

## 2011年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定 応力インバージョンにおけるデータセット抽出基準の重要性 Proper estimation of stress fields in the source region of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake

今西 和俊<sup>1\*</sup>, 桑原 保人<sup>1</sup>  
IMANISHI, Kazutoshi<sup>1\*</sup>, KUWAHARA, Yasuto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所

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

2011年東北地方太平洋沖地震では海溝軸付近で数10mを超えるすべりが起こったことが様々な観測データから明らかになってきた。これだけ大きなすべりを起こす歪が蓄積されていたとすると周辺の応力場に顕著な空間変化が存在していたことが期待される。本研究では使用するデータセットを適切に選ぶことで、このような応力場の空間変化が検出できることを報告する。

応力テンソルインバージョンにより応力場を推定する場合、含まれるメカニズム解にはある程度のばらつきがあることが必要とされる。Hardebeck and Hauksson (2001) の数値実験によると、データセットのほとんどがある断層面に沿った類似のメカニズム解であった場合、真の応力場がどうであれ、最大主応力軸が断層面に対して約45度の角度を持つ結果が推定されてしまうことが示されている。本研究で対象とする東北地方太平洋沖ではプレート境界面で発生する低角逆断層型地震が多いことから、使用するデータセットに注意を払わないと誤った結果が推定されてしまうことになる。

我々はこの問題点を解決するため、Frohlich (1992) による断層タイプの分類、Kagan angle (Kagan, 1991)、震源の深さの情報を用い、プレート境界面で発生している地震 (On-fault 地震) とそれ以外の地震 (Off-fault 地震) に分類することを試みた。具体的には、(1) Frohlich (1992) による断層タイプが逆断層型、(2) 低角逆断層型地震 (走向 195°、傾斜角 15°、すべり角 90°) との間の Kagan angle が 35度以下、(3) 震源がプレート境界面から ±10km の間に存在、という3つの条件をすべて満たした地震を On-fault 地震、それ以外を Off-fault 地震と定義した。この分類を1997年2月から2011年東北地方太平洋沖地震が発生する直前までの防災科学技術研究所の F-net モーメントテンソル解に適用したところ、およそ半数が On-fault 地震と認定された。On-fault 地震のメカニズム解の走向と傾斜角はプレート境界面の形状とも調和的であり、上記の条件がうまく機能したことが伺える。Off-fault 地震は様々なメカニズム解から構成されており、正断層タイプの地震も多く含まれる。

次に対象地域をいくつかの領域に分割し、それぞれの領域に含まれる Off-fault 地震を用いて応力テンソルインバージョン (Michael, 1984) を実施した。2011年東北地方太平洋沖地震で大きなすべりを生じた領域においては、最大主応力軸はほぼ水平面内に作用していたことがわかった。最大主応力軸の推定誤差を考慮すると、プレート境界面に対して 10~40°ほどの角度を持って作用している。一方、それ以外の領域では最大主応力軸がプレート境界面に対して高角に作用していたことがわかった。特に茨城県沖ではほぼ直交している。このように、大きなすべりを生じた領域にはある程度のせん断応力が掛かっていたのに対し、それ以外の領域ではせん断応力が非常に小さかったことが明らかになった。また、比較のために On-fault 地震を使って同様の解析を行ってみたところ、どの領域においてもプレート境界面に対して最大主応力軸が約45度で作用するという結果が推定された。これは Hardebeck and Hauksson (2001) の数値実験が示しているように、データセットが適切でないことに起因した誤った応力場であると言える。

なお、発表においては、主応力軸の空間変化が生じる要因、本震発生後の応力場との関係についても報告する予定である。

謝辞：防災科学技術研究所の F-net モーメントテンソル解を利用させていただきました。

### 引用文献：

- Frohlich, C. (1992), Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanism, *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 75, 193-198.
- Hardebeck, J. L., and E. Hauksson (2001), Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics, *J. Geophys. Res.*, 106, 21,859-21,882, doi:10.1029/2001JB000292.
- Kagan, Y. Y. (1991), 3-D rotation of double-couple earthquake sources, *Geophys. J. Int.*, 106, 709-716.
- Michael, A. J. (1984), Determination of stress from slip data: faults and folds, *J. Geophys. Res.*, 89 (B13), 11,517-11,526.

キーワード: 応力テンソルインバージョン, 2011年東北地方太平洋沖地震, データセット抽出基準

Keywords: stress tensor inversion, 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, data-set selection criteria

## 誘発地震活動域における応力場の特徴 ~ 茨城県北部・福島県南東部 ~ Stress field of normal-faulting seismic sequences in Ibaraki and Fukushima Prefectures triggered by the Mw9.0 Tohoku-oki

加藤 愛太郎<sup>1\*</sup>, 五十嵐 俊博<sup>1</sup>, 酒井 慎一<sup>1</sup>, 小原 一成<sup>1</sup>, 武田 哲也<sup>2</sup>, 飯高 隆<sup>1</sup>, 岩崎 貴哉<sup>1</sup>, 東北地方太平洋沖地震合同観測グループ<sup>1</sup>

KATO, Aitaro<sup>1\*</sup>, IGARASHI, Toshihiro<sup>1</sup>, SAKAI, Shin'ichi<sup>1</sup>, OBARA, Kazushige<sup>1</sup>, TAKEDA, Tetsuya<sup>2</sup>, IIDAKA, Takashi<sup>1</sup>, IWASAKI, Takaya<sup>1</sup>, Group for the aftershock observations of the 2011 Tohoku-oki Earthquake<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>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

The 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake triggered widespread seismicity throughout the Japanese island arc including Hokkaido and Kyushu regions. In particular, a significant increase in the shallow seismicity was observed in the minutes following the main-shock along the Pacific coast of NE Japan, notably the northern part of Ibaraki Prefecture and the southern part of Fukushima Prefecture. The most striking feature of the induced seismicity is that the focal mechanisms reveal normal faulting with a T-axis orientated in a roughly E-W direction. Several large magnitude events including the maximum 7.0 earthquake have occurred during the sequence. It is very important to understand the stress field of driving such intensive seismic swarm activities.

We have, therefore, conducted a series of temporary seismic observations through a dense deployment of about 60 portable stations after outbreak of the intensive seismic swarm. We manually picked polarity of first motion of P-wave observed at each seismic station. Then, we have determined focal mechanism of earthquakes applying the method developed by Hardebeck and Shearer [2002] to the first motion data.

Most of the determined focal mechanisms at depths shallower than 10 km show normal faulting with a vertical P-axis. It is interesting that the orientation of T-axis shows spatial variation. The T-axis at the northern part of the Ibaraki is roughly oriented ENE-WSW. The T-axis at the southeast part of the Fukushima is roughly oriented NEN-SWS. In contrast, focal mechanisms at depths greater than 15 km are complex. They consist of normal-, reverse- and strike-slip faulting.

## 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う東北地方北部での応力場の時間変化 Temporal change in stress field in the northern part of Tohoku district associated with the 2011 Tohoku-oki Earthquake

小菅 正裕<sup>1\*</sup>

KOSUGA, Masahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 弘前大学理工学研究科

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

We have investigated the stress field in the northern part of Tohoku district for the both periods before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku (Tohoku-oki) Earthquake. We determined focal mechanisms using data of P-wave first motion, then estimated stress field by a stress tensor inversion method. After the Tohoku-oki earthquake, the seismicity is quite high in Akita prefecture, forming newly activated three major clusters and many minor ones. The location of major clusters is complementary for the periods before the Tohoku-oki earthquake. Seismicity in some clusters started almost immediately after the Tohoku-oki earthquake, however, beginning was delayed even for months in some clusters, and the duration of activity is highly variable among the clusters. Focal mechanisms of earthquakes in the new clusters show predominantly strike-slip or oblique-slip solutions with consistently NW-SE trending T-axis. The stress tensor inversion using focal mechanism data indicates clear temporal change in the stress field due to the Tohoku-oki earthquake, from reverse-faulting regime to strike-slip regime. Thus the new stress field brought the quiescence of seismicity in the former clusters with predominantly reverse faulting, which is consistent with the Coulomb stress calculation. This change is explained qualitatively by the static stress change due to the slip of megathrust of Tohoku-oki earthquake; compressional stress in WNW-ESE direction was reduced by the slip. However, the spatiotemporal variation in seismicity and focal mechanisms suggest the need of additional factors to bring temporal change. Possible factors are, for example, fluid migration in the crust following the static stress change, delayed response of crustal materials, and viscoelastic response in the lower crust and uppermost mantle.

### Acknowledgments

We used hypocentral parameters of the JMA catalog that was prepared by the JMA and the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in Japan. The hypocenters of the catalog were determined by the data of JMA, NIED, Hirosaki University, Tohoku University, Hokkaido University, University of Tokyo, and Aomori Prefecture. We thank these institutions for providing waveform data used for the determination of focal mechanisms.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 誘発地震, 震源メカニズム, 応力場, 時間変化

Keywords: Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, induced seismicity, focal mechanisms, stress field, temporal variation

## ユタ州中央部ワサッチ活断層系周辺のネオテクトニクス (紹介)

### Introduction of neotectonics and crustal extension in the Wasatch active fault zone, Utah: Review

小川 勇二郎<sup>1\*</sup>, ロン ハリス<sup>2</sup>

OGAWA, Yujiro<sup>1\*</sup>, Ron Harris<sup>2</sup>

<sup>1</sup>なし, <sup>2</sup>ブリガム・ヤング大学

<sup>1</sup>none, <sup>2</sup>Brigham Young University

合衆国ユタ州の中央部は、現在はベイスンアンドレインジ地域 (BRP) の東端に位置し、先カンブリア代から中生代までの地層や岩石、新生代の火成岩類 (第四紀の火山岩を含む) が分布し、新生代以降の東西の伸張テクトニクスが始まるまでは、中生代の浅海・陸生層の堆積からコロラド高原の現出、白亜紀を中心としたセビア褶曲スラスト帯の発達、白亜紀・古第三紀のララマイド変動などが重なっていた地域である。この地域のテクトニクスは、白亜紀中心の側方短縮テクトニクスと中新世から始まった側方伸張テクトニクスが見られ、日本のテクトニクスと奇しくも一致する。

ワサッチ活断層系はアイダホ州境界から南へ続き、ユタ州中央部でいったん途切れるが、セントジョージからラスベガス方面へのハリケーン断層系へと連続する全長 600 km におよぶ正断層活断層帯である。興味深いことに、この断層系の周辺では新生代中期から第四紀の玄武岩・流紋岩の火山活動が盛んで、多数の火山、ストック、岩脈が多くの個所で見られる。岩脈の入るユタ州中南部は、活断層の活動はむしろ低調であり、東西伸張歪が岩脈の貫入で解消されている可能性 (Ron Harris の発案) もある。ワサッチ活断層系は南北に少なくとも 10 のセグメント (各約 30-70 km 長さ) に分かれ、それぞれに地形地質調査、サイズミックプロファイル、トレンチ、GPS などにもとづく研究により、地震断層の履歴や活動史、セグメント間の連動の可能性などが詳しく明らかにされている (MacCalpin, 2009 2nd ed., Hintze & Cowallis, 2009 ほか)。我々は、Brigham Young 大学、Utah 大学のグループとともに、ユタ湖 (グレートソルト湖南方; ただし、淡水) のコアリングなどにもとづくパレオサイズモロジカルな研究であるが (別途報告)、今回はこの周辺のテクトニクスを中心に、従来の研究をレビューし今後の展望を述べたい。

GPS による変位は BRP 東部では平均して 2-3 mm/yr とされているが、ワサッチ活断層系を挟んで急変し、ここが歪集中帯であることが分かる。各セグメントで約 1200-1500 年の再来周期 (M7 以上; 深さ約 15 km) が知られている。また、約 300 年ごとにどれかのセグメントが動いていて、セグメント間での連動もあつたらしい。近過去での地震断層は 17 世紀に起きているので、近々 M7 が起きる確率は高く、合衆国ではサンアンドレアス断層系などについて危険な地域とされている。

ワサッチ活断層系は必然的にソルトレイクバリーとユタバリーの西縁をなす。約 2 万年前の LGM の終了間際に、最大の氾濫を起こしたボネビルレイクは、約 1.9 ? 1.5 万年前には最高位段丘 (ボネビル面) を作り、その後次第に退いた。段丘を形成していた時の湖水面は、アイダホ州最南東縁の Red Rock と呼ばれるダム状の自然地形でかるうじて維持されていたが (北方ヘスネークリバー水系へ流下していた) その後乾燥期に入るとその地形を越えることが出来ず、次第に湖面を下げついに塩湖となった。その途中でもう一度約 1.4 万年前に湖水位安定期があり、中位段丘 (プロボ面) を作った。それ以降継続的に水位は下がりつつある (ユタ湖は現在までも淡水である)。これらの段丘や湖底面は、どこでも大なり小なりワサッチ活断層系で変位している。段丘堆積物とその基盤の古生層を切る断層面のスリッケンラインのレイクはほとんど 90 度すなわちディップスリップのみであり、一度期の最長変位は 2 m に達する。変位史の研究にもとづくと、中新世の 1900 万年以降伸張テクトニクスは連綿として継続しており、BRP での累積の歪は、約 25% に達するという。ただし、地形からも分かるように、最近数万年の活動は、ネバダ州西部とユタ州北部など限られた地域であるようだ。これらは、活断層、マイクロサイズミシティー、GPS などからも判断される。BRP の伸張テクトニクスのメカニズムについては、以下の 4 つの説がある。1. ララマイド変動で出来たプラトーの重力的な崩壊、2. ファラロン・太平洋拡大軸の沈み込みに伴うロールバック、3. ホットスポットによる weakening と doming、4. サンアンドレアス断層に沿う太平洋側のプレートの NW への変位に伴うプレート境界の再配列。コロラド高原の特に周辺では、第四紀火山活動は想像以上に著しいが、この活動と活断層の活動度は相反的であり、伸張歪が断層活動の前に、マグマの貫入によって解消されているかもしれない。マグマティズムの成因に関しても、島弧活動に主眼を置く考え方と、ホットスポットないしプレートに主眼を置く考え方の間には大きな開きがあり、今後とも十分な検討が必要である。

キーワード: ワサッチ活断層系, ユタ州, 伸張テクトニクス, 歪集中帯, コアコンプレックス, マグマの貫入

Keywords: Wasatch active fault system, Utah, stretching tectonics, strain concentration, core complex, magma intrusion

## 新しい岩脈法

### Latest methods for inferring stress conditions from dikes and mineral veins

山路 敦<sup>1\*</sup>

YAMAJI, Atsushi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

岩脈群からその形成時における 3 軸の方向を推定する、いわゆる岩脈法が、1970 年代以降あちこちで使われている。1980 年代以降、岩脈たちの方向から 3 本の主応力軸の方向と応力比を推定する新しい岩脈法が開発されている。最近の手法では、平行岩脈群でなくとも、応力が推定できるようになった。すなわち、岩脈の極が等積投影図上で一点集中型のクラスターをなさず、ガードル状でも、また、一様分布に近い場合でも、応力状態を推定できる。今や、主応力軸と応力比を誤差付きで推定することができるのである。また、異なる応力状態でできた岩脈群が混在する場合でも、混在した岩脈たちの方向からそれらの応力状態を識別することができる。本公演では、その発展をレビューし、原理について説明する。最新の方法論は、本セッションで佐藤活志ほかで紹介する。また、天然のデータに適用した例を、山路・星がポスターで紹介する。

キーワード: テクトニック応力, マグマ圧, クラスタ解析

Keywords: tectonic stress, magma pressure, clustering