

Thin-skinned tectonics は東北地方背弧側で成り立っているか？ Thin-skinned tectonics holds in the back-arc region of Northeast Japan?

飯尾 能久^{1*}
IIO, Yoshihisa^{1*}

¹ 京都大学防災研究所
¹DPRI, Kyoto Univ.

東北日本背弧側では、新第三紀後期以降に堆積した地層が大きな短縮変形を受けている(例えば、佐藤, 1989)。最近、Okada and Ikeda (2011) は、この地域で得られた石油探査データ等を詳細に検討し、日本海拡大時の伸張変形およびその後現在に至る短縮変形のメカニズムを推定した。それによると、伸張時には、深さ5~10km程度に存在するほぼ水平な断層の上盤が東へ移動することにより深い堆積盆が形成される。短縮時にも同一の断層が再活動するが、そのずれのセンスは反転し、上盤が元へ戻ることにより、堆積盆にたまった地層が大きく変形する。このメカニズムは、水平な断層が比較的浅いことから、thin-skinned tectonics と呼ばれるが、このモデルには以下のような問題が存在する。

1) 1847年善光寺地震や1964年新潟地震など、西傾斜の震源断層の深部(10-15km)はほぼ水平な断層の下側となり、このモデルには含まれない。

2) 伸張時の深い堆積盆においては、アイソスタティックな隆起が見られるはずだが、推定されている地質構造にはそのような隆起は見られない。

3) 伸張時に形成された堆積盆内の孤立した基盤岩ブロックが、短縮変形時に堆積層を間に挟んでいるにも関わらず、横からの押しにより変形する。

4) 日本海拡大時の伸張量の見積もりが、場所によって大きく異なる。

これらのいくつかは、thin-skinnedではなく、堆積盆内の断層が直下の下部地殻へ伸びることで説明出来ると考えられる。

キーワード: 内陸地震, ひずみ集中帯, 断層, 下部地殻, 日本海拡大, 堆積盆

Keywords: thin-skinned, intraplate earthquake, detachment fault, tectonic inversion, lower crust, NKTZ

発震機構解から推定された2005年福岡県西方沖地震震源域での断層深部の滑りについて

Fault slip around the initiation point of the 2005 Fukuoka earthquake inferred from focal mechanism data

松本 聡^{1*}, 中尾 茂²

MATSUMOTO, Satoshi^{1*}, NAKAO, Shigeru²

¹九州大学 地震火山観測研究センター, ²鹿児島大学大学院理工学研究科

¹SEVO, Kyushu Univ., ²Dept. of Earth and Env. Sci., Kagoshima Univ.

2005年3月に発生した福岡県西方沖地震の震源域においては、地震発生後に稠密な地震観測網が展開された。これらのデータを用い、Matsumoto et al. (2012) は広域応力とモーメントテンソルを用いて応力場不均質の検出を行った。彼らの結果によると、断層深部破壊開始点付近に本震のモーメントの数割に相当する滑りが発生していることが明らかになった。余震を用いたこの推定は本震発生後の応力場を反映しているものであり、現在もなお、この滑りの影響が残っていることを示している。GPSを用いた本震や余効変動モデルによると、この滑りは本震時もしくは発生後のものではないことを示している。これは地震前に滑りを起こしたことを示唆しており、地震発生前の滑りが本震破壊開始点付近で発生し、本震の破壊を引き起こす要因の一つとなった可能性がある。GPSの連続記録には地震発生前に短期的な滑りは見いだせないものの、やや長周期の変動が発生しており、この地震前変動が寄与している可能性が考えられる。

キーワード: 内陸地震, 発震機構, 断層滑り, GPS, 福岡県西方沖地震, 応力場

Keywords: Inland earthquake, focal mechanism, fault slip, GPS, 2005 Fukuoka earthquake, stress field

2011年4月11日福島県浜通りの地震で井戸沢断層沿いで出現した地震断層で認められる条線と地殻応力場の関係 Relationship between crustal stress field and fault slickenlines due to the 2011 Iwaki earthquake

大坪 誠^{1*}, 重松 紀生², 高橋 美紀³, 吾妻 崇³, 今西 和俊³, 安藤 亮輔³

OTSUBO, Makoto^{1*}, SHIGEMATSU, Norio², TAKAHASHI, Miki³, AZUMA, Takashi³, IMANISHI, Kazutoshi³, ANDO, Ryosuke³

¹ 産業技術総合研究所 地質情報研究部門, ² 文部科学省, ³ 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター

¹Geological Survey of Japan/AIST, ²Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, ³Geological Survey of Japan/AIST

After the occurrence of the 2011 Mw 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (March 11, 2011), a Mw 6.8 (Mj 7.0) aftershock occurred on April 11, 2011 in Iwaki-city, Fukushima Prefecture, NE Honshu, Japan. The earthquake on April 11, 2011 (hereafter, 2011 Iwaki earthquake) occurred in temporal seismicity gaps and it was one of the major aftershocks after the 2011 Tohoku earthquake. To investigate the stress field before the 2011 Iwaki earthquake, we applied the multiple inverse method to the focal mechanisms during one month before the earthquake. Using 12 focal mechanisms during the one month, the multiple inverse method (Otsubo et al., 2008) revealed normal-faulting stress state with the NE-SW trending Sigma3-axis. The small angular misfits (7 degrees) between the slip direction predicted from the stress and that observed for fault plane of the 2011 Iwaki earthquake shows that the NW-SE trending extension is concordant with the slip motion of the 2011 Iwaki earthquake (Otsubo et al., 2011). We then succeeded measured co-seismic slip directions during the rupture of the 2011 Iwaki earthquake. Slickelines caused by the 2011 Iwaki earthquake are observed extensively over a wide range of the fault ruptures along the Itozawa Fault (Active Fault and Earthquake Research Center, 2011; Ishiyama et al., 2011; Otsubo et al., in press). Especially, the curved or cross-cutting fault slickenlines are observed at 8 localities along the Itozawa fault. The co-seismic slip have the curved slickenlines that the direction of fault motion during the rupture of the 2011 Iwaki earthquake shifted from a normal faulting with a left-lateral component to that with a right-lateral component. The angular misfits between the slip direction predicted from the NW-SE trending extensional stress and that predicted from the each component of the curved slickenlines on the fault scarps are ~33 to 65 degrees and ~2 to 17 degrees, respectively. Misfit changes show that the co-seismic slip direction shifted to normal faulting explained by the regional stress in the process of the faulting. These results suggest that co-seismic rupture processes near surface is a key to understand the gradual stress accumulations in the overlying plate associated with the huge trench type earthquake.

Acknowledgements:

Thanks are also due to the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) for making available the focal mechanism data in the study area.

Reference:

- Active Fault and Earthquake Research Center (2011) <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>
Ishiyama, T. et al. (2011) http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng/#hamadori
Otsubo, M. et al. (2008) Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, 457, 150-160.
Otsubo, M. et al. (2011) Striations formed on the surface rupture due to the earthquake in the Fukushima prefecture on 11th of April, 2011, Japan. Abstract of the 2011 Geological Society of America Annual Meeting, 98-1.
Otsubo, M. et al. (in press) Slickenlines on fault scarps caused by an earthquake in Iwaki-city (Fukushima Prefecture, Japan) on 11th of April, 2011. *Jour. Geol. Soc. Japan*.

キーワード: 応力, 地震断層, 断層擦痕, 2011年東北地方太平洋沖地震, 前弧, 東北日本

Keywords: Stress, Surface rupture, Fault striation, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Fore arc, NE Japan

2011年東北沖地震に伴う応力変化と東北日本内陸における誘発地震活動 2 Stress change due to the great 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) and induced earthquake activity in the inland areas of

吉田 圭佑^{1*}, 長谷川 昭¹, 岡田 知己¹, 中島 淳一¹, 伊藤 喜宏¹, 飯沼 卓史¹, 浅野 陽一²

YOSHIDA, Keisuke^{1*}, HASEGAWA, Akira¹, OKADA, Tomomi¹, NAKAJIMA, Junichi¹, ITO, Yoshihiro¹, IINUMA, Takeshi¹, ASANO, Youichi²

¹ 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, ² 独立行政法人防災科学技術研究所

¹Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate school of Science, To, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)は、東日本内陸部においても顕著な地震活動を誘発した(例えば, Hirose et al., 2011, EPS). 長谷川・他(2011, 地震学会), 吉田・他(2011, 地震学会)では, これらの誘発地震や余震の発震機構解を用いた起震応力場の推定を行い, 東北地方太平洋沖地震による擾乱が, 震源域から内陸部までの広域(震央距離約300km)において応力場の主軸を変化させた可能性を示した. このことは同時に, これまで未知の量であった地殻内の差応力の絶対値が非常に小さい可能性を示唆するものであり, 地震発生準備過程を考える上で重要な問題である. 現在我々は, 東北地方太平洋沖地震前後で, 応力場の主軸方向が静的応力変化と対応して変化した領域と, そうでない領域の境界付近をより詳細に調べることにより, 地殻内の一般的な差応力の絶対値を知ることを目的として解析を行っている. 本講演では, 吉田・他(2011)で起震応力場に変化が見られたいわき市付近からその沖合にかけて発生した地震についての結果を紹介し, 議論を行う.

2. データと方法

用いたデータは, (1) Asano et al. (2011)により防災科学技術研究所のF-netとHi-netの波形データを用いて決められたCMT解, (2) F-netにより波形データを用いて推定されたメカニズム解, (3) 気象庁により初動極性を用いて推定されたメカニズム解である. ただし, いわき~茨城県北部周辺では, 東北地方太平洋沖地震以前に浅い地震の発生が少ないので, (4) 2003-2011年に発生したMjma > 1.0の地震について, 波形記録からP波極性の読み取りを行い, メカニズム解を推定した. その後, 信頼性が高いと考えられる72個をデータセットに加えた. これらの地震を, Asano et al. (2011)による方法を参考に分類し, 上盤側で発生した地震を抽出して解析に用いた.

起震応力場の推定には, damped stress tensor inversion (Hardebeck and Michael, 2006)を用いた. 領域分割は, 深さ方向には内陸部と沖合で異なる方法で行った. 内陸部では, 余震分布の特徴に基づき, 深さ0kmから12.5kmまでと12.5kmから30kmまでの二つに分割し, 沖合では, プレート境界からの距離が25km以内の領域と25kmから50kmの領域との二つに分けた. 水平方向には内陸部・沖合共に, 0.25°ごとの領域に分割した.

3. 結果

内陸浅部では, 地震前後共に正断層型の起震応力場が得られた. 最大引張の方向は, 地震前では北北西-南南東, 地震後の同じ領域では東西方向と若干異なる. 信頼区間を見ると有意な変化と断じるのは困難であるが, 本震後の結果は, 地震時滑りモデルを用いて計算した応力変化の主軸方向(N86°E)とほぼ一致する. 内陸深部に関しては, 地震前後ともに起震応力場が推定可能であった領域において, 東西圧縮の逆断層型から東西引張の横ずれ断層型の応力場へと変化しているように見える. 地震後に得られた主軸の方向は地震前と比べ, 滑り分布から計算した応力変化量に近づく結果である.

一方, いわき市の沖合浅部では, 比較的沿岸に近いところにおいて地震前後双方で有意な解を得ることができたが, 東西圧縮の横ずれ型から東西引張の正断層型へと起震応力場は変化していた. いわき沖合の深部では広い範囲で地震前後それぞれの起震応力場を推定することができた. 概ね本震前の応力場は東西圧縮の逆断層型ないしは横ずれ断層型であるのに対して, 本震後では東西引張の正断層型の解が得られた. これら地震後の応力の主軸の方向は, 東北地方太平洋沖地震がそれぞれの領域に及ぼす静的応力変化の主軸の方向と概ね一致する. 一方, 地震前後で応力場の主軸方向に変化が見られる領域では, 静的応力変化の大きさが差応力で約1MPa以上となっており, 東北沖地震発生以前の差応力がただか1MPa程度にすぎなかったことを示している.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, メカニズム解, 応力テンソルインバージョン, 静的応力変化, 絶対応力

Keywords: 2011 Tohoku earthquake, focal mechanisms, stress tensor inversion, static stress change, stress magnitude

2011年東北地方太平洋沖地震による余震・誘発地震発生メカニズムの多様性 Diversity in Triggering Mechanism for Seismic Events Following the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

寺川 寿子^{1*}

TERAKAWA, Toshiko^{1*}

¹ 名古屋大学・大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Extensive aftershocks and triggered seismic events are ubiquitous following large earthquakes, but the controlling mechanisms are not yet understood. Focal mechanisms of these events can provide insight into physical triggering mechanisms because they reflect friction coefficient and pore fluid pressure on the fault as well as the tectonic stress pattern. In the present study we examined physical processes triggering seismic events following the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake ($M_w = 9.0$) by examining focal mechanisms through CMT data inversion and changes in the Coulomb failure function (DCFF). In the shallow part (< 20 km) of the source region the tectonic stress pattern drastically changed from reverse-type with east-west compression to normal-type with east-west tension, while it doesn't change in the remaining region. We evaluated DCFF in the direction of resolved shear traction on the maximum shear plane of the present tectonic stress field. The direct causes triggering aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake are increase of the magnitude of deviatoric stresses and decrease of the fault strength, which directly correspond to the two factors of the Coulomb failure function. The increase of seismicity rate in the region east to the Japan trench and central Honshu was mainly controlled by the former, which is caused by the static stress change due to the mainshock. The latter is more complicated, but one of the plausible physical processes is fluid diffusion excited by the mainshock. The temporal (apparent) stress rotation observed in the northernmost part of Nagano prefecture reflected temporal changes of statistical characteristics of focal mechanisms, caused by decrease of fault strength through increase of pore fluid pressures. The local excitation of seismicity rate in the northern Honshu also indicates that aftershocks in the region with negative DCFF may have been triggered by the same process.

キーワード: 余震・誘発地震, 応力, 間隙流体圧, クーロン破壊関数の変化

Keywords: Aftershock/triggered seismic events, Stress, Pore fluid pressure, Change in Coulomb failure function

東北地方太平洋沖地震による内陸誘発地震活動の減衰と継続性 Temporal decays of induced inland earthquakes associated with the 2011 M=9.0 Tohoku-oki, Japan, earthquake

遠田 晋次^{1*}
TODA, Shinji^{1*}

¹ 京都大学防災研究所

¹ Disaster Prevention Research Institute

大地震によるステップ状の応力増加を利用して、主要活断層や内陸地震発生域の応力蓄積状況などを推定できないだろうか。本発表では、東北地方太平洋沖地震による東日本内陸の地震活動変化の推移を調べ、構造特性・断層摩擦特性・応力蓄積速度の地域差を議論する。

東北地方太平洋沖地震後、広範囲（震源域から 400 km 以内）で地震活動が活発化した。これらの活発化域の大半は本震による静的クーロン応力（Coulomb failure stress change, CFF）の増加によって説明可能である（例えば、Hiratsuka & Sato, EPS, 2011; Ishibe et al., EPS, 2011; Toda et al., GRL, 2011）。ただし、秋田県南部、長野県北部、喜多方市周辺、茨城・福島県境付近など、東北地方内陸では逆断層への CFF が負となる地域でも地震活動が活発化した。これらの地域は火山・カルデラ地域などにあたり、地質構造や応力状態の不均質性が東北地方太平洋沖地震によって増幅され、本震後の東西伸張に呼応する中小の横ずれ断層、正断層が選択的に励起された結果と解釈される。コサイスマミックな応力変化によって、構造・応力不均質が強調されたことによる。

内陸誘発地震活動の時系列はどうであろうか。秋田県沖、佐渡西方沖、伊豆半島と伊豆諸島では例外的に数ヶ月以内に活動が終息しているが、大半の地域では、本震後 1 年経過した現在（2012 年 2 月）でも活動レベルが東北沖前に戻っていない。未だに顕著な地震活動を継続している地域は、秋田県北部、秋田県南部、山形県月山、仙台市北西部、福島県喜多方北方、長野県北部、飛騨山脈・松本市、茨城・福島県境、千葉県銚子付近、首都直下である。これらのうち、長野県北部などごく一部を除いて、活動の減衰が遅いのも特徴である。大半の地域では大森宇津公式を適用して減衰を表現することができ、 p 値が 0.8 以下となる。また、これらの地域の本震前の活動を常時地震活動と仮定すると、常時地震活動に戻るまで数 10 年かかる（例えば、秋田県北部・南部の活動は約 40 年）。これは、日本の内陸での余震継続時間が数 10 年~100 年程度とした先行研究例（例えば、Toda et al., 1998）と矛盾しない。Dieterich (1994, JGR) の速度および状態依存摩擦構成則（rate and state dependent friction law）に従うと、誘発地震継続時間はその地域の歪み速度に反比例する。応力変化量そのものは継続期間に影響しないので、誘発地震継続時間から地域間の歪み速度を比較できる。伊豆半島・諸島ではフィリピン海プレートが本州弧に衝突し、歪み速度が 1 桁以上速いために（例えば、Sagiya et al., 2000, PAGEOPH）、誘発地震活動が短期間で終了した可能性がある。秋田沖や佐渡西方なども変形速度が速い日本海東縁に位置している。一方で、常時地震活動が安定している首都直下（経度：139.2-140.35 °，緯度：35.4-36.5 °，深さ 100km 以浅）の解析では、誘発地震継続時間は約 4 年と求められた。上記の伊豆半島よりも長い、内陸の場合よりも顕著に短い。首都直下のプレート境界は、東北沖地震の大規模な余効変動域にある（Ozawa et al., 2011, Nature）。上記摩擦則では、応力速度の変化は地震発生率変化に比例することも指摘されている（Toda et al., 2003, Nature）。東北沖地震によって、関東地方のプレート境界沿いで歪み速度が増加したことは GPS によるポストサイスマミックな変動だけではなく、繰り返し地震などからも指摘されている（防災科学技術研究所, 2011, 地震予知連会報）。したがって、首都直下周辺での誘発地震活動は、プレート境界でありながら、余効すべりにより活動が促進され減衰が遅くなっているとも考えることもできる。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 誘発地震, クーロン応力変化, 余震

Keywords: Tohoku-oki earthquake, induced earthquake, Coulomb stress change, aftershocks