

## 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つたのと同じように、余効すべりについても、プレート境界最浅部を含めたところ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つ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

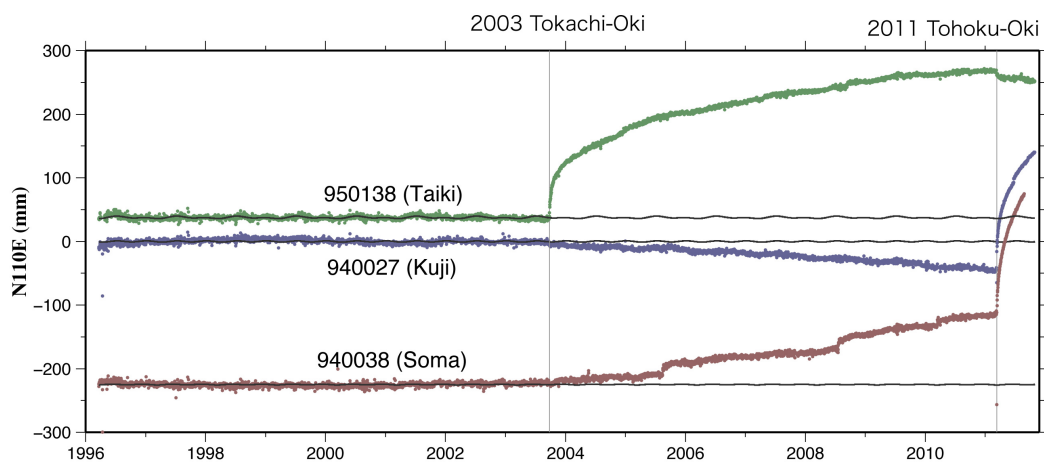
Keywords: Northeast Japan, GPS, Interseismic crustal deformation, Pacific plate, acceleration, 2003 Tokachi-Oki earthquake



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