丘面とも呼ばれる(松田ほか, 1974)。この元禄段丘面と高位の沼Ⅰ～Ⅲ面の高度分布パターンが良く似ていることから、従来、沼Ⅰ～Ⅲ面も昔の元禄型地震によって離水したと考えられてきた(Matsuda et al., 1978; Shimazaki & Nakata, 1980; 宍倉, 2003)。しかし、プレート境界地震の場合、地震時にすべった領域(震源域)はやがて再固着するが、それ以外のプレート境界では地震間を通じて非地震性すべりが進行するため、地震時の隆起・沈降パターンは時間と共に徐々に失われていき、最終的に残るのはプレートの定常沈み込みによる変動だけである(Matsu'ura & Sato, 1989)。従って、沼Ⅰ～Ⅲ面の形成は元禄型地震の発生とは関係なく、その成因は太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みによる房総半島南端部の定常的な隆起運動と完新世の海水準変動に帰すべきものである(松浦・野田, 日本地震学会 2014 年度秋季大会講演予稿集, D11-03)。こうした考えの妥当性を検証するため、本研究では、波浪による浸食と堆積、地盤隆起、及び海水準変動を考慮した海岸地形形成モデルを構築し、房総半島南部の完新世海成段丘発達の数値シミュレーションを行った。

海岸地形の形成過程は概念的に次のような式で記述される: 標高変化 = -浸食 + 堆積 + 地盤隆起 - 海面上昇。海岸での海-陸相互作用のモデル化に際しては、浸食レートは波浪エネルギーの散逸レートに比例し(Anderson et al., 1999)、浸食によって生産された浮遊物質の堆積レートは岸から遠ざかるにつれて指数関数的に減少していくとした。また、房総半島完新世海成段丘の発達シミュレーションでは、地震性の間欠的な隆起運動は考慮せず、プレートの沈み込みに起因する定常的な隆起運動(Hashimoto et al., 2004)のみを考慮し、酸素同位体比記録に基づく平均海面高度の時系列データ(Siddall et al., 2003)を3次スプライン関数の重ね合わせでフィッティングした海水準変動曲線を用いた。

海食崖と海食台は海水準変動曲線の変曲点(山と谷)付近で発達する。1万年前から現在までの海水準変動曲線には7つの変曲点(4つの山と3つの谷)があるため、7つの海成段丘が形成される。しかし、隆起速度が遅いと、形成された段丘の殆どは現海面下に沈んでしまい観測されない。隆起速度が早い場合でも、古い段丘と新しい段丘の重なり合いや逆転が生じ、段丘面の形成年代と現在の高度の対応関係は単純ではない。このことは、房総半島南部の完新世離水海岸地形の詳細な調査に基づいて、既に指摘されている(遠藤・宮内, 日本活断層学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, P-06)。今回のシミュレーションでは、隆起速度を3~4mm/yrとすると沼Ⅰ～Ⅳ面に相当する明瞭な段丘面が発達することが分かった。但し、その場合でも、古い段丘と新しい段丘の重なり合いや逆転が生じているため、最高位の段丘面の形成年代が最も古いわけではないことに注意する必要がある。

キーワード: 海成段丘, 海水準変動, 定常隆起運動, 浸食, 堆積

Keywords: Marine terrace, Sea level change, Steady land uplift, Erosion, Deposition

## 多重地震サイクルとそのすべり・時間依存構成則による解釈 Interpretation of multiple earthquake cycles based on the slip- and time-dependent fault constitutive law

松浦 充宏<sup>1\*</sup>  
MATSU'URA, Mitsuhiro<sup>1\*</sup>

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

The occurrence of the Mw9.0 Tohoku-oki earthquake in 2011 brought two essential problems in subduction-zone dynamics to light. The first problem is why did such an extraordinarily large earthquake occur in the same place where ordinarily large earthquakes have repeated every 40 years over the past two centuries? In other words, is the multiple earthquake cycles physically explainable? The second problem is when will the surface deformation pattern in northeast Japan be back? In other words, how will the frictional strength of ruptured areas be recovered? To address these problems, first, we need to change the conventional concept of asperity. Since Lay & Kanamori (1981) proposed an asperity model of earthquakes, the asperity has been thought to be an actual entity that means a strongly coupled portion of faults or a fundamental unit of seismic rupture areas. If it is so, plural asperities cannot occupy the same place. Then, no multiple earthquake cycle exists, though the chain rupture of adjacent asperities is possible. Recently, following the idea of spectral analysis, Matsu'ura (2012) redefined the asperity as a notional entity to represent the spatial irregularity in frictional properties (peak strength and critical slip-weakening displacement) of faults. For example, a specific mode in spectral analysis of peak strength corresponds to the asperities of a specific size. Then, plural asperities with different sizes can be in the same place, but it is only a necessary condition for multiple earthquake cycles. Another necessary condition is the scale dependence of critical slip-weakening displacement, which results from the upper fractal limit of fault surface geometry (Matsu'ura et al., 1992). Otherwise the dynamic rupture of a small asperity would easily trigger the dynamic rupture of the largest basement asperity. From the laboratory rock experiments (e.g., Ohnaka & Shen, 1999) and the numerical simulations based on the slip- and time-dependent fault constitutive law (Aochi & Matsu'ura, 2002), we can derive the following quantitative relations on the scale-dependence of frictional properties; 1) the critical slip-weakening displacement is proportional to the upper fractal limit of fault surface geometry and inversely proportional to the abrasion rate of fault surface, and 2) the recovery time of peak strength is proportional to the square of the upper fractal limit and inversely proportional to the adhesion rate. The scale-dependence of fault healing time (the second relation) means that the strength recovery of larger asperities is slower than that of smaller asperities. So, the time needed for the complete recovery of the surface deformation pattern in northeast Japan depends on the fault healing time of the largest basement asperity, which would be very long.

キーワード: 2011年東北沖地震, 多重地震サイクル, アスぺリティモデル, すべり・時間依存構成則  
Keywords: 2011 Tohoku-oki earthquake, multiple earthquake cycle, asperity model, slip- and time-dependent friction law



## 水平短縮している堆積盆がなぜ沈降するのか? Why do horizontally shortening sedimentary basins subside?

飯尾 能久<sup>1\*</sup>  
HIO, Yoshihisa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京大・防災研  
<sup>1</sup>DPRI, Kyoto Univ.

新潟平野、大阪平野や濃尾平野などでは、数 km 以上の厚い堆積層が発達しており、これらの盆地は、新第3紀あるいは第4紀以降、沈降を続けていると考えられている(例えば、藤田,1993)。また、これらの堆積盆は、新潟-神戸歪集中帯あるいはその周辺に位置し、大きな水平短縮速度で特徴付けられる(Sagiya et al., 2000)。地層が水平に短縮すると、直感的には、そこでは物質が過剰となるため短縮した部分で地層が厚くなり、隆起が起こるものと考えられるが、上記の堆積盆では大規模な沈降が続いている。どうしてだろうか?

これらの堆積盆と周辺の山地の境界付近には活断層がある。その運動の逆断層成分により、上盤・下盤側で相対的な隆起・沈降が期待される。しかしながら、絶対的な隆起・沈降については、問題は単純ではない。例えば、半無限弾性体の単純な平面逆断層では、高角でないとそもそも下盤側に絶対的な(遠方から見て)沈降が表れない。断層のある弾性層より下部に粘弾性的な層を導入すると、粘性緩和とアイソスタシーの効果により沈降は生じる。しかしながら、この沈降は、そもそも隆起域の荷重に起因するものであり沈降量は隆起量とせいぜい同程度であるが(例えば、西村・他, 2012)、新潟平野や大阪平野では、沈降量が隆起量に比べて圧倒的に大きい。淡路島では標高数百 m の山の上にも大阪層群があるが、盆地下では、対応する層の深さは 2km 程度である(例えば、堀川・他, 2003)。新潟平野では、西端付近にある変位速度の大きな角田・弥彦断層の上盤側には顕著な山地は存在していない(例えば、石山・他, 2000)。

飯尾(2009)は、水平短縮による物質過剰を除去するために、地殻下部でデラミネーションが起こり、地殻が薄くなるために沈降すると考えた。短縮により厚くなった地殻下部で高温・高圧の変成作用が起こり、最上部マントルより重くなって脱落するという考えである。しかし、隆起から一転して沈降となるためには、相当大規模なものが脱落する必要があると考えられる。

飯尾(2009)は短縮域で物質過剰が生じると考えたわけであるが、それは例えば、粘土を短縮するようなイメージである。一方、薄い弾性板の短縮では、バックリングと呼ばれる上か下への一方的な曲がりが起こる可能性も知られている。上への曲がりにおいては、空気中には障害物は無いが、重力に抗するための仕事を必要とする。下への曲がりの場合、海面下の同じ深度で比較すると、沈降域において上載岩圧が小さくなるため、周囲より鉛直応力が小さくなると考えられる。そのため、沈降域において、水平最大圧縮応力と鉛直応力の差が大きくなり、変形が進みやすくなる可能性がある。

短縮変形において、一旦下向きのバックリングが起こるとそこでは差応力が大きくなり、さらに短縮変形が進行するという正のフィードバックが働く可能性がある。そのため、歪み速度の大きな堆積盆が形成されると考えられる。水平圧縮応力の絶対値が大きい場合、つまり、地殻が高応力状態にある場合は、1,2km の沈降はそれほど効かないかもしれないが、低応力状態にある場合は大きな効果を持つと考えられる(例えば、吉田・他(2014)による地形とメカニズム解の関係に見られるように)。

キーワード: 歪み集中帯, 応力, 堆積盆, 沈降, 内陸地震, 活断層

Keywords: high strain region, stress, sedimentary basin, subsidence, intraplate earthquake, active fault

## 本州の背弧内リフトの形成と短縮変形 Formation of backarc inner rifts and their shortening deformation in Honshu island, Japan

佐藤 比呂志<sup>1\*</sup>; 石山 達也<sup>1</sup>; 加藤 直子<sup>1</sup>; 阿部 進<sup>3</sup>; 白石 和也<sup>3</sup>; 稲葉 充<sup>2</sup>; 阿部 紫織<sup>1</sup>; 蔵下 英司<sup>1</sup>; 野 徹雄<sup>4</sup>; 佐藤 壮<sup>4</sup>; 小平 秀一<sup>4</sup>; 松原 誠<sup>5</sup>  
SATO, Hiroshi<sup>1\*</sup>; ISHIYAMA, Tatsuya<sup>1</sup>; KATO, Naoko<sup>1</sup>; ABE, Susumu<sup>3</sup>; SHIRAIISHI, Kazuya<sup>3</sup>; INABA, Mitsuru<sup>2</sup>; SHIORI, Abe<sup>1</sup>; KURASHIMO, Eiji<sup>1</sup>; NO, Tetsuo<sup>4</sup>; SATO, Takeshi<sup>4</sup>; KODAIRA, Shuichi<sup>4</sup>; MATSUBARA, Makoto<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所, <sup>3</sup> 石油資源開発 (株), <sup>4</sup> 海洋研究開発機構, <sup>5</sup> 防災科学技術研究所  
<sup>1</sup>ERI, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>JGI Inc., <sup>3</sup>JAPEX Co., Ltd., <sup>4</sup>JAMSTEC, <sup>5</sup>NEID

日本海の拡大は、複数の軸をもつ様式で進行した。この背弧域でのリフトニングについては、これまで地質構造や重力異常などから議論されることが多かったが、近年、深部反射法地震探査の実施や、地震波トモグラフィなどによって認識できるようになってきた。ここでは、とくに東北日本から中部日本にかけての地域を対象として、新しい地球物理学的数据を基に、日本海拡大期に形成された背弧域のリフトの形成と、その後の短縮変形の特徴について述べる。

新潟平野から佐渡島の間には厚さ 7km に達する厚いリフト期以降の堆積物が分布し、ボーリング調査などで日本海拡大期に噴出した広域玄武岩の分布が知られている。自然地震トモグラフィからは下部地殻への苦鉄質岩の併入に起因する P 波速度の高速度化が認められる。こうした地域では、玄武岩併入域と大陸地殻の境界部にリフト軸に平行なリフト軸の外側に傾斜する逆断層が形成されている。越後山脈西縁の月岡断層は、大規模なウェッジスラストを構成することが、反射断面や速度構造から明瞭になっている。秋田堆積盆地の西縁を限る飛島-船川断層は、西傾斜の逆断層である。すなわち、盆地両縁の盆地外側に傾斜した逆断層が大規模なウェッジスラストを形成しつつ短縮変形が進行し、盆地内堆積物の褶曲が形成される。北部フォッサマグナは最も短縮変形が進行した地域で、とくに大規模なウェッジスラストを構成する長野盆地西縁断層により、リフト盆地充填堆積物が強く褶曲した。盆地充填堆積物が強い短縮変形を被って保存されていることは、基本的にはリフト縁の断層がリフト外側に傾斜した逆断層をなすからである。類似した構造は富山トラフにも見られる。富山や新潟堆積盆地では、北東-南西方向にリフト軸を有する堆積盆地が形成され、その南西端はこれと直交する横断方向の断層によって境される。こうした形状は基本的には、北部フォッサにおいても同様であり、基本的に糸魚川-静岡構造線から関東構造線にいたる断層群は、リフトを横断する断層としての性格を有している。

下部地殻の高速度領域は、関東北部から東北南部でも新第三系の堆積物が厚い堆積盆地地下で見られる。鬼怒川低地帯や関東北西部の平野下でも重力や反射などから厚い堆積物の分布が確認されているが、この領域の下部地殻で地震波速度の高速度化が見られる。これらの過去のリフト境界に形成された活断層の姿勢は、リフト軸の外側に傾斜しており、日本海沿岸の中絶リフトと共通した性質を示す。

キーワード: 中絶リフト, 背弧海盆, 日本海, 地殻構造, 短縮変形, 断層関連褶曲

Keywords: failed rift, backarc basins, the Sea of Japan, crustal structure, shortening deformation, fault-related fold

## 白亜紀アジア大陸東縁と日本の堆積盆地 The eastern continental margin of Cretaceous Asia and sedimentary basins in Japan

磯崎 行雄<sup>1\*</sup>; 中畑 浩基<sup>1</sup>; 青木 一勝<sup>2</sup>  
ISOZAKI, Yukio<sup>1\*</sup>; NAKAHATA, Hiroki<sup>1</sup>; AOKI, Kazumasa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科, <sup>2</sup> 岡山理科大学  
<sup>1</sup>Dept. Earth Science & Astronomy, Univ. Tokyo, <sup>2</sup>Okayama University of Science

The tectono-sedimentary history of the Cretaceous arc-trench system of Japan has been reconstructed on the basis of conventional geological studies on the paired metamorphic belts, granite batholith belt, and various sedimentary basins. The recently developed detrital zircon chronology can add more critical constraints in reconstructing the sedimentary settings of various basins with respect to the coeval arc complex and contemporaneous continent on the back-arc side. We reported several preliminary results on U-Pb age spectra of zircon grains from various Cretaceous sandstones in Japan, and the mutual comparison among them allows us to discriminate/characterize various sedimentary units and basins. In particular, we could identify back-arc, intra-arc, and fore-arc basins for the Cretaceous Japan with respect to the Asian continent.

キーワード: 白亜紀, 堆積盆地, 碎屑性ジルコン, アジア大陸, U-Pb 年代  
Keywords: Cretaceous, sedimentary basin, detrital zircon, Asia, U-Pb age

## 地形・重力異常・火山分布の位置関係に基づく沈み込み帯の分類 Classification of subduction zones based on the spatial correlation of topography, gravity anomaly and volcanic front

深畑 幸俊<sup>1\*</sup>  
FUKAHATA, Yukitoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

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

多様な沈み込み帯を分類し理解するために、チリ型・マリアナ型 (Uyeda, 1982) という区分が提唱され教科書等にも広く掲載されている。チリ型では、若い海洋プレートがその浮力のために低角で沈み込むため、プレート間の固着が強く、巨大地震が発生し上盤 (島弧) では圧縮が生じる。一方、マリアナ型では、古く重いプレートが高角で沈み込むため、プレート間の固着は弱く、巨大地震は発生せず上盤では背弧拡大など伸張的な現象が起こるとされている。この分類は直感に訴えるものではあるが、例えばスラブの年齢と沈み込み角の間には実は相関がない (Lallemant et al., 2005) など、実態を的確に反映したものではない。東北弧のように古い海洋プレートが沈み込む一方沈み込み角が浅いなど、どのように分類したら良いのか判然としない島弧は少なくない。

島弧海溝系の最も主要な特徴としては、地震分布の他に、地形・重力異常・火山分布の3つがある。その3者は基本的に海溝にほぼ平行に走る。そこで、各沈み込み帯ごとに島弧の走向に直交する断面を取って、地形および重力異常のプロファイルを描くと共に火山フロントの位置をプロットすることにより、3者の空間的位置関係をまず客観的に把握した。そして、主として火山フロントの位置が重力異常や地形的な高まりと一致するか否かを基に沈み込み帯の分類を行った。

重力異常は、海溝で普遍的に低く、わずかの例外を除き海溝から 100 - 200 km 陸側に顕著な高まりを持つ。以下では、その重力異常の高まりを前弧、それよりも陸側を背弧と呼ぶことにする。背弧にも重力異常の高まりがしばしば存在する。

まず一つ目の分類の基準として、前弧の重力異常の高まりと火山フロントの位置とが一致する場合としない場合とがあることに着目した。前者の場合、地形的高まりも一致する。これをI型と名付けた。次に、後者の一致しない場合、火山フロントは海溝側にくることはなく、常に背弧側に位置する。そして、火山フロントと地形的な高まり (ピーク) とが一致する場合と一致しない場合があり、それぞれII-a型、II-b型と名付けた。火山フロントが不明瞭ないしは海溝と斜行、海溝の走向方向に地形等の変化が大きい、海嶺沈み込みの近く、などを除く世界中の30の沈み込み帯について解析したところ、I型が6、II-a型が12、II-b型が6、前弧の重力異常がはっきりしないものが3、I型とII型の間接的形態が3となった。

I型は全て海洋性島弧である一方、II-a型は千島弧を除き全て大陸性だった。II-b型は海洋性と大陸性が半々で、海洋性的の場合I型と一続きの島弧海溝系を形成する場合が多い。応力状態は、I型・II-b型が伸張的である一方、II-a型は圧縮的だった。

I型とII-b型の違いは、スラブの沈み込み角に帰されると考えられる。基本的に、前弧の重力異常の高まりの位置は海溝からの距離に依る (Matsu'ura and Sato, 1989) のに対し、火山フロントの位置はスラブの深度で規定されるからである (England et al., 2004)。例えば、スラブの沈み込み角が比較的に浅いトンガ弧はII-b型である一方、その南に位置するI型のケルマデック弧は沈み込み角が非常に急である。

II-a型とII-b型の違いは島弧の応力場に帰着される。まとめると、スラブの沈み込みの角度によりI型とII型が、応力状態によりa型とb型が区分される。そうすると、分類は全体として2×2となるべきだが、スラブの沈み込み角が急でかつ圧縮場というケースは少なくとも地球上には存在しない。一般に、スラブの沈み込み角が急になると島弧の応力場が伸張的になることが知られており、その問題と関係している。また、前弧の重力異常がはっきりしない島弧は、琉球やエーゲ海などいずれも強伸張場である。海洋プレートの沈み込みにより重力異常の高まりを作る作用が、伸張場による変形によってあらかじめ打ち消されているためと考えられる。また、地形的高まりと火山フロントがしばしば一致するものの普遍的にはそうではないことが知られているが、その問題もこの分類によってクリアに整理できる。I型とII-a型のときには両者は一致し、II-b型のときには一致しないのである。

キーワード: 沈み込み帯, 島弧, 地形, 重力異常, 火山フロント

Keywords: subduction zone, island arc, topography, gravity anomaly, volcanic front