

## MDRS 法によって明らかになった東京都下の基盤構造 Basement structure beneath the Tokyo metropolitan area as revealed with the MDRS method

堀川 晴央<sup>1\*</sup>; 阿部 信太郎<sup>1</sup>; 山口 和雄<sup>1</sup>; 野田 克也<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>

HORIKAWA, Haruo<sup>1\*</sup>; ABE, Shintaro<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Kazuo<sup>1</sup>; NODA, Katsuya<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(独) 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 地球科学総合研究所

<sup>1</sup>AIST/GSJ, <sup>2</sup>JGI

### はじめに

関東地域は、東北日本と西南日本の境界にあたり、地質構造が複雑であることがこれまでの研究で明らかになっている(例えば、日本地質学会編, 2008)。その一方で、我が国随一の人口を擁し、人間活動が活発であるため、地下構造の調査は大きな制約を受け、しかも、過去に調査できた箇所ですら再度調査が行えるとは限らない。したがって、過去に取得されたデータからできるだけ地下構造に関する情報を引き出すことが、都市域の地下構造に関する研究ではきわめて重要である。

最近開発された MDRS 法 (Multi-Dip Reflection Surfaces 法; Aoki et al., 2010) は、CRS 法 (Common Reflection Surface Stacking 法; 例えば、Jager et al., 2001) に準じて高い SN 比で反射イベントを抽出し、それらを重ね合わせてイメージングする手法である。通常の CMP 法による解析と比べて、MDRS 法は複雑な地質構造による反射面を明瞭にイメージングできることが報告されている(例えば、山口ほか, 2012)。したがって、関東平野での記録にでも本手法による鮮明なイメージングが可能ならば、関東地域の地質構造の解明に大きく貢献することが期待される。本講演では、東京都で取得された反射法地震探査の記録に本手法を試みたところ、先新第三系の基盤上面付近の構造を明瞭にイメージングできたことを報告する。

### データ

解析したデータは東京都が平成 15 年度に取得したもの(東京都, 2003)で、測線は東京都北部(一部は埼玉県南部)を東西に横断し、西端は立川断層の西側にあたる昭島市、東端は和光市で、総測線長は 26.9 km である。発振点間隔および受振点間隔はそれぞれ 150 m, 25 m である。大型バイブロサイズを複数台使用した大規模な発振は限られ、大型バイブロサイズあるいはミニバイブを 1 台のみ用いた発振箇所が過半数である。

通常の CMP 法による処理結果(東京都, 2003)では、測線の西部に位置する立川断層によって、先新第三系の基盤岩上面に大きな落差が認められる。この他、その東側では基盤岩の上面が凹凸に富んでいることを示唆する結果が得られているが、基盤岩の上面の具体的な形状は不明瞭であった。本研究では、この基盤岩上面付近の構造を明瞭にイメージングすることを目指した。

### 結果

MDRS 法による再処理結果を、通常の CMP 法による結果と比較すると、先新第三系と考えられる基盤岩の上面付近の構造がより明瞭にイメージングされている。測線の中央付近では、深さ 2.5 km から 4 km にかけて、東に向かって傾斜する長さが約 4-6 km ほどの反射面が複数認められる。また、これらの反射面の上方には、西側に尖滅する形の楔状で反射が強い領域が深さ 2 km 程度まで分布する。この領域内の反射面は水平ないし東に緩傾斜だが、下位のもののほど傾斜がきつくなる放射状をなしている。

上述のイメージング結果は、複数の正断層によりブロック化された基盤が、正断層の活動により傾きながら堆積層がたまっていくことにより生じた構造と解釈される。関東地方西部では、中新世の日本海の拡大により形成された(ハーフ) グラーベン構造が確認されている(高橋ほか, 2006)が、本研究で明らかとなった構造も同時期に形成された構造なのかもしれない。

地表で立川断層があるとされる付近に着目すると、基盤上面に対応すると考えられる反射面のうち西側のものが、従来の解析結果よりもさらに西に伸びて地表の立川断層の直下付近に達して不明瞭になる。そのすぐ西側には、1.5 km ほど浅くなると対応する反射面が認められる。以上から、少なくとも深さ 3 km 程度までは、立川断層は高角であると考えられる。

### 謝辞

本研究で利用したデータは東京都土木技術支援・人材育成センターより提供いただいた。記して感謝いたします。

### 文献

Aoki, N., S. Narahara, A. Takahashi and T. Nishiki, 2010, Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection

SSS31-01

会場:502

時間:4月30日 14:15-14:30

surfaces method, SEG Extended Abstracts, 3604-3608.

Jager, R., J. Mann, G. Hocht and P. Hubral, 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes, *Geophysics*, 66, 97-109.

日本地質学会編, 2008, 関東地方, 日本地方地質誌 3, 朝倉書店, 570 pp.

高橋雅紀・林 広樹・笠原敬司・木村尚紀, 2006, 関東平野西縁の反射法地震探査記録の地質学的解釈?とくに吉見変成岩の露出と利根川構造線の西方延長?, *地質学雑誌*, 112, 33-52.

東京都, 2003, 平成 15 年度 地震関係基礎調査交付金 関東平野地下構造調査 (北多摩地区弾性波探査) .

山口和雄・阿部 進・横倉隆信・岡田真介, 2012, MDRS 法による苫小牧 86 測線反射法データの再解析, *地質調査総合センター速報 (平成 23 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告)*, 59, 75-87.

キーワード: MDRS 法, 基盤構造, 反射法地震探査, CRS 法

Keywords: multi-dip reflection surfaces method, basement structure, seismic reflection survey, common reflection surface stacking

## 稠密地震観測による奥羽脊梁山脈の地震波速度構造 — 断層破壊の地殻構造的な規制要因 —

### Seismic velocity structure in Ou backbone range by using a dense seismic array

青柳 恭平<sup>1\*</sup>; 木村 治夫<sup>1</sup>

AOYAGI, Yasuhira<sup>1\*</sup>; KIMURA, Haruo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電力中央研究所

<sup>1</sup> Central Research Institute of Electric Power Industry

#### 背景と目的

奥羽脊梁山脈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、我が国でも有数の逆断層型地震の多発地帯である。1896年陸羽地震(M7.2)や2008年岩手宮城内陸地震(M7.2)など、最近100年余りでも、被害地震が数多く発生している。横手盆地東縁断層帯で発生した1896年陸羽地震では、断層帯北部のみに地表地震断層を生じた。本研究の目的は、逆断層帯の破壊に関わる地殻構造的な規制要因を見出すことである。本発表では、奥羽脊梁山脈における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、速度構造と既往の被害地震の破壊域端部との関係を検討する。

#### 稠密微小地震観測

稠密微小地震観測は、2012年11月から2013年11月までの約1年間、北上低地と横手盆地に挟まれた東西約40km、秋田県仙北市から宮城県栗原市にわたる南北約100kmの範囲で実施した。定常観測点の疎な領域を中心に30か所の臨時観測点を配置し、全体として約10km間隔で対象地域をカバーするようにした。各観測点には、クローバテック製 DAT-4 レコーダーと Lennartz 製 LE-3Dlite 地震計の組み合わせ(計20点)、もしくは近計システム製 EDR-X7000 レコーダーと KVS-300 地震計の組み合わせ(計10点)のいずれかを設置した。3成分、250Hz サンプリングで連続収録を行い、前者は約2ヵ月間毎、後者は約6ヵ月間毎にデータ回収とバッテリー交換を行った。積雪期には、前者のうち約半数がアクセス不通に伴う約3ヶ月間の欠測がある。

#### 走時データ

観測期間中、奥羽脊梁山脈周辺で発生した2700個余りの地震について、気象庁一元化震源カタログに基づいて、各地点の収録データからイベント波形を編集した。地震毎の統合波形データに対して、winシステム(ト部・東田, 1991)を用いて、暫定的にP波とS波到着時刻の自動検測を行った。この検測データに同一イベントに対する気象庁一元化震源点の検測値を統合して、トモグラフィ解析用の絶対走時データとした。

また、より広域的に波線力バレッジを高めるため、観測期間外の定常観測網データも用いた。2004年~2011年に東経140度~141.5度、北緯38.5度~40度、深さ0~180kmに発生したM1以上の地震のうち、水平方向0.05度、深さ方向1kmの領域毎に最も多くの観測点で検測値が得られている地震2259個を抽出した。

#### トモグラフィ解析の暫定結果

上記で得られた絶対走時を統合して、tomoDD(Zhang and Thurber, 2003)によりトモグラフィ解析を行った。解析対象(暫定)は、焼石岳北方を中心にした南北160km×東西128km、深さ0~180kmの範囲である。グリッド間隔は、水平方向8km、深さ方向5kmである。20回程度のイタレーションにより、以下の暫定結果が得られた。

岩手宮城内陸地震の震源域北端部は、地殻内地震の地震発生層(深さ5~10km付近)における北西-南東方向の速度急変部に対応している。震源域側では高 $V_p$ であるのに対し、その北側では低 $V_p$ である。北上低地西縁断層帯はこの速度急変部の北側に分布している。この速度境界部は、重力異常の急変(北東側が低、南西側が高)とも調和的である。

この北西-南東方向の速度急変部は秋田県側まで連続して認められる。その位置は、1896年陸羽地震の震源域(川舟断層、あるいは横手盆地東縁断層帯北部)の南端にもほぼ一致している。この速度急変部の地表には、衣川、成瀬川など、同方向の谷地形が発達しており、地質分布もその南北で異なる。これらのことから、この速度急変部は東北日本弧でしばしば見られる北西-南東方向の胴切り断層を見ている可能性がある。

今後、トモグラフィ解析の分解能と地質構造を十分に精査した上で、こうした地殻構造の急変部が断層破壊の停止に関わっている可能性について検討したい。

キーワード: 奥羽脊梁山脈, 地震波速度構造, 破壊停止, 微小地震観測, 走時トモグラフィ

Keywords: Ou backbone range, Seismic velocity structure, Rupture termination, Micro-earthquake observation, Seismic tomography

## 箱根火山周辺の比抵抗構造と東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動の関係 Relation between the resistivity structure around Hakone volcano and seismicity induced by the 2011 Tohoku Earthquake

吉村 令慧<sup>1\*</sup>; 小川 康雄<sup>2</sup>; 行竹 洋平<sup>3</sup>; 神田 径<sup>2</sup>; 小森 省吾<sup>4</sup>; 後藤 忠徳<sup>5</sup>; 本多 亮<sup>3</sup>; 原田 昌武<sup>3</sup>; 山崎 友也<sup>1</sup>; 加茂 正人<sup>1</sup>; 安田 陽二郎<sup>6</sup>; 谷 昌憲<sup>5</sup>  
YOSHIMURA, Ryokei<sup>1\*</sup>; OGAWA, Yasuo<sup>2</sup>; YUKUTAKE, Yohei<sup>3</sup>; KANDA, Wataru<sup>2</sup>; KOMORI, Shogo<sup>4</sup>; GOTO, Tadanori<sup>5</sup>; HONDA, Ryou<sup>3</sup>; HARADA, Masatake<sup>3</sup>; YAMAZAKI, Tomoya<sup>1</sup>; KAMO, Masato<sup>1</sup>; YASUDA, Yojiro<sup>6</sup>; TANI, Masanori<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 東京工業大学火山流体研究センター, <sup>3</sup> 神奈川県温泉地学研究所, <sup>4</sup> 中央研究院地球科学研究所, <sup>5</sup> 京都大学大学院工学研究科, <sup>6</sup> 鳥取大学大学院工学研究科

<sup>1</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>2</sup>Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, <sup>3</sup>Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, <sup>4</sup>Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, <sup>5</sup>Graduate School of Engineering, Kyoto University, <sup>6</sup>Graduate School of Engineering, Tottori University

Seismicity around the Hakone volcano was activated just after the arrival of surface waves caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Most of these triggered earthquakes had similar distribution to prior occasional swarm activities. In order to image electrical properties around such seismic events, we carried out audio-frequency magnetotelluric (AMT) measurements at 39 sites in December 2011 (Yoshimura et al., 2012). In this study, we conducted 3D modeling of dense AMT (Yoshimura et al., 2012) and MT (Ogawa et al., 2012) data, to figure out electrical characteristics around the triggered seismicity. In spite of careful treatments for noise reduction, the effects of noise were still seen on the longer parts of the responses (<1 Hz) at the several measurement sites. Thus we determined to have use of the frequency range from 320 Hz to 1.02 Hz. The full components the impedance tensors at 51 sites in total were inverted using the code developed by Siripunvaraporn et al. [2005]. The model space consists of 64(x-)×46(y-)×36(z-direction; including 7 air layers) blocks. The minimum horizontal size of blocks was 400m×400m. Significant characteristics of the obtained three-dimensional resistivity model are: (1) the most of the triggered earthquakes, which occurred shallower than a depth of 4km, seem to align along edges or areas just inside the relatively resistive block; (2) surface conductive blocks, in which there were very few earthquakes, were observed beneath not only fumarolic areas but geothermal non-active regions.

キーワード: MT 法探査, 3次元比抵抗構造, 箱根火山, 誘発地震

Keywords: magnetotellurics, three-dimensional resistivity structure, Hakone volcano, triggered earthquake



## 濃尾平野周辺の三次元地震波速度構造 Three-dimensional seismic velocity structure around the Neodani fault

中島 淳一<sup>1\*</sup>; 加藤 愛太郎<sup>2</sup>; 岩崎 貴哉<sup>2</sup>; 濃尾地震断層域 合同地震観測グループ<sup>3</sup>

NAKAJIMA, Junichi<sup>1\*</sup>; KATO, Aitaro<sup>2</sup>; IWASAKI, Takaya<sup>2</sup>; THE JAPANESE UNIVERSITY GROUP OF THE, Joint seismic observations at the are<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 地震研究所, <sup>3</sup> 濃尾地震断層域合同地震観測グループ

<sup>1</sup>Graduate School of Sci., Tohoku Univ., <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at the Area of Nobi Earthquake

1891年に発生した国内最大の内陸地震である濃尾地震(M8.0)の震源断層と考えられている根尾谷断層帯周辺において、不均質構造や断層への応力蓄積機構の解明を目的に、2009年から5ヶ年の計画で全国の大学及び研究機関による合同観測(自然地震観測、電磁氣的観測、GPS観測、制御震源探査など)が行われた。自然地震観測では、定常観測点の隙間を埋めるように73点の臨時地震観測点が設置され、定常観測網も含めると平均観測点間隔約10kmという非常に稠密な地震観測網が構築された。連続波形データは気象庁一元化震源をもとに切り出され、周囲の定常点も含めた約200km四方の領域でP波・S波の到着時刻の読み取りが行われた。

本研究では、根尾谷断層帯周辺の詳細な三次元地震波速度構造を推定するために、合同観測点で得られた読み取り値と気象庁一元化の読み取り値を統合し、Zhao et al. (1992)の手法を用いて地震波速度トモグラフィーを行った。使用した地震は2002年1月から2013年1月までに発生した3027個であり、2009年11月から2013年1月までのデータには臨時観測点が含まれている。解析に使用したP波、S波の到着時刻データは、それぞれ248,354、215,034であった。解析領域は34°37'N, 135°13'E, 0°300kmとし、根尾谷断層帯周辺では水平方向に0.1度間隔、鉛直方向は5°30km間隔でグリッドを配置した。

解析で得られた主な結果は以下の通りである。

1. 濃尾平野下の下部地殻はP波、S波とも周囲に比べ低速度である。
2. フィリピン海プレートから濃尾地震の震源直下の地殻中部にかけて、連続的な低速度域がみられる。
3. 濃尾地震のすべり量が大きかった温見断層直下の下部地殻は特に速度が遅い
4. 濃尾地震の震源よりも南東側の下部地殻の速度は平均程度であり、震源域付近を境に下部地殻の速度が大きく変化する。

これらの結果は、根尾谷断層帯周辺では地震波速度の不均質が大きく、その不均質により上部地殻に応力が集中し、濃尾地震が発生したことを示唆している。地震発生層下の不均質構造は国内外の大地震の震源域周辺でも報告されていることから、内陸地震の応力蓄積過程を理解するためには、最上部マントルや下部地殻の不均質構造を高精度で推定し、その影響を評価することが不可欠である。

キーワード: 濃尾地震, 下部地殻, 流体, フィリピン海スラブ

## 濃尾断層帯における応力インバージョン解析 Stress tensor inversion in the Nobi fault area, Central Honshu, Japan

勝俣 啓<sup>1\*</sup>; 小菅 正裕<sup>2</sup>; 片尾 浩<sup>3</sup>; 山田 卓司<sup>1</sup>; 加藤 愛太郎<sup>4</sup>; 濃尾地震断層域 合同地震観測グループ<sup>4</sup>  
KATSUMATA, Kei<sup>1\*</sup>; KOSUGA, Masahiro<sup>2</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>3</sup>; YAMADA, Takuji<sup>1</sup>; KATO, Aitaro<sup>4</sup>; THE JAPANESE  
UNIVERSITY GROUP, The joint seismic observations<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター, <sup>2</sup> 弘前大学理工学研究科附属地震火山観測所, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所地震予知研究センター, <sup>4</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Inst. Seismo & Volcano, Hokkaido Univ., <sup>2</sup>Earthquake and Volcano Observatory, Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, <sup>3</sup>Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」に基づき、1891年濃尾地震(M8.0)の震源域となった濃尾断層周辺において、2009年から2013年まで合同微小地震観測が行われた。定常観測点に加え、70点の臨時観測点が設置され、平均観測点間隔約10kmという稠密な地震観測網が構築された。本研究では期間中に観測された地震の震源メカニズム解を決定し、それらを用いて応力テンソルインバージョン解析を行った。

研究領域(北緯35.3~36.1度, 東経136.0~137.0度)内で2009年5月1日から2013年5月31日までに発生したM1.0以上、深さ30km以浅の地震を選択し、手動で読み取りを行った。P波初動の押し引きをデータとして、Hardebeck and Shearer (2002)が開発したHASHというソフトウェアを用いて震源メカニズム解702個を決定した。得られた解の多くは左横ずれタイプであり、P軸はほぼ東西を向き、この地域の広域応力場と一致している。

さらに、得られた702個の震源メカニズム解を用いて応力テンソルインバージョン解析を行った。最初に、震源メカニズム解を震源の深さによって、2~7km, 5~10km および 8~13kmの3グループに分ける。研究領域内に東西0.1度×南北0.1度間隔で格子点を設定し、各格子点から半径15kmの円内に震央が入るメカニズム解を各グループで選択する。各グループ別々に、Hardebeck and Michael (2006)が開発したSATSIを用いて、応力テンソルインバージョンを行った。得られた結果は、各グループ共によく似ていて、最大主応力軸はほぼ東西・水平方向を向いているが、多少、空間的な変化があるようだ。濃尾断層帯では1891年濃尾地震で地表変位が出現した範囲では、ほぼ東西方向であるが、それより北側および南側では、時計回りに数10度の回転が見られる。

キーワード: 濃尾断層, 合同地震観測, 震源メカニズム解, 応力テンソルインバージョン, 内陸地震, 活断層

Keywords: Nobi fault, joint seismic observations, focal mechanism, stress tensor inversion, inland earthquake, active fault

## 山陰地方のGNSS データに認められるひずみ集中帯 Strain concentration zone recognized from GNSS data in the San-in region

西村 卓也<sup>1\*</sup>  
NISHIMURA, Takuya<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

山陰地方においては、1943年鳥取地震(M7.2)や2000年鳥取県西部地震(M7.3)などの地殻浅部を震源とする大地震が数多く発生している。また微小地震分布には海岸線にほぼ平行な帯状の地震活動域が見られることが知られている。一方、国土地理院のGEONETによって明らかになった日本列島の地殻変動分布では、山陰地方を含む中国地方は、ひずみ速度の小さい領域として認識されてきた(例えば, Sagiya *et al.*, 2000)。しかし、GNSSデータを用いた日本列島の定常的な地殻変動分布に関する研究は、GEONETの観測開始から間もない時期に行われた研究が多く、2002年の観測網増強後のデータについて十分検討されていない。そこで、本研究では、GEONETデータを用いて、山陰地方の地殻変動を概観し、特に地震活動域周辺の変動について報告する。

### 解析方法

解析には、国土地理院から公開されているGEONET日座標値(F3解)を用いた。観測点950462(長崎県福江)を基準とする座標時系列に対し、経年変化成分、年周成分、半年周成分を持つ曲線を最小二乗法によりフィッティングし、経年変化成分を各観測点での変動速度とした。この速度ベクトルを、山陰地方の地震帯に直交する断面上に投影し、速度分布の特徴を調べた。また、速度ベクトルから、観測点を頂点とする三角形でのひずみ分布、平滑化したグリッド上でのひずみ分布(Shen *et al.*, 1996)を計算し、微小地震分布との比較を行った。

### 結果

この地域で大きな地震が発生していない2005年4月から2009年12月までの平均速度分布からは、山陰地方の東部(島根県東部から鳥取県)において、海岸線に平行な微小地震活動域に対応する変形集中域を確認することができた。面積ひずみ速度分布では、収縮のひずみが太平洋側から日本海側に向かって漸減し、微小地震活動に対応するような変化は見られない。しかし、最大剪断ひずみ速度分布では、中国地方東部の内陸部が日本列島でも最小クラスの低ひずみ速度( $10^{-8}$ のオーダー)なのに対し、日本海沿岸では $10^{-7}$ 程度の大きなひずみ速度が帯状に広がっていることが確認された。また、2000年鳥取県西部地震の震源域周辺では、周辺より大きなひずみ速度が観測されており、余効変動が継続していることを示唆するが、山陰地方の西部ではひずみ速度の大きな領域が空間的に連続するような分布は見られなかった。

山陰地方東部の地震帯に直交する断面での速度分布は、地震帯に平行な(N80°E)方向の速度において、地震帯を挟んで速度が約2mm/年ほど急変しており、ひずみ集中帯であると認められる。ひずみ集中帯の幅は、北側が日本海になるため特定することが難しいが、地震帯の南側の山陽地方の変形は小さく、地震帯から北側10kmの範囲で主に変形しているように見える。地殻変動速度の方向より、この変動帯では右横ずれ運動をしていることが示唆され、この領域の地震のメカニズム解とも調和的である。また、東北地方太平洋沖地震以降の2012年1月から2013年12月までの速度分布には、東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響が顕著に見られた。山陰地方のひずみ速度は倍増しており、地震帯を挟む速度の差もほぼ倍増している。

観測されたひずみ集中帯の変動は、地震帯を挟む南北が別のブロックであるとした場合の右横ずれのブロック運動によって説明できると考えられるが、浅部の固着域の深さなどのパラメータを推定するためにはデータが不足しており、ひずみ集中域における稠密地殻変動分布を観測する必要がある。

### まとめ

GEONETデータの解析から、山陰地方の東部において、海岸線に平行な地震帯に沿ってひずみ集中帯が存在することが明らかになった。このひずみ集中帯では、幅10km程度で2mm/年の右横ずれ運動を示唆する変形が卓越しており、地震のメカニズム解とも調和的な運動方向を示す。東北地方太平洋沖地震以降は、変動速度が倍増した。ひずみ集中帯の変動メカニズムを明らかにするためには、さらに詳細な地殻変動分布を得ることが重要であり、観測とモデル計算の両面から解析をすすめる必要がある。

### 参考文献

Sagiya *et al.*, PAGEOPH, 147, 2303-2322, 2000  
Shen *et al.*, JGR, 101(B12), 27957-27980, 1996

キーワード: 地殻変動, ひずみ集中帯, GNSS, 山陰地方

---

SSS31-06

会場:502

時間:4 月 30 日 15:30-15:45

Keywords: Crustal deformation, Strain concentration zone, GNSS, the San-in region



## 龍門山断層ガウジの含水条件下の高速摩擦強度と WFSD 掘削孔における温度異常との比較

### HV frictional strength of wet Longmenshan fault gouge and its comparison with the temperature anomaly in WFSD drill hole

東郷 徹宏<sup>1\*</sup>; 嶋本 利彦<sup>1</sup>; 馬 勝利<sup>1</sup>; 姚 路<sup>1</sup>

TOGO, Tetsuhiro<sup>1\*</sup>; SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>1</sup>; MA, Shengli<sup>1</sup>; YAO, Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所

<sup>1</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration

最近日本海溝における J-FAST プロジェクトでも試みられたように、大地震後の断層沿いの温度異常から摩擦の強度を見積もる研究が世界的にも注目を集めている。2008 年 5 月 12 日に中国の四川省で発生したウェンチャン地震 (Mw= 7.9、四川大地震とも呼ばれる) では、龍門山断層系の主要断層のひとつである映秀—北川断層沿いに 250 km を越える地表断層が認められ、この断層の西部の都江堰市郊外の虹口露頭付近において、Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD) と呼ばれるプロジェクトで 2 本の断層帯がおこなわれた。WFSD-1 孔は地震後 1 年以内という非常に迅速に掘られた掘削孔であり、WFSD でも掘削孔における温度測定はプロジェクトの重要項目になっている。掘削では深度約 580~760 m の間に見事な断層帯が認められた (約 10 m のカタクレサイト、多数の薄い断層ガウジ帯と断層角礫からなる; Li et al., 2013, Tectonophysics)。また孔内の温度計測の結果、深さ約 590 m において 0.15 °C 程度の非常に小さな異常しか認められず、これから推定された断層の摩擦係数は 0.03 またはそれ以下である可能性が高いと報告されている (Mori et al., 2010, AGU)。この摩擦係数は過去約 20 年間にわたって行われてきた乾燥条件下での高速摩擦実験の結果よりもさらに小さい値である。

そこで我々は、掘削孔に近い虹口露頭の断層ガウジを含水条件下で測定して (含水量は 25wt %)、無水条件下における実験結果と比較検討した。実験時のすべり速度は 1.3 m/s、垂直応力は 1.0~4.8 MPa であった。実験試料は掘削地点から数 100 m 離れた虹口断層露頭から採取した面状断層ガウジを用いた。実験の結果、含水ガウジのピーク摩擦係数は 0.1-0.36 と低い値を示し、さらに定常摩擦係数は 0.03~0.14 という極めて低い値に達することが明らかになった。また、ピーク摩擦係数、定常摩擦係数ともに垂直応力の増加と共にべき乗に減少していくことが明らかになった。WFSD-1 孔内では co-seismic な断層変位は 600~750 m で、断層面の傾斜角はおおよそ 65° (Li et al. 2013, Tectonophysics) とされているので、岩石密度を 2.5 と仮定して断層面にかかる垂直応力を計算するとおおよそ 6.3 から 7.9 MPa と求められる。我々の摩擦実験の定常摩擦係数をこの垂直応力へ外挿してやると、定常摩擦係数は 0.028~0.023 となり、Mori らが温度以上から復元した摩擦係数 (0.03 以下) と非常に整合的な結果が得られる。

さらに、FE-SEM を用いてマイクロストラクチャーの観察を行った所、無水ガウジはナノ粒子まで粉碎されたスリップゾーンと変形が弱いゾーンから構成されるのに対して、含水ガウジではガウジの上部がやや細粒化しているものの、ガウジ粒子細かく粉碎された痕跡や明瞭なスリップゾーンは認められなかった。これは thermal pressurization や、ガウジの圧密にともなう間隙水圧の上昇によって、粒子間の接触による粉碎が抑制されたためだと考えられる。

キーワード: 高速摩擦実験, 龍門山断層, ウェンチャン地震, 摩擦発熱, 孔内温度測定

Keywords: High-velocity friction experiment, Longmenshan fault, Wenchuan earthquake, Frictional heating, Bore hole temperature measurement

## 横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生の数値シミュレーション Numerical simulation of shear bands formation in ground due to strike-slip fault

野田 利弘<sup>1\*</sup>; 山田 正太郎<sup>1</sup>; 浅岡 顕<sup>2</sup>; 澤田 義博<sup>2</sup>; 川合 裕太<sup>1</sup>

NODA, Toshihiro<sup>1\*</sup>; YAMADA, Shotaro<sup>1</sup>; ASAOKA, Akira<sup>2</sup>; SAWADA, Yoshihiro<sup>2</sup>; KAWAI, Yuta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>(公財)地震予知総合研究振興会

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Association for the Development of Earthquake Prediction

横ずれ断層発生時には、断層上部の地盤内部で深部から地表に向かって枝分れしたフラワー構造（花卉状構造）や地表面でリーデルせん断（雁行状せん断）構造などが付随発生することが知られている。上田<sup>1)</sup>は、横ずれ断層模型実験を実施し、X線CTスキャンを用いて地盤内部でのせん断帯の発達過程を調べるとともに、澤田・上田<sup>2)</sup>は、構成式にモール・クーロン破壊規準に基づく弾完全塑性体を用いて幾何学的非線形性を考慮した大変形解析を実施し、リーデルせん断等の形成過程をシミュレートしている。

本研究では、澤田・上田<sup>2)</sup>の研究を参考に、土骨格の構成式にSYSカムクレイモデル<sup>3)</sup>を登載した水～土骨格連成有限変形解析コード**GEOASIA**<sup>4)</sup>を用いて、横ずれ断層に伴う上部地盤のせん断帯発生過程を調べた。本解析コードは速度型の運動方程式を忠実に時間積分して運動を求める動的問題にも対応可能なため、せん断帯発生に伴う波動生成や波動伝播も再現可能である<sup>5),6)</sup>。使用した構成式は広範な土材料を同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式である。以下では、水と連成させない一相系材料とした場合の計算事例を示す。

はじめに、断層の走向方向（y方向）に1有限要素を配置した3次元メッシュを用いて実施した（図1）。中央下端の3要素を断層部分とみなし右横ずれ断層を想定した。境界条件として、y方向の向かい合う垂直な面（x-z面）のうち、断層直上部分には周期境界を、それ以外には一様なy方向の強制変位（速度 $10^{-6}$ m/s）を、断層部分を挟んで左右に逆向きに与えるとともに、x-z面およびy-z面は摩擦なしの条件とした。この結果、せん断帯は地盤下端の断層部分から複数発生し、ずれの増大に伴い、上部に向かう上に凸な対数螺旋形状（フラワー構造）を示した。このフラワー構造の発生には土要素の塑性膨張挙動が必要であった。

次に、y方向に40要素を配置しx-z面に周期境界を設定した3次元メッシュを用いて、せん断帯発生過程と地盤の不均質性（初期不整）の有無の影響を調べた。ここでは下端節点において、断層部分を挟んで一様なy方向の強制変位（速度 $10^{-6}$ m/s）を逆向きに与えるとともに、下端の断層部分の土要素について材料定数を僅かに変更して初期不整を設定した。この結果、初期不整がある場合は、地盤内部でフラワー構造が複数発生後、地表面まで到達し、雁行状のリーデルせん断構造が現れた（図2）。リーデルせん断部はその周辺よりも隆起を示した。なお、材料定数の違いに応じてリーデルせん断と走向方向のなす角が変化した。（「内部摩擦角」 $\phi'$ が小さい場合このなす角は小さくなった。図は省略。）また、材料によってはフラワー構造ではなく、内部に一つの平板状のせん断帯のみが形成され、波動生成が顕著に見られる場合もあった。

1) 上田圭一 (2003): 横ずれ断層系の発達過程ならびに変位地形の形成過程, 電力中央研究所 研究報告:U03021

2) 澤田昌孝, 上田圭一 (2009): 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション, 電力中央研究所研究報告:N08028

3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790.

4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.

5) Noda, T., Xu, B. and Asaoka, A. (2013): Acceleration generation due to strain localization of saturated clay specimen based on dynamic soil-water coupled finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, 53(5), 653-670.

6) 浅岡顕, 山田正太郎, 野田利弘 (2013): 地表面载荷による地盤の破壊現象と破壊に伴う振動の発生に関する数値解析, 日本地球惑星科学連合大会 2013 年大会.

キーワード: 横ずれ断層, せん断帯, リーデルせん断, フラワー構造, 数値解析

Keywords: strike-slip fault, shear bands, Riedel shear, flower structure, numerical analysis

SSS31-08

会場:502

時間:4月30日 16:30-16:45

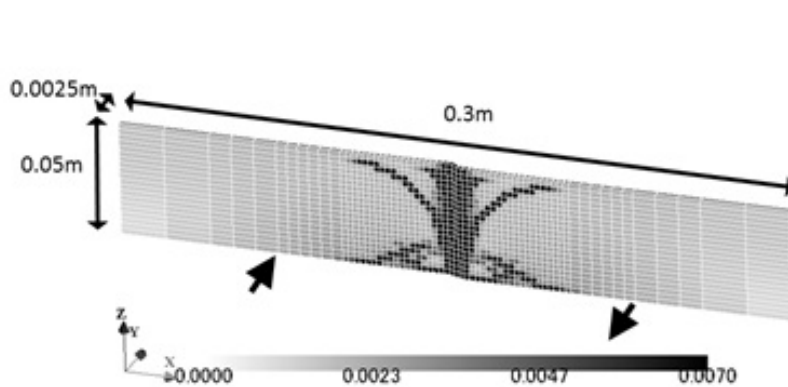


図1 フラワー構造の出現

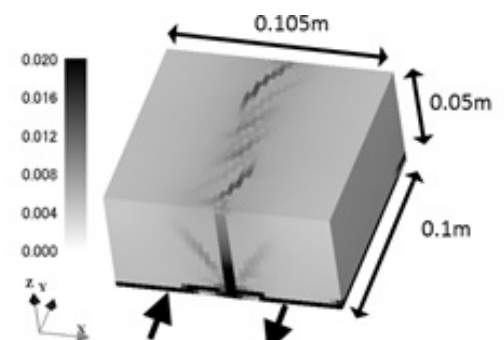


図2 フラワー構造後の  
リーデルせん断の出現  
(初期不整がある場合)

2011年福島県浜通りの地震震源域の応力場：静的応力変化に起因すると推定される  
顕著な空間不均質  
Spatially inhomogeneous stress field in the source area of the 2011 Fukushima Hamadori  
earthquake sequence

吉田 圭佑<sup>1\*</sup>; 長谷川 昭<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>1</sup>  
YOSHIDA, Keisuke<sup>1\*</sup>; HASEGAWA, Akira<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>1</sup>

<sup>1</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>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University

After the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, many earthquakes occurred near Iwaki, Fukushima Prefecture, including Mw6.8 event of April 11. This 2011 Fukushima Hamadori earthquake sequence is characterized by normal faulting, with T-axis oriented in the NW-SE, E-W and NE-SW directions for events in the northern, central and southern parts of the source area, respectively.

In order to understand the cause of such a remarkable spatial variation of focal mechanisms, we investigated the stress field in the source area of this earthquake sequence. First, we relocated hypocenters of events that occurred during the period from 1997 to 2012 by the double-difference location method. Relocated hypocenters show that events near the 3/19 Mw 5.8 earthquake in the southern area, those near the 3/23 Mw 5.7 earthquake in northern area and those near the 4/11 Mw 5.9 earthquake in central area are aligned along planes dipping westwards corresponding to one of nodal planes, respectively.

Then, we estimated the stress field in the source area of the sequence by a stress tensor inversion of focal mechanisms reported by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention and Japan Meteorological Agency. Results show that the stress field is very heterogeneous in space with normal fault stress regime after the occurrences of the main-shock of each part of the source area. In the northern, central, southern and east parts of the source area, the minimum principal stress ( $\sigma_3$ ) axes are oriented in the NW-SE, E-W, NE-SW and NNE-SSW directions, respectively. As a whole,  $\sigma_3$  axis shows the concentric circle-like distribution. In contrast, before the occurrence of the main-shock of each part,  $\sigma_3$  axis is oriented homogeneously in space in the E-W direction.

This observation suggests the possibility that the remarkable heterogeneity in stress field is caused by the static stress change of large earthquakes. We estimated the static stress changes caused by the 2011 Fukushima Hamadori earthquake sequence. A slip model estimated by Hikima (2012) using strong motion waveforms was used for the Mw6.8 earthquake. Furthermore, we made fault models of the 3/19 Mw 5.7, 3/23 Mw 5.8 and 4/12 Mw 5.7 events using hypocenter locations and the scaling relation between moment magnitude, fault length, width and slip amount for estimating their static stress changes.

Spatial distribution of  $\sigma_3$  axis direction of the static stress change is approximately the same as that of the observed stress field after the occurrences of the main-shock of each part of the source area. This strongly suggests that  $\sigma_3$  axis rotated after the 2011 Fukushima Hamadori sequence and the stress magnitude in the focal area before the sequence was smaller than the static stress change ( $< \sim$ several MPa). We estimated the differential stress magnitude assuming that the difference in the stress tensor before and after the earthquakes is equal to the static stress change associated with the large earthquakes. Estimated magnitude of the differential stress was  $< 20$  MPa.

キーワード: 内陸地震, 地殻応力, メカニズム解, 摩擦強度

Keywords: crustal stress, focal mechanism, weak fault



## 岩石は変形の進行とともにどこまで軟らかくなれるのか? : 破壊—溶解反応—物質移動—沈殿クリープ

### To what degree can rocks become weak during deformation?: Fracturing-dissolution-mass transfer-precipitation creep

竹下 徹<sup>1\*</sup>; 岡本 あゆみ<sup>1</sup>  
TAKESHITA, Toru<sup>1\*</sup>; OKAMOTO, Ayumi<sup>1</sup>

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

地震後に1000年に一度生じることが判明したM9クラスの地震である東日本太平洋沖地震が生じた結果、日本列島の地殻ダイナミクスについて新たな事実が明らかとなって来た。その一つは、地殻の差応力問題に重要な示唆がもたらされたことである。東日本太平洋沖地震後には、普段地震が生じない場所で、従来とは型の異なる地震が生じた。その典型例がいわき市付近で生じた正断層型の大地震（福島県浜通り地震）であるが、この地域では巨大地震前には弱い東西圧縮の場にあったが、地震後には東西伸張の応力場に変化した。Yoshida et al. (2012) らは東日本太平洋沖地震による応力変化を推定し、地震前後の応力場を説明する差応力の最適値を計算した。その結果、地震前後で地殻中の差応力値はともに1 MPa程度であることが推定された。

本講演では、この極めて低い差応力値が妥当であるとした場合、日本列島の地殻ダイナミクスについて浮上する新たな問題点、および岩石はこのような極低応力で変形出来るのか議論する。もし地殻中の差応力値が1 MPaであるとする、地殻岩石の弾性定数は $10^{11}$  Paであるので、東北日本地殻中で発生する弾性歪は $10^{-5}$ 程度である。一方、Sagiya et al. (2000) によるGPS測定により東北日本の歪速度は $10^{-7}$ /yr程度と求められているので、活断層の再来周期として1000-10000年を採用すると、地震間に活断層近辺で $10^{-4}$ - $10^{-3}$ の歪が生じていることになる。ここで、上記の弾性歪の値が妥当であると仮定すると、地震間の全歪の内、弾性歪の割合は1-10%にすぎず、全歪のほとんどは塑性歪として生じていることになる。したがって、岩石のレオロジーの問題として、岩石は1 MPaの差応力のもとで、 $10^{-7}$ /yr ( $10^{-15}$ /s) オーダーの歪速度を発生出来るほど十分軟らかいかが大きな問題として浮上する。

我々は、地殻上部の差応力を支配していると考えられる脆性塑性転移点付近の変形過程・機構を隆起・削剥により露出した天然の変形岩・断層岩中の微細構造解析を通じて研究している。脆性塑性転移点付近の岩石の変形挙動は、地殻の深いレベルで形成され、上昇してきた変成岩に良く見て取れる。なぜなら、変成岩は上昇過程で塑性領域から脆性領域へ脆性塑性転移点を通過して上昇するからである。例えば、白亜紀に形成された三波川変成岩の石英片岩では、岩石が脆性塑性転移点で変形したことが準脆性的な微小断層の形成として記録されている。ここでは、石英層は断層で切れているにも拘わらず、極微細な動的再結晶粒子が断層に沿って形成されており、変形が塑性変形の成分も持つことを示す。動的再結晶粒子間には微細な白雲母粒子も形成されていて、流体が断層に沿って浸透したことを示唆する。変形量が増加すると、断層密度が高くなるほか、微細粒動的再結晶石英粒子と白雲母粒子からなる微細せん断帯の幅が増加し、レンズ状に残される非変形部分の体積分率が減少していく。おそらく、せん断帯の部分では圧力溶解沈殿クリープが極めて低応力で生じており、非変形レンズ部に応力集中が生じて新たな微細断層が生じると推察される。微細せん断帯の体積分率の増加に伴って、岩石は一方的に歪軟化すると考えられる。

やはり、同様の白亜紀の高圧変成岩である北海道神居古潭変成岩の脆性塑性転移点付近の条件で変形した変砂岩試料中では、伸張割目が形成され、破砕片が隔離した石英碎屑粒子が観察される。破砕片間では、石英のファイバー状粒子の成長（沈殿）が空隙を埋めるために生じているが、これはあたかも破砕された石英粒子を修復する作用のように見える。一方で、石英粒子と白雲母粒子境界では、石英粒子側に湾入が見られ、顕著な石英の溶解が両粒子境界で生じている。さらに、白亜紀に脆性塑性転移点付近の条件で形成された中央構造線カクレーサイトでも、破砕片の間は流体から沈殿した鉱物で埋められている。また、破砕作用の程度の増加とともに、流体を介した著しい元素移動が生じていることが判明してきた。結局のところ、脆性塑性転移点付近の変形は破壊—反応—物質移動—沈殿により生じており、この変形様式により著しい強度低下が生じると予想される。

キーワード: 地殻上部の差応力, 歪軟化, 微小破壊, 溶解反応, 物質移動, 鉱物の沈殿

Keywords: differential stress in the upper part of crust, strain softening, micro-fracturing, dissolution, mass transfer, precipitation of minerals

## 発震機構解から求めた2013年淡路島地震(M6.3)断層周辺の応力状態検出 Detecting the stress condition at a fault from focal mechanism: application to the 2013 Awaji Island earthquake (M6.3)

松本 聡<sup>1\*</sup>; 片尾 浩<sup>2</sup>; 飯尾 能久<sup>2</sup>

MATSUMOTO, Satoshi<sup>1\*</sup>; KATAO, Hiroshi<sup>2</sup>; IIO, Yoshihisa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学地震火山センター, <sup>2</sup>京都大学防災研究所

<sup>1</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., <sup>2</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.

内陸地震発生域においては地震発生のポテンシャルを評価することが大変重要であるが現状では難しく、その方法を開発する必要が求められている。断層において地震が発生する条件として、せん断応力が断層の強度を超える必要がある。実際の断層においては、断層を含む領域全体が高応力で断層の強度が下がることにより発生する場合と、断層に応力が集中することで発生する場合が考えられる。この両者は地震前後の応力場変化から区別することができると考えられる。本研究では領域の応力場を外部から載荷される応力と、断層における地震前の応力集中もしくは地震後の応力低下と等価なモーメントテンソルで表現し、地震前後の応力場変化から応力集中と差応力の絶対値を求めることを試みた。この方法を2013年4月に発生した淡路島での地震(M6.3)の発震機構解データに適用した結果、地震前に応力が断層周辺に集中していることを示す解が最適になった。また、差応力としては約51MPaとなり、淡路島が現在も比較的応力の高い状態である可能性が求められた。本研究の方法を内陸地震断層周辺の地震活動データに適用することにより、地震発生のポテンシャルを求めるひとつの指標が得られるものと期待できる。

キーワード: 応力場, 地震断層, 発震機構解

Keywords: stress field, earthquake fault, focal mechanism

## 摩擦—流動構成則とその地震発生サイクルの2次元解析への応用 A friction to flow constitutive law and its application to a two-dimensional modeling of earthquake cycles

嶋本 利彦<sup>1\*</sup>; 野田 博之<sup>2</sup>

SHIMAMOTO, Toshihiko<sup>1\*</sup>; NODA, Hiroyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国地震局地質研究所, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Institute of Geology, China Earthquake Administration, <sup>2</sup> JAMSTEC

摩擦から高温塑性変形をつなぐ構成則を確立することは、地震の発生、プレートの相互作用などをモデリングする上でも長い間大きな課題であった。摩擦法則と流動則を線形につなぐ構成則が提唱されているが、摩擦から流動への変化を再現した岩塩の実験データと全く合わない。我々は双曲線正接関数(hyperbolic tangent)を使った簡単な式で、新しいパラメタを導入することなく、摩擦から高温塑性流動への変化が記述できることを示した(Shimamoto, 2004, JpGU; Shimamoto and Noda, 2010, AGU). Noda and Shimamoto (2012, JSG)はこの式を使って断層の安定性を解析している。講演ではこの構成則の特徴と実験データの比較をし、この構成則を用いて、リソスフェアを横切る断層の地震サイクル挙動についての解析結果を報告する。また、モデリングの結果に基づいて新しい断層モデルを提唱する。主な結果は以下の通りである。

(1) 摩擦—流動構成則は、岩塩剪断帯の摩擦領域、脆性—延性遷移領域、完全塑性領域の剪断変形実験結果(Kawamoto and Shimamoto, 1997, Proc. IGC Beijing)と非常に一致を示す。全ての実験データに構成則をフィットさせて、摩擦と流動パラメタをかなりよく再現することができた。

(2) 過去約30年間、リソスフェアの性質を記述するために2つの方法が使われてきた。ひとつは、摩擦強度と流動則をつないだ強度断面である(クリスマス・ツリーとも呼ばれる)。一方、地震発生のモデリングでは浅部の速度弱化が地震発生域の下部で速度強化に変わるモデルが使われてきた。前者には摩擦の速度依存が入っていないので地震発生のモデリングには使えないし、脆性—延性遷移領域の性質を記述することはできない。後者には、リソスフェア下部における流動の性質が組みこまれていない。摩擦—流動構成則は、統一した視点から両者を融合することができる。

(3) 摩擦—流動構成則を用いて地震発生サイクルの解析が可能であることを2次元解析でしめた。解析には境界要素法を用いて、地震間の断層のゆっくりしたすべりと地震時の断層の動的挙動を解析している。流動則としては石英の流動則を用いた。摩擦—流動則は浅部では摩擦法則と変わらないので、地震発生時の断層の挙動はこれまでの速度依存性を変えたモデルの解析結果とよく似ている。遷移領域・流動領域の断層挙動は流動特性を反映しているので、今後地殻変動のデータとの比較が望まれる。

(4) すべり速度(流動領域では歪速度)を仮定すると、摩擦—流動構成則を使って摩擦・遷移・流動領域における強度断面を描くことができる。この3分モデルを、地震発生サイクルにおける断層の挙動の全体像と対比することは可能である。しかし最大の問題は、地震発生領域においてはすべり速度が10桁以上も変わり、それに応じて強度断面のみならず、摩擦・遷移・流動領域の境界も地震サイクル中に変わってくることである。リソスフェアの強度断面は一定速度を仮定して決まるのではなく、リソスフェアを横切る断層の挙動に応じて自発的に決まることを示す。

(5) モデリングの結果では、地震時の断層運動は遷移領域における速度強化の性質をもつ領域に深く及んでいる。地震の後、震源域の下部約3分の1の領域では、断層クリープが深部から浅部に向かって広がって次の地震に至る。この領域では、地震性断層運動に断層クリープが重複しておこる。遷移領域の変形組織はマイロナイトの組織によく似ている。従って、このような断層運動は、世界のかなりの場所で報告されている「マイロナイト化したシュードタキライト」の産状をよく説明する。地震発生モデリングの結果に基づいて、中央構造線のような内陸大断層の構造と断層岩を見直す面白い。

(6) 石英・長石のような重要な鉱物を用いて摩擦から流動に至る剪断変形実験をおこなうことは容易ではない。摩擦—流動構成則は摩擦と流動則パラメタがあれば両者をつなぐ性質を予測できるので、実験条件を想定する上で実用価値がある。

キーワード: 摩擦—流動構成則, 地震発生サイクルのモデリング, 断層モデル, リソスフェア・レオロジー, マイロナイト, シュードタキライト

Keywords: Friction to flow constitutive law, Earthquake cycle modeling, Fault model, Lithosphere rheology, Mylonite, Pseudotachylite



## 内陸逆断層地震震源域の地震前の応力場の計算法についての考察 A consideration about computation of tectonic stress field for inland thrust earthquake

宮武 隆<sup>1\*</sup>  
MIYATAKE, Takashi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学・地震研究所  
<sup>1</sup> ERI, The Univ. of Tokyo

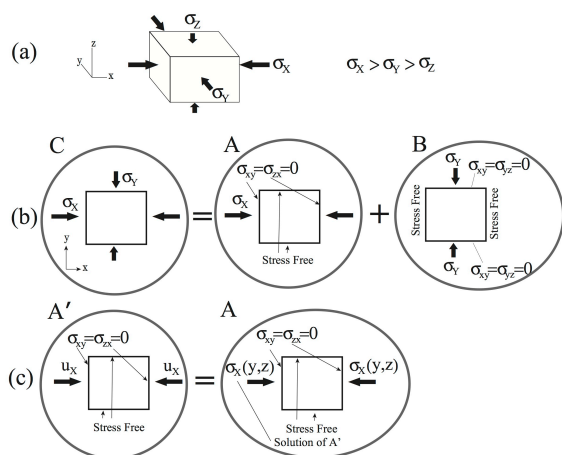
逆断層地震を駆動する応力システムを図1aに示す。これは領域の協会に加わる応力系、従って領域解法での境界条件と考えることも出来る。ここで $\sigma_z$ は静岩圧 $\sigma_v (= \rho gz)$ と仮定することもできる。これらから静岩圧を引き去ったものをあらためて図1aの応力 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ とする。その場合に $\sigma_z$ はゼロになるが、実際には造構応力の $z$ 成分もあるはずなので若干は残り、負になる可能性も有る。さて、図1で示すこの応力システムは、2つのシステム(図1b)のようにBとCに分解することができる。ただし $\sigma_x$ と $\sigma_y$ の深さ分布などはよくわかっていない。もし $\sigma_x$ だけを加えて他の成分はゼロとするシステムAで $\sigma_x$ が深さに対し一様であると仮定すると、断層面上の剪断応力と垂直応力は、深さによらず、ほとんど均一になる。この断層垂直応力に静岩圧 $\sigma_v (= \rho gz)$ が加えて、静摩擦係数、動摩擦係数をそれぞれ乗じると、断層強度(ピークのストレス)と動的摩擦応力が推定できるのだが、自由表面で大きな応力降下、Strength Excessは地表で最小、深さと共に増加することになってしまう。すると、地震破壊は必ず地表から開始されることになる。もちろんこのことは必ずしも成立しないので誤った結論であり $\sigma_x$ は深さによらず一定という仮定が正しくないことになる。もし $\sigma_x$ が深さとともに増加するならば、上記の誤りは避けることができる。この深さ依存性は、弾性定数が深さと共に増加すると仮定し、境界に変位一定の境界条件を課すと生じることは明らかである。日本の内陸については、ストレス・フィールドは、主にプレート運動に起因しているはずで、境界条件としては変位条件が適当であると思われる(図1cのA')。ここで $\sigma_{xx}$ 以外の応力成分はゼロである。上記の変位境界条件を課して(A')静的弾性方程式を解き、結果として生じた境界面でのストレス構成要素を新たな境界条件として(今度は変位条件で無く応力条件として)課して(図1cのA)静的弾性方程式を解くと、先の問題(A')の解と同じになる。

実際に計算する場合にAで与える応力のみならずBで与える応力も既知ではない。しかしBのシステムが断層に及ぼす影響は非常に小さいと予想される。もし構造が一樣ならば、Bが作る断層面上の起震応力は、完全にゼロになるからである。構造が不均質の場合には完全にはゼロで無いが、実際に計算してみるとAの作る応力のたかだか数%程度であることがわかった。従ってBの影響は無視してよい。

結論として、図1aの逆断層地震の起震応力を計算する際に、A'の境界条件で計算してよさそうであることがわかった。

キーワード: 内陸地震, 応力

Keywords: inland earthquake, stress field





## 2011 年東北沖地震による 2008 年岩手・宮城内陸地震余震域への静的応力降下と地震活動の低下

### Aftershock activity of the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake suppressed by stress shadow of the 2011 Tohoku earthquake

鈴木 悠平<sup>1\*</sup>; 遠田 晋次<sup>2</sup>; 吉田 圭佑<sup>1</sup>; 岡田 知己<sup>3</sup>  
SUZUKI, Yuhei<sup>1\*</sup>; TODA, Shinji<sup>2</sup>; YOSHIDA, Keisuke<sup>1</sup>; OKADA, Tomomi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東北大学理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>3</sup> 東北大学地震・噴火予知研究観測センター  
<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate school of Science, Tohoku university, <sup>2</sup>International Research Institute for Disaster Science, Tohoku university, <sup>3</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku university

東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)によって、東日本の各地で誘発地震活動が活発化した。それらは静的応力変化(例えば、Toda et al., GRL, 2011)や動的応力変化(Miyazawa et al., GRL, 2011)、間隙流体圧の変化(Terakawa et al., EPSL, 2013)などによって説明されている。一方で、東北沖地震によって地震活動が静穏化したとされる地域はきわめて限られる。東北沖震源付近(Kato & Igarashi, GRL, 2012)と2004年中越地震余震域(廣瀬・遠田, 地震学会秋季大会, 2011)、2008年岩手・宮城内陸地震余震域(Suzuki & Toda, AGU fall meeting, 2013)のみである。そのうち、Suzuki & Toda (2013)は岩手・宮城内陸地震の余震活動の低下の原因を東北沖地震による静的クーロン応力(CFF)の低下に求めた。しかし、余震域の断層(以下、レシーバ断層)の情報が少なく、静穏化が応力低下によるものとの確証に至っていない。

そこで、本研究では岩手・宮城余震域において既存データの約40倍となる4106個の発震機構データを求め、より詳細な応力・地震応答の時空間解析とモデル化を行った。メカニズム解は、2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ・原子力安全基盤機構(JNES)による臨時観測データ、東北大学・気象庁・防災科学技術研究所(Hi-net, F-net)の定常観測データを用いてHardebeck & Shearer (BSSA, 2002)の手法にしたがって求めた。気象庁初動解と精度の良いF-netモーメントテンソル(VR?80%)も併用した。得られたメカニズム解のほとんどは逆断層型と横ずれ断層型を示す。この2つの断層タイプの比率は空間的に不均質で、余震クラスターごとに特徴がある。これらのクラスター別の静穏化を調べたところ、余震域南部で逆断層、横ずれ断層がそれぞれ卓越する2つのクラスターにおいて、東北沖地震後の地震活動の低下が顕著であった。また、得られた全てのメカニズム解節面を同余震域に潜在するレシーバ断層とし、Iinuma et al. (JGR, 2012)の東北沖地震の震源断層モデルを用いて $\Delta$  CFFを計算した。媒質は半無限均質弾性体(Okada, BSSA, 1992)を仮定し、見かけの摩擦係数0.0, 0.4, 0.8の場合をそれぞれ計算した。その結果、0.0の場合で80%以上、0.8の場合では50%以上の節面で $\Delta$  CFFが負となった。また前述の2つのクラスターでは、 $\Delta$  CFFが負となる節面が卓越していたことがわかった。

$\Delta$  CFFによる地震応答は、速度・状態依存摩擦構成則をもとにDieterich (JGR, 1994)によって定式化されている。ある時刻に応力がステップ状に増加した場合、地震活動の急増の後ベキ乗則に従って時間減衰する(大森公式)ことが物理的に説明されている。このDieterichモデルによる地震活動の時系列計算には複数のパラメータが必要である。ここでは、上記で得られた $\Delta$  CFFの他に、2000年から岩手・宮城本震までの震源データから推定された常時地震活動レート、東北沖地震までの余震活動から最尤法で推定された応力蓄積速度、構成パラメータと法線応力の積 $A\sigma$ 、岩手・宮城本震に伴う $\Delta$  CFFをパラメータ値として採用した。これらの条件のもと、上記の大量のレシーバ断層への $\Delta$  CFFを使った地震応答をすべて計算し、その平均値の時系列と観測された地震活動の時系列を比較した。その結果、モデルでは東北沖地震時に地震発生の一時的な増加が起こり、観測値とは整合しなかった。このモデルと観測との不一致の原因として、1) 東北沖地震後の地震検知率低下による余震データの欠損、2) 余効変動による応力蓄積速度の変化、3) 流体による摩擦の低下(摩擦係数が0.0で差が最も小さい)、などが考えられる。

謝辞: 本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震合同余震観測グループ、科学研究費補助金・新学術領域「地殻流体」および原子力安全基盤機構(JNES)による観測データを使用して推定したメカニズム解、気象庁一元化処理震源、気象庁初動解、F-netモーメントテンソルを使用しました。

キーワード: 誘発地震, 静的クーロン応力変化, 速度・状態依存摩擦則, 地震活動静穏化

Keywords: induced earthquake, static Coulomb failure stress change, rate-and state-dependent friction law, seismic quiescence

## 熱流体解析に基づくガス圧式高温高压岩石変形試験機の改良案の創出 Improvement of gas medium triaxial apparatus derived from thermal fluid analysis

竿本 英貴<sup>1\*</sup>; 重松 紀生<sup>1</sup>

SAOMOTO, Hidetaka<sup>1\*</sup>; SHIGEMATSU, Norio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

<sup>1</sup> Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

装置の改良は、安全面に留意しながら所望の性能が発揮できるように行わなければならない。一般に、この過程では、試作、評価、改善、再試作と試行錯誤のループを何度も辿るため、多大な時間と費用がかかる。近年の装置設計と改良では、可能なかぎり試行錯誤にかかるコストを低減するため、数値計算によりこのループを代替させることが主流となりつつある。

高温・高压下での岩石の力学特性の高精度決定には、ガス圧式高温高压岩石変形試験機が用いられる。しかし国内の同装置は、熱設計が十分とは言えず高温での使用には限界があった。ここでは、試行錯誤のループを有限要素法に基づく熱流体解析によって代替させ、安価かつ安全に有用な装置改良案を創出することを目指す。

実験装置に対する熱流体解析で用いる支配方程式は、熱伝導方程式、連続の式、ナビエ・ストークス方程式、気体の状態方程式の4つであり、これらを連立させて解くことで、装置部材内の温度場や封入ガスの流れ場を定量的に把握することができる。

熱流体解析を実施した結果、(1) 固体部材の温度場に対する封入ガスの影響は大きくないこと、(2) 熱源近くの断熱材の温度は、材料の耐熱温度以下となること、(3) 樹脂製 O-リング周辺での温度勾配が著しく大きいこと、などの情報を定量的に把握することができた。これらの知見に基づいて、樹脂製 O-リングに接する部材の材質変更、断熱材の材質変更、治具の輻射率の改善など、いくつかの有用な改良指針を得ることができた。

キーワード: 熱, 流体, ナビエ・ストークス, 状態方程式, ガス圧式高温高压岩石変形試験機

Keywords: heat, fluid, Navier-Stokes, equation of state, gas medium triaxial apparatus

## 反射法地震探査による北米濃地域の地下構造の推定 The crustal structure beneath northern Mino region, central Japan revealed by seismic reflection survey

江元 智子<sup>1\*</sup>; 津村 紀子<sup>1</sup>; 藤原 明<sup>2</sup>; 阿部 進<sup>2</sup>; 小嶋 智<sup>3</sup>; 狩野 謙一<sup>4</sup>; 小村 健太郎<sup>5</sup>; 武田 哲也<sup>5</sup>; 浅野 陽一<sup>5</sup>; 小原 一成<sup>6</sup>; 伊藤 谷生<sup>7</sup>

EMOTO, Tomoko<sup>1\*</sup>; TSUMURA, Noriko<sup>1</sup>; FUJIWARA, Akira<sup>2</sup>; ABE, Susumu<sup>2</sup>; KOJIMA, Satoru<sup>3</sup>; KANO, Ken-ichi<sup>4</sup>; OMURA, Kentaro<sup>5</sup>; TAKEDA, Tetsuya<sup>5</sup>; ASANO, Youichi<sup>5</sup>; OBARA, Kazushige<sup>6</sup>; ITO, Tanio<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>(株) 地球科学総合研究所, <sup>3</sup> 岐阜大学工学部, <sup>4</sup> 静岡大学防災総合センター, <sup>5</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所, <sup>6</sup> 東京大学地震研究所, <sup>7</sup> 帝京平成大学

<sup>1</sup>Chiba University, <sup>2</sup>JGI, Inc., <sup>3</sup>Gifu University, <sup>4</sup>Shizuoka University, <sup>5</sup>NIED, <sup>6</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>7</sup>Teikyo-Heisei University

中部日本の北西部に位置する北米濃地域では 1891 年に日本国内最大級の内陸地震である濃尾地震が発生した。本地域の活断層の走向やメガキンク褶曲(狩野・他, 1990)の軸の方向は、概ね南東-北西方向を示し、この地域に沈み込むフィリピン海プレート(PSP)もまた南東-北西方向の軸を持つ尾根状の形状をしている。しかし、沈み込むプレートが地質の変形に与える影響を議論するための、地殻-上部マントルについての詳細な地震学的構造はまだ解明されていない。

本地域の地殻構造を明らかにするため、2009 年 10 月に反射法地震探査が行われた(駒田・他, 2010)。測線は根尾谷断層帯と高角に交わっている。この探査のショット記録に反射法解析を適用し地殻-上部マントルまでの反射断面を作成した。

得られた反射断面からは往復走時 10 秒付近に約 2 秒継続する反射波群が見られた。反射波群は対象地域の南西側では 9~11 秒、北東側では 10~12 秒で見られた。深度変換をすると南西側でおよそ 28~37km、北東側で約 32~39km に反射波群が分布していた。反射波群の上端・下端は根尾谷断層帯の北東側に比べ南西側の方が深い位置にあることが分かった。特に南西から北東への深度の変化は根尾谷断層帯の下で見られる。これらの反射波群の深度の特徴は本地域での速度解析の結果(江元・他, 2012)と一致する。

往復走時 10 秒付近の反射波群は既存の反射断面を比較することで下部地殻ラミネーションと解釈している。この下部地殻ラミネーションの形状の特徴は、根尾谷断層帯の濃尾地震時の変位方向(松田, 1974)と調和的である。このことから、反射波群の南西側と北東側での深度の差は、根尾谷断層帯の変位によって生じたもので、根尾谷断層帯の変位が下部地殻にまで及んでいる可能性が示唆された。また先行研究で推定されている PSP の上面深度と下部地殻ラミネーション下端の深度を比較すると、根尾谷断層帯の南西側は深度おおむね一致する。従って、北米濃地域の南西側ではフィリピン海プレートの上面と陸側の下部地殻が接触している可能性がある。

キーワード: 下部地殻, 根尾谷断層, 反射法地震探査, フィリピン海プレート, 北米濃

Keywords: lower crust, Neodani fault, reflection seismic survey, Philippine Sea Plate, northern Mino region

## 市販 IC レコーダを用いた茨城県北部における臨時微小地震観測について Temporary observation of micro earthquakes in the northern Ibaraki prefecture by using commercially-supplied IC recorder

齊藤 佳佑<sup>1\*</sup>

SAITO, Keisuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 齊藤 佳佑, <sup>2</sup> 勝俣 啓

<sup>1</sup> KEISUKE SAITO, <sup>2</sup> KEI KATSUMATA

P 波初動極性を用いて震源メカニズム解を推定する場合、その精度を高めるためには、高密度な地震観測網が必要であり、その実現のためには、できるだけ安価な地震観測システムを開発する必要がある。そこで、本研究では、初動極性の読み取りに特化した、機能を必要最低限に抑えた地震観測システムを提案する。用いた地震計は約 1 万円の上下動地震計で、市販されている約 1 万円の IC レコーダをデータロガーとして用いた。IC レコーダの仕様書によると、IC レコーダの記録可能周波数は 60~3400 [Hz] であるが、防災科学技術研究所 Hi-net の観測点と IC レコーダを用いた観測点で記録した地震波の周波数特性を比較した結果、20~30 [Hz] 程度の波も記録できることがわかった。

本研究では、正断層型の微小地震が多発している茨城県北部において 2012 年 8 月から約 1 か月間、臨時微小地震観測を行い、本研究で考案した地震観測システムの有効性を検討した。設置した臨時観測点数は全 29 点である。観測点設置の際は、実際の群発地震を想定し、全観測点を 1 本の道路沿いに設置することで、観測点設置に要する時間の短縮を図った。観測点設置から約 1 か月後に回収作業を行った後、P 波初動極性の読み取りを行い、震源メカニズム解の推定を行った。震源メカニズム解の計算は HASH プログラム [Hardebeck and Shearer (2002)] を用いて行い、推定した震源メカニズム解の個数は 87 個である。

また、推定した震源メカニズム解の精度を検証するため、東京大学地震研究所の臨時観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解との比較を行った。比較に当たっては、防災科学技術研究所 Hi-net の観測点も併せて、東京大学地震研究所の臨時観測点と Hi-net の観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解 (以下、この観測点の組み合わせを①とする) と、IC レコーダを用いた臨時観測点と Hi-net の観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解 (以下、この観測点の組み合わせを②とする) との比較を行った。また、①と②に対して、推定した 87 個の震源メカニズム解の P 軸と T 軸を比較した結果、震源球上のほぼ同じ位置に分布していたことから、両者の推定精度に対して有意な差はないと言える。したがって、IC レコーダの観測点のデータを用いて推定した震源メカニズム解は、従来通りの 3 成分地震計のデータを用いて推定した震源メカニズム解とほぼ同程度の精度を有していると言える。



## 2011 年東北沖地震後の東北日本弧の粘弾性変形過程のモデル化 Modeling the viscoelastic deformation of the NE Japan arc after the 2011 Tohoku-oki earthquake

芝崎 文一郎<sup>1\*</sup>; 中井 仁彦<sup>1</sup>; 武藤 潤<sup>2</sup>; 飯沼 卓史<sup>3</sup>

SHIBAZAKI, Bunichiro<sup>1\*</sup>; NAKAI, Yoshihiko<sup>1</sup>; MUTO, Jun<sup>2</sup>; IINUMA, Takeshi<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Tohoku University, <sup>3</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

The rheological structure of the Northeastern Japan arc crust and the upper mantle is heterogeneous along and transverse to the arc. Shibazaki et al. (2014) developed a model of the stress state of the Northeastern Japan island-arc crust using a finite element method with viscoelasticity and elastoplasticity. They reproduced several elongated low-stress regions transverse to the arc with viscous deformation that corresponds to hot fingers (high-temperature regions in the mantle wedge). The viscous relaxation process after the 2011 Tohoku-oki earthquake could be affected by the existence of low-viscosity regions caused by hot fingers. A three-dimensional (3D) finite element model was developed to investigate the viscoelastic deformation processes with heterogeneous viscosity distribution after the 2011 Tohoku-oki earthquake. The model considers the realistic crustal and mantle structures, viscoelasticity (Maxwell or Burgers rheology), and coseismic fault slip distribution obtained by Iinuma et al. (2012). For simplicity, only the elastic crust and viscoelastic mantle structure were considered. The westward movement near the trench and eastward movement in the inland region due to viscoelastic relaxation were reproduced, which are consistent with the observations. We also consider the local low viscosity region in the Northeastern Japan arc crust. In this case, extensional viscous strain concentrates on this region. We report the numerical results that take into account the realistic 3D heterogeneous viscosity distribution in the crust and the upper mantle beneath the Northeastern Japan island arc.

キーワード: 2011 年東北沖地震, 東北日本弧, 粘弾性変形

Keywords: 2011Tohoku-oki earthquake, NE Japan arc, Viscoelastic deformation