

## 越後平野で観測された東北地方太平洋沖地震に伴う局所的に大きな地殻変動 Local anomaly of crustal deformation associated with the 2011 Pacific coast off Tohoku earthquake in the Echigo plain

西村 卓也<sup>1\*</sup>, 水藤 尚<sup>1</sup>, 小林 知勝<sup>1</sup>, 董勤喜<sup>2</sup>, 柴山 恭<sup>3</sup>

Takuya NISHIMURA<sup>1\*</sup>, Hisashi Suito<sup>1</sup>, Tomokazu Kobayashi<sup>1</sup>, DONG, Qinxi<sup>2</sup>, SHIBAYAMA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院, <sup>2</sup> (株)エデュサイエンス総合研究所, <sup>3</sup> (株)計算力学研究センター

<sup>1</sup>Geospatial Information Authority of Japan, <sup>2</sup>Eduscience Research Institute, <sup>3</sup>Research Center of Computational Mechanics, Inc

国土地理院では新潟・神戸ひずみ集中帯と日本海東縁ひずみ集中帯に位置するひずみ集中帯内部の詳細地殻変動分布を明らかにするため、新潟県越後平野周辺をほぼ東西に横断する GNSS 観測点を概ね 5km の間隔で 2010 年に設置し、毎年 10-11 月に繰り返し観測を実施している。Ohzono et al. (2013) は、GEONET による東北地方太平洋沖地震 ( $M_w$  9.0) の地殻変動から計算された歪み分布に、震源断層モデルでは説明できない地域的不均質があることを指摘した。また、Ozawa et al. (2013) は、InSAR データによる地殻変動分布から火山地域において、特に上下変動成分に顕著な地殻変動の不均質性を見だし、火山直下における低弾性率領域によって説明可能であることを示した。本講演では、計 3 回の繰り返し観測に基づく越後平野周辺の地殻変動の詳細を明らかにするとともに、弾性定数の不均質を考慮した有限要素法による地殻変動の計算を行い、観測された地殻変動の再現を試みた結果について報告する。

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴って、この地域でも大きな東西伸張の地殻変動が観測された。2010 年 10-11 月から 2011 年 10-11 まで地震時の伸びの主軸とほぼ等しい観測点配列方向 ( $N105^\circ E$ ) の変位及び歪み分布を見ると、越後平野の新津丘陵の西側の基線では 6.2ppm (25km で 15.4cm) の伸びが観測されたのに対し、新津丘陵の東側の基線では 3.8ppm (16km で 6.2cm) の比較的小さな伸びが観測された。本来、新津背斜の東側の方が地震の震源断層に近いので、大きな歪みが観測されることが期待されるが、観測結果は反対となっている。越後平野周辺は、地震波構造探査や地下のボーリング等から弾性定数の小さな堆積層が極めて厚く堆積していることが知られており、新津丘陵の西側で観測された大きな伸張歪みは地下構造の不均質に起因する可能性がある。このような可能性を検証するために、Nishimura et al. (2011) の本震と最大余震の 4 枚の矩形断層を近似した矩形領域のずれと防災科学技術研究所の J-SHIS 地盤構造モデルに準拠した弾性定数の不均質を媒質に与えて、有限要素解析により、越後平野周辺の地殻変動分布の数値シミュレーションを行った。計算された東西方向の歪み分布は、越後平野中央部では周辺の地域に比べて 2 倍程度の伸張ひずみとなり、GNSS 観測点間の伸張ひずみも新津丘陵の西側の基線で 6.1ppm、東側の基線で 3.4ppm とほぼ観測値が再現された。歪み分布の不均質は、震源域近傍の地殻変動観測からは断層運動のメカニズムや滑り分布を原因とするものと媒質の不均質を原因とするものとの分離が難しいが、東北地方太平洋沖地震のようなある程度離れた場所における大きな断層運動によって、初めて明瞭に分離できたと言える。この結果は、今後東北地方太平洋沖地震以外の地殻変動のモデル化を行う際にも、媒質の不均質性を考慮することが重要であることを示すものである。

キーワード: 地殻変動, 東北地方太平洋沖地震, 有限要素法, GNSS

Keywords: Crustal deformation, the 2011 Tohoku-oki earthquake, Finite Element Model, GNSS

## 東北日本弧不均質粘性構造を考慮した東北沖地震の2次元余効変動解析 Viscous relaxation after the Tohoku Oki Earthquake by heterogeneous rheological structure of the NE Japan

武藤 潤<sup>1\*</sup>, 芝崎 文一郎<sup>2</sup>, 大園 真子<sup>3</sup>, 矢部 康男<sup>4</sup>, 伊藤 喜宏<sup>4</sup>, 飯沼 卓史<sup>5</sup>, 松本 拓己<sup>6</sup>, 岡田 知己<sup>4</sup>

Jun Muto<sup>1\*</sup>, Bunichiro Shibazaki<sup>2</sup>, Mako Ohzono<sup>3</sup>, Yasuo Yabe<sup>4</sup>, Yoshihiro Ito<sup>4</sup>, Takeshi Iinuma<sup>5</sup>, Takumi Matsumoto<sup>6</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 建築研究所国際地震工学センター, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター, <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>5</sup> 東北大学災害科学国際研究所, <sup>6</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>Dept. Earth Sci., Tohoku University, <sup>2</sup>International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, <sup>3</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University, <sup>4</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, <sup>5</sup>International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, <sup>6</sup>National Institute for Earth science and Disaster Prevention

Deployment of dense network of geodetic observations has illuminated the heterogeneous crustal deformation associated with the Mw 9.0 2011 Tohoku Oki earthquake. Ohzono et al. (2012) showed the heterogeneity of coseismic strain fields likely reflecting heterogeneity in rheological (viscoelastic) properties of the NE Japan lithosphere (Yabe et al., in prep). Moreover, viscoelastic relaxation after the earthquake that lasts longer than other mechanisms (e.g., afterslip and poro-elastic rebound) has also known to be affected by viscosity structures of the island arc-trench system such as elastic thickness variation, spatial and depth-dependent viscosity. Therefore, the viscosity structure of the NE Japan trench-arc system must be estimated in order to evaluate the viscous relaxation component accurately in the observed post-seismic deformation field. To this end, two-dimensional viscosity profiles of the northeastern (NE) Japan island arc-trench system were created using laboratory derived constitutive laws of various minerals. The calculated profiles based on temperature, pressure and water contents dependent rock rheology predict viscosities of the mantle wedge and oceanic mantle to be  $10^{19}$  Pa s and  $10^{20}$  Pa s, respectively. These values agree well with the recent estimate of the viscosities after the post-seismic deformation of the 2004 Sumatra earthquake (Mw 9.2). This indicates that the steady-state flow laws of rocks can be used to infer post seismic deformation field. However, our calculations reveal significant lateral variations in viscosities across the northeastern Japan arc: thick, high viscous lithosphere in the colder forearc and thin and low viscous lithosphere in the hotter volcanic front. Preliminary two-dimensional finite element modeling (FEM) on post-seismic deformation of the Tohoku Oki earthquake revealed that the incorporation of the lithosphere structures have significant effects to the stress relaxation process compared with widely used uniform layered model. In the presentation, we will furthermore examine stress relaxation process of the lithosphere from FEM modeling taking into account of temperature- and depth-dependent heterogeneous rheology.

References: [1] Muto, J. (2011) *Tectonophysics*, 503, 201-206. [2] Ohzono, M., Y. Yabe, T. Iinuma, Y. Ohta, S. Miura, K. Tachibana, T. Sato, and T. Demachi (2012) *Earth Planets Space*, 64, 1231-1238.

キーワード: 余効変動, 粘性緩和, 地殻マントルレオロジー, 東北地方太平洋沖地震, 東北日本, 島弧-海溝系

Keywords: Post-seismic deformation, Viscous relaxation, Rheology of crust and mantle, Tohoku Oki Earthquake, Northeastern Japan, Arc-trench system

## 東北沖地震による応力場の変化と断層強度 - 内陸地震の応力載荷過程 Change in stress field by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and fault strength-stress loading process for inland earthquake

長谷川 昭<sup>1\*</sup>, 吉田 圭佑<sup>1</sup>, 岡田 知己<sup>1</sup>

Akira Hasegawa<sup>1\*</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Tomomi Okada<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

<sup>1</sup> RCPEV, Graduate School of Science, Tohoku University

2011年東北沖地震は、稠密な観測網が展開されていた沈み込み帯で発生したM9.0という超巨大地震であったが故に、地震発生機構の理解に貢献する多くの重要な研究成果が得られつつある。それには、地震の大きさと観測網の品質や稠密さから、これまで必ずしも明瞭に見えなかった現象が、誰もが納得するS/Nを持つシグナルとして検出されたことが大きい。その一つに、応力場の変化がある。Hasegawa et al. (EPSL 2012)は、震源断層直上の上盤プレート内の静的応力変化が差応力で5~15MPa以上の領域で、主応力方向の逆転がみられ、従って、これらの領域で地震前の差応力が5~15MPa以下と極めて小さかったことを明らかにした。Yoshida et al. (GRL 2012)は、内陸でも、主応力方向が有意に変化した地域があり、そこでは~1MPa程度とさらに小さいことを示唆する結果を得た。差応力がそれほど小さいとすると、従来の内陸地震の応力載荷モデルを再考する必要がある。東北沖地震の1か月後に起きたいわき付近のM7.0の正断層型地震の発生も、従来の考え方で理解することは難しく、同様に再考を強く促すものである。

メカニズム解のデータを格段に増やして行った応力場の研究(吉田・他、本大会)で、東北沖地震前の前弧域の応力場は島弧走向方向に変化し、北上山地と阿武隈山地で1軸がプレート収束方向に必ずしも向かないことが分かった。これは、地形の凹凸によりつくられる応力が支配的であることを示唆する。東北沖地震後の1軸の回転(Hasegawa et al., EPS 2011)から推定されたプレート境界の摩擦係数0.036を用いると、前弧域では偏差応力は非常に小さく、1軸が必ずしもプレート収束方向に向かないことが期待される(例えば、Wang and He, JGR 1999)。つまり、太平洋下のプレート収束によりつくられる応力は、1軸をプレート収束方向に向けるほど大きくはない。そうであれば、太平洋沿岸の前弧域でみられた東北沖地震前の応力場は説明できるし、何故いわき付近にM7.0の正断層の地震が発生したかも理解できる。

このことは、内陸地震を発生させる差応力が小さい、すなわち断層強度も小さいことを示す。断層強度がそれほど小さいとすると、強度を極端に下げるメカニズムが働いているはずであり、その原因としてはover-pressured fluidが考えられる。これらの理解に基づいて推定された、内陸地震の新たな応力載荷モデルを提案する。これが成り立つとすると、1) 深部から流体が供給される場所でのみ地震が発生する、2) 内陸地震発生過程では応力上昇より強度減少の方が重要な役割を果たしている、3) 内陸地震は、over-pressured fluidにより強度が十分に減少した断層で発生する、すなわち、準備が十分に整った断層のみが破壊する、4) 内陸地震の繰り返し間隔は、主として深部からの流体の供給レートで決まる、ということになる。

キーワード: 応力, 断層強度, 応力載荷過程, 内陸地震, 地殻流体, 東北沖地震

Keywords: Stress, fault strength, stress loading process, inland earthquake, crustal fluids, Tohoku-Oki earthquake

## PS-InSAR 時系列解析による 2008 年岩手・宮城内陸地震後の粘弾性緩和と局所的余効変動の検出

### Postseismic deformation following the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced from PS-InSAR time series analysis

大下 佑也<sup>1</sup>, 太田 雄策<sup>1\*</sup>, 大園 真子<sup>2</sup>, 岡田 知己<sup>1</sup>, 出町 知嗣<sup>1</sup>, 立花 憲司<sup>1</sup>, 三浦 哲<sup>3</sup>, 海野 徳仁<sup>1</sup>

Yuya Ohshita<sup>1</sup>, Yusaku Ohta<sup>1\*</sup>, Mako Ohzono<sup>2</sup>, Tomomi Okada<sup>1</sup>, Tomotsugu Demachi<sup>1</sup>, Kenji Tachibana<sup>1</sup>, Satoshi Miura<sup>3</sup>, Norihito Umino<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大院理・地震噴火予知研究観測センター, <sup>2</sup> 北大院理・地震火山観測研究センター, <sup>3</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku University, <sup>2</sup>ISV, Hokkaido University, <sup>3</sup>ERI, The University of Tokyo

2008 年岩手・宮城内陸地震は連続 GPS データによって見出された奥羽脊梁山脈ひずみ集中帯 [1] で発生した逆断層型地震である。地震後に発生した余効変動に関しては GPS を用いた比較的地震直後の解析 [2] や ALOS/PALSAR データを用いて地震後に国見山東麓および雨田森において局所的な LOS 変化が見られることを指摘した研究が存在する [3]。Ohzono et al. [4] は GPS データから長期間継続する余効変動を見出し、それが粘弾性緩和によって大局的には説明が可能であることを示した。その一方で震源域近傍では GPS 観測値と粘弾性緩和モデルによる計算値が乖離し、その原因が局所的な余効すべり、もしくは粘弾性緩和の過小評価に起因することを指摘している。そこで本研究は震源域近傍の余効変動をより時空間的に詳細に把握するために ALOS/PALSAR データに StaMPS [5] を用いた PS-InSAR 時系列解析を適用した。

PS-InSAR 時系列解析の結果、本震震源断層近傍の詳細な地殻変動のパターンを時系列的に捉えることに成功した。本研究で検出した衛星から地上までの LOS 変位は、震源断層を挟む長波長の変位パターンと、短波長の変動が重畳し、複数の要因によってそれらが生じていることを示唆する結果となった。短波長の変動は栗駒山北側の雨田森近傍および栗駒山西側の高松岳付近の 2 箇所顕著であり、その変位量の最大値は解析期間である 2008 年 7 月から 2010 年 10 月までの間で 0.22m に及んでいることが分かった。本震震源断層を境界とする長波長の LOS 変位のパターンの成因について検討を行った結果、地震後の粘弾性層の緩和過程を考えることで長波長の変動を大局的には再現可能であることが分かった。

短波長の変動 (雨田森および高松岳付近) に関しては、雨田森付近は、地震時に東に傾き下がる断層が活動した可能性が指摘されており [6,7]、その断層面で長期間に渡って地震後余効すべりが発生した可能性がある。また高松岳付近では地震波速度構造が比較的浅部まで周囲と比較して低速度であり [8]、かつ三途川カルデラの内輪に位置する [9] ことから火山活動による可能性が高いと考えられる。

[1] Miura et al., EPS, 2004. [2] Iinuma et al., GRL, 2009. [3] 高田 他. 測地学会誌, 2011. [4] Ohzono et al., EPS, 2012. [5] Hooper et al., JGR, 2007. [6] Abe et al., BSSA, in press. [7] Takada et al., EPS, 2009 [8] Okada et al., EPS, 2012. [9] 布原 他, 2008

キーワード: 内陸地震, 余効変動, InSAR

Keywords: Inland earthquake, postseismic deformation, InSAR

## 2011年東北地方太平洋沖地震による誘発地震活動域のイメージング Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>, 五十嵐 俊博<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>, 酒井 慎一<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>2</sup>, 岩崎 貴哉<sup>1</sup>

Aitaro Kato<sup>1\*</sup>, Toshihiro Igarashi<sup>1</sup>, Kazushige Obara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>1</sup>, Tetsuya Takeda<sup>2</sup>, Takaya Iwasaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>ERI University of Tokyo, <sup>2</sup>NIED

Intense swarm-like seismicity associated with shallow normal faulting was induced in Ibaraki and Fukushima prefectures, Japan, following the 2011 Tohoku-Oki earthquake. This seismicity shows a systematic spatiotemporal evolution, but little is known of the heterogeneity in crustal structure in this region, or its influence on the evolution of the seismicity. Here we elucidate a high-resolution model of crustal structure in this region, and determine precise hypocenter locations. Hypocenters in Ibaraki Prefecture reveal a planar earthquake alignment dipping SW at about 45-degree, whereas those in Fukushima Prefecture show a more complex distribution, consisting of conjugate sets of aligned small earthquakes. On the north of the hypocenter of the largest earthquake in the sequence (the M7.0 Iwaki earthquake), we imaged a high-velocity body at shallow depths that lacks aftershock seismicity. Based on fault source models, the large-slip region of the Iwaki earthquake is situated along a zone that roughly coincides with this high-velocity body. We delineated a separate low-velocity anomaly directly beneath the hypocenter of the Iwaki earthquake, indicating crustal fluids in this region. We hypothesize that strong crust underwent structural failure due to the infiltration of crustal fluids into the seismogenic zone from deeper levels, causing the Iwaki earthquake.

## 山陰地方の地震帯における応力場の空間変化と3次元地震波速度構造 Spatial variation of the stress field and 3-D seismic velocity structure in the seismic belt of San-in district

岸本 信二<sup>1</sup>, 飯尾 能久<sup>1\*</sup>, 片尾 浩<sup>1</sup>, 近藤 和男<sup>1</sup>, 澁谷 拓郎<sup>1</sup>, 中尾 節郎<sup>1</sup>, 坂 靖範<sup>1</sup>, 三浦 勉<sup>1</sup>, 米田 格<sup>1</sup>

Shinji Kishimoto<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>1\*</sup>, Hiroshi Katao<sup>1</sup>, Kazuo Kondo<sup>1</sup>, Takuo Shibutani<sup>1</sup>, Setsuro Nakao<sup>1</sup>, Yasunori Ban<sup>1</sup>, Tsutomu Miura<sup>1</sup>, Itaru Yoneda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

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

地震発生域における応力場の空間変化や地殻の不均質構造を知ることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要な鍵となり得る。本研究では、山陰地方における臨時観測点(50点)に定常観測点(27点)を加えた、計77点の地震観測網によるデータを用いた解析により、島根県東部の地震多発域を中心として、地震帯の応力場および3次元地震波速度構造と地震活動ならびに間隙流体圧との関連を調べた。

応力場はGephart and Forsyth(1984)などの標準的な応力逆解析手法を用いて推定した。推定された応力場において、ミスフィット角のRMSは全解析領域で $10^\circ$ 以下という小さい値が求まった。このことは、推定された応力場が解析領域内の観測された断層のすべり方向をよく説明できていることを意味する。また、島根県東部の解析対象地域では、最適解については地震帯の中心に向かう程、 $1$ のazimuthが、東西方向から $30^\circ$ ~ $40^\circ$ 時計周りに傾くという結果が得られた。このことは、地震帯における $1$ のazimuthが、中国地方広域のそれと比べて時計周りに数十度回転するという、Kawanishi et al. (2009)の報告と調和的である。

また、本研究では山陰地方地震帯の地震波速度構造を調べるため、FMTOMO(Rawlinson et al., 2006)を用いて地震波トモグラフィーを行った。手動で読み取られたP波およびS波の走時から、緯度・経度方向に $0.05^\circ$ 、深さ方向に3kmという細かいグリッド間隔において地震波速度構造を推定した。解析の結果、2000年鳥取県西部地震余震域や島根県東部の、特に地震活動が活発な場所において顕著な低速度異常が推定された。この低速度領域は、解析結果がある程度分解能を持つ深さ13kmから地表まで連続的に存在しているように見える。さらに当地域の低速度域の分布と震源分布には関連性が見られ、震源分布は低速度領域と高速度領域の境界付近で発生しているように見える。地震帯では、地震波速度構造に特徴づけられる地殻浅部の不均質構造、あるいは地殻流体の存在が当地域の地震活動をコントロールしている可能性がある。

応力逆解析とトモグラフィーの結果から、本研究では地震メカニズム解における断層面のばらつきの原因が、間隙流体圧によって生じた断層強度の違いであると考え、当地域における間隙流体圧の分布を調べた。

応力逆解析から得られた結果が極めて小さいミスフィット角を示すことから、解析領域内の応力場は均質であると仮定し、さらに、断層面上に働く摩擦係数は岩石の種類によらず一定(Byerlee, 1987)であるとすれば、各断層の破壊強度の違いは間隙流体圧によると考えることが出来る。島根県東部において推定された応力場から、メカニズム解のもう一つの節面(補助面)のミスフィット角が断層面に比べて $10^\circ$ 以上大きく、断層面を特定出来た地震について、せん断応力と法線応力から間隙流体圧を計算した。解析の結果、解析領域内には様々な破壊強度を示す断層が分布している可能性があることが分かった。このことは、地震波速度構造の低速度領域に特徴づけられた流体の存在が、当地域の地震の発生に関与している可能性を示唆している。

キーワード: メカニズム解, 応力場, 地震波トモグラフィー

Keywords: focal mechanism, stress field, tomography

## レイリー波位相速度とレシーバー関数の同時逆解析による立川断層近傍の深部地盤構造の推定

### Joint Inversion of Phase Velocity and Receiver Function for Estimation of Sedimentary Layers near the Tachikawa Fault

佐口 浩一郎<sup>1\*</sup>, 山中 浩明<sup>1</sup>

Koichiro Saguchi<sup>1\*</sup>, Hiroaki Yamanaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

#### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震以降、首都圏での地震活動が増加しており、今後、立川断層等による活断層による被害地震の発生が危惧されるため、首都圏では精度の高い強震動予測が必要とされる。高精度な強震動予測を実施する場合、3次元地下構造モデルが必要不可欠であるが、地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」<sup>1)</sup>によりモデルが構築されつつある今日においても、観測記録に基づく確認が必要とされる。本研究では、立川断層における強震動予測のための3次元地下構造モデルの作成を目的として、立川断層帯周辺地域で微動アレイ観測を実施し、レイリー波位相速度とレシーバー関数の同時逆解析から当該地域の深部地下構造を推定することにより、立川断層帯による地盤の段差構造を含めたより詳細な3次元地下構造を明らかにするものである。

#### 2. 微動アレイ観測によるレイリー波位相速度の推定

微動アレイ観測は立川断層を挟んで東西各4地点の計8地点により実施した。各観測点における観測は大アレイおよび小アレイをそれぞれ半径1.5~2km程度と0.4~0.5km程度の2つの円内において3成分による地震計を配置して実施した。大アレイで60分間、小アレイで30分間の微動のデータを0.005秒間隔で記録した。得られたアレイ記録の上下動成分をノイズの少ない81.92秒間のデータに区分して、それぞれに対して周波数-波数スペクトル法解析(F-K法解析)により、レイリー波の位相速度を推定した。F-K法解析の結果、7地点において周期0.5秒~5秒の間で概ね0.5km/s~2.5km/sの分散性を有する位相速度が得られた。

#### 3. レシーバー関数の算出

立川断層帯周辺の観測点(K-NET, KiK-NETおよびSK-net)では数多くの地震記録が得られており、レシーバー関数の算出には概ね震央距離100km以内の約70地震(M<sub>j</sub>=4.5以上)のうち各地点20~50の地震を使用した。各観測点におけるレシーバー関数算出の際には、解析区間をP波初動より約5秒間とし、レシーバー関数には1Hz~5Hzのバンドパスフィルターを施した後重合により算出した<sup>2)</sup>。解析で得られた全観測地点におけるPS-P時間の分布から、立川断層を挟んでPS-P時間は大きく異なっており、立川断層の東側ではPS-P時間が長いのに対し、断層の西側ではPS-P時間が短くなっていることが明らかになった。これにより断層の西側では堆積層が非常に薄く堆積しているかほとんど堆積層がないと推測される。

#### 4. レイリー波位相速度とレシーバー関数の同時逆解析

レイリー波位相速度とレシーバー関数の同時逆解析には焼きなまし法<sup>3)</sup>を用いた。逆解析における評価関数はKurose and Yamanaka (2006)<sup>4)</sup>と同様とした。探索パラメータをV<sub>p</sub>(P波速度)、V<sub>s</sub>(S波速度)およびH(層厚)とし、探索範囲はV<sub>p</sub>およびV<sub>s</sub>では初期値±10%、Hでは初期値1~150%とした。同時逆解析により立川断層帯周辺地域における地下構造は、S波速度0.5 km/s, 0.9 km/s, 1.5 km/sおよび2.7 km/sの堆積層と3.2 km/sの地震基盤から構成される5層で構成されており、立川断層の西側と東側にそれぞれ位置する観測点における堆積層の厚さから立川断層の深部地盤における段差は概ね1.8 km程度であることが明らかになった。

#### 謝辞

本研究は、文部科学省「立川断層帯における重点的調査観測」を受けて実施されました。また、本研究では防災科学技術研究所によるKiK-net, K-NETおよび首都圏強震動総合ネットワークによるSK-netの地震観測記録を使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 地震調査委員会(2009):「長周期地震動予測地図」2009年試作版, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_choshuki/choshuki2009.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/choshuki2009.pdf)
- 2) 小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美: 深い地盤構造評価のためのPS変換波の検出方法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No505, 45-52, 1998.3, 2008
- 3) Ingber, L.: Very fast simulated annealing, *Math. Comput. Modeling*, Vol.12, No.8, pp.967-973, 1989
- 4) Kurose, T., and Yamanaka, H.: Joint inversion of receiver function and surface-wave phase velocity for estimation of shear-wave velocity of sedimentary layers, *Exploration Geophysics*, 37, 93-101, 2006

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SSS25-07

会場:302

時間:5月21日 10:30-10:45

キーワード: 立川断層, 同時逆解析, レシーバー関数, 微動アレイ探査, レイリー波位相速度

Keywords: Tachikawa fault, joint inversion, receiver function, array microtremor exploration, Rayleigh wave phase velocity



稠密地震観測データから推定された震源分布と地震波不均質構造の関係 - 長野県西部地域の場合 -

Relationship between hypocentral distributions and seismic heterogeneous structures inferred from dense array data

土井 一生<sup>1\*</sup>, 野田 俊太<sup>2</sup>, 飯尾 能久<sup>3</sup>, 堀内 茂木<sup>4</sup>, 関口 涉次<sup>5</sup>

Issei Doi<sup>1\*</sup>, Shunta Noda<sup>2</sup>, Yoshihisa Iio<sup>3</sup>, Shigeki Horiuchi<sup>4</sup>, Shoji Sekiguchi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>立命館大学理工学部, <sup>2</sup>鉄道総合技術研究所, <sup>3</sup>京都大学防災研究所, <sup>4</sup>株式会社ホームサイスマメータ, <sup>5</sup>防災科学技術研究所

<sup>1</sup>College of Science and Technology, Ritsumeikan University, <sup>2</sup>Railway Technical Research Institute, <sup>3</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, <sup>4</sup>Home Seismometer Corporation, <sup>5</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

内陸地震がどのようなメカニズムで発生するか現在においても完全にはわかっていない。本研究では、1984年長野県西部地震(Mw 6.8)の震源域周辺における詳細な地震波速度構造を推定し、余震分布や周辺域における群発地震活動分布と比較しそれらの関係について調べた。

長野県西部地域においては、本震発生前後から現在まで継続して地震活動が活発で、マグニチュードが4以上のイベントも珍しくない(Ooida et al., 1989)。また、現在は本震断層面上だけでなく、余震域東部で群発的な地震活動が見られる。1995年から現在に至るまで、本震および群発地震震源域およびそれらの周辺において稠密な地震観測が行われている(Iio et al., 1999)。観測点はノイズを避ける固い岩盤の上に1-4 km 間隔で57点設置され、10 kHz という高サンプリングで地震波形記録が集録されている。本研究では1995年10月から2005年2月までに発生した観測点方位分布が180度以上ある地震12,291個を初期データセットとした。読み取り総数はP波で215,096個、S波で183,917個である。P波、S波の読み取り精度は非常に高く、それぞれ数ms, 数十msである。

解析は震源決定、一次元インバージョン、三次元インバージョンの三段階に分けておこなった。初期構造にはHirahara et al. (1992)で推定された1次元速度構造を用いた。グリッド間隔は震源・観測点分布やS波走時の誤差を考慮し、本震震源域および群発地震発生域近傍では水平方向1.5 km 間隔、その周辺部では水平方向3 km 間隔、深さ方向には深さ4 km 以浅で1 km 間隔、深さ4 km 以深で2 km 間隔とした。波線追跡にはPseudo Bending 法(Um and Thurber, 1987)を用いた。また、逆行列の計算にはLSQR法(Paige and Saunders, 1982)を用いた。

その結果、本震震源域および群発地震発生域の深さ2-6 km で震源、速度構造とも精度よく推定された。震源分布と $V_p/V_s$ 比がよく対応し、比較的低い $V_p/V_s$ 比(1.58-1.70)を示す領域に震源が多く存在し、高い $V_p/V_s$ 比を示す領域にはほとんど震源が見られなかった。また、本震断層の上端や東端が比較的 $V_p/V_s$ 比の高い領域に位置し、本震の震源過程やこの地域における地震活動が速度構造の不均質によって規定されていることが示唆された。

## 2012年北海道北部の群発地震に誘発された内陸スロースリップイベント? Slow slip event induced by earthquake swarm in inland of northern Hokkaido?

大園 真子<sup>1\*</sup>, 高橋 浩晃<sup>1</sup>, 一柳 昌義<sup>1</sup>, 東 龍介<sup>1</sup>, 山口 照寛<sup>1</sup>, 山田 卓司<sup>1</sup>, 谷岡 勇市郎<sup>1</sup>

Mako Ohzono<sup>1\*</sup>, Hiroaki Takahashi<sup>1</sup>, Masayoshi Ichiyonagi<sup>1</sup>, Ryosuke Azuma<sup>1</sup>, Teruhiro Yamaguchi<sup>1</sup>, Takuji Yamada<sup>1</sup>, Yuichiro Tanioka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学地震火山研究観測センター

<sup>1</sup> ISV, Hokkaido University

北海道北部は、定常的に浅部の地震活動が活発な地域であり、M4-5クラスの地震が頻繁に発生している。また、2011年東北地方太平洋沖地震後には群発的な地震活動も活発になり、2012年7月には中川町でM4.2(深さ約4km)の地震が発生した。さらに、2013年1月にはその震源域の深部延長と思われる場所でM4.8(深さ約20km)の地震も発生している。2012年の地震活動と同期するように、国土地理院が展開するGNSS観測網GEONETの0851(幌延)では、西側の観測点(0104天塩)に対して3ヶ月で約1cmの伸びを示す異常地殻変動とみられるシグナルが確認された。一方、北海道大学では2006年から北海道北部の詳細な地殻変動場をとらえるために、天塩町から中頓別町までの東西を横断する10点の稠密GPS連続観測点を設置して観測を行っている。本研究では、これらの稠密GPS観測点のデータを解析することにより、群発地震の活動域や幌延周辺での詳細な地殻変動の検出を試みた。その結果、群発地震発生域の北西部の観測点では、0851と同様に主に東西方向への伸びが検出された。この地域はサロベツ断層帯と問寒別断層帯に挟まれた領域に相当する。一方、この地域の観測点と問寒別断層帯を挟む東側の観測点との基線長変化は短縮の傾向が見られる。以上のことから、2012年の群発地震活動に伴い、この領域では地殻の非弾性変形または地質学的構造境界を断層とする非地震性すべりが発生している可能性が考えられる。今後、他の地球物理学的データとも比較しながらそれらの可能性を検討し、異常地殻変動と群発地震活動との関係についても考えていく必要がある。

キーワード: 地殻変動, 内陸地震, スロースリップ

Keywords: crustal deformation, inland earthquake, slow slip

## 発震機構解を用いた兵庫県南部地震震源域周辺の応力場推定 2

### Modeling stress field around the fault of the 1995 Kobe earthquake (M7.2) using focal mechanisms 2

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

Satoshi Matsumoto<sup>1\*</sup>, Hiroshi Katao<sup>2</sup>, Yoshihisa Iio<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.

近年, 発震機構解を用いた応力場の推定が世界各地でなされてきた. それらの結果から応力場は空間的に一様ではなく, 不均一であることが明らかになってきた. Matsumoto et al. (201) は不均一な応力場を空間的に一様な広域応力場とモーメントテンソルで表現される媒質中の非弾性変形による応力変化によって構成されていると考え, これらを推定する手法を開発した. 本研究ではこの手法を1995年兵庫県南部地震震源域および周辺で発生した地震に適用し, この地域の応力場のモデリングを試みる.

まず, 応力場の空間変化を見出すために通常の応力テンソルインバージョンをデータに適用した. 方法は Michael and Hardebeck (2006) によるものを用いた. その結果, 水平最大圧縮軸をほぼ東西にもつ横ずれ断層応力場であることが分かった. しかしながら, 破壊の開始点周辺では逆断層場になっていることが示された. この地域では最大主圧縮応力(1)の方向はほぼ東西で安定している. 一方, 中間主応力(2)と最小主圧縮応力(3)が近い値をとり, 応力比  $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = 0.1 - 0.2$  程度と小さい. これは断層近傍のすべりや非弾性変形によって容易に応力場が横ずれから逆断層場に変化しうることを示している. そこで Matsumoto et al. (2012) の方法を同じデータに適用した. モーメントテンソルは断層上に5 km間隔で配置し, インバージョンによって広域応力とモーメントテンソルの大きさを推定した. その結果, 断層端と断層中央部においてほかの位置よりも大きなモーメントテンソル, すなわち非弾性変形が起こっていることを示している. これらは本震の破壊開始点, 終点に対応することから, 破壊の開始, 終了に関連していると考えられる. また, これらは余震データから得られていることから, 地震後において断層上に非弾性変形が存在しており, それが応力変化を生みだしていることを示している.

キーワード: 兵庫県南部地震, 応力場, 発震機構, 非弾性変形

Keywords: Stress field, Kobe earthquake, focal mechanism, inelastic deformation

## 活断層の運動方向と地震学的に推定される地殻応力の比較：跡津川断層の例 Comparison between geologically determined fault slip and seismologically determined stress along the Atotsugawa Fault

重松 紀生<sup>1\*</sup>, 大坪 誠<sup>1</sup>, 宮川 歩夢<sup>1</sup>, 道家 涼介<sup>2</sup>, 丹羽 正和<sup>3</sup>, 吾妻 崇<sup>1</sup>, 今西 和俊<sup>1</sup>

Norio Shigematsu<sup>1\*</sup>, Makoto Otsubo<sup>1</sup>, Ayumu Miyakawa<sup>1</sup>, Ryosuke Doke<sup>2</sup>, Masakazu Niwa<sup>3</sup>, Takashi Azuma<sup>1</sup>, Kazutoshi Imanishi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所地質調査総合センター, <sup>2</sup> 株式会社地層科学研究所, <sup>3</sup> 日本原子力研究開発機構

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan/AIST, <sup>2</sup>GEOSCIENCE RESEARCH LABORATORY Co., Ltd., <sup>3</sup>Japan Atomic Energy Agency

跡津川断層において露頭で観察した活断層の運動方向と地震学的に推定した地殻応力との関係を検討した。跡津川断層は、岐阜県北部から富山県南部に位置する北東 - 南西走向の右横ずれの活断層であり、平均変位速度が2 - 3 m / 千年で国内では活動的な活断層の一つとして知られる。また、最近の観測研究により様々な知見が得られていることから研究対象断層とした。

跡津川断層に沿っては、西北西 - 東南東方向で水平に近い最大圧縮主応力軸を持つ地殻応力が、微小地震活動に基づき求められている (Imanishi et al., 2011)。これらは断層の深部と浅部で異なる応力解を示している。

断層東部の佐古、断層中部の菅沼谷、断層西部の天生、金山谷の4露頭で41条の断層スリップデータを取得した。観察した露頭は顕著な断層ガウジを伴い、現在の活動に調和的な右横ずれの他、左横ずれ、上下成分が顕著な構造が見られた。佐古露頭、菅沼谷露頭においては左横ずれの構造を右横ずれの構造が切断している。

得られた断層スリップデータと微小地震に基づく応力を比較すると、佐古、天生、金山谷の3露頭においては、主断層面におけるミスフィット角が30度以下である。一方、菅沼谷露頭については大きなミスフィット角を示す。また、断層の深部と浅部のそれぞれで求めた応力解と天生、金山谷における断層スリップデータを比較すると、断層の深部で求めた応力解に対するミスフィット角の方が小さい。

筆者らは阿寺断層においても主断層面から得られた断層スリップデータが微小地震に基づく応力解と調和的であるという結果を得ている (藤内ほか, 2011)。主断層面から得られる断層スリップデータと微小地震に基づく応力解の比較は、断層が活断層であるかどうかの判断として使える可能性がある。一方、菅沼谷における断層スリップデータが他と傾向が異なることについては、菅沼谷露頭付近の地形データを検討し、菅沼谷露頭の断層が最近の活動では動いていない、あるいは断層の屈曲などによる局所的応力などの可能性を検討する必要がある。また、天生、金山谷の結果と微小地震に基づく応力解の比較は、断層運動がより深部の応力に支配されていることを示唆している。

キーワード: 跡津川断層, 応力逆解析, 断層スリップデータ, 微小地震, 活断層

Keywords: Atotsugawa Fault, stress tensor inversion, fault slip data, microearthquakes, active fault

## 能登半島地震の断層への応力集中モデル

## A stress concentration model for the 2007 Noto Hanto earthquake fault

飯尾 能久<sup>1\*</sup>, 高田 陽一郎<sup>1</sup>, 鷲谷 威<sup>2</sup>, 歪集中帯大学合同地震観測グループ<sup>1</sup>Yoshihisa Iio<sup>1\*</sup>, Youichiro Takada<sup>1</sup>, Takeshi Sagiya<sup>2</sup>, Group for the Atotsugawa Joing Observation<sup>1</sup><sup>1</sup> 京都大学防災研究所, <sup>2</sup> 名古屋大学環境学研究科<sup>1</sup>DPRI, Kyoto Univ., <sup>2</sup>Nagoya Univ.

2007年能登半島地震の余震のメカニズム解を用いた応力逆解析により, Kato et al.(2010)は, 深さ6-10kmでは逆断層的な応力場であるのに対して0-4kmでは横ずれ型な応力場となることを見出した. この深さ変化は, 断層面上のすべり方向の深さ変化と調和的であり(Ozawa et al., 2008), 本震の発生前から存在していたと考えられる. 深さ変化の原因として, 北東-南西に圧縮軸を持つベンディングが提案されているが(Kato et al., 2009), この方向は最大圧縮応力の方向ではないため, その可能性は低いと思われる.

跡津川断層のFEMモデルにおいて, 下部地殻に存在する深部延長のすべりにより, 断層周辺では横ずれ型, 断層から離れるにつれて逆断層型となることを報告した. 能登半島地震の断層は跡津川断層から離れたところに位置しており, 合同観測データの解析等によっても, 周辺は基本的には逆断層的な応力場となっていると考えられる. そのため, 跡津川断層と同様に, 深部延長のすべりによって上記の特異な応力場の解釈を試みた. ここでは, Okada(1992)を用いたフォワードモデリングによりすべり量を求めた.

まず, 深さ10km以深の地殻内に鉛直な断層を仮定する. これは, Kato et al.(2010)が本震の震源付近に推定しているものと同様の走向を持つものである. 逆断層的な応力場の下でも, この断層は横ずれを起こし, その直上に横ずれ型の応力集中を引き起こす. 10km以浅には本震断層と同様に傾斜63°の断層を仮定した. 長さ22km幅11kmであるが浅部・深部の2つに分割している. 上記の鉛直な断層のすべりによる応力集中により, この断層の深部でも横ずれ的なすべりを起こすものと推定される.

Kato et al.(2010)では, 深さ10km以深で水平面内応力の大きさがほぼ同じであることも報告している. そこで, 以下のような方針で各断層のすべり量を決定した. 遠方応力場として, 鉛直応力は $\rho gh$ , 最小圧縮応力は鉛直応力と同じ, 最大圧縮応力は摩擦係数 $\mu=0.4$ と静水圧を仮定して最小圧縮応力から計算した. ただし, 深さ10km以深では鉛直応力との差は一定であるとした. 深さ10km以深で水平面内の差応力がほぼゼロとなるように鉛直断層のすべりを決定し, 浅部では観測結果に合うようなすべり分布を試行錯誤的にサーチした. 3つの断層のすべりを深部から50m, 30m, 10mとすることにより, 断層近傍においては, 深さ8kmでは逆断層的なのに対して, 深さ2kmでは横ずれ型の応力場を再現することが出来た.

跡津川断層においては, 下部地殻内の低速度・低比抵抗異常域は大規模なものであり, 深部延長だけでなくその両端部を含めてWeak Zone(変形集中帯)となっている(Nakajima et al., 2008; Yoshimura et al., 2009). さらに, Weak Zoneは跡津川断層を超えて走向方向に連続しており, 大きな歪み速度で特長付けられる歪み集中帯(Sagiya et al. 2000)を形作っていると考えられる. 一方, 能登半島地震の断層においては, 下部地殻内の低速度・低比抵抗異常域から推定されるWeak Zoneは今回の震源域を超えて続いていないようであり(Kato et al., 2010; Yoshimura et al., 2008), また, 断層の位置は歪み集中帯の外側となっている. そのため, 想定している時間スケールにおいてWeak Zone以外の領域が弾性的に振る舞うと仮定すると, 一度静的な釣り合い状態が達成されるとWeak Zoneではそれ以上の変形は起こらず, 周辺の歪み速度も小さくなる. ブロック運動的な変形は起こらないので, 応力場には過去からのすべりの履歴が反映され, 鉛直断層とその直上の傾斜した断層のトータルのすべりによる応力場が見られると考えられる.

キーワード: 内陸地震, 下部地殻, 応力集中過程, 歪み集中帯, Weak Zone

Keywords: intraplate earthquake, lower crust, stress accumulation process, Niigata-Kobe tectonic zone, Weak Zone

## 脆性断層岩中の流体を介した元素移動の規則性とメタソマティズムによる究極の脆性断層岩

### Systematics of element migration via fluids in cataclasites and ultimate cataclasites by metasomatism

竹下 徹<sup>1\*</sup>, 渡部悠登<sup>1</sup>, 金子由実<sup>1</sup>, 藤本光一郎<sup>2</sup>, 重松紀生<sup>3</sup>

Toru Takeshita<sup>1\*</sup>, Watanabe, Yuto<sup>1</sup>, Kaneko, Yumi<sup>1</sup>, Fujimoto, Koichiro<sup>2</sup>, Shigematsu, Norio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学, <sup>2</sup> 東京学芸大学, <sup>3</sup> 産業技術総合研究所

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>Tokyo Gakugei University, <sup>3</sup>AIST

我々は三重県飯高町で中央構造線を貫通して掘削されたボーリングコアを用い、脆性断層岩（カタクレサイト）中の物質移動を解析する研究を進めている。本掘削孔は約 474 m で中央構造線を貫いているが、上盤側の最下部は厚さ 20 m の領家帯に属するトーナライト起源のウルトラマイロナイトで主として構成されている。本ウルトラマイロナイトは様々な程度にカタクレサイト化を重複して被っており、我々は割れ目密度を指標としたカタクレサイト化の程度に基づき、本脆性断層岩を比較的未変形な岩石、弱カタクレサイト化岩、中カタクレサイト化岩、強カタクレサイト化岩に区分した。その後、すべての試料（全 22 試料）について XRF 全岩化学分析を行った結果、カタクレサイト化の進展とともに全岩化学組成は大きく変化していることが明らかとなった。そこで、Al を不動元素と仮定し、未変形岩 vs 弱カタクレサイト化岩、弱カタクレサイト化岩 vs 中・強カタクレサイト化岩の組み合わせでアイソコン図を作成した所、以下のことが明らかとなった。（1）未変形岩から弱カタクレサイト化岩にかけて質量は約 30% 増加する。また、Si, Na, K が増加する一方、Ca, Fe, Mg が減少する。（2）弱カタクレサイト化岩から中・強カタクレサイト化岩にかけて質量は減少し、最終的に強カタクレサイト化岩では約 25% の質量減少が認められる。また、Ca, Mg, Fe が増加する一方、Si, Na, K が減少する。つまり、未変形岩から弱カタクレサイト化岩にかけての元素移動と逆センスの元素移動を示す。さらに、元素移動は鉱物の増減を生じる結果となるので、偏光顕微鏡下でポイントカウンティングにより鉱物のモード組成を測定した。その結果、弱カタクレサイト化岩中で石英脈の形成、斜長石のセリサイト化、中・強カタクレサイト化岩中では、方解石脈の形成および緑泥石の沈殿が生じており、これらが元素移動と対応していることが明らかとなった。つまり、強カタクレサイト化岩は方解石や緑泥石に著しく富む究極の脆性断層岩となる。これらの質量変化と元素移動・鉱物の増減は、未変形岩から弱カタクレサイト化岩にかけて破壊による体積増加（ダイラタンシー）が生じ、そこにシリカに富む流体が侵入し石英の沈殿が生じた一方、弱カタクレサイト化岩から中・強カタクレサイト化岩にかけては、流体に溶解した石英分が強圧縮によって絞り出されていったことによって説明出来る。しかし、同様に流体に溶けていると思われる Ca, Mg, Fe が何故弱カタクレサイト化岩では鉱物として沈殿せず、中・強カタクレサイト化岩で方解石や緑泥石として沈殿するかは良くわかっていない。Ca メタソマティズムについては、トーナライトだけでなく、苦鉄質岩や超苦鉄質岩でも顕著に生じており、変形に伴う場合とそうでない場合がある。今後、Ca, Mg, Fe の元素移動の過程・機構についての総合的な研究が必要である。

キーワード: 元素移動, メタソマティズム, カタクレサイト, 破壊による体積変化, 溶解と沈殿, アイソコン図

Keywords: element migration, metasomatism, cataclasis, volume change due to fracturing, dissolution and precipitation, isocon diagram