

C会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

2019年9月16日(月) 10:45 ~ 12:00 | C会場 総合研究8号館NSホール

[S03]AM-2

座長: 縣 亮一郎(海洋研究開発機構)、木戸 元之(東北大学災害科学国際研究所)、田中 優作(東京大学地震研究所)

10:45 ~ 11:00

[S03-05] 海底間音響測距観測による2011年東北地方太平洋沖地震後の余効すべり不均質性の直接検出

\*山本 龍典<sup>1</sup>、日野 亮太<sup>1</sup>、木戸 元之<sup>2</sup>、本荘 千枝<sup>1</sup>、長田 幸仁<sup>1,3</sup>、小平 秀一<sup>4</sup>、中村 恭之<sup>4</sup> (1. 東北大学大学院理学研究科、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. イネーブラー株式会社、4. 海洋研究開発機構海域地震火山部門)

11:00 ~ 11:15

[S03-06] 南海トラフの斜め沈み込みによる横ずれ運動の可能性 — 潮岬海底谷での海底間音響測距観測 —

\*木戸 元之<sup>1</sup>、荒木 英一郎<sup>2</sup>、辻 健<sup>3</sup>、山本 龍典<sup>4</sup>、川田 佳史<sup>1</sup> (1. 東北大学災害科学国際研究所、2. 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、3. 九州大学工学研究院 地球資源システム工学部門、4. 東北大学大学院 理学研究科)

11:15 ~ 11:30

[S03-07] Width of the strain concentration in the San-in Shear Zone as observed by a dense GNSS network

\*Angela Meneses-Gutierrez<sup>1,2</sup>, Takuya Nishimura<sup>3</sup> (1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:30 ~ 11:45

[S03-08] GEONETデータ(F3解)に基づいた内陸SSE検出の試み

\*田中 優作<sup>1</sup> (1. 東大地震研)

11:45 ~ 12:00

[S03-09] 海底圧力計記録に含まれる長周期潮汐成分を考慮した浅部スロースリップによる海底地殻変動の検出

\*井上 智裕<sup>1</sup>、村本 智也<sup>2</sup>、稲津 大祐<sup>3</sup>、伊藤 喜宏<sup>4</sup>、日野 亮太<sup>5</sup>、太田 和晃<sup>4</sup>、鈴木 秀市<sup>5</sup> (1. 京都大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、3. 東京海洋大学、4. 京都大学防災研究所、5. 東北大学)

# 海底間音響測距観測による2011年東北地方太平洋沖地震後の余効すべり不均質性の直接検出

## Direct detection of postseismic slip heterogeneity after the 2011 Tohoku Earthquake by using direct path ranging

\*山本 龍典<sup>1</sup>、日野 亮太<sup>1</sup>、木戸 元之<sup>2</sup>、本荘 千枝<sup>1</sup>、長田 幸仁<sup>1,3</sup>、小平 秀一<sup>4</sup>、中村 恭之<sup>4</sup>

\*Ryusuke Yamamoto<sup>1</sup>, Ryota Hino<sup>1</sup>, Motoyuki Kido<sup>2</sup>, Chie Honsho<sup>1</sup>, Yukihito Osada<sup>1,3</sup>, Shuichi Kodaira<sup>4</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>4</sup>

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 東北大学災害科学国際研究所、3. イネーブラー株式会社、4. 海洋研究開発機構海域地震火山部門

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 3. ENABLER Ltd., 4. Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2011年東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)の余効変動は、粘弾性緩和が卓越していることが、複数の研究から明らかになった。例えば、海底測地観測の一つであるGNSS-音響結合方式(GNSS-Acoustic)では、測地観測による粘弾性緩和の直接検出に成功し、特に、地震時変動の大きかった宮城県沖で粘弾性緩和が支配的であることを明らかにした(例えば、Sun et al., 2014; Watanabe et al., 2014; Tomita et al., 2017)。一方で、浅部余効すべりについては、海底測地観測網が海溝軸近傍まで及んでいないため、これまで実測ができなかった。

本研究では、海底間音響測距(Direct Path Ranging; 以下DPR)という手法を用いて、東北沖地震の浅部余効すべりの実測を目指した。これは海底に設置した2つの音響トランスポンダ間で音波の送受信を行い、その往復時間と海中音速との積を計算することで基線長を求める手法である。海中音速は、温度、圧力、塩分を変数とする経験式で表されるが、深海においては温度と圧力の変動の影響が大きいため、これらも測距と同時に計測する。また、1脚型の機器の場合は海流によって、また3脚型の場合は堆積物中に徐々に沈み込むことによって、機器の姿勢変化が生じる。この傾斜変化の影響を、機器に搭載された傾斜計と方位計を用いて幾何的に補正する。DPRは、海底の局所的変動を精密かつ連続的に捉えることに長けている。例えば1 km程度の基線ならばミリメートルオーダーの精度で計測ができる(McGuire and Collins, 2013; Yamamoto et al., 2019)。このような高精度の観測を実現するには上述の各種補正が不可欠である。

観測は、地震時すべりが卓越していた宮城県沖と、顕著な余効すべりが示唆されている福島県沖の2箇所で、それぞれ2013-2016年(2013, 2014-2015, 2015-2016年の計3回に分けて実施)と2017-2018年に行われた。宮城県沖の海溝軸を跨ぐ基線に関して変位レートを計算したところ、いずれの観測期間中においても顕著な短縮は認められず、少なくとも本観測期間中は浅部余効すべりに起因する短縮はなかったと見られる。一方の福島県沖における観測では、 $27.0 \pm 5.5$  mm/yrという有意な基線長の短縮が認められた。基線が海溝軸となす角度を考慮すると、 $31.4 \pm 6.4$  mm/yrで海溝に沈み込んでいることになる。

海溝軸近傍は複数の断層が存在しており、そのどこで収束を賄っているかは不明である。我々はまず、反射法地震探査のデータから、本観測の基線がそれらを跨いでいるかを調べた。宮城県沖に関しては、海溝軸近傍の堆積層内に逆断層が認められる一方で、下部陸側斜面下の堆積層内には逆断層と解釈できる顕著な反射面が見られないことから、本DPR観測の基線が、この海域でのプレート境界断層のほぼすべてを跨いでいる可能性が高いことがわかった。従って、本観測期間中には顕著な浅部余効すべりは起きていなかったと言って良いだろう。一方の福島県沖は、海溝軸も含めて堆積層内に明瞭な反射面が見られない場所が多く、どこにプレート境界断層が出てきているかが現時点では不明である。従って、本観測がこの海域における浅部余効すべりの全てを捉えているかどうかはまだ不確定であり、もし本観測の基線が跨いでいない断層でさらなる収縮が生じていれば、実際の短縮レートは本観測で推定された値以上である可能性もある。また福島県沖では、海底地形に音響パスが阻まれて、DPR観測が行えなかった基線が多くある。そこで、DPR観測と並行して、海底局の中間に海中に漂うノードを置き、これを中継させることで音響パスを通す間接音響測距(Indirect Path Ranging)を実

施した。これを併用することで、今後、福島県沖の浅部余効すべりの解明が期待される。

## 南海トラフの斜め沈み込みによる横ずれ運動の可能性 ー潮岬海底谷での海底間音響測距観測ー

### A possible strike-slip motion along the Nankai oblique subduction zone --direct-path acoustic ranging at the Shionomisaki Canyon--

\*木戸 元之<sup>1</sup>、荒木 英一郎<sup>2</sup>、辻 健<sup>3</sup>、山本 龍典<sup>4</sup>、川田 佳史<sup>1</sup>

\*Motoyuki Kido<sup>1</sup>, Eiichiro Araki<sup>2</sup>, Takeshi Tsuji<sup>3</sup>, Ryusuke Yamamoto<sup>4</sup>, Yoshifumi Kawada<sup>1</sup>

1. 東北大学 災害科学国際研究所、2. 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、3. 九州大学工学研究院 地球資源システム工学部門、4. 東北大学大学院 理学研究科

1. IRIDeS, Tohoku University, 2. R&D CEAT, JAMSTEC, 3. Dept. Earth Resources Engineering, Kyushu University, 4. Graduate School of Science, Tohoku University

フィリピン海プレートは南西日本に対し41-65 cm/yr の速度で斜めに沈み込んでいる。その斜交角は潮岬沖では直交方向から30-50度にもなり、横ずれ成分は26-50 mm/yrに達すると推定される。この横ずれ成分は、巨大地震時に直交成分とともに解消される可能性もあるが、地震時には解消されずに、純粋な横ずれ成分として、内陸部の中央構造線の活動、あるいは海溝付近で非地震時にクリープ等により解消されている可能性もある。Tsuji et al. (2014) では、熊野海盆の外縁帯に平行する、wedge boundary strike-slip fault (WBSF) の存在を指摘しており、潮岬海底谷のWBSFに沿う方向の地形的なオフセット量から、WBSFでの横ずれ運動の大きさが地質学的時間の平均値として~20 mm/yr 程度あると見積もっている。しかし、それが定常クリープなのか間欠的な動きであるかは、地質情報からだけでは判定ができない。それで、我々は海底間音響測距による地殻変動の実測を試み、クリープの有無を調べることにした。

WBSFと潮岬海底谷が交差する水深約3000mの海底に3台の測器を設置し、2016年6月から約2年間の連続観測を実施した。各基線は1000-2500 m で深谷・WBSFをまたぐように設置し、WBSFに平行する横ずれ運動があれば、基線長変化として捉えられる配置とした。実際の地形は急峻な崖となっており、音響パスを通しつつ急傾斜地を避けるために、ROVを用いて確実に設置した。

2019年1月に機器を音響切り離しにより回収し、データ解析を行った。バッテリーが切れるまでの2年間、すべての基線で質の良い連続データが得られた。一方で音速補正に用いる温度計のデータは3000 mの水深にしては極めて大きい最大で0.2°Cに達する擾乱が見られた。正確な音速補正を適用するためには、基線両端での温度変化がコヒーレントであることが前提となるが、両端の温度変化の違いも0.1°C程度あり、線形な温度場空間変化の仮定が困難で、音速補正後も見かけの基線長の擾乱が1000 mの基線で10 cm 程度、2500 mの基線で20 cm 程度残ってしまった。しかし、1年間の長期データのため線形回帰による基線長変化速度は概ね1-2 cm/yrの精度で議論が可能である。暫定的な解析結果からは、観測精度内での定常的なクリープの存在は見られず、横ずれ運動は地質学的時間の中で間欠的に発生していることを支持する結果となった。現在、大きな温度擾乱を効果的に補正する方法を試行中であり、今後より精度の高い議論が可能になると期待される。

## Width of the strain concentration in the San-in Shear Zone as observed by a dense GNSS network

\*Angela Meneses-Gutierrez<sup>1,2</sup>, Takuya Nishimura<sup>3</sup>

1. Institute for Advanced Research, Nagoya University, 2. Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The San-in Shear Zone (SSZ) is a ~N80°E right-lateral shear zone in southwest Japan with a 30- to 50-km width, where seismic activity and high strain rates have been observed. Although no major active fault is identified in the SSZ, deformation in the area can be modeled by assuming a 5 mm/yr deep creep on a vertical fault with right-lateral motion and conjugate Riedel shears within the shear zone can reconcile the seismotectonics in the area (Nishimura and Takada, 2017). GNSS velocities are well explained by a model having a deep creep on a vertical fault plane, however, it is not clear the extent of the shear zone in the lower crust or how the overall E-W trending right-lateral slip is accommodated by the active faults within it. Thus, we evaluate the width of the shear zone beneath the SSZ utilizing the available GNSS data in the area.

We analyze daily coordinates from continuous GNSS stations in southwest Japan from 1 January 2014 to 31 December 2018. The network is composed by GEONET stations and original stations in the SSZ operated by Kyoto University since December 2014 near the source regions the 2000 Western Tottori and the 2016 Central Tottori earthquakes. Precise daily coordinates for the GNSS sites are calculated with the GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY-OASIS), version 6.2 using the Precise Point Positioning processing strategy with ambiguity resolution (Zumberge et al., 1997; Bertiger et al., 2010).

We utilize the horizontal displacement rates distribution with respect to site 0344 (35.09°N, 134.59°E) for our analysis. Two major earthquakes affected the crustal deformation in the area during the analyzed period: the 2016 Kumamoto earthquakes ( $M_w$  7.0) and the 2016 Central Tottori earthquake ( $M_w$  6.2). Coseismic and postseismic corrections are applied for the perturbed stations.

We estimate the width of the SSZ for Eastern, Central, and Western Tottori by assuming parallel vertical dislocations below 13 km depth (Omuralieva et al., 2012) in the shear zone. Optimized models based on the horizontal displacement along three profiles reveal different widths of the shear zone (i.e., 72 km in Western Tottori, 38km in Central Tottori and 55 km in Eastern Tottori). They suggest that ductile flow in the lower crust is distributed in a channel beneath the SSZ. However, models with a single vertical fault in the middle of the shear zone are within the data 2 sigma confidence interval. Current GNSS network provides a limited contribution to constraining the width of the shear zone in the lower crust.

## GEONETデータ(F3解)に基づいた内陸SSE検出の試み

## Attempt to detect intra-plate SSEs based on GEONET data (F3 solution)

\*田中 優作<sup>1</sup>\*Yusaku Tanaka<sup>1</sup>

1. 東大地震研

1. ERI, UTokyo

スロー地震と呼ばれる、同規模の通常の地震より長い時定数で発生する地震は、その時定数に応じて超低周波地震、低周波地震・微動、スロースリップイベント(SSE)に分けられる。この中でもSSEは最も長い時間スケールで進行し、その観測には主としてGNSSが用いられている。スロー地震データベース(<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>)によれば、SSEは、これまで主にプレート境界で観測されており、内陸での検出例は北海道で観測された事例しかない(池田・日置, 2014, JpGU; Ozono et al., 2015)。プレート境界型のSSEは、例えばプレート境界上にSSEを起こす矩形断層を仮定する事で地上の観測点各々の位置における地殻変動が予測できる上に、ある程度まとまった数の観測点と同じ方向に動く事が期待できる。プレート境界型のSSEは、この予測に従ってシグナルを探す事で検出が可能である。一方、内陸SSEは、発生する断層を仮定する事が困難であり、地殻変動観測点の移動方向の予測も難しく、内陸SSEが浅部で発生した場合はシグナルを捉える観測点の数も限定的なものになる。このような点が、これまで内陸SSEの検出事例がごく限られていた理由である。

そこで本研究では、国土地理院が提供するGNSSデータ(GEONET, F3解)を用いて、下で述べる[手法概略]に沿って日本の地殻変動を包括的に調査し、その他の内陸SSEの検出を試みる。本研究は予稿投稿時点で[手法概略](8)まで進行しており、これまでに内陸SSEの可能性が疑われる数十の地殻変動の検出に成功した。学会講演では、この成果について報告する。

ただし、本研究は地殻変動データにのみ基づいており、検出した地殻変動が内陸SSE起源であると断定することは現時点では不可能である。内陸SSE起源の可能性が非常に高いことを示すためには、今後、例えば同時期における同じ場所での低周波微動の発生の有無などを確認していくことが必要である。

## [手法概略]

(1) 第一に、F3解を利用して日本中の水平方向の地殻変動量の時系列を作成する。この段階では誤差の大きい鉛直方向は使わない。 $(dE)^2 + (dN)^2$ の平方根( $dE$ ,  $dN$ は各々東向き変動量と北向き変動量)を用いる事で、地殻変動の発生方向に依存せずにシグナルが検出できる。

(2) 作成した時系列に対して、一ヶ月幅の移動時間窓を作成し、その時間窓の中で(中央値  $\pm$   $3 \times$  中央絶対偏差)の外側に位置したデータを外れ値として除外する。

(3) F3解の時系列にはアンテナ交換や、地震時の地殻変動、火山活動による地殻変動などによって不連続が含まれる。この不連続は本研究ではノイズとなるため、この補正を行う。まず移動時間窓を作成し、この時間窓を前半と後半に分割する。そして前半と後半の各々に最小二乗法で二次関数をフィッティングする。前半の終端と、後半の始端の値を見積もり、その差を取る。この差が、ある閾値を超えていた場合、その差の分だけ不連続が存在すると見做して、時間窓の後半以降すべてのデータから、その値を差し引く。ただし、これには閾値が大きいと小さな不連続が見逃され、小さいと大きな不連続が上手く補正できないという問題がある。そこ

で大きく設定した閾値を徐々に小さくしながら補正を繰り返し行う。

(4) 不連続を補正した時系列に対し、(2)と同じ方法で、再度、外れ値の除去を行う。

(5)  $\sigma = 10$ 日のガウシアンフィルターを適用し、時系列を平滑化する。

(6) 平滑化した時系列の中で、ジグザグ型の地殻変動が存在する部分を抽出する。

(7) ジグザグ型の地殻変動が抽出された観測点を含む、その近傍5観測点の内、4観測点以上で同時にジグザグ型の地殻変動が抽出された場合、そこで地殻変動を検出したとする。

(8) 検出された地殻変動について、各観測点で東西方向・南北方向・上下方向の地殻変動量を見積もる。

(9) 見積もられた地殻変動を内陸SSEによるものだと仮定し、その地殻変動を説明可能な断層を数値計算で求める。

## 海底圧力計記録に含まれる長周期潮汐成分を考慮した浅部スロースリップによる海底地殻変動の検出

### Detection of seafloor crustal deformation due to shallow SSE using ocean bottom pressure with long-period tidal variability corrections

\*井上 智裕<sup>1</sup>、村本 智也<sup>2</sup>、稲津 大祐<sup>3</sup>、伊藤 喜宏<sup>4</sup>、日野 亮太<sup>5</sup>、太田 和晃<sup>4</sup>、鈴木 秀市<sup>5</sup>

\*Tomohiro Inoue<sup>1</sup>, Tomoya Muramoto<sup>2</sup>, Daisuke Inazu<sup>3</sup>, Yoshihiro Ito<sup>4</sup>, Ryota Hino<sup>5</sup>, Kazuaki Ohta<sup>4</sup>, Syuichi Suzuki<sup>5</sup>

1. 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、3. 東京海洋大学、4. 京都大学防災研究所、5. 東北大学

1. Kyoto University, 2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 3. Tokyo University of Marine Science and Technology, 4. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 5. Tohoku University

近年海底下での地殻変動検出を目的とした海底圧力観測が重要視されている。特に海底下の浅部で発生するスロースリップの変動源の推定に際して、陸上のGNSS観測のみでは不十分であり、直上の海底圧力計が重要な役割を果たす。本研究では深海域に設置された海底圧力計記録に含まれる海洋起源の圧力変動に着目する。特に長周期潮汐成分（周期2日以上）を除去することで浅部スロースリップに伴う、海底の上下変動を精度よく検出する手法について述べる。

海底で観測される水圧は機器直上の海水の量に大きく依存する。海底圧力計は海底の地殻変動（上下動）を高い分解能で観測する一方で、観測される圧力値には直上の気圧や海水量など地殻変動以外の成分も含まれる。海洋起源の圧力変化は、観測される非地殻変動成分の中でもその割合が大きく、潮汐成分および潮汐以外の要因からなる非潮汐成分に分けられる。さらに潮汐成分は短周期の成分（2日未満）と長周期の成分（2日以上、以後「長周期潮汐成分」）が含まれる。本研究で研究対象とするスロースリップに伴う地殻変動（数週間から数ヶ月の変動）の解析では、地殻変動成分と長周期潮汐成分の周波数成分はほぼ一致するため、長周期潮汐成分の除去が不可欠となる。しかしながら、先行研究（Muramoto et al., 2019; Hino et al., 2013など）では観測された圧力値から短周期の潮汐成分と非潮汐成分を取り除いており、長周期潮汐成分は除去していない。

ニュージーランドヒ克蘭ギ沈み込み帯に2014年から2017年の期間に設置された海底圧力計記録を解析に用いた。非潮汐成分の補正には海洋モデル（Inazu et al., 2012）を使用し、長周期潮汐成分の補正にはBAYTAP-L（Tamura et al., 1991）を使用した。その結果、長周期潮汐を観測記録から除去することで、ある観測点では、長周期潮汐を除去する前の圧力値の時系列に比べて標準偏差が10%程度（0.1hPa程度）減少した。議論では、推定された長周期潮汐とモデル計算による長周期潮汐を比較し、推定された値の妥当性を検証する。さらに、長周期潮汐を除去した圧力値を用いて、観測期間に発生したスロースリップ（2015年9月、2016年11月など）に対して、海底地殻変動の推定を行った結果を示す予定である。