

## 2011年東北地方太平洋沖地震前後の海底地形調査から明らかになった地殻変動 Coseismic displacement of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected by repeated multi-narrow beam bathymetric surveys

富士原 敏也<sup>1\*</sup>, 小平 秀一<sup>1</sup>, 野 徹雄<sup>1</sup>, 海宝 由佳<sup>1</sup>, 藤江 剛<sup>1</sup>, 中村 恭之<sup>1</sup>, 高橋 努<sup>1</sup>, 山本 揚二郎<sup>1</sup>, 佐藤 壮<sup>1</sup>, 木戸 ゆかり<sup>1</sup>, 中村 武史<sup>1</sup>, 高橋 成実<sup>1</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>

FUJIWARA, Toshiya<sup>1\*</sup>, KODAIRA, Shuichi<sup>1</sup>, NO, Tetsuo<sup>1</sup>, KAIHO, Yuka<sup>1</sup>, FUJIE, Gou<sup>1</sup>, NAKAMURA, Yasuyuki<sup>1</sup>, TAKAHASHI, Tsutomu<sup>1</sup>, YAMAMOTO, Yojiro<sup>1</sup>, SATO, Takeshi<sup>1</sup>, KIDO, Yukari<sup>1</sup>, NAKAMURA, Takeshi<sup>1</sup>, TAKAHASHI, Narumi<sup>1</sup>, KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の緊急調査として地震直後より、震源・津波波源域で、調査船「かいいい」による日本海溝横断のマルチチャンネル反射法地震探査、マルチナロービーム音響測深海底地形調査が実施された。数調査測線は既存構造調査と同一測線をとって、地震前後の海底地形を比較して海底変動を調べた。結果には鉛直方向に数m、水平方向には20m程度の不確定さがあると思われるものの、桁違いに大きい2011年東北沖地震の地殻変動は海底地形調査で検知された。

宮城沖では、過去1999年と2004年の2度「かいいい」調査が行われている [e.g. Tsuru et al., 2002 JGR; Ito et al., 2005 GRL; Miura et al., 2005 Tectonophys.]. 解析では測深精度のよい観測船直下付近 (スワス角45°以内、幅3~6km) のビームが重なる部分のデータを用いた。用いた海中音速の違いに起因するバイアス的な測深差、測位等による位置オフセットは、地震による変動が小さいと思われる海溝海側斜面において推定し調整した。北緯38°の測線の海底地形データを比較した結果、海溝軸(144°00'E付近、水深約7600m)に至るまで、2011年の陸側斜面地形が上昇していることがわかった。これはプレート境界に沿った断層破壊が海溝軸まで達し、海底を隆起させたことを示している。海溝軸から陸側へ西約40kmにある斜面の傾斜変換地点(水深約3700m)までの範囲の陸側斜面最外側部では特に上昇しており、2011年と1999年、2011年と2004年、それぞれ比較すると、海側斜面に対して平均11~16m高くなっている。また、海溝軸の海底に東西長約1500m、高さ約±50mの局所的な地形変化が見られた。これは海底に達したプレート境界断層運動による地形変化と考えられる。地震前の2004年と1999年調査の比較には、高低差に有意な差が出ないことがわかった。

2011年陸側斜面データの測定点位置を水平、西北西方向にずらすと、両調査間の地形がよく相関し、高低差値の分散が小さくなる。水平方向の地形分解能、地形変化が小さい南北方向の拘束がよくないためなど水平移動量・方向には不確定性はあるが、2011年と1999年、2011年と2004年調査の比較とも、50m程度ずらすと両調査間の海底地形の相関が最大となり、海底地形の水平ずれが最小になったと判断できる。このときの高低差は、移動前より小さくなるものの平均7~10m高い。これらの結果は、2011年の陸側斜面最外側部が海側斜面に対して東南東方向に約50m移動し、平均7~10m上方に地震時変動したことを示している。

北緯38.5°の測線上で、2011年と1999年の海底地形データを比較した結果もまた、海溝軸(144°05'E付近)を境にして違いがあり、2011年の陸側斜面地形が浅くなっている。しかしながら、変動量は北緯38°測線に比べて小さい。

本研究と宮城沖に展開されていた海上保安庁海洋情報部、東北大学の海底地殻変動観測の結果 [Ito et al., GRL 2011; Kido et al., 2011 GRL; Sato et al., 2011 Science] を合わせると、水平変動量、隆起量は海溝軸に向かうにつれて大きくなり、海溝軸近傍の陸側斜面が最も大きく変動していることがわかった。陸側斜面最外側部は傾斜角平均約5°の比較的急斜面である。斜面では水平変動が正味の隆起量に加えての海底隆起効果をもたらす [e.g. Tanioka and Seno, 2001 GRL]. 観測された海底上昇量11~16mと推定した地震時隆起量7~10mの差4~6mが斜面の効果であると考えられる。海溝近傍、海溝軸沿いに続く急斜面域が大きな水平変動をしたことが、正味の隆起量に追加した海底上昇効果を引き起こした、これが海底津波計やGPS津波計で観測された短波長で大振幅の津波 [e.g. Maeda et al., 2011 EPS] の原因になった可能性がある。

本調査は、海洋研究開発機構の地震対応緊急調査、および文部科学省の科学研究費補助金(特別研究促進費)による「2011年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査」の一環として行われた。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, マルチナロービーム海底地形, 海底地殻変動, 津波, 海底地すべり

Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, multi-narrow beam bathymetry, coseismic displacement, tsunami, sub-marine landslide

## 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う海底地殻変動 Seafloor movements associated with the 2011 Tohoku Earthquake detected by GPS/acoustic geodetic observation

石川 直史<sup>1\*</sup>, 佐藤 まりこ<sup>1</sup>, 氏原 直人<sup>1</sup>, 渡邊 俊一<sup>1</sup>, 吉田 茂<sup>1</sup>, 望月 将志<sup>2</sup>, 浅田 昭<sup>2</sup>

ISHIKAWA, Tadashi<sup>1\*</sup>, SATO, Mariko<sup>1</sup>, UJIHARA, Naoto<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Shigeru Yoshida<sup>1</sup>, MOCHIZUKI, Masashi<sup>2</sup>, Akira Asada<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海上保安庁海洋情報部, <sup>2</sup> 東京大学生産技術研究所

<sup>1</sup>Hydrogr. and Oceanogr. Dept. of Japan, <sup>2</sup>IIS, Univ. of Tokyo

海上保安庁では、GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測の技術開発及び海底基準点の展開を行っている。

地震後の3月末から4月にかけて、日本海溝沿いに設置してある海底基準点において海底局の動作確認と臨時観測を実施し、地震前後の観測値の比較から地震時の海底の地殻変動を求めた。

その結果、東北沖の全ての海底基準点において東南東方向の動きが検出された。特に、震央近傍にある「宮城沖1」海底基準点が東南東方向に24m移動し、約3m隆起したことがわかった。さらに、震源の北東約70kmに位置する海底基準点でも23mの移動が検出されており、広範囲にわたって20m以上の地殻変動が発生したことが示唆される。また、「宮城沖1」よりも約40km陸側にある「宮城沖2」では、約0.8mの沈降が検出され、海溝側から陸に向かって隆起から沈降への推移を捉えることができた。

臨時観測では観測時間が十分にとれなかったこともあり、観測誤差は通常より大きく数10cm程度であると推定されるが、1~2kmの範囲に設置している複数のトランスポンダーが全て同様の動きをしていることから、観測結果の信頼性は高いと考えられる。また、結果には、地震後2~3週間の余効変動や余震による影響が含まれているが、移動量の大部分は本震によるものと考えられる。

3月末から4月にかけての臨時観測の後も、余効変動の把握のため、定期的に観測を実施している。その結果、銚子沖、福島沖の海底基準点については、余効変動とみられる東南東向きの変動が捉えられている。一方、宮城沖、釜石沖の海底基準点については、有意な余効変動は捉えられていない。本発表では、最新の観測成果を含めて報告する予定である。

キーワード: 海底地殻変動観測, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: Seafloor geodetic observation, the 2011 Tohoku earthquake

## 現場海底圧力観測から見る 2011 年東北地方太平洋沖地震に関する海底上下変位 Seafloor vertical displacements related to the 2011 Tohoku-Oki earthquake observed by ocean bottom pressure gauges

稲津 大祐<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 木戸 元之<sup>1</sup>, 長田 幸仁<sup>1</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 飯沼 卓史<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>, 佐藤 利典<sup>2</sup>, 荒木 英一郎<sup>3</sup>, 杉岡 裕子<sup>4</sup>, 伊藤 亜妃<sup>4</sup>

INAZU, Daisuke<sup>1\*</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>1</sup>, KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>, OSADA, Yukihiro<sup>1</sup>, SUZUKI, Syuichi<sup>1</sup>, IINUMA, Takeshi<sup>1</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>, SATO, Toshinori<sup>2</sup>, ARAKI, Eiichiro<sup>3</sup>, SUGIOKA, Hiroko<sup>4</sup>, ITO, Aki<sup>4</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>2</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構 地震津波防災研究プロジェクト, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

<sup>1</sup>Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Tohoku University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>3</sup>Earthquake and Tsunami research project for Disaster Prevention, JAMSTEC, <sup>4</sup>Institute for Research on Earth Evolution, JAMSTEC

我々は自己浮上式海底圧力計を用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域とその周辺における海底上下変動観測を行っている。本震震源の周囲約 100km 以内において、地震前数か月前から地震後数か月間にわたる連続データを 8 観測点で取得した他、地震発生後には宮城県沖から青森県沖に至る日本海溝陸側斜面に 5 点の観測点を追加して、2011 年 11 月まで計測を行った。本震発生以前から観測を続けている観測点においては、本震 (Mj9.0, 14:46 JST, 11 March)、最大前震 (Mj7.3, 11:45 JST, 9 March)、2 番目に大きい前震 (Mj6.8, 6:24 JST, 10 March) の地震時上下変位と、それらに関する余効変動を含むゆっくりとした上下変位が見られた。本発表ではこれらの観測点で得られた海底圧力時系列について報告する。本震に伴う地震時海底上下変位の大きさは m のオーダーであった。一方、最大前震による海底上下変位は数十 cm のオーダーであった。2 番目に大きい前震についても地震時変位が cm オーダーで計測された。余効変動のようなゆっくりとした地殻変動は、その時間スケールが海洋変動と重複するため、その正確な検出には、潮汐はもちろん、海洋変動のできるだけ正確な補正が肝要となる。著者らが開発してきた数値シミュレーションに基づく海洋モデルを用いて、海底圧力データにこの補正を施した。結果、最大前震から本震にかけて数 cm 以上のゆっくりとした上下変動が抽出された。地震前から設置されていたほとんどの観測点で、本震後の余効変動による沈降が観測されている。変動量は陸側の観測点ほど大きくなる傾向にあり、地震後の数ヶ月間で数十 cm に及んでいた。地震後に設置した観測点のデータについては、センサーのドリフト成分と余効変動成分の分離などの検討を進めている。

キーワード: 海底圧力, 海底上下変位, 地震時すべり, ゆっくりすべり, 余効変動

Keywords: ocean bottom pressure, seafloor vertical displacement, coseismic slip, slow slip, postseismic slip



## 海陸地殻変動データに基づく2011年東北地方太平洋沖地震に伴う余効すべりの時空間発展

### Evolution of the postseismic slip associated with the 2011 Tohoku Earthquake based on land and seafloor geodetic data

飯沼 卓史<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 木戸 元之<sup>1</sup>, 稲津 大祐<sup>1</sup>, 長田 幸仁<sup>1</sup>, 佐藤 まりこ<sup>2</sup>, 石川 直史<sup>2</sup>, 太田 雄策<sup>1</sup>, 伊藤 喜宏<sup>1</sup>, 鈴木 秀市<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>

IINUMA, Takeshi<sup>1\*</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, KIDO, Motoyuki<sup>1</sup>, INAZU, Daisuke<sup>1</sup>, OSADA, Yukihiro<sup>1</sup>, SATO, Mariko<sup>2</sup>, ISHIKAWA, Tadashi<sup>2</sup>, OHTA, Yusaku<sup>1</sup>, ITO, Yoshihiro<sup>1</sup>, SUZUKI, Syuichi<sup>1</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 海上保安庁海洋情報部

<sup>1</sup> AOB-RCPEVE, Tohoku University, <sup>2</sup> Japan Coast Guard

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、沈み込む太平洋プレートと陸側のプレートとの境界で発生した、いわゆるプレート境界型の地震であった。過去に発生した東北日本沈み込み帯におけるプレート境界型地震と同様に、大きな余効すべりが発生していることが、陸上GPS観測により求められた変位時系列などから推定されている。1993年の三陸はるか沖地震および2005年の宮城県沖の地震に際しては、余効すべりによって解放されたひずみエネルギーが、本震とほぼ同程度かそれを上回る規模に達したことが報告されている(例えば、Heki et al., 1997; Miura et al., 2006など)。一方、国土地理院によって運営されているGPS連続観測網“GEONET”で得られたGPSデータから、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う余効すべり分布がOzawa et al. (2011)によって推定されており、最近のデータまでを含めた解析結果(国土地理院, 2012, <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110314-index.html>)も得られているが、解放されたモーメントはMw 8.6相当未満であり、本震時に解放された地震モーメントに比して依然として有意に小さい。以上を踏まえると、2011年の地震の余効すべりは、本震と同規模程度のモーメント解放量に達するまで、今後も続くことを十分期待できる。

しかしながら、陸上観測点で得られたデータのみを用いた解析では、地震時すべりが海溝沿いの浅い領域に集中していたことを明らかにすることができなかったのと同じように、余効すべりについても、プレート境界最浅部を含めたどこで発生しているのかを明らかにするためには空間的な解像度が不十分であるといえる。そこで、海底での測地学的観測データをも用いた解析を行うことが不可欠であると考えられる。本研究では、GPS・音響結合方式の海底地殻変動観測データ、及び自己浮上式の海底圧力計で記録された水圧データから推定される海底上下変位データを用いることで、海底下のプレート境界における余効すべりを高空間解像度で推定することを試みた。

解析期間中に発生した地震に伴う変位については、気象庁のCMTカタログを用いて期待される変位量を計算し、測地学的観測から求められた変位時系列データからこれを差し引くことで補正を行った。得られた時系列データを、Yagi and Kikuchi (2003)に基づく時間依存逆解析手法を用いて解析し、余効すべりの時空間発展を推定した。

結果からは、予察的なものではあるが、1) 茨城・福島両県沖並びに岩手県沖のプレート境界のごく浅部(20 km以浅)、すなわち地震時には50 mを超えるような大きなすべりが生じなかった領域において大きな余効すべりが生じていること、2) プレート境界型の地震が普段発生しない宮城県下のプレート境界深部(50 km以深)において、有意に大きな余効すべりが発生していること、また、3) 1978年宮城県沖地震のアスペリティ群(2005年の宮城県沖の地震及び2011年東北地方太平洋沖地震本震によって破壊されたと考えられる)の付近ではほとんどすべっていないことなどが見て取れる。

当日の講演においては、最新のデータまでを含めた解析結果を紹介する予定である。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 地殻変動, 海底圧力計, 海底GPS/音響測距, GPS, 余効すべり

Keywords: 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Crustal Deformation, Ocean Bottom Pressure, GPS/Acoustic ranging, GPS, Postseismic Slip

## 2011年東北地方太平洋沖地震の余効すべりの時間発展 Temporal evolution of afterslip following the 2011 Tohoku-oki earthquake

福田 淳一<sup>1\*</sup>, 青木 陽介<sup>1</sup>, 加藤 照之<sup>1</sup>, Kaj M. Johnson<sup>2</sup>

FUKUDA, Jun'ichi<sup>1\*</sup>, AOKI, Yosuke<sup>1</sup>, KATO, Teruyuki<sup>1</sup>, Kaj M. Johnson<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup>Indiana University

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

We use GPS data recorded by the continuous GPS network, GEONET, to investigate afterslip following the March 11, 2011, Tohoku-oki earthquake (Mw 9.0). We analyzed GPS data after March 11 with the GIPSY-OASIS II software to estimate daily station coordinates. The daily GPS time series show large-scale postseismic deformation. The observed postseismic deformation is assumed to result from aseismic afterslip on the subducting Pacific plate interface and temporal evolution of afterslip distribution is estimated using a time-dependent inversion method. In the inversion, the curved plate interface is approximated with collection of many triangular dislocation elements. The Network Inversion Filter [Segall and Matthews, 1997] is applied to the GPS time series from March 11 to October 17, 2011, to estimate temporal variation of afterslip distribution. Our inversion analysis shows that afterslip is concentrated downdip of the coseismic rupture off Sanriku, off Miyagi, and off Fukushima. We find another afterslip patch that is adjacent to the rupture area of the largest aftershock off Choshi. Our analysis does not show significant temporal variation of spatial pattern of afterslip, indicating that afterslip propagated within a few days after the mainshock. As of October 17, 2011, the maximum cumulative afterslip is 2.79 m and the moment magnitude from the estimated afterslip distribution is Mw=8.52. Residuals between the observed and predicted displacements show a systematic pattern that is consistent with postseismic viscous relaxation.

## GPS キネマティック時系列のEOF解析により明らかになった、2011年東北地方太平洋沖地震に関連する一連の地震に伴うすべり分布 Co- and post-seismic slips of the 2011 Tohoku-oki Earthquake sequence from EOF analysis of GPS kinematic time series

宗包 浩志<sup>1\*</sup>  
MUNEKANE, Hiroshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 国土地理院

<sup>1</sup> GSI of Japan

2011年東北地方太平洋沖地震に関連する一連の地震の滑り分布をGPSキネマティック時系列により明らかにした。GPSキネマティック時系列に経験的直交関数法に基づくフィルターを適用することで、S/Nを向上することができ、より信頼できる滑り分布を求めることができた。主な結果は次の通りである(1)3/9の前震については、地震時すべりおよび余効変動がほぼ同じ場所でおきており、また、本震直前のすべりの加速は見られない、(2)地震時のすべり領域および余震、初期の余効変動のすべり領域はお互いに住み分けている(3)EOFの第2、第3モードには、ピラーの熱変形の影響が見られる。

キーワード: キネマティック GPS, 経験的直交関数法, 地震時すべり, 余効変動

Keywords: Kinematic GPS, Empirical Orthogonal Function, Coseismic slip, Afterslip

## 2011年東北沖巨大地震の発生：基盤アスペリティに累積したすべり遅れの完全回復 The 2011 Tohoku-oki Earthquake: Total Recovery of the Slip Deficit Accumulated in a Basement Asperity

橋本 千尋<sup>1\*</sup>, 野田 朱美<sup>2</sup>, 松浦 充宏<sup>3</sup>

HASHIMOTO, Chihiro<sup>1\*</sup>, NODA, Akemi<sup>2</sup>, MATSU'URA, Mitsuhiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 株式会社構造計画研究所, <sup>3</sup> 統計数理研究所

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Kozo Keikaku Engineering Inc., <sup>3</sup>Institute of Statistical Mathematics

The Mw9.0 off northeast Japan (Tohoku-oki) earthquake occurred on March 11th of 2011 at the interface between the North American (NA) and Pacific (PA) plates. The occurrence of interplate earthquakes can be regarded as the sudden release of tectonic stress accumulated by the interseismic gradual increase of slip deficit in source regions. To obtain precise slip-deficit rate distribution on the NA-PA plate interface, Hashimoto et al. (2009) have analyzed GPS velocity data for the interseismic calm period of 1996-2000 with a unified inversion formula for Bayesian models with direct and indirect prior information (Matsu'ura et al. 2007). In this analysis, however, the updip limit of the model region is set to 4 km on the basis of geohydro-chemical studies for the strength of subduction zone plate boundaries, and so the inversion result might be biased especially in the shallow part of the plate interface. In the present study, to obtain unbiased slip-deficit rate distribution, we reanalyzed the same interseismic GPS velocity data with the same inversion procedure but without setting any updip limit of the model region. The result of the inversion analysis clearly shows the existence of five remarkable slip-deficit zones distributed on the NA-PA plate interface along the southern Kuril-Japan trench. We also analyzed coseismic GPS displacement data for the Tohoku-oki earthquake with the same inversion method, and obtained the bimodal distribution of coseismic slip spreading over the southern two, Miyagi-oki and Fukushima-oki, interseismic slip-deficit zones. The maximum slip is 32 m for the Miyagi-oki slip-deficit zone but only 7 m for the Fukushima-oki slip-deficit zone. The extraordinarily large coseismic slip in the Miyagi-oki slip-deficit zone, where ordinarily large earthquakes with about 3 m coseismic slips have repeated every 40 years in the past two centuries, suggests the total rupture of a 300-km-long basement asperity underlying much smaller-scale local asperities.

Keywords: the 2011 Tohoku-oki earthquake, GPS data inversion, interseismic slip deficit, coseismic slip, basement asperity

## 太平洋プレート沈み込みの急加速 Accelerated subduction of the Pacific Plate

日置 幸介<sup>1\*</sup>, 三井 雄太<sup>1</sup>  
HEKI, Kosuke<sup>1\*</sup>, MITSUI, Yuta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北大院理

<sup>1</sup>Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ.

プレート収束境界の島弧側ではすべり欠損による陸向きの速度がみられ、固着が強いほど速い(地震間地殻変動)。そこでプレート境界地震が発生すると反対向き(海溝向き)の動きが生じ、余効すべり(アフタースリップ)が終わるまで継続する。これらが東日本の連続GPS観測点の基本的な運動のパターンであり、1990年代から2000年代初頭にかけて比較的一様な地震間変動が継続していた。プレート境界を北から、(1)十勝沖、(2)青森県東方沖と陸中沖、(3)宮城沖福島沖の三セグメントに便宜的に分けると、(1)では2003年9月の十勝沖地震(Mw8.0)に伴って弱くなった固着が現在回復途上である。また(3)では、2003年10月以降発生したいくつかのM7級地震とそれらの分不相応なアフタースリップによって、固着が弱い状況が2011年東北沖地震(Mw9.0)まで継続した。一方この間に(2)では大きめのプレート間地震は発生していない。本研究では90年代から現在に至るこれらのセグメントにおけるプレート間固着の推移を大局的な視点から考察する。

GPS連続観測網GEONETのF3解に基づく、北海道大樹町、岩手県久慈市、福島県相馬市のGPS点の海溝向き(N110E)の動きを添付の図に示す。2003年以降の変化を見やすくするため、2003.0以前の時系列から推定された直線成分を除去した。また大樹町での2003年十勝沖地震に伴う地震時変動と、久慈と相馬における2011年東北沖地震に伴う地震時変動は除去してある。北海道大樹町では地震直後のアフタースリップが顕著だが、八年後の2011年でも地震以前に対して有意な右上がりを示し、(1)では本来の固着が回復していないことを示す。

(3)でもほぼ同じ期間、固着が失われた状態が続いている。福島県相馬では2003年十勝沖地震によるステップは見られないが、それ以降段階的に固着を失う(右上がり)が顕著になってゆく過程が見られる。これを微視的にみると、2003年10月の宮城沖(M6.8)に始まり、2005年宮城沖(M7.2)、2008年茨城沖(M7.0)および福島沖(M6.9)、2010年福島沖(M6.7, M6.2)、2011年宮城沖(M7.3)と続いた一連の地震に伴う地震時変動とアフタースリップとして解釈できる。一方巨視的にみると、それらは2003年に始まった巨大スロー地震(東北沖地震のプレスリップ)の一部として発生した小規模アスペリティの破壊にも見える。

これらに挟まれた(2)のセグメントでこの期間に大きなプレート間地震は発生していない。岩手県北部久慈GPS点では、逆に2003年9月の地震に伴って傾きが右下がりになっている。これは(2)での固着が2003年地震後に強まった(およそ倍程度)ことを意味する。地震に伴って断面の摩擦が減ることはあっても、固着が突然増えることは考え難い。本研究では、摩擦特性の変化ではなく、太平洋プレートの「沈み込みが加速した」ために見かけ上固着が強まったという仮説を提唱する。

プレート境界で比較的大きな地震が発生し、その後数年にわたって固着が弱まると、そのセグメントで一時的に沈み込みが加速する。ただし、これだけでは隣接した固着セグメントのすべり欠損は増えない(例えば久慈が陸向きに加速することはない)。しかし(1),(2),(3)のスラブ全体がある程度剛体的に振る舞うと考えると、(1)と(3)の固着の喪失によって(2)でスラブが加速されることが理解できる。海溝付近のスラブには、下方から沈み込む向きにスラブプル、反対向きにプレート境界での固着に伴う摩擦力(これがGPSですべり欠損として観測される)が働き、それらが釣り合って一定速度の沈み込みを実現している。一部のセグメントで固着が一時的に減れば、スラブプルが沈み込みを加速して固着部分の摩擦力を増加させることによって、新たな釣り合いを達成するのだろう。久慈の時系列をみる限りこの調整作用は極めて短時間(数日以内)に行われるようだが、このような時間スケールでプレート(この場合は太平洋プレートのスラブ)がその存在を主張できることは地球物理学的に興味深い。

図の説明:1996年以降の大樹(北海道)、久慈(岩手)、相馬(福島)GPS局の、海溝向きの動き。2003年以前のデータから求めた直線成分を差し引いてある。また大樹の2003年十勝沖地震に伴う変動と久慈と相馬の2011年東北沖地震に伴う変動は取り除いた。大樹と相馬での固着弱化(右上がり)と呼応して久慈では固着強化(右下がり)が見られる。

キーワード:東北日本, GPS, 地震間地殻変動, 太平洋プレート, 加速, 2003年十勝沖地震

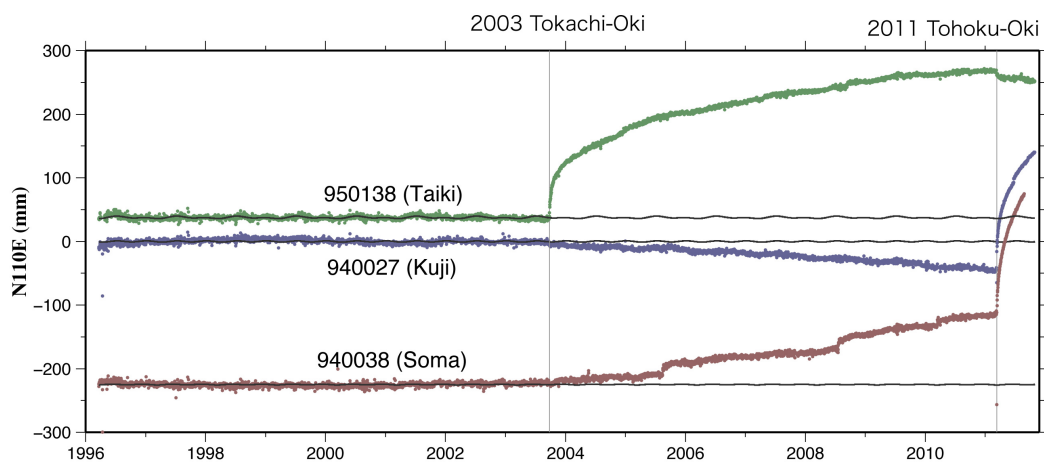
Keywords: Northeast Japan, GPS, Interseismic crustal deformation, Pacific plate, acceleration, 2003 Tokachi-Oki earthquake



SCG74-08

会場:国際会議室

時間:5月24日 15:45-16:00



## 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴う余効的地殻上下変動 Post-seismic vertical crustal movements due to the Tohoku-Oki earthquake of 11 March 2011

加藤 照之<sup>1\*</sup>, 福田 淳一<sup>1</sup>, 田中 愛幸<sup>1</sup>, 青木 陽介<sup>1</sup>

KATO, Teruyuki<sup>1\*</sup>, FUKUDA, Jun'ichi<sup>1</sup>, TANAKA, Yoshiyuki<sup>1</sup>, AOKI, Yosuke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に伴う余効変動についてその後の経過について報告する。本震発生時に東北地方太平洋沿岸は1m以上の大きな沈降を示した。地震前から観測されていた沈降を含め、このような沈降は第四紀の後半10万年程度の時間スケールで見るといずれは回復すべきものと考えられてきた。1946年南海地震後に発生した同様の沈降は地震後2~3年で急速に回復し、その後緩やかに回復していくという経過をたどっており、その原因については本震断層の下部延長におけるすべりと引き続き粘弾性緩和過程で説明されたことから、同様の過程が今回にも期待される。

しかしながら、GEONETデータの解析結果では三陸沿岸の上下変動成分は必ずしも大きな隆起は示しておらず、同データを用いた時間依存インバージョン解析によると、10月頃までに、三陸沖の断層下部延長で最大2.5m程度の余効すべりが発生しているものの、東北地方直下に至る地域での大きな余効すべりを示しているとは言い難い。これを単純に対数関数近似で延長しても、地震後数十年で沿岸を十分隆起させるほどの余効すべりは発生しない可能性が示唆される。一方、粘弾性的緩和過程は今後顕著になってくると考えられるが、現在までのところ、粘弾性緩和過程による上下変動では、沿岸の隆起は限定的であり、数百年~数千年程度の時間スケールではむしろ沈降になる可能性が高い。また、このような長い時間スケールのうちには次の地震が再来すると考えられるので、積分効果を考えると沿岸の沈降が元に戻ることは考えにくい。

粘弾性緩和過程については地殻上部の弾性層の厚さや粘弾性パラメータの仮定あるいは断層の幾何学的形状などによって変わってくるので、さらに検討が必要である。一方、これまで弾性的過程で考えられてきた地震前の北海道~三陸沿岸に見られた顕著な沈降過程が弾性的プロセスであるかどうかとも再考する余地がある。このような沈降が数100年前に発生した超巨大地震の粘弾性緩和過程を見ているものと考えすることはできないであろうか。もしこう考えると、地震前の測地的データに現れている沈降がプレート固着のみによるものと考えてきたインバージョン解析なども再考されなくてはならない。プレート沈み込み過程の考え方全体を見直していくことがこの課題の解明に必要なではないかと考えられる。

キーワード: GPS, 東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 地殻変動, 粘弾性緩和

Keywords: GPS, Tohoku-oki earthquake, post-seismic crustal movement, crustal movement, visco-elastic adjustment

## 運動学的地震サイクルモデルによる東北地方の地震間、地震時、地震後の地殻変動 The inter-, co- and post-seismic crustal deformation in the Tohoku region by the kinematic earthquake cycle model

橋間 昭徳<sup>1\*</sup>, 佐藤 利典<sup>1</sup>

HASHIMA, Akinori<sup>1\*</sup>, SATO, Toshinori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学理学研究科地球生命圏科学専攻

<sup>1</sup>Dept. Earth Sciences, Chiba University

東北日本弧は北アメリカプレートに太平洋プレートが沈みこむことによって形成された典型的な島弧である。この沈み込み帯におけるプレート境界型地震はこれまで最大 M7 ほどと見られていたが、Mw9.0 の 2011 年東北太平洋沖地震が発生したことにより、東北地方のテクトニクスに関して巨大地震サイクルのもとでの変動を再検討する必要がある。

東北日本弧は地質学的には東西圧縮帯にあるとされ、河成・海成段丘分布からは第四紀後期において東北地方は全体的に隆起していることがわかっている。一方過去 100 年あまりの測地測量においては、長期変動とは逆に、特に太平洋岸において一貫して 5~10mm/yr もの沈降速度が観測されてきた。長期的な収支の観点から、2011 年東北太平洋沖地震のような巨大地震に際しては大きな隆起が見込まれていたのだが、実際の GPS 測量においてはさらなる沈降が観測された。したがって、地震サイクルのどの段階で隆起に転じるのか、そしてそのメカニズムについての解明が求められている。一方、東北地方の内陸域の地震活動は 2011 年東北太平洋沖地震以前には東西圧縮の逆断層型が主だったが、地震後はこのタイプの地震が顕著に減少している。

このように、地震サイクルの各段階で、地殻変動と、内部応力場を反映する地震活動パターンが異なっているが、いずれもプレート沈み込み運動とそれともなう地震サイクルという共通の要因によって引き起こされている以上、これらを大局的に説明するモデルを構築することが求められる。そのようなモデルの一つとしては、変位の食い違い運動によるプレート沈みこみモデルが挙げられる。本研究では、まずは地殻の上下変動に焦点をあて、変位の食い違い運動によるプレート沈みこみモデルによって、地震サイクル後期における沈降、地震時の沈降、長期的な隆起という上下変動の時間変化が解明できるかを調べる。

変位の食い違い運動によるプレート沈みこみモデルは、プレート間の力学的相互作用はプレート境界における変位の食い違い（断層すべり）の増加によって表現できるという考えにもとづいている。本研究ではプレート境界面形状として、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源付近のプレート境界面の垂直断面を CAMP モデルからとり、これを 2 次元化したものを用いた。プレート境界面におけるすべり運動は、プレート境界面全体における定常的なすべり運動（定常プレート沈みこみ）地震固着域におけるすべり欠損の増加（地震間の固着）、繰り返し地震時すべりの 3 成分に分解できる。定常すべりとしてプレート相対速度（10 mm/yr）を与え、水平方向に 500 km、深さ 40 km におよぶ地震固着域が 1000 年に一度破壊される（地震すべり）と仮定する。簡単のため固着域における地震時のすべり分布は一様とした。また、このような長期間変動を扱う際には、アセノスフェアの粘弾性的性質を考慮することが必要である。ここではリソスフェア？アセノスフェア構造を、弾性的表層と粘弾性的半無限空間からなる二層構造媒質を仮定し、弾性的リソスフェアの厚さの変えた場合について計算を行なった。

まず、長期的変動については、地震すべりにかかわらず、最終的には定常沈みこみの効果のみが効いてくる。この変動は海溝における沈降、島弧域における隆起を示し、東北地方における長期的な隆起とも一致する。また、地震時の変動については、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にも観測されているように、すべり領域の上端が隆起し、下端から内陸域にかけて沈降する。

一方、地震サイクル間の変動は、地震すべりによって弾性的リソスフェアがどこまで破壊されたかによって大きく異なる。計算によると、地震によって弾性的リソスフェアを下まで断ち切った場合（リソスフェアの厚さ  $H=40$  km）、地震間の固着の効果によって島弧域は隆起してしまう。一方、弾性的リソスフェア内でも地震すべり領域の下部は破壊を起こさずに安定的にすべりとした場合（ $H=50$  km）、地震後 200 年ほどは内陸側では隆起が起きる。一方、地震前の 400 年では内陸域は広く沈降となる。このことは東北地方における地震サイクル後期の沈降傾向に一致する。

このような地震サイクル中の変動の時間変化は、アセノスフェアの粘性率にも依存するが、主にサイクルの初期では地震時すべりに対するアセノスフェアの粘弾性的応答が、サイクルの後期では地震間の固着の効果がそれぞれ支配的であることによる。また計算結果は、海溝からの距離によって地震サイクル間の上下変動の時間変化のパターンが大きく異なることを示しているため、特に太平洋側の海域における長期地殻変動観測の重要性を示している。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 地殻変動, 地震サイクル, 粘弾性, 定常沈み込み運動, テクトニクス

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Crustal deformation, Earthquake cycle, Viscoelasticity, Steady subduction, Tectonics

## 摩擦特性に依存する小繰り返し地震の揺らぎ Perturbation of small repeating earthquake depending on frictional properties

有吉 慶介<sup>1\*</sup>, 松澤 暢<sup>2</sup>, 日野 亮太<sup>2</sup>, 長谷川 昭<sup>2</sup>, 金田 義行<sup>1</sup>  
ARIYOSHI, Keisuke<sup>1\*</sup>, MATSUZAWA, Toru<sup>2</sup>, HINO, Ryota<sup>2</sup>, HASEGAWA, Akira<sup>2</sup>, KANEDA, Yoshiyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究 P, <sup>2</sup> 東北大学

<sup>1</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup>RCPEV, Tohoku University

近年の観測網の発展によって、小繰り返し地震解析はプレート境界面のすべり履歴やカップリング率を推定するのに有効な手法として確立されつつある。特に、海溝型巨大地震震源域付近に対しては、陸上 GPS 観測網などでは高精度で推定することが困難であることから、モニタリングツールとして小繰り返し地震の活用が期待される。一方で、小繰り返し地震解析から推定されたすべり量は、プレートの収束速度や高精度で得られた陸上 GPS 解析結果よりも小さい値となる場合がある。その主な要因として、震源域周辺での応力場に乱れが生じるため、小繰り返し地震として認識されずに取り逃がしていることが考えられている。Ariyoshi et al. [2007 GRL] では、摩擦係数が速度-状態依存摩擦構成則の *slowness-law* に従う場合、大規模な余効すべりが通過すると深部で発生する小繰り返し地震が一時的にゆっくり地震に変化することを指摘した。しかし、有効法線応力や摩擦構成則が異なる場合、揺らぎの発生過程も多様になる可能性がある。そこで本研究では、これらが異なる場合について、数値シミュレーションを行った。

その結果、*slowness-law* では、浅い震源や高い間隙圧などで有効法線応力が低い場合、同一の摩擦特性であっても、通常はゆっくり地震が発生し、余効すべりが通過する際に通常の地震が発生することが分かった。これは、釜石沖のように震源が深い場合を想定した Ariyoshi et al. [2007 GRL] の結果とは逆である。また、この中間では、通常時に発生する地震と同じすべり速度をもつイベントが余効すべり通過時に頻発した。*slip-law* でもほぼ同様の傾向がみられるが、深さの範囲が限定的な結果となった。震源が深い場合、地震活動が巨大地震発生前後にまたいだ長期間に渡って不活発となる特徴がみられ、*slowness-law* の中間的な場合にみられたイベントが頻発する現象は、数多くのシミュレーションを行っても再現することはできなかった。このような違いは、ゆっくり地震の発生条件が繊細な *slip-law* [Rubin & Ampuero, 2007 JGR] では、ゆっくり地震が起こりにくいことから、応力擾乱に対しても繊細になったためだと考えられる。

これらの結果を観測結果と比較して考察を行うと、小繰り返し地震は沈み込みプレート境界面の深部でも浅部でも発生していることから、摩擦構成則が *slowness-law* に従うか、*slip-law* で有効法線応力が中間値かつ深さによらずほぼ一定と考えられる。その上で、東北地方太平洋沖地震直後に釜石沖で繰り返し地震が3度も起きた現象を考えると、*slip-law* から説明するのは難しい。本発表では、*slowness-law*, *slip-law* に加えて、*composite-law* [Kato and Tullis, 2001 GRL] や *PRZ-law* [Perrin et al. 1995 JMPS] など他の摩擦構成則でも数値シミュレーションを行い、どの摩擦構成則が妥当なのかを根本から議論する。これにより、東北地方太平洋沖地震をはじめとする海溝型巨大地震に伴う地殻変動量について、摩擦構成則を適用する数値シミュレーションや小繰り返し地震解析の高度化を図る。

キーワード: 非相似地震, 繰り返し地震に基づくすべり量推定, 摩擦構成則を適用した数値シミュレーション, 余効すべり, 震源深さと地殻流体の影響, プレート境界型地震

Keywords: non-similar earthquake, slip estimation by repeating earthquake analyses, numerical simulation based on friction law, postseismic slip propagation, effect of geofluid and focal depth, interplate earthquake, interplate earthquake



## 東北地方太平洋沖地震に関する海底地殻変動観測と今後の展開 Current status and future plan of seafloor geodetic observation for 2011 Tohoku-oki earthquake

木戸 元之<sup>1\*</sup>, 長田 幸仁<sup>1</sup>, 飯沼 卓史<sup>1</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>

KIDO, Motoyuki<sup>1\*</sup>, OSADA, Yukihito<sup>1</sup>, IINUMA, Takeshi<sup>1</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター

<sup>1</sup>RCPEV, Tohoku University

We have detected considerably large coseismic displacement associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake through GPS/acoustic geodetic surveys. Taken them together with those observed by Japan Coast Guard and wide-spread array of seafloor pressure gauges, the data definitely contribute to elucidate the coseismic slip distribution of the earthquake based on numerical inversion analysis, the result of which we did not expect with our knowledge before the earthquake, but is supported by many other observations after the earthquake. The unexpected feature is not only in the coseismic slip distribution but also in postseismic deformation. GSI has been monitoring the postseismic deformation using GEONET and reported reasonable slip distribution that compensates the coseismic slip of the main shock mainly in the western (and hence deeper) adjacent area. However, our repeated observations after the earthquake indicate complexity in the postseismic slip, including further slip even at the main coseismic slip area near the trench. In addition, the deformation seems to still continue with a considerable rate.

To elucidate the complexity, Tohoku University and Nagoya University plan to drastically extend the seafloor geodetic survey sites along the Japan Trench by this summer under the accelerated project promoted and funded by MEXT. The total number of survey sites being planned is about 20, to be distributed mainly on deeper seafloor near the trench, in where the deformation cannot be inferred from onshore GPS network. The most of the survey sites consist of four transponders while some important sites consist of six transponders, which can effectively correct the effect of undesired spatial variation in sound speed in ocean. The new transponders are designed against long ranging over 10 km distant at depth and are compatible with both the systems of the university groups and Japan Coast Guard.

The other key of the project is the introduction of an autonomous moving buoy, which can navigate itself along programmed path or remotely operated on demand away from a research vessel. The utilization of this extra buoy will lead surveys to be more efficient or precise taken with an existing towing buoy simultaneously. The power for electronics and propulsion will be supplied by diesel oil lasting for at least two days per fuel. The autonomous buoy is an all-in-one system and the overall length is 3 m at most, which can be dealt with any researcher on any vessel. This promotes new research groups to begin their own GPS/acoustic survey. Systematic result of displacements in postseismic deformation will be obtained after the second time of survey to be conducted by the end of the fiscal year of 2012.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 海底地殻変動, 余効変動, 海底GPS観測

Keywords: 2011 Tohoku-Oki earthquake, seafloor crustal deformation, postseismic deformation, seafloor geodesy

## 平成 23 年 ( 2011 年 ) 東北地方太平洋沖地震の余効変動とその発生メカニズム Postseismic deformation following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and its mechanism

水藤 尚<sup>1\*</sup>, 小沢 慎三郎<sup>1</sup>, 西村 卓也<sup>1</sup>, 飛田 幹男<sup>1</sup>

SUITO, Hisashi<sup>1\*</sup>, OZAWA, Shinzaburo<sup>1</sup>, NISHIMURA, Takuya<sup>1</sup>, TOBITA, Mikio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国土交通省国土地理院

<sup>1</sup> GSI of Japan

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い GEONET によって広範囲に地殻変動が観測された。引き続き大規模な余効変動が観測されている。GEONET によって観測されている余効変動の水平変動は、東北地方から関東地方の太平洋岸での東向きの変位が顕著で、本震発生後 10 カ月余りで岩手県中部太平洋岸において最大 90cm に達している。地震時とほぼ同じ方向であるが、空間分布を詳細に見ると地震時と異なった特徴がある。太平洋側の変位は地震時には宮城県で大きかったのに対して、余効変動では岩手県北部から千葉県北部までそれほど差が見られない。また日本海側でも最大 50cm という大きな変動量が観測されている。上下変動に関しても複雑な空間分布が観測されている。地震時には太平洋沿岸のほぼ全域で沈降が観測されたが、地震後には岩手県沿岸を除いて隆起が観測されている。一方、太平洋沿岸と内陸を比較してみると、宮城県の太平洋側で隆起が広がっているが、そのすぐ西側の内陸では沈降が広がっている。それに対して、福島県から茨城県にかけては太平洋側、内陸ともに隆起が広がっている。また青森県でも内陸にかけて隆起が観測されている。よって、上下変動に関しては、地震時と余効変動で全く異なる分布を示している。

これらの観測された余効変動から、その発生メカニズムがプレート境界面上のすべり（余効すべり）によるものと考え、そのすべり分布の推定結果は地震時に比べるとその深部延長で発生している。そして、余効すべりのピークは岩手県南部沿岸付近の深さ 40 km 付近で最大 300cm 弱に達し、千葉県銚子沖にも 100cm に達するピークがあるのが特徴である。推定されたモーメントは  $9.15 \times 10^{21}$  Nm でモーメントマグニチュード 8.57 に相当し、地震時のモーメント量の 18.3% である。

GEONET によって観測されている最新の余効変動の時空間分布の詳細及び余効すべりの推定結果を報告するとともに、現在の余効すべりの推定の際には考慮されていない粘弾性緩和及び間隙弾性緩和による変動がどの程度であるかについても報告する。

キーワード: 2011 年東北地方太平洋沖地震, 余効変動, 余効すべり, 粘弾性緩和, 間隙弾性緩和

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, postseismic deformation, afterslip, viscoelastic relaxation, poroelastic rebound

## 2011年東北沖地震における余効すべりの時空間分布 Spatio-temporal distribution of afterslip due to the 2011 Tohoku-Oki earthquake from MCMC inversion

鈴木 翔太<sup>1\*</sup>, 伊藤 武男<sup>1</sup>, 兵藤 守<sup>2</sup>, 里 嘉千茂<sup>3</sup>, 野口 拓美<sup>4</sup>

SUZUKI, Syota<sup>1\*</sup>, ITO, Takeo<sup>1</sup>, HYODO, Mamoru<sup>2</sup>, SATO, Kachishige<sup>3</sup>, NOGUCHI, Takumi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup>海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, <sup>3</sup>東京学芸大学教育学部自然科学系, <sup>4</sup>フルード工業(株)

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>JAMSTEC, <sup>3</sup>Tokyo Gakugei University, <sup>4</sup>Fluid Engineering Co., Ltd.

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)が発生した。東北沖においてM7から8の海溝型地震は繰り返し発生しているが、M9クラスの地震は繰り返し間隔がきわめて長いため情報が少なく、また世界的にも超巨大地震に関する情報は乏しい。一方で、日本列島には高密度なGPS観測網(GEONET)が展開されており、詳細な地殻変動の様子が観測されている。GEONETは東北沖地震発生後に大きな東向きの地殻変動を観測し、この地殻変動は主に余効すべりに起因すると解釈することができる。したがってGEONETによって観測された余効変動を解析することにより、余効すべりの時空間分布を知ることができる。また、地震を理解するためには、プレート境界の応力状態や摩擦特性を理解することが必要不可欠である。応力状態や摩擦特性は地震の余効すべりを解析することで得ることができ(Hsu *et al.*, 2006)、さらに余震活動との関連性や今後の地震活動の予測を行うための基本的な情報となる。したがって、本研究では東北沖地震後の余効すべりの時空間分布を求めた。

解析にはGEONETで観測され、国土地理院によって解析されたF3解を用いる。観測された地殻変動時系列データには、定常的なトレンド、年周変化、地震時のステップ、および地震後の余効変動が含まれている。そのため、それぞれ一次関数、三角関数、ヘビサイドステップ関数、対数関数を用いてモデル化を行う。考慮する地震は、気象庁地震カタログのM7以上のもので、地震時のステップの変化量が定常時の標準偏差よりも大きいものを使う。モデル化した式を解くために、線形な部分は最小二乗法を用い、非線形な部分はColeman *et al.* (1996)による方法でそれぞれのモデルパラメータを決定した。このようにして東北沖地震の余効変動のデータを取り出し、余効すべりを求める。

余効すべりを求めるために本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)に基づいた手法を採用した。従来、よく使われている最小二乗法を用いたインバージョン解析では一つの解を求めるのに対して、MCMC法は事後確率分布として解を求める。インバージョン解析に内在する劣決定問題はそれぞれの解の相関として現れ、事後確率分布に内在される。すべり分布を求めるために観測方程式 $d = Gm$ を使う。ここで $d$ は観測された余効変動データ、 $G$ は断層面上の小断層のすべりと地表面の観測点の変動量とを関係づけるグリーン関数である。本研究では、有限要素法による3次元不均質構造を考慮したグリーン関数を用いた。そして、グリーン関数の大きさに基づく重み付きスムージングパラメータも使用する。また、 $m$ はプレート境界を小さい領域に区切った小断層の滑り量(走向・傾斜方向)である。この観測方程式を解くためのサンプリング方法はメトロポリス・ヘイスティング法を使用する、また、MCMC法は計算が膨大であるため、GPUを用いることで計算の速度を上げている。このようにして東北沖地震の余効すべりを求めた。

解析した結果から、余効すべりは深さ約25から35km、幅約400kmの領域に帯状に分布することが分かった。すべり量のピークは、福島沖に7ヶ月後の時点で約3mのすべりが見られた。この場所は福島県沖地震(1938年)の発生した場所と空間的に一致する。また、時間変化を見ると、はじめは福島沖の部分のすべりが大きい、時間が経つにつれ岩手県沖へすべりの領域が広がり、北の方へすべりが広がっていることが分かった。地震時のすべり分布(Simons *et al.*, 2011)と比較するとより地震時のすべりよりも深部で余効すべりが進展している。プレート境界深部では大きなすべりがある結果になったが、今回は考慮していない粘弾性についての部分を反映している可能性がある。残差の空間分布は地震間に観測された歪集中帯の場所と空間的に一致しているため、両者には何かの関係があることが示唆される。

キーワード: 東北沖地震, 余効すべり, マルコフ連鎖モンテカルロ法, 有限要素法を用いたグリーン関数

Keywords: Tohoku-Oki earthquake, afterslip, Malcov chain Monte Carlo method, Green function using FEM

## Hi-netで観測された2011年東北地方太平洋沖地震による土岐アクロス信号の変化 Temporal changes of Toki ACROSS signal induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

國友 孝洋<sup>1\*</sup>

KUNITOMO, Takahiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 國友孝洋

<sup>1</sup>Takahiro Kunitomo

中部地域の弾性波アクロスの常時送信は、岐阜県土岐市（原子力機構）、静岡県森町（気象研究所）、愛知県豊橋市（名古屋大学）において実施されている。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の前後は、豊橋送信所では送信装置の故障で送信が停止していたものの、土岐および森町の両送信所では連続送信が継続されていた。2011年の連合大会では、気象研究所により近傍のHi-net観測点で得られた森町送信所からの信号に走時変化があったことが速報されている〔吉田・他（2011）〕。本報告では、Hi-netで観測された土岐送信所からの弾性波アクロス信号の地震後の変化について報告する。

土岐送信所では、2007年3月から搬送波周波数13.005Hz、変調周期50秒、平均発生力5.5tonfのFM送信を行っている。スペクトルで見ると10.245-19.445Hzの帯域に0.02Hz間隔で461本のラインスペクトルが楕形に並ぶ“周波数コム”信号となっている。帯域内でのスペクトル振幅の平均値は約2700Nである。送信装置の偏心錘は、回転軸が鉛直であり、2時間毎に回転方向を反転させている。異なる回転方向に対応する観測データを後に線形結合することで、直交2方向の直線加振に対する伝達関数を取得することができる。

土岐送信所から最も近く（11.3km）、S/N比の高いデータが得られているHi-net八百津（N.YOTH）観測点を例に報告する。まず、1日毎のデータをスタッキングし、視線方向R、接線方向Tの加振に対する視線方向r、接線方向t、鉛直方向zの観測成分を計算し、6成分のテンソル伝達関数およびグリーン関数を求めた。次に、1年間（2008年度）のデータをスタッキングして得られたテンソル伝達関数およびグリーン関数（以下、基準波形）との比較において、一日毎の時間変化を調べた。結果は以下の通り。

1) 1日スタッキングして得られた波形と基準波形との差分波形をプロットして変化の大局を調べた。差分波形は、2011年3月11日を境にP波の後続波およびS波とS波の後続波の波形が変化したことを明瞭に示している。その変化は月日とともに減少しているが2011年12月の時点でも地震前の状態には戻っていない。地震を境に岐阜県東濃地域で非常に大きな地下水位・水圧変化があったことが報告されており〔例えば、浅井・石井（2011）〕。また、アクロス信号の変化が後続波で顕著なことから、地下水の変動に伴って地下の比較的浅部の散乱構造が変化したのではないかと考えている。

2) 最大振幅波（rRおよびzRはP波、それ以外はS波）を含む1秒間について基準波形とのクロススペクトルから走時差を計算した。走時は、3月11日を境にS波を含む部分で約2msec遅くなり、その後徐々に回復しているものの、12月末時点でも元の状態には戻っていない。この走時変化が、地下浅部の変化のみを反映したものなのか、地殻の大局的な速度変化を含むものなのか現時点では明らかではない。S/N比が低く精度が悪いが、今後、より遠くの観測点のデータを詳細に調査する予定である。

（謝辞）防災科研のHi-netのデータを使わせて頂きました。また、原子力機構東濃地科学センターの方々には、土岐送信所の稼働にご尽力を頂きました。記して感謝致します。

キーワード: 走時変化, 地殻変動

Keywords: travel time change, crustal movement



## 2011年東北地震に伴う津波荷重変形のGEONETによる検出 Detection of tsunami-induced deformation caused by the 2011 Tohoku earthquake using on-land GPS network

三井 雄太<sup>1\*</sup>, 日置 幸介<sup>1</sup>  
MITSUI, Yuta<sup>1\*</sup>, HEKI, Kosuke<sup>1</sup>

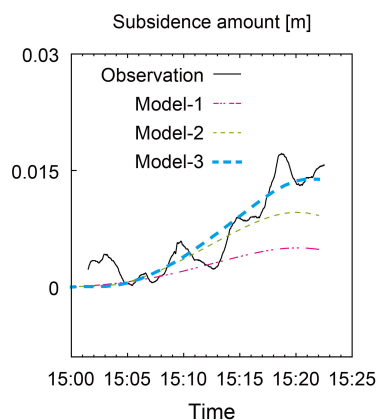
<sup>1</sup> 北大理

<sup>1</sup>Sci., Hokkaido Univ.

The 2011 Tohoku earthquake on March 11 caused massive tsunami. We first detect a land-deformation signal due to the tsunami using on-land GPS network. We focus on GPS stations along the Sanriku coast, and stack the GPS data at seven coastal stations and seven landward stations respectively. The data show that relative subsidence at the coastal stations to the landward stations had occurred on the order of 1 cm until almost 30 minutes after the Tohoku earthquake. We check whether the subsidence signal corresponds to simulated land deformation based on a tsunami simulation model, and confirm the tsunami hypothesis for the subsidence. We find that a popular elastic model with a stratified velocity structure (Gutenberg-Bullen earth model) for the Green's function leads to underestimation of the subsidence amount about 1/2-1/3. Effect of compliant materials near the surface may be important to estimate tsunami-induced land deformation.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 荷重変形, 観測とシミュレーションの比較

Keywords: The 2011 Tohoku earthquake, tsunami, load deformation, comparison between observation and simulation



## 超伝導重力計が記録した2011年東北地方太平洋沖地震による重力変化 Gravity changes due to the 2011 Tohoku earthquake recorded by superconducting gravimeters

今西 祐一<sup>1\*</sup>, 田村 良明<sup>2</sup>

IMANISHI, Yuichi<sup>1\*</sup>, TAMURA, Yoshiaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 国立天文台

<sup>1</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>2</sup>NAOJ

2011年東北地方太平洋沖地震は、日本列島の広い範囲で大規模な地殻変動と余効変動を引き起こした。これにともなって、地表における重力も、地震発生時に変化しただけでなく、地震後に長期的な変化を示すことが考えられる。それに加えて、地殻およびマントルの粘弾性的な性質による永年的な変化が観測される可能性もある。

このようなM9クラスの地震が発生したときに、震源に比較的近い地域で3台の超伝導重力計(水沢・松代・神岡)が稼働していたというのは、今回が初めてのケースである。これらの重力計は本震およびその後の余震などで激しく乱されたものの、ほぼ連続した記録が得られている。地震発生後のデータが蓄積されるにしたがい、長期的な変化の様相が明らかになると期待される。重力記録の長周期成分には、気圧や地下水などの影響が重畳しているため、現在慎重に解析をすすめている。

キーワード: 超伝導重力計, 2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: superconducting gravimeter, 2011 Tohoku earthquake

## 2011年東北地方太平洋沖地震による誘発地震の震源分布と地質構造から推定される誘発地震の発生メカニズム Mechanism of induced earthquakes of the 2011 Off Pacific coast of Tohoku Earthquake according to aftershocks activity

川辺 孝幸<sup>1\*</sup>, 中野啓二<sup>2</sup>

KAWABE, Takayuki<sup>1\*</sup>, NAKANNO Keiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山形大学地域教育文化学部, <sup>2</sup>TeFS

<sup>1</sup>Faculty of Education, Art and Science, Yamagata University, <sup>2</sup>Terra-Fluid Systems

2011年3月11日14時46分頃に発生したMj9.0の平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後、秋田県田沢湖西方、山形県月山南麓、山形-福島県境、長野県北東部、長野県松本盆地中央部、茨城県北部～福島県南部など、豊北日本の内陸部の各地で誘発地震が発生している。

筆者のうち川辺は、1995年兵庫県南部地震以前の同地域での微小地震活動と本震以降の地震活動、2007年新潟県中越沖地震や2008年岩手-宮城内陸地震の地震活動などの検討をおこない、大規模地震の発生に地殻上部への流体の押し上げが大きく係わっていることを明らかにしてきた。

誘発地震とその余震群の震源の時空分布を調べると、秋田県田沢湖西方、山形-福島県境、長野県松本盆地中央部などでは、地震群は、基本的には地質断層の位置に調和的な起こっていることが多いが、半径数km～10kmの円形もしくは楕円形の分布範囲に集中して起こっているが、地質断層の伸びの方向とは無関係であり、複数の方向の断層の、楕円もしくは円形の範囲内に入る一部分のみが地震群によってフォーカスされている、という特徴を持っている。また、多くの誘発地震とその余震群では、個々の発震機構はそのローカルな応力を反映しているものが多い。しかし、余震群は、断層の走向方向には配列せず、前述のように、断層の伸びの方向とは異なる方向で余震が起こっている。

茨城県北部～福島県南部の地域では、棚倉破砕帯に平行方向とそれに直交する方向に正断層型の余震分布がブロックをつくるように起こっているが、これらは地質断層と調和的であり、実際に、北西部では、正断層型の地表地震断層が起こっている。ここでは、上部地殻のブロックがあたかも地すべりのように東に動いているように見える。

以上のような誘発地震群を時系列に見ると、初期に、円筒上の震源分布が見えるものが多い。このことは、誘発地震群の発生に、流体が関与していることが示唆される。2011年東北地方太平洋沖地震の本震によって、日本列島が東西方向に伸張した結果による応力低下によって、発生した流体が関与した、と推定される。

キーワード: 誘発地震, メカニズム, 震源分布, 地質構造, 応力低下, 流体の押し上げ

Keywords: induced earthquake, mechanism, hypocentral distribution, geologic structure, reduced stress, uplifting by fluid

## 東北地方太平洋沖地震震源域における海底地形変状の解析 Geomorphologic analysis of the co-seismic deformation of the seabed in the tsunami source area of the Tohoku Earthquake

鮑 巴達拉胡<sup>1\*</sup>, 竹内 章<sup>2</sup>

BAO, Badalahu<sup>1\*</sup>, Akira Takeuchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 富山大学大学院理工学教育部, <sup>2</sup> 富山大学大学院理工学研究部

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineer, University of Toyama, <sup>2</sup>Faculty of Science, University of Toyama

### 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は、日本海溝付近で発生した巨大な断層運動が原因である。これに伴い三陸沖の海底地形が変化し、巨大津波が発生した。本報告では、地震前後の海底地形図と断面図を作成し、判読・比較することで、巨大地震と海底地形の対応関係を議論する。

### 使用データ

・地震前のデータ：海上保安庁とJAMSTECが取得した測深データを一元的に統合した水深値のデータ。  
・地震後のデータ：よこすか YK11-E06 航海 (2011/7/11 ~ 7/28) により得られた東北沖の測深データと、白鳳丸 KH11-7 航海 (2011/7/16 ~ 8/4) により得られた宮城県沖の測深データ。水圧計による水深値とは 10m 程度のオフセットが認められた。

地震前のデータは膨大なデータを平均化したものである。一方、地震後は単一航海の生データであり、単純には比較できない。断面での地形変化は、比較的変動が少ない海溝海側斜面の特徴的な地形 (アウトライズ) を重ね合わせて、人為的なオフセットが無視できる状態で検討した。

### 結果と考察

使用データ範囲の全域で海底地形の判読を行った結果、地震前は平坦であった海溝底で顕著に隆起している箇所が見られた。海溝底の中央 (143 °59.5 'E) に位置するこの高まりは、陸側が緩く海側が急傾斜の非対称をなし、ほぼ南北に連なっており、38 °02 ' ~ 38 °05 'N まで、およそ 5.5km 伸びていた。

この地形判読結果とすべり量分布モデルとの対応関係について調べたところ、地震時に生じた非対称海嶺状地形は、Iinuma et al. (2011) によるすべり量分布モデルで地震時の変位が大きいとされる領域 (143 °57 ' ~ 144 °03 'E, 38 °00 ' ~ 38 °07 'N) に収まっている。

高まりを横断する西北西-東南東断面図において、高まりの西側では、海溝底から陸側斜面基部は見かけ上およそ 50m 隆起した。急斜面の麓から海溝海側斜面基部にかけてほとんど変化が見られない。このことから、非対称の高まりは、プレート境界面自体が逆断層センスのすべりを生じたことで、海溝底の堆積層に変形 (デタッチメント褶曲) が生じたことが考えられる。

また、地震前に見られた海溝陸側斜面の断層崖が、地震後には消えている。これは、プレート境界から付加体内に分岐した断層が逆断層運動をしたため、上盤側の海溝陸側斜面は隆起したと解釈した。この隆起が巨大津波の原因と考えられる。

海溝陸側斜面では新たな地すべり滑落崖と断層崖が見られた。ブロック構造を成す断層崖に沿って数多くの小規模な地すべり地形が形成されており、最近出来た地形であることがわかる。その直下には、土砂が堆積して形成した階段状のベンチ地形が見られる。

### まとめ

地震時の、デコルマ面と分岐断層のすべりによる海底地形の変化により、海溝陸側斜面の付加体と海溝底陸寄りが、海側と上方に移動したことが推定できた。今回明らかになった海溝底に現れた断層は、巨大津波の波形のうち短波長の鋭いピークが現れた原因の一つである可能性がある。これらの大きな地形変動が明らかになったことにより、種々提案されているすべり量分布モデルの可否判定における基準のひとつを提供できたといえる。

キーワード: 東北沖太平洋地震, 海底地形変動, 地形調査, KH11-07 航海, 海溝陸側斜面地すべり, 海底断層

Keywords: Off Tohoku Earthquake, Geomorphological Change, Morphological survey, The KH11-07 Cruise, Japan Trench, Seafloor Faults



# Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

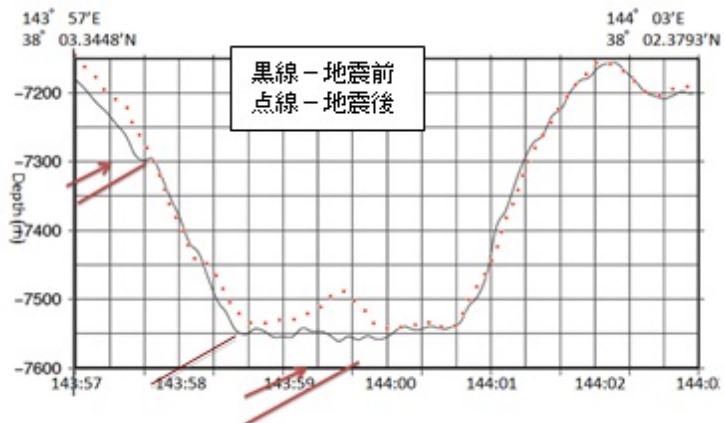
©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SCG74-P09

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 17:15-18:30



## 東日本大地震と固体流動説によるその仕組み

## The Great Eastern Japan Earthquake 2011 and Its Mechanisms According to the Theory of Solid State Lithologic Flow

間遠 伸一郎<sup>1\*</sup>

MADO, Shinichiro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 間遠総合学術研究所

<sup>1</sup>Mado Research Office of Sciences and Arts

### 1. はじめに

2011年3月11日に日本の東北・関東地方を襲った東日本大地震は、マグニチュード9.0という未曾有の大地震でしたが、様々な点で従来の地震理論を揺るがす興味深い地震でもありました。特に、固体流動説による地殻変動の理解が理論的解明の鍵と見られますので、本論ではその点を論じます。

### 2. 巨大地震のメカニズムの問題

巨大地震のメカニズムについての従来の定説は、プレートテクトニクスとマントル対流説に基づいています。しかしながら、固体流動説によっても巨大地震のメカニズムについての別の説明が可能です。

表面上、同じ現象が、固体流動説によってもマントル対流説によっても説明されるように思えるかもしれませんが、何の力が地殻変動を引き起こすのかが、両理論の主要な違いです。

### 3. 従来の定説

従来の定説では、日本列島で起こる典型的な大地震の説明は、プレートテクトニクスとマントル対流説に基づいて行われます。この理論は、地球の地殻の下のマントルと呼ばれる岩石の厚い層の中で、地球内部の熱エネルギーによって岩石の対流が起こり、その対流の力で地殻を含むプレートが引きずられて動くことを主張します。日本列島の東側には日本海溝がありますが、日本海溝の東側の海底の岩盤が太平洋プレートであり、太平洋プレートの下から日本海溝の下に向かってマントル対流の流れがあり、その力によって太平洋プレートを日本列島の下に引きずり込んでいくとされます。そのため、日本列島は、沈み込む太平洋プレートの動きに引きずられて少しずつ沈降して行きます。しかし、日本列島を含む大陸側のプレートは比重が小さいため、浮力が働き、ある程度沈降した後に、突然隆起します。この突然の隆起の際に大地震と津波が発生するというのです。しかしながら、東日本大地震の際に観測されたのは、海岸の隆起ではなく、沈降でした。この現象は、定説を疑うに十分です。

### 4. 固体流動説による大地震のメカニズム

図によって説明します。

A) 重力の作用は氷河のように固体の岩石を高所から低所へと流動させます。  
B) 日本海溝はとりわけ低くなっているため、岩石の固体流動はそこに流れ込みます。それゆえ、流れの先端は海溝にあります。

C) 流れの先端部分が太平洋の海底の岩盤にぶつかってその上に乗り上げます。

D) 乗り上げた流れの先端部分の重みで太平洋の海底の岩盤が押し下げられます。

E) 海底の岩盤が地下深くに押し込まれて行きます。

働く力の因果連鎖は次のようになります：

A → B → C → D → E。

働く力は重力だけです。熱によるマントル対流は全く想定されていません。

大地震と津波が起こるのは、Cの動きが大変急激な現象となるためです。

現象は繰り返される流れなので、因果連鎖とは反対に、

E → D → C → B → A

のように、逆の順序で起こります。

### 5. 固体流動説による理解

今回の大地震では、定説とは異なり、牡鹿半島で観測された、東の方向の5.3mの動きと、1.2mの沈下をワンセットとして理解する説明が可能です。すなわち、この現象は、固体流動による日本列島の動きを実証しており、高所から低所へと流れる岩石の固体流動が、水平方向に5.3m流れる間に垂直方向に1.2m下降したのだと考えることができるのです(図のA)。この説明では、岩石の固体流動によって、日本列島全体が流動したのだと解釈されます。固体流動説によるこの説明は、氷河の流れと同様に岩石の流れを考えており、今回の現象の特徴が無理なく説明されます。

また、牡鹿半島の鋭く突き出した形状は、今回のような大地震が今まで度重なったことで形成されたと推察されます。

キーワード: 地殻変動, 地震, 東日本大地震, 津波, 岩石の固体流動, 地球の重力

Keywords: Diastrophism, Earthquake, The Great Eastern Japan Earthquake 2011, Tsunami, Solid State Lithologic Flow, Gravity

固体流動説にもとづく大地震と津波の仕組み

