

2021年10月14日(木)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

9:00 ~ 10:30 | D会場 D会場

AM-1

座長:仲西 理子(海洋研究開発機構)

9:00 ~ 9:15

[S06-01] 三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

○福島 駿¹、篠原 雅尚²、山田 知朗²、西田 究²、竹尾 明子²、蓬田 清³ (1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学地震研究所、3.北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野)

9:15 ~ 9:30

[S06-02] S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

○利根川 貴志¹、高木 涼太²、澤崎 郁³、汐見 勝彦³ (1.海洋研究開発機構、2.東北大学、3.防災科学技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[S06-03] 2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

○岩崎 貴哉¹、佐藤 比呂志^{2,3}、蔵下 英司²、石毛 宏和⁴、清水 英彦⁴、石山 達也²、飯高 隆²、篠原 雅尚²、川崎 慎治⁴、阿部 進⁴、平田 直^{5,2} (1.地震予知総合研究振興会、2.東京大学地震研究所、3.静岡大学防災総合センター、4.(株)地球科学総合研究所、5.国立研究開発法人防災科学技術研究所)

9:45 ~ 10:00

[S06-04] S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェアアセノスフェア境界

○悪原 岳¹、中東 和夫²、篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、塩原 肇¹、山下 裕亮³、望月 公廣¹、植平 賢司⁴ (1.東京大学地震研究所、2.東京海洋大学、3.京都大学防災研究所、4.防災科学技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S06-05] 地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

○石瀬 素子¹、加藤 愛太郎¹、酒井 慎一¹、中川 茂樹¹、平田 直² (1.東京大学地震研究所、2.防災科学技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S06-06] 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

○松原 誠¹、汐見 勝彦¹、馬場 久紀²、佐藤 比呂志³、西宮 隆仁⁴ (1.防災科学技術研究所、2.東海大学海洋学部海洋地球科学科、3.東京大学地震研究所、4.気象庁気象研究所)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

11:00 ~ 12:15 | D会場 D会場

AM-2

座長:石瀬 素子(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:15

[S06-07] 伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

○本多 亮¹、安部 祐希¹、石瀬 素子²、酒井 慎一^{3,2}、行竹 洋平²、道家 涼介¹ (1.神奈川県温泉地学研究所、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大学院情報学環・学際情報学府)

11:15 ~ 11:30

[S06-08] 南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

○仲西 理子¹、Qin Yanfang¹、Liu Xin¹、藤江 剛¹、汐見 勝彦²、小平 秀一¹、高橋 成実^{1,2}、中村 武史³、富士原 敏也¹ (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所)

11:30 ~ 11:45

[S06-09] 南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

○藤江 剛¹、新井 隆太¹、白石 和也¹、中村 恭之¹、小平 秀一¹、海宝 由佳¹、尾鼻 浩一郎¹、三浦 誠一¹ (1.海洋研究開発機構)

11:45 ~ 12:00

[S06-10] 日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

○新井 隆太¹、三浦 誠一¹、中村 恭之¹、藤江 剛¹、海宝 由佳¹、小平 秀一¹、望月 公廣²、仲田 理映²、沖野 郷子³ (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大気海洋研究所)

12:00 ~ 12:15

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○馬 妍雪¹、仲田 理映¹、望月 公廣¹、三浦 誠一²、中村 恭之²、新井 隆太²、藤江 剛²、海宝 由佳²、小平 秀一² (1.東京大学地震研究所、2.海洋研究開発機構)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

13:30 ~ 14:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:田中 優作(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S06-12] Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

○Chintan Timsina¹、James Mori²、Masumi Yamada² (1.Graduate School of Science, Kyoto University、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

13:45 ~ 14:00

[S06-13] Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

○Admore Phindani MPUANG^{1,2}、Takuo SHIBUTANI² (1.Graduate School of Science, Kyoto University、2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

D会場 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

14:00 ~ 15:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:小林 知勝(国土地理院)、田中 優作(東京大学地震研究所)

14:00 ~ 14:15

[S03-01] 東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

○藤原 智¹ (1.国土地理院)

14:15 ~ 14:30

[S03-02] 能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

○田中 優作¹、鷺谷 威¹ (1.名古屋大学)

14:30 ~ 14:45

[S03-03] 陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

○板場 智史¹、太田 和晃²、長谷川 浩³ (1.産業技術総合研究所、2.防災科学技術研究所、3.気象庁)

14:45 ~ 15:00

[S03-04] 継続時間1時間のスロースリップイベント

○勝間田 明男¹、宮岡 一樹³、露木 貴裕⁵、板場 智史⁴、田中 昌之⁵、伊藤 武男⁶、高森 昭光²、新谷 昌人² (1.富山大学、2.東大地震研究所、3.気象庁、4.産総研、5.気象研究所、6.名古屋大学)

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 9:00 ~ 10:30 | D会場 D会場

AM-1

座長: 仲西 理子(海洋研究開発機構)

9:00 ~ 9:15

[S06-01] 三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

○福島 駿¹、篠原 雅尚²、山田 知朗²、西田 究²、竹尾 明子²、蓬田 清³ (1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野)

9:15 ~ 9:30

[S06-02] S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

○利根川 貴志¹、高木 涼太²、澤崎 郁³、汐見 勝彦³ (1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学、3. 防災科学技術研究所)

9:30 ~ 9:45

[S06-03] 2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

○岩崎 貴哉¹、佐藤 比呂志^{2,3}、蔵下 英司²、石毛 宏和⁴、清水 英彦⁴、石山 達也²、飯高 隆²、篠原 雅尚²、川崎 慎治⁴、阿部 進⁴、平田 直^{5,2} (1. 地震予知総合研究振興会、2. 東京大学地震研究所、3. 静岡大学防災総合センター、4. (株) 地球科学総合研究所、5. 国立研究開発法人防災科学技術研究所)

9:45 ~ 10:00

[S06-04] S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェア・アセノスフェア境界

○悪原 岳¹、中東 和夫²、篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、塩原 肇¹、山下 裕亮³、望月 公廣¹、植平 賢司⁴ (1. 東京大学地震研究所、2. 東京海洋大学、3. 京都大学防災研究所、4. 防災科学技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S06-05] 地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

○石瀬 素子¹、加藤 愛太郎¹、酒井 慎一¹、中川 茂樹¹、平田 直² (1. 東京大学地震研究所、2. 防災科学技術研究所)

10:15 ~ 10:30

[S06-06] 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

○松原 誠¹、汐見 勝彦¹、馬場 久紀²、佐藤 比呂志³、西宮 隆仁⁴ (1. 防災科学技術研究所、2. 東海大学海洋学部 海洋地球科学科、3. 東京大学地震研究所、4. 気象庁気象研究所)

三陸沖光ケーブル観測システムのDistributed Acoustic Sensingデータを用いたレイリー波位相速度の計測

Rayleigh wave phase velocity estimated from Distributed Acoustic Sensing records using seafloor optical fiber cable system off Sanriku

*福島 駿¹、篠原 雅尚²、山田 知朗²、西田 究²、竹尾 明子²、蓬田 清³

*Shun FUKUSHIMA¹, Masanao SHINOHARA², Tomoaki YAMADA², Kiwamu NISHIDA², Akiko TAKEO², Kiyoshi YOMOGIDA³

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 東京大学地震研究所、3. 北海道大学 理学院 自然史科学専攻 地球惑星ダイナミクス分野

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences

近年、光ファイバをセンサとして、歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）。東京大学地震研究所では、三陸沖に設置した光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用して、DAS観測を行なってきた。Spica et al. (2020) では、このDAS観測データから短周期（周期2秒以下）レイリー波の位相速度を計測し、深さ約3kmまでの堆積層のS波速度構造を推定している。観測システムが敷設されている三陸沖は2011年東北沖地震の震源域北部に位置し、また、深さ約50kmのプレート境界で繰り返し地震の発生が報告されている（e.g., Matsuzawa et al., 2002）。この領域での地震発生様式の理解には、高分解能な島弧側上側プレートの構造が必要である。そこで、DAS観測データに対して地震波干渉法を適用し、プレート境界付近の深さまで感度を有する周期10秒程度までの表面波位相速度の推定を試みた。

本研究では、堆積層及び、島弧側上部地殻構造の地震波速度構造の高分解能推定を目指し、DASデータに対して地震波干渉法を用いて表面波の抽出を行い、frequency – wavenumber法（F-K法）を用いて周期10秒程度までの位相速度推定を行った。本研究で利用したデータは、2020年2月に行われた観測のうち、約12時間のDASデータである。このDASデータは観測点間隔が約5mで、最大観測距離が約100km、約20000チャンネルで構成される。

図1は、仮想震源を10000チャンネルとし、観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた2点間距離ごとの波形群を示す。DAS観測点は非常に密に配置されているため、地震波干渉法をDASデータに適用した場合、従来の海底地震計と比較し、短時間のデータでSN比の良い表面波が抽出できることが分かった。もっとも顕著な波群はレイリー波と考えられる。DASはケーブル方向の歪み速度成分を記録するので、ケーブル方向に伝播するradial成分に感度が高いため、通常地震計よりも地震波干渉法によって、レイリー波が選択的に検出できると考える。

図2は図1のレイリー波に対してF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線である。図2中の実線は、光ファイバ近傍で行われた制御震源探索から得られたP波速度(Takahashi et al., 2004)のモデルに対して、Disper80 (Saito 1988) により計算したレイリー波の基本モード位相速度である。ここで、密度とS波速度はBrocher (2005) の経験式を使用しP波速度から計算した。また、破線は基準モデルから堆積層のみS波速度を±20%としたモデルのレイリー波の理論分散曲線である。その結果、このモデルから得られる分散曲線が、解析した範囲で信号がもっとも大きな基本・1次モードでそれぞれ周期9秒と5秒までよく一致する。

以上より地震波干渉法をDASデータに応用することで、12時間の観測データで周期約9秒程度までの表面波位相速度を推定できた。DASアレイの場合、様々な大きさのアレイサイズに対してFK法を適用することができるので、対象となる周期・波長に合わせてアレイサイズを変えて位相速度を測定することができ、高分解能かつ高精度な測定が期待される。今後、DASデータから得られた位相速度から速度構造を求めることで、従来

よりも空間的に分解能が高い島弧側上部地殻地震波速度の推定をめざす。

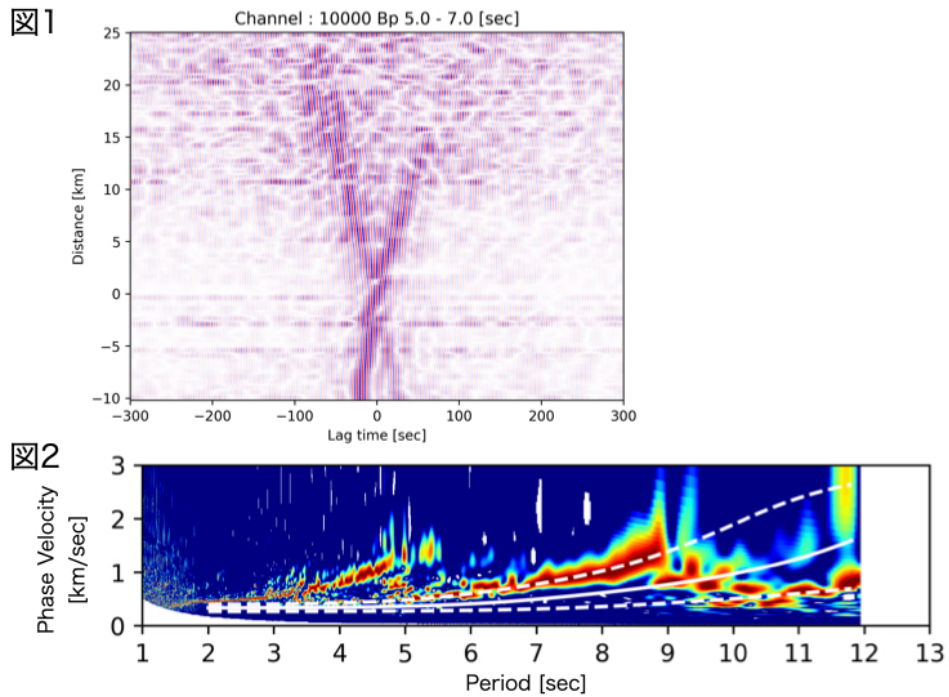


図1: 仮想震源10000と観測点8000-15000チャンネルペアに対し地震波干渉法を適用し得られた表面波、周期5~7秒のband-pass filterを適用。

図2: 図1の表面波にF-K法を適用し得られた位相速度の分散曲線。実線は、Takahashi et al., 2004により得られたP波速度を基準モデルとして計算したレイリー波の基本モード位相速度を示し、破線は基準モデルから堆積層のみ+20%したモデルの位相速度を示す。

S-net連続記録で捉えた東北沖における上盤浅部構造の時間変化

Temporal variation of seismic velocity structure at the top of the overriding plate off Tohoku region derived from the continuous records of S-net

*利根川 貴志¹、高木 涼太²、澤崎 郁³、汐見 勝彦³

*Takashi Tonegawa¹, Ryota Takagi², Kaoru Sawazaki³, Katsuhiko Shiomi³

1. 海洋研究開発機構、2. 東北大学、3. 防災科学技術研究所

1. JAMSTEC, 2. Tohoku Univ., 3. NIED

常時ノイズ記録に地震波干渉法を適用して二点間を伝播する波動場を抽出し、その波動場の時間的な変化を抽出することで、構造の時間的な変化を調べることが可能である。このような研究を実施するためには長期間観測された連続記録が必要であるため、海域ではそれほど実施されてこなかった。しかし、近年、海域でも定常観測網が設置され、海底下の構造の時間変化を抽出する研究例が南海トラフで報告されるようになった（例えば、Ikeda and Tsuji, 2018; Tonegawa et al. 2020, JpGU）。また、日本地球惑星科学連合2021年大会ではS-net記録を用いた構造の時間変化を発表し（Tonegawa et al. 2021, JpGU）、東北沖の海溝軸付近で浅部の地震波速度が少しずつ速くなっていることを報告した（データは2020年6月末まで）。本研究では、そのデータ使用期間を2021年6月末まで延長し、2021年に東北沖で発生した3つの地震（2月福島県沖地震：Mw7.1, 3月宮城県沖地震：Mw7.0, 5月宮城県沖地震：Mw6.95）に伴う変化も抽出したので報告する。連続記録の期間は2016年6月～2021年6月で、観測点は海溝より陸側の観測点を使用した（ただし、S6ケーブルの観測点は除く）。連続記録の3成分波形はTakagi et al. (2019)の方法を用いて合成した。相互相関関数はスペクトルホワイトニングを行い、0.5-1.0 Hzの帯域で計算した。このとき、機器ノイズを除去するため、1時間分の連続記録と次の1時間分の連続記録の差分波形を用いて相互相関関数を計算した（Takagi et al. 2021）。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用いた（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）。結果では、海溝軸に近い（海側）観測点では少しずつ速度が上昇することが検出され、その一方で、陸に近い（陸側）観測点ではそのような上昇はあまり顕著ではなかった。海側観測点では4.5年で0.3-0.4%ほど速度が上昇し、その後、2021年の地震によって0.4%ほど低下した。S-netの観測開始以来、海側観測点では、2016年福島県沖地震（M7.4、深さ25 km、正断層）のときも含めて大きな地震による速度構造の変化を検出したことがなかったため、今回が初めての観測例となる。また、もちろん陸側観測点でも、震源により近い場合、この2021年のイベントによる速度減少を検出できた。

Data citation S-net: doi:10.17598/NIED.0007

2019年海陸統合地震探査による東北日本弧中部の地殻・上部マントル構造

The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling

*岩崎 貴哉¹、佐藤 比呂志^{2,3}、蔵下 英司²、石毛 宏和⁴、清水 英彦⁴、石山 達也²、飯高 隆²、篠原 雅尚²、川崎 慎治⁴、阿部 進⁴、平田 直^{5,2}

*Takaya IWASAKI¹, Hiroshi Sato^{2,3}, Eiji Kurashimo², Hirokazu Ishige⁴, Hidehiko Shimizu⁴, Tatsuya Ishiyama², Takashi Iidaka², Masanao Shinohara², Shinji Kawasaki⁴, Susumu Abe⁴, Naoshi Hirata^{5,2}

1. 地震予知総合研究振興会、2. 東京大学地震研究所、3. 静岡大学防災総合センター、4. (株)地球科学総合研究所、5. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 4. JGI, Inc., 5. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

In 2019, an extensive onshore-offshore seismic expedition was undertaken from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). This expedition was supported by several funds from MEXTs' projects of "Integrated Research Project on Seismic and Tsunami Hazards around the Sea of Japan" and "2nd Earthquake and Volcano Hazards Observation and Research Program", and from ERI, the University of Tokyo. The onshore seismic line in the NE Japan Arc was laid out from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast, crossing the Dewa Hills, Shinjo Basin, Ou Backbone Range and Kitakami River Valley from west to east. The total length of the profile is about 155 km, on which 1,667 receivers were set to record 24 large energy shots. As seismic sources, we used explosives at 3 shot points and 4 vibroseis trucks with 150 stationary sweeps at the other 21 points.

The preliminary results beneath the onshore line and offshore part of the Pacific side were presented by tomography analyses (Sato et al, 2020a, b, Kurashimo et al., 2021) and ray-tracing technique (Iwasaki et al., 2021). In the present paper, we proceed to model the whole crust and uppermost mantle under the onshore profile from the combined interpretation on tomography and ray-tracing analyses. For the travel-time analysis, we carefully reconstructed the travel time data both for first arrivals and later phases. In the modelling for the crooked part of the onshore profile, "the distance correction" was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the inadequateness of the simple 2D ray-tracing. Deeper structures of the middle/lower crust and uppermost mantle were constructed from travel times of first arrivals and later phases both from land and air-gun shots.

The features of the obtained velocity model were summarized as follows;

(1) The uppermost part of the crust is composed of 4 layers of V_p = 1.6-2.0, 1.8-3.5, 3.7-5.0 and 4.5-5.5 km/s, respectively, representing sedimentary and volcanoclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line. Actually, their total thickness is 2-5 km in the western and middle parts of the onshore profile, but only 0.5 km beneath its eastern edge. Such structural undulation is well

correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region, representing successive tectonic processes in the NE Japan arc since Miocene.

(2) The crystalline part of the upper crust has a velocity of 5.8-6.1 km/s, which was underlain by the middle crust with V_p of 6.3-6.4 km/s. The thicknesses of the upper and middle crusts are 5-9 and 5-7 km, respectively.

(3) The lower crust with a velocity of 6.5-7.1 km/s is situated in a depth range of 15-30~32 km. This part is composed of 2 or 3 parts and considered to be reflective. Its reflective property, however, shows regional change both in horizontal and vertical directions. The seismic activity in the lower crust is considerably low as compared with those of the upper/middle crust. The velocity in the lowermost part may exceed 7.0 km/s.

(4) The Moho depth is around 30-32 km, beneath which the upper mantle velocity is estimated to be about 7.7 km/s. These characteristics are rather well constrained both from the onshore-offshore tomography and ray-tracing analysis of the onshore line.

References

Iwasaki et al., 2021. The upper crustal structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, JpGU Meeting, SCG49-05.

Kurashimo et al., 2021. Seismic structure from the forearc region off Miyagi to the central part of Northern Honshu arc, Japan, revealed by onshore-offshore seismic experiment. submitted to 2021 JpGU Meeting, SCG49-04.

Sato et al., 2020a. Seismic transect across the central part of Northern Honshu, Japan, 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.

Sato et al., 2020b. Deep seismic reflection profiling across the Shonai and Shinjo basins, northern Honshu, Japan, 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

S波レシーバ関数解析から推測される日本海下のリソスフェア―アセノスフェア境界

Lithosphere–asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S receiver functions

*悪原 岳¹、中東 和夫²、篠原 雅尚¹、山田 知朗¹、塩原 肇¹、山下 裕亮³、望月 公廣¹、植平 賢司⁴

*Takeshi AKUHARA¹, Kazuo Nakahigashi², Masanao Shinohara¹, Tomoaki Yamada¹, Hajime Shiobara¹, Yusuke Yamashita³, Kimihiro Mochizuki¹, Kenji Uehira⁴

1. 東京大学地震研究所、2. 東京海洋大学、3. 京都大学防災研究所、4. 防災科学技術研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Tokyo University of Marine Science and Technology, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The evolution history of the Sea of Japan back-arc basin remains under debate, involving the opening of sub-basins such as the Japan and Yamato Basins. Detailed knowledge of the lithospheric structure will provide the key to understanding tectonic history. This study identifies the lithosphere–asthenosphere boundary (LAB) beneath the Sea of Japan back-arc basin using S-receiver functions (S-RFs). The study area, including the Japan and Yamato Basins, has been instrumented with broadband ocean-bottom seismometers (OBSs). S-RFs from these OBSs show negative Sp phases preceding the direct S arrivals, suggesting the LAB. The S-RFs also show abnormally reduced amplitudes. For further qualitative interpretation of these findings, we conduct transdimensional Bayesian inversion for S-wave velocity models. This less-subjective Bayesian approach clarifies that the low-velocity seafloor sediments and damped deconvolution contribute to the amplitude reduction, illuminating the necessity of such considerations for similar receiver function works. Inverted velocity structures show a sharp velocity decrease at the mantle depths, which we consider the LAB. The obtained LAB depths vary among sites: ~45 km beneath the Japan and Yamato Basins and ~70 km beneath the Yamato Rise, a bathymetric high between the two basins. The thick lithosphere beneath the Yamato Rise most likely reflects its continental origin. However, the thickness is still thin compared to that of eastern Asia, suggesting lithosphere extension by rifting. Notably, the Japan and Yamato Basins show a comparable lithospheric thickness, although the crustal thickness beneath the Yamato Basin is known to be anomalously thick. This consistency in the lithospheric thickness implies that both basins undergo similar back-arc opening processes.

地震波異方性に基づく首都圏下のPHSスラブ構造についての新たな解釈

A New PHS slab Model beneath the Tokyo Metropolitan Area Based on 3-D P-wave

*石瀬 素子¹、加藤 愛太郎¹、酒井 慎一¹、中川 茂樹¹、平田 直²

*Motoko ISHISE¹, Aitaro Kato¹, Shin'ichi Sakai¹, Shigeki Nakagawa¹, Naoshi Hirata²

1. 東京大学地震研究所、2. 防災科学技術研究所

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

■はじめに

首都圏とその周辺域では、伊豆弧のオホーツク/北米プレートへの衝突、相模トラフからのフィリピン海プレート東端部の沈み込み、日本海溝からの太平洋プレートの沈み込み、そして相模トラフから沈み込んだフィリピン海スラブ東端部と日本海溝から沈み込んだ太平洋スラブの相互作用（近接～接触）といった、地球上まれに見る多様なテクトニクスが展開されている。この一帯では非常に活発で多様な地震活動が見られ、歴史的に様々なタイプの大地震に見舞われてきていることが知られている。また、近い将来においても、プレートの沈み込みに伴うM7程度の地震の発生確率が非常に高いとされている（地震調査委員会、2014）。このようなテクトニクスと地震活動を解明すべく、1980年代から地震活動と3次元地震波速度構造解析研究が精力的に進められ、複数の構造モデルが提案されてきている（中村・島崎、1981；野口、1985；笠原、1985；Ishida, 1992；Nakajima et al., 2009；酒井、2012など）。しかし、既往研究が示すフィリピン海スラブ上面の形状・深さ、およびフィリピン海スラブの北東端の位置と形状は、モデルによって大きく異なっている。そこで本研究では、これまで注目されてこなかった「地震波異方性」の観点から、首都圏下のプレート構造を求めその解釈を行う。

■データと解析方法

解析に使用した地震は、2010年～2013年に関東地方で発生したM3以上の1877地震であり、これらの地震の初動P波到達時刻をデータとした異方性トモグラフィー解析（Ishise et al., 2015）を実施した。観測点は、高感度地震観測網および首都圏に密に配備された首都圏地震観測網（MeSO-net）であり、観測点数はそれぞれ294点と296点で、合計500点である。なお、到達時刻は、防災科研で作成されたマニュアルピックの初動P波到達時刻データ（441,170個）を使用した。

■等方性構造の特徴

異方性を考慮したトモグラフィー解析で得られた等方性構造の特徴は、概して既往の等方性トモグラフィー研究（例えばNakajima et al., 2009）によるものと調和的であった。一方で、MeSO-netのデータを用いたことで浅部の構造の分解能が格段に向上し、これまでは明らかでなかった構造を検出することができた。例えば、深さ20km以浅において、東西方向に伸びるいくつかの帯状の構造が得られた。これらは、関東平野の下に存在すると推定されている古い付加体の分布とよく対応している。帯状構造の深さ変化を追跡することで、付加体の深部構造についての知見が得られると期待される。

■異方性構造の解釈

得られた異方性の方向の特徴から、大陸地殻の異方性（R1）、海洋性地殻の異方性（R2）、スラブマンタルの低速度異常領域の異方性（R3）、大陸マンタルの異方性（R4）、スラブマンタルの高速度異常領域の異方性（H）を定義した（Ishise et al., 2021 JGR）。

R1, R2, R3, R4, Hの異方性の方向は、それぞれWNW-ESE, NW-SE, NS, WNW-ESE, NSで特徴付け

られ、これらは大陸プレートの縁辺部に形成された付加体の走向方向、相模トラフの走向、地震メカニズムで卓越した断層面の走向、太平洋プレートの沈み込み方向、地震メカニズムで卓越した断層面の走向と一致しており、R1は付加体の層構造、R2はプレートbendingによる亀裂の配列、R3とHはスラブマントル内の弱面の配列、マントル物質の結晶格子選択配向に起因した異方性であると推定される。

■首都圏下のフィリピン海スラブについての新たな知見

上記の解釈を用いることで、フィリピン海プレートの構造について次の新たな知見が得られた。

(1) 北緯35.7-36度付近で東西方向に伸びる一連の低速度異常領域は、これまでは蛇紋岩化したマントルウェッジ (Kamiya and Kobayashi, 2000) や大陸地殻とマントルウェッジ (Nakajima et al., 2009) と解釈されてきた。しかし、本研究で得られた異方性構造から、この低速度異常領域は、大陸プレート、フィリピン海プレートの海洋性地殻、大陸プレートのマントルで構成されていることがわかった。その結果フィリピン海プレートの北東端は、既往研究 (Uchida et al., 2009) による北東端と比べて南側に位置する可能性が示された。

(2) 房総半島に分布する南北方向に伸びた深さ20km以深の低速度異常領域は、これまでは大陸プレートの地殻深部構造として解釈されてきた。しかし、本研究で得られた異方性構造から、スラブマントル内の低速度異常領域であることが新たに示された。

その結果、フィリピン海プレートの上面深さが既往のモデルと比べ浅くなった。

駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状

Improved configuration of subducting Philippine Sea Plate from the Suruga Trough beneath the Tokai region, central Japan

*松原 誠¹、汐見 勝彦¹、馬場 久紀²、佐藤 比呂志³、西宮 隆仁⁴

*Makoto MATSUBARA¹, Katsuhiko Shiomi¹, Hsatoshi Baba², Hiroshi Sato³, Takahito Nishimiya⁴

1. 防災科学技術研究所、2. 東海大学海洋学部海洋地球科学科、3. 東京大学地震研究所、4. 気象庁気象研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Marine and Earth Science, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートとユーラシアプレートとの境界では、海溝型巨大地震が繰り返し発生してきた。巨大地震に伴う強震動予測やプレート間での固着状況を解明するためには、沈み込むフィリピン海プレートの高精度な形状を明らかにしていく必要がある。本研究では、防災科学技術研究所(防災科研)の高感度地震観測網(Hi-net)や気象庁、大学等の定常観測網に加えて海底の臨時観測点で得られたデータを合わせて解析した地震波トモグラフィーの結果や、微小地震の震源分布、低角逆断層型の地震の分布等を考慮して、フィリピン海プレート上面の形状を推定するとともにレシーバー関数解析も行い、その結果と比較した。

2. データ・手法

解析領域は駿河湾や東海地域を覆う東経136°-139°および北緯34°-36°である。陸域の定常観測網のデータと東海大学や気象研究所等により駿河湾内に設置された臨時海底地震計のデータを合わせて用いた。陸域定常観測網では2000年10月から2017年12月まで97,369個の地震を捉えていた。その中から、水平0.01°(約1km)四方、深さ1kmの領域から読取数最大の地震を1個ずつ、36,632個の地震を解析に用いた。2018年1~8月に行われた海底観測点のデータから得られた、定常観測網ではトリガーされない228個の微小地震を解析に用いた。海底地震計により捉えられた地震については定常観測網の連続データから切り出したデータと合わせて再読取りを行った。さらに、陸域で実施された4発の人工地震探査からの到達時刻データも用いた。36,632個の地震からの1,573,094個のP波、1,532,330個のS波、4発の人工地震探査からの92個のP波、228個の地震からの3,958個のP波、4,809個のS波の到達時刻データを解析に用いた。

地震波速度構造解析には、Zhao et al. (1992)の手法にスムージングや観測点補正値を導入した地震波トモグラフィー法(Matsubara et al., 2004; 2005)を用いた。水平方向に0.05°(約5km)間隔、深さ方向に2.5~30km間隔で三次元的にグリッドを配置した。初期速度構造は防災科研Hi-netにおける震源決定に用いられている一次元速度構造(鶴川・他, 1984)を用いた。

レシーバー関数解析は、速度不連続面の検出に有効な手法である。116個の地震を解析に用いた。観測機器の方向補正を行い(汐見, 2013)、周波数領域でのレシーバー関数解析を行った(Park and Levin, 2000)。時間領域における深さ変換には、本解析で得られた三次元地震波速度構造を用いた。

3. 結果と議論

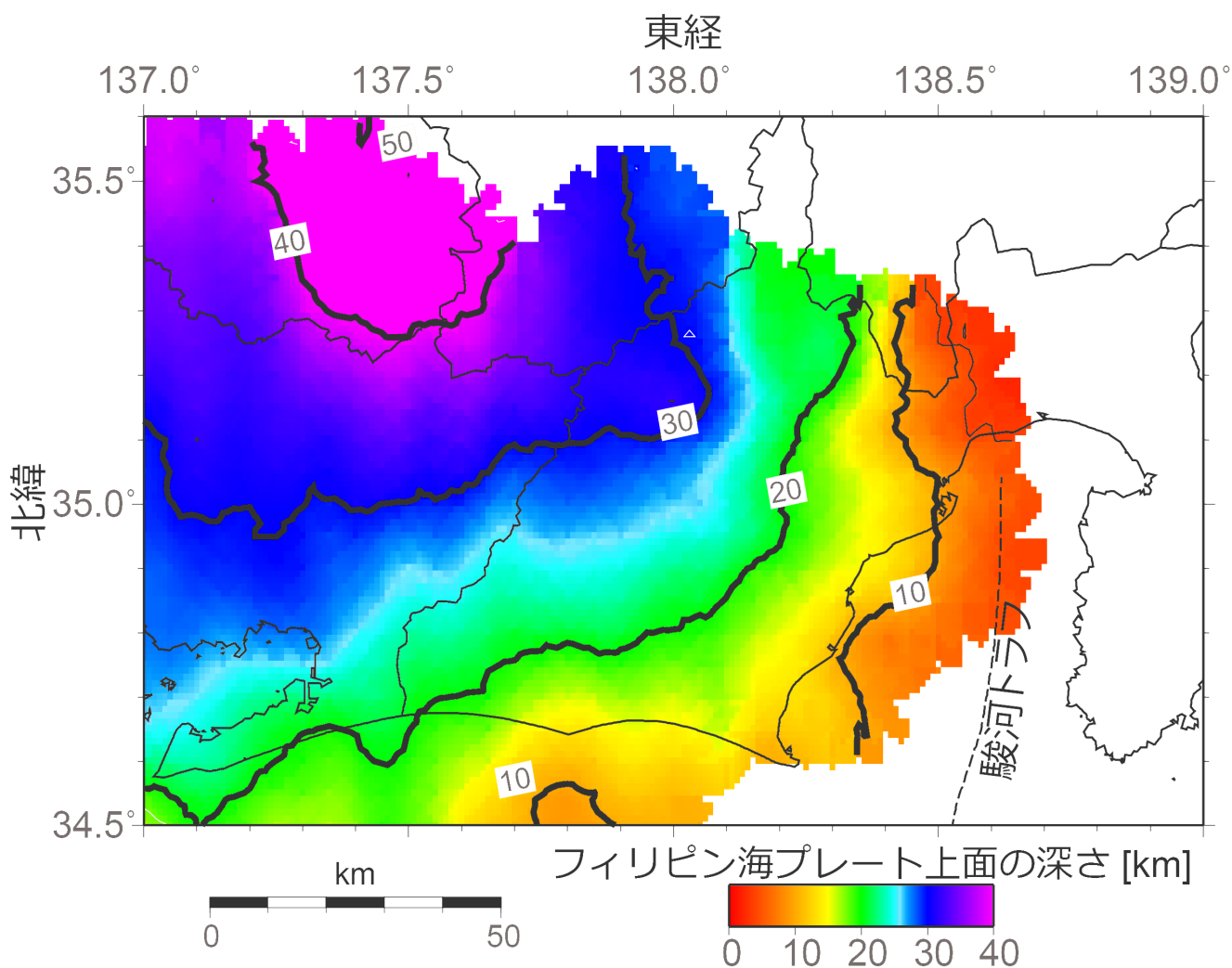
日本全体の解析では、水平方向の分解能は0.2°であるが(Matsubara et al., 2019)、チェッカーボードテストの結果、多くの観測点が存在し多くの地震が発生する東海地域では水平方向に0.1°の分解能があることが分かった。海域の臨時観測点のデータを活用したことにより、海域下の深さ5kmや10kmの浅い領域の解像度が向上した。

水平断面図を見ると深さ10kmや20kmでは中央構造線の北側の高速度域と南側の低速度域が明瞭にイメージ

ングされた。西南日本では中央構造線は緩やかな北傾斜であるが、東海地域では急傾斜となっている。これは、伊豆弧衝突帯でのフィリピン海プレートの浮揚性沈み込みにより上盤側のユーラシアプレートの隆起運動を伴う短縮変形により生じたものである。Kano et al. (1990)では水平回転が議論されたが、本解析ではフィリピン海プレートの衝突による上盤のユーラシアプレートの三次元的な変形がイメージングされた。

鉛直断面図では、沈み込むフィリピン海プレートの低速度かつ高Vp/Vsな海洋地殻と低Vp/Vsな海洋マントルがイメージングされた。この海洋地殻の結果や微小地震の震源分布、プレート境界で発生していると考えられる低角逆断層型の地震の分布からフィリピン海プレート上面境界を構築した。この形状はレーシーバー関数法による結果と調和的であった。駿河トラフから沈み込むフィリピン海プレートは深さ20km程度までが既往のモデルより沈み込む角度が緩やかになり、上面の深さは6-10km程度浅くなった。特に深さ10kmの等深線の位置は5~10km程度西側になった。また、深さ10kmや20kmの等深線の位置は静岡県三保半島から山梨県にかけての陸域下では5~20km程度西になった。定常観測点と臨時海底地震計を組み合わせることにより、プレート境界を交差する波線を用いた解析ができるようになり、浅い沈み込み帯の形状が明らかになった。

Matsubara, M., Shiomi, K., Baba, H., Sato, H., & Nishimiya T. (2021). Improved geometry of the subducting Philippine Sea plate beneath the Suruga Trough. *Global and Planetary Change*, 204, 2021, 103562, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103562>



D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 11:00 ~ 12:15 | D会場 D会場

AM-2

座長:石瀬 素子(東京大学地震研究所)

11:00 ~ 11:15

[S06-07] 伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

○本多 亮¹、安部 祐希¹、石瀬 素子²、酒井 慎一^{3,2}、行竹 洋平²、道家 涼介¹ (1.神奈川県温泉地学研究所、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大学院情報学環・学際情報学府)

11:15 ~ 11:30

[S06-08] 南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

○仲西 理子¹、Qin Yanfang¹、Liu Xin¹、藤江 剛¹、汐見 勝彦²、小平 秀一¹、高橋 成実^{1,2}、中村 武史³、富士原 敏也¹ (1.海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2.防災科学技術研究所、3.電力中央研究所)

11:30 ~ 11:45

[S06-09] 南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

○藤江 剛¹、新井 隆太¹、白石 和也¹、中村 恭之¹、小平 秀一¹、海宝 由佳¹、尾鼻 浩一郎¹、三浦 誠一¹ (1.海洋研究開発機構)

11:45 ~ 12:00

[S06-10] 日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

○新井 隆太¹、三浦 誠一¹、中村 恭之¹、藤江 剛¹、海宝 由佳¹、小平 秀一¹、望月 公廣²、仲田 理映²、沖野 郷子³ (1.海洋研究開発機構、2.東京大学地震研究所、3.東京大学大気海洋研究所)

12:00 ~ 12:15

[S06-11] High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

○馬 妍雪¹、仲田 理映¹、望月 公廣¹、三浦 誠一²、中村 恭之²、新井 隆太²、藤江 剛²、海宝 由佳²、小平 秀一² (1.東京大学地震研究所、2.海洋研究開発機構)

伊豆衝突帯とその周辺におけるフィリピン海プレートおよびスラブの地殻の厚さ

Crustal thickness of the Philippine Sea plate and slab in and around the Izu collision zone, Japan

*本多 亮¹、安部 祐希¹、石瀬 素子²、酒井 慎一^{3,2}、行竹 洋平²、道家 涼介¹

*Ryou HONDA¹, Yuki Abe¹, Motoko Ishise², Shin'ichi Sakai^{3,2}, Yohei Yukutake², Ryosuke Doke¹

1. 神奈川県温泉地学研究所、2. 東京大学地震研究所、3. 東京大学大学院情報学環・学際情報学府

1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

はじめに

フィリピン海プレートはその北縁で大陸プレートに対し年間3 - 4 cmの速度で収束しており、南海トラフや相模トラフでは大陸プレートに対して沈み込んでいる。そのため、伊豆半島の東では関東地震が発生し、西では東海地震が発生する。一方、伊豆半島の付け根付近の伊豆衝突帯では、下部地殻は沈み込んでいるが上部地殻などは衝突し、浮揚性沈み込みが起きているため、周辺とは異なる地殻活動が生じている。伊豆衝突帯のプレートの収束様式や地震活動などは、伊豆島弧の地殻の厚さや物性によって大きく影響を受けていると考えられるが、その空間的な分布は未解明である。これまでに伊豆衝突帯を含む領域でレシーバ関数による構造解析が行われた(Kinoshita et al., 2015, J. Geophys. Res.)がフィリピン海プレート及びスラブのモホ面の3次元形状は推定されていない。そこで本研究では、レシーバ関数解析と地震波トモグラフィにより得られた結果からモホ面や地殻の形状を3次的に捉え、この領域での地震活動との関係について考察した。

モホ面の探索

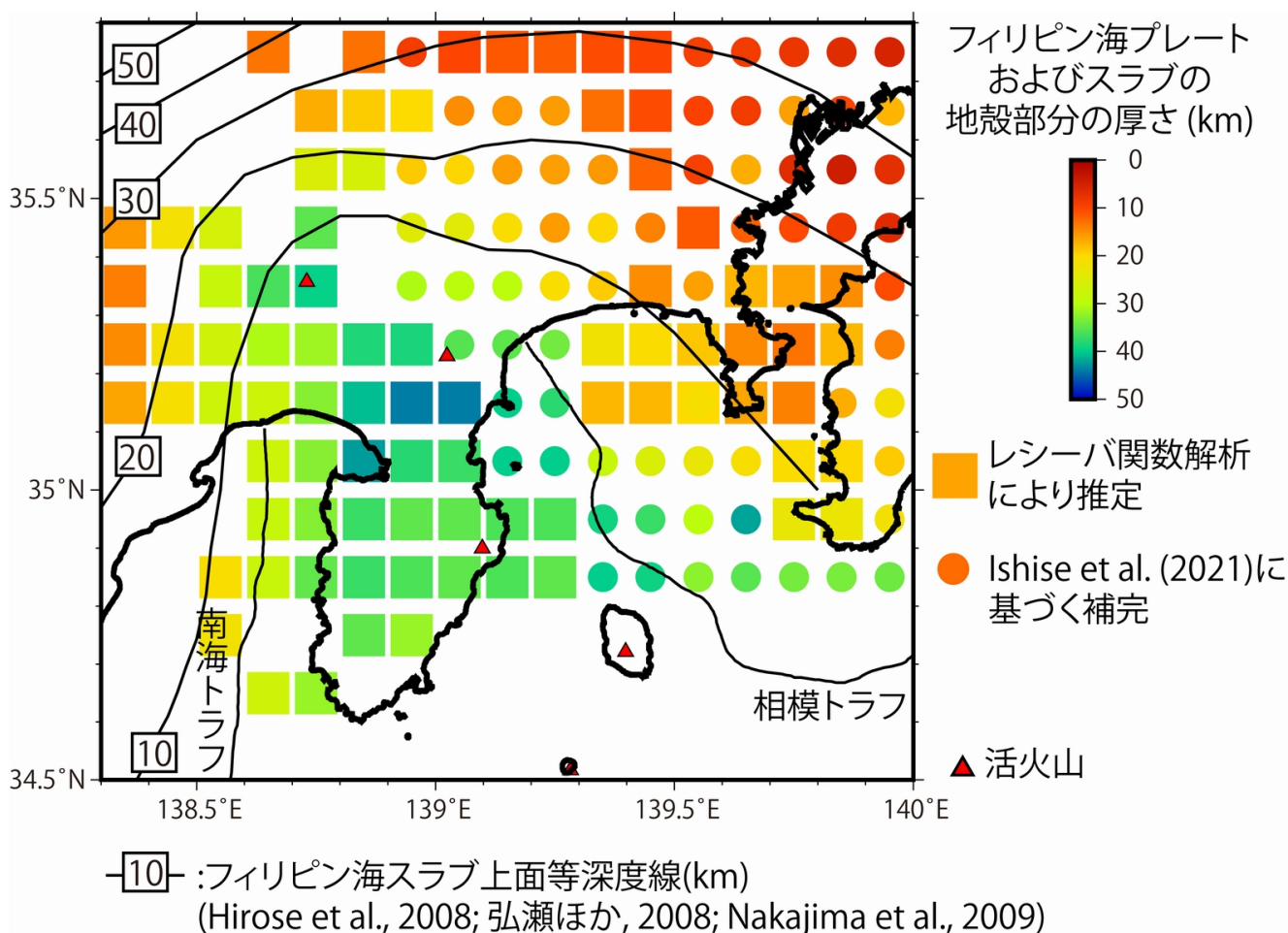
2007年から2017年までの期間に神奈川県とその周辺地域の観測点で得られた遠地震(震央距離30-90、M6以上)の波形から、P波レシーバ関数とS波レシーバ関数を作成した。レシーバ関数は、時間拡張型マルチテーパ(Shibutani et al., 2008, Bull. Seismol. Soc. Am.)を用いて作成し、Matsubara et al. (2019, InTech Open)の3次元地震波速度分布と防災科学技術研究所の浅部・深部統合地盤モデルを仮定して深さ変換し空間的に平均した。その結果、解析領域の広範囲の深さ20 - 60 kmに不連続面の存在が示された。この不連続面は、これまでに推定されているフィリピン海スラブ上面(Hirose et al., 2008, J. Geophys. Res.; 弘瀬ほか, 2008, 地震; Nakajima et al., 2009, J. Geophys. Res.)に比べて深くモホ面と解釈するのが妥当である。ただし、原因については断定できていないが、丹沢山地付近ではモホ面に対応するレシーバ関数のピークが検出できなかった。そこで、丹沢山地付近のモホ面深度を別のデータを用いて補完することを試みた。Kodaira et al. (2007, J. Geophys. Res.)が人工地震探査データから推定した伊豆島弧の速度構造では、地殻の底部のP波速度が7.5 km/s程度である。それを参考に、Ishise et al. (2021, J. Geophys. Res.)が地震波トモグラフィにより推定したモデルからP波速度7.5 km/sの等速度面の深度分布を抜き出したところ、その分布はレシーバ関数で検出したモホ面の分布とおおよそ一致した。このことからその等速度面がこの地域のモホ面深度の指標になると判断し、レシーバ関数でモホ面が検出できなかった領域をその等速度面で補完した。

地殻の厚さ分布

上述の先行研究により推定されたフィリピン海スラブ上面の深度分布を考慮してフィリピン海スラブの地殻の厚さの分布を推定した。その結果、地殻は伊豆半島と富士山、箱根火山付近の直下では35 km以上の厚さを持ち、その領域から遠ざかるにつれて薄くなるように分布することが分かった(図)。伊豆島の北西延長ではスラ

ブ内の地震活動は不活発であるが、相模トラフとその北西延長に沿う領域の周辺ではやや活発な地震活動があり、その中でも丹沢山地東部ではスラブの沈み込みと整合的なメカニズムの震源が分布する(Yukutake et al., 2012, Earth Planets Space)。またその領域は、剪断歪の集中域(Doke et al., 2020, Geol. Soc. Spec. Publ.)に近接し、さらに1923年関東地震のアスペリティの西端近傍でもある。つまり相模トラフとその北西延長に沿う領域付近では歪、応力、プレート境界のカップリング強度の空間変化が大きい。本研究で推定した地殻の厚さには、相模トラフとその北西延長を挟んで南西側から北東側へ厚さが20 km以上減少する、という特徴がある。地殻の厚さが急変する領域には、地殻を構成する岩石の組成や密度・浮力などの空間変化の存在が示唆され、それが歪、応力、カップリング強度の分布に影響を与えて収束様式を変化させる原因になっていると考えられる。

謝辞 防災科学技術研究所、東京大学、気象庁の地震波形データを使用させていただきました。本研究の一部は、首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクトの助成を受けて実施いたしました。記して感謝いたします。



南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築

Constructing a 3D seismic velocity and density model of the Nankai Trough

*仲西 理子¹、Qin Yanfang¹、Liu Xin¹、藤江 剛¹、汐見 勝彦²、小平 秀一¹、高橋 成実^{1,2}、中村 武史³、富士原 敏也¹

*Ayako NAKANISHI¹, Yanfang Qin¹, Xin Liu¹, Gou Fujie¹, Katsuhiko Shiomi², Shuichi Kodaira¹, Narumi Takahashi^{1,2}, Takeshi Nakamura³, Toshiya Fujiwara¹

1. 海洋研究開発機構 海域地震火山部門、2. 防災科学技術研究所、3. 電力中央研究所

1. JAMSTEC, 2. NIED, 3. CRIEPI

南海トラフ巨大地震震源域における地震・津波ハザード評価、強震動予測、高精度震源決定などに用いる地下構造標準化の試みとして、沈み込むフィリピン海プレートの形状を含む3次元地震波速度構造モデルが提案された(Nakanishi et al., 2018)。このモデルは、主に、屈折法地震探査により推定された地震波速度構造に基づくものであるが、海域における震源決定、海域で発生する地震による陸域の地震動（特に長周期地震動）の予測や地震発生シミュレーションの信頼性の向上のためには、3次元構造モデルの高精細化のみならず、S波速度構造、密度構造を反映する必要がある。しかし、現時点では、地震探査においてS波を射出可能な制御震源の活用が困難であり、海域におけるS波速度構造の詳細な把握の事例は限られている（例えばTakahashi et al., 2002）。密度についても掘削調査による局所的な情報に限られており、空間的な構造は把握できていない。本研究では、屈折法地震探査に限らず、反射法地震探査や自然地震トモグラフィー、表面波の解析などから成果として得られる様々な地震波速度情報を統合した3次元地震波速度構造モデルとこれに基づく3次元密度構造モデルの構築を目指す。モデルの構築にあたってS波速度と密度の情報が現段階では十分ではないため、最初に、既存の3次元P波速度構造から、経験式（例えば、Brocher, 2005、Ludwig et al., 1970）によってS波速度や密度に変換することとした。提案されている様々な経験式の中から、南海トラフ域に適用できるものについて整理し、これまでに、地殻最浅部の堆積層とそれ以下の深部の構造について、それぞれ別の変換式を適用した構造モデルを作成した。今後、付加体と沈み込むプレート側の構造を構成する岩石の性質との関連を考慮して、各地層区分に対する変換式の適用を検討するとともに、調査観測の成果から得られたS波速度情報や地震調査および重力データとの比較等による変換式の検証方法の検討を進める。

本研究は、文部科学省による科学技術試験研究委託事業「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」の一環として実施している。また、本研究の一部は、JSPS科研費JP19H01982の助成を受けたものである。

南海トラフ室戸沖における詳細な地震波速度構造：稠密OBS探査データを用いた波形解析

Detailed P-wave velocity structure derived from marine controlled-source seismic survey off Cape Muroto Nankai Trough

*藤江 剛¹、新井 隆太¹、白石 和也¹、中村 恭之¹、小平 秀一¹、海宝 由佳¹、尾鼻 浩一郎¹、三浦 誠一¹
*Gou FUJIE¹, Ryuta Arai¹, Kazuya Shiraishi¹, Yasuyuki Nakamura¹, Shuichi Kodaira¹, Yuka Kaiho¹, Koichiro Obana¹, Seiichi Miura¹

1. 海洋研究開発機構
1. JAMSTEC

フィリピン海プレートが日本列島下に沈み込む南海トラフ海域は、世界でもっとも地震観測研究が充実しているプレート沈み込み帯の一つであり、M8クラスの巨大地震から、微小地震、さらには各種スロー地震(低周波微動、非地震性滑りなど)まで、さまざまなプレート境界断層すべり現象が時空間的に不均質に分布していることが知られている。スロー地震は通常の地震が発生する周辺に分布する傾向があるなど、これら多様な断層すべりは何らかの関連性を持っており、プレート境界断層で発生する現象として包括的に理解することの重要性が指摘されている。

最近の地震活動研究や地下構造研究の進展から、海山の沈み込みなどプレート境界断層形状の複雑さや断層付近の物性(低速度層)などローカルな構造不均質が、スロー地震活動分布などと興味深い相関を示すことが分かってきた。そこで、海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯全域のプレート境界断層の詳細な実態把握を目指した大規模地下構造調査研究を2018年から進めている。この一環で、2019年11月～12月、我々は室戸岬沖の土佐簗と呼ばれる海底地形の高まり付近において、制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。土佐簗の下には、大きな海山が沈み込んでいると考えられており、その陸側(北側)では巨大地震が、トラフ側(南側)ではスロー地震(低周波微動)が観測されるなど、本海域は海山の沈み込みがプレート沈み込み帯の発達や断層すべり挙動の多様性に与える影響を研究する上で理想的な条件を揃える。

本研究では、プレート境界断層形状に加えてプレート境界付近の流体分布や underthrust sediment などの実態把握を進め、プレート境界断層すべり挙動の多様性を支配する構造要因を解明することを目指して、下記の手順で地震波速度構造モデルを構築している。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン(周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI)によって高解像度地震波速度構造のモデリングを行う。FWI解析は、入力データのノイズ抑制やインバージョン・パラメータの調整など、モデルの最適化に向けた課題が残っている状況ではあるが、海洋地殻上面形状やBSRのほか、デコルマを示唆するような地震波速度の逆転など、興味深い構造的な特徴が描き出されている。

特に注目すべきは、上盤内の地震波速度の不均質である。たとえば、土佐簗海盆下のプレート境界上面は顕著な低速度になっている一方、そのトラフ側(海側)には明瞭な高速度帯が形成されているなど、プレート境界断層上面の地震波速度はトラフ軸から陸側に向かって単調に上昇しているわけではないことが分かってきた。観測された構造不均質とプレート境界断層すべり挙動の関連性については、今後、さまざまな角度から検討を加えていく必要があるが、地震波速度の不均質性が強い場所で低周波微動が観測されているなど興味深い相関が見られており、我々の構造解析結果は、プレート境界断層のすべり挙動の理解には、断層形状にとどまらず断層物性の不均質性についても考慮していく必要があることを示唆している。

日向灘における稠密地殻構造探査に基づくプレート沈み込み構造とスロー地震活動の関係

Subduction structure in the Hyuga-nada subduction zone inferred from dense active-source seismic surveys and its relation to slow earthquake activity

*新井 隆太¹、三浦 誠一¹、中村 恭之¹、藤江 剛¹、海宝 由佳¹、小平 秀一¹、望月 公廣²、仲田 理映²、沖野 郷子³

*Ryuta ARAI¹, Seiichi Miura¹, Yasuyuki Nakamura¹, Gou Fujie¹, Yuka Kaiho¹, Shuichi Kodaira¹, Kimihiro Mochizuki², Rie Nakata², Kyoko Okino³

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学地震研究所、3. 東京大学大気海洋研究所

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo,

3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では低周波微動や超低周波地震などの多様なスロー地震活動が発生している（Yamashita et al., 2015; Tonegawa et al., 2020）。これらの地震活動域は九州パラウ海嶺が沈み込んでいる場所に対応しており、沈み込む海山と一連の地震活動との関係について活発な議論がなされている。例えば、微動活動は地磁気異常データ等から推定される海山の縁に分布し、またプレート境界の等深度線に沿って震央が移動することが知られている。こうした活動場所や移動を支配する要因を理解するためには、活動が発生する場所の断層形状や物性、摩擦特性を詳細に把握する必要がある。

海洋研究開発機構では南海トラフ域全体のプレート沈み込み構造を高精細化し、スロー地震活動を含むプレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指し、2018年度から大規模かつ稠密な地震波構造探査研究を実施してきている。2020年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同研究として、海底地震計（OBS）を用いた稠密屈折法探査と5.6 km長のストリーマケーブルを用いた反射法探査を日向灘海域で実施した。屈折法探査では、OBS100台を海溝に平行な測線（HYU01）と沈み込み方向の測線（HYU02）の2測線に稠密（2 km間隔）で展開し、エアガン発振による地震波データを取得した。反射法探査では、これらの測線に加えてHYU01に直交する2測線（HYU18、HYU22）でもデータを取得した。本発表では主に、海溝平行測線（HYU01）のデータ解析から明らかとなった上盤プレート内およびスラブ沈み込み構造とスロー地震活動の関係について議論する。

OBSおよびストリーマケーブルデータを用いた走時トモグラフィ解析から、プレート境界周辺の地震波速度がプレート境界に沿って変化することがわかってきた。最も注目されるのは、九州パラウ海嶺の沈み込み域にはプレート境界に比高1~2kmほどの高まりがあり、その高まりの東縁部に周囲に比べて顕著な低速度域（ $V_p \sim 4.0 \text{ km/s}$ ）が存在する点である。この低速度域は低周波微動の活動度が測線の中で最も高い場所に一致することから、プレート境界断層周辺の物性の不均質性が微動活動と相関していることが示唆される。今後は、OBSデータへ波形インバージョン解析を適用することで、特にプレート境界周辺の不均質構造をより高解像度で明らかにしていく計画である。

High-Resolution Seismic Imaging of the subducting Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-Nada in relation to the 2013 and 2015 tectonic tremor distributions

*馬 妍雪¹、仲田 理映¹、望月 公廣¹、三浦 誠一²、中村 恭之²、新井 隆太²、藤江 剛²、海宝 由佳²、小平 秀一²

*Yanxue Ma¹, Rie Nakata¹, Kimihiro Mochizuki¹, Seiichi Miura², Yasuyuki Nakamura², Ryuta Arai², Gou Fujie², Yuka Kaiho², Shuichi Kodaira²

1. 東京大学地震研究所、2. 海洋研究開発機構

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Various types of slow earthquakes including slow slip events (SSEs), very low frequency earthquakes (VLFs) and tectonic tremors occur around the segment boundary off the Bungo Channel located between the Kyushu and Shikoku Islands. Their distributions appear to vary along depth of the subduction of the Philippine Sea Plate. The VLFE and tremor activities have been observed to occur around a subducted seamount of the Kyushu Palau Ridge (KPR, Yamashita et al., 2017; Tonegawa et al., 2020; Nakata et al., 2020). We processed two seismic reflection profiles; one existing KR0114-8 profile (Park et al., 2008) and the other HYU-02 profile newly acquired by JAMSTEC in 2020 to investigate the relationship between the distribution of the tremor activity, the morphology and physical properties along the plate interface. The HYU-02 line is parallel to the subduction direction, and the KR0114-8 line runs along the strike of the Nankai Trough near the deformation front extending further to the west across the KPR. The HYU-02 line was processed, and a pre-stack depth migration image was obtained. We performed denoise, deghost and designature on the seismic reflection data of KR0114-8. Then, we applied pre-stack time migration to the dataset and imaged in high resolution complex geological structures, the topography of the subducting oceanic crust including the KPR, decollement and faults. The KPR is imaged as a complex topographic high. We compared these structures seen in the seismic images and distributions of the 2013 and 2015 tremor activities. During the 2015 episode, the tremor activity around the KR0114-8 profile apparently concentrates to the east of the KPR reaching near the trough axis where typical accretionary prisms are formed. On the other hand, most of 2013 tremors occurred in the west of the KPR. Tremors are considered to occur along the plate interface. The spatial relationships between the tremor distribution and the subducting KPR suggests that the geometry of the plate interface and surrounding structural disturbances induced by the KPR subduction may have a primary control on the tremor generation.

D会場 | 一般セッション：S06. 地殻構造

2021年10月14日(木) 13:30 ~ 14:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:田中 優作(東京大学地震研究所)

13:30 ~ 13:45

[S06-12] **Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal**

○Chintan Timsina¹、James Mori²、Masumi Yamada² (1.Graduate School of Science, Kyoto University、
2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

13:45 ~ 14:00

[S06-13] **Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion**

○Admore Phindani MPUANG^{1,2}、Takuo SHIBUTANI² (1.Graduate School of Science, Kyoto University、
2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

Three-Dimensional Seismic Attenuation Models for Central Nepal

*Chintan Timsina¹, James Mori², Masumi Yamada²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

We imaged the three-dimensional upper crustal attenuation structure of central Nepal in the source region of the 2015 Gorkha earthquake (Mw 7.8) by analyzing more than 35000 seismic waveforms from local earthquakes. We used P- and S-wave spectra of the Gorkha earthquake sequence recorded by a temporary network of 42 stations deployed for 11 months. We modeled the amplitude spectra for the path-averaged attenuation operator (t^*) using a non-linear least square technique by assuming a ω^{-2} source model for the frequency band of 1-30 Hz. This procedure depends on finding an optimal fit between observed spectra and theoretically computed spectra based on low-frequency spectral level (Ω_0), corner frequency (f_c), and t^* . During the fitting, station site responses are estimated by stacking together all the residual for each station. After removing the site response, the fitting procedure is repeated and the weighting of each t^* measurement is also estimated based on how well the spectrum is modeled. We obtained more than 25,000 high-quality t^* measurements which are then inverted for frequency-independent Q_p and Q_s structure using SIMUL2000 (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) code. For the ray tracing, we used the 3D velocity models and hypocenter locations from the result of our previous velocity tomography of the region. In general, preliminary results of the attenuation structure agree with the velocity structure, where the high-velocity regions are consistent with high Q-values (low attenuation). In this presentation, we will further discuss the lateral variations on velocity and attenuation structure of the region and their implications for the 2015 Gorkha earthquake.

Extinction in genetic algorithms: application to receiver functions inversion

*Admore Phindani MPUANG^{1,2}, Takuo SHIBUTANI²

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The use of genetic algorithms in receiver functions inversion for crustal and uppermost mantle velocity-depth structure is well established (e.g. Shibutani et al., 1996). Their operation is analogous to the evolution of biological species through the use of (pseudo)random numbers to control the selection, crossover and mutation processes in their search for an optimal model(s). Despite their robustness, one drawback of the standard genetic algorithms is that towards the end of a 'run', only a few new solution ideas are explored which may lead to the stagnation of the optimization process. This can be an especially major drawback for large model dimensions, such as in the inversion of receiver functions for dipping and anisotropic structures. To mitigate this problem, this study introduces an extinction concept to genetic algorithm inversion of receiver functions for crustal shear wave velocity structure. With extinction, parts of the explored model population are regularly replaced to exploit highly fit models as well as random explorations of other domains. The concept of self-organized criticality, which has similarly been used to explain the extinction of biological species (e.g. Newman, 1996), is applied to control the size and frequency of the extinction events in the genetic algorithm following Krink et al. (2000).

Three different model replacement strategies are tested against the standard genetic algorithm of Shibutani et al. (1996) for performance comparison on both synthetic and real data problems. In random replacement, extinct models are replaced by randomly generated models. Survivor mutant replacement comprises replacing extinct models with randomly generated mutations of the surviving population. Lastly, in best-model mutant replacement, extinct models are replaced with mutations of the current best model, mutated at 2, 3 or 4 points selected at random positions. Preliminary results show that random replacement achieves the most extensive model space exploration but with the least exploitation of fitter models, consequently resulting in a less fit 'best model'. Greater exploitation of fitter models is achieved by survivor mutant and best-model mutant replacement strategies which obtain fitter best models in fewer generations compared to the standard genetic algorithm. A combination of the three replacement strategies may offer the best balance between exploitation of 'fitter' models and exploration of the whole model space without affecting the efficiency of the algorithm as shown by the results from the synthetic tests. The difference in computational costs between the standard genetic algorithm and the genetic algorithm with extinction was insignificant during these tests. These results show that extinction in genetic algorithm inversion of receiver functions can be tuned to improve the efficiency of the optimization process in escaping local minima as well as reducing convergence time. This technique can prove very useful for optimization problems with large dimension model spaces.

D会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

2021年10月14日(木) 14:00 ~ 15:00 | D会場 D会場

PM-1

座長:小林 知勝(国土地理院)、田中 優作(東京大学地震研究所)

14:00 ~ 14:15

[S03-01] 東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

○藤原 智¹ (1.国土地理院)

14:15 ~ 14:30

[S03-02] 能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

○田中 優作¹、鷺谷 威¹ (1.名古屋大学)

14:30 ~ 14:45

[S03-03] 陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

○板場 智史¹、太田 和晃²、長谷川 浩³ (1.産業技術総合研究所、2.防災科学技術研究所、3.気象庁)

14:45 ~ 15:00

[S03-04] 継続時間1時間のスロースリップイベント

○勝間田 明男¹、宮岡 一樹³、露木 貴裕⁵、板場 智史⁴、田中 昌之⁵、伊藤 武男⁶、高森 昭光²、新谷 昌人² (1.富山大学、2.東大地震研究所、3.気象庁、4.産総研、5.気象研究所、6.名古屋大学)

東北地方太平洋沖地震の余効変動予測モデルを利用した広域の微小な地殻変動検出

Detection of small crustal deformations in a wide area using spatiotemporal functional model of post-seismic deformation after the 2011 Tohoku-oki earthquake

*藤原 智¹

*Satoshi FUJIWARA¹

1. 国土地理院

1. Geospatial Information Authority of Japan

地殻変動の空間的分布を求めるためには、観測点ごとに抽出目的の地殻変動が含まれる期間の前後の差をとることによって求められるのが通常である。ところが、対象となる地域の範囲が広がると、例えばプレート運動に伴うような広域の地殻変動も含まれてくるために、単純に2時期の差をとるだけでは、抽出目的以外の変動がノイズとなって現れてしまう。本報告では、国土地理院の電子基準点を200点以上利用し、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による余効変動を時間と空間両方で関数モデル（時空間モデル）化することで、実際の観測値からの差分を求めるだけで余効変動以外の微小な地殻変動を精度よく、かつ非常に簡便に求められることを示す。

Tobita (2016)により、下記の式で表される、2つの対数と1つの指数関数の混合モデルを用いることで、東北地方太平洋沖地震の余効変動の時系列が短・中期的な時間推移とともに、場所によって異なる余効変動の空間分布も予測できる時空間モデルが作成できることが示されている。

$$D(t)=a \ln(1+t/b)+c+d \ln(1+t/e)-f \exp(-t/g)+Vt$$

ここで、 $D(t)$ は余効変動時系列の各成分、 t は地震後の日数、 $\ln$ は自然対数、 b 、 e 、 g は全観測点に共通の対数関数または指数関数の緩和時定数、 V は観測点ごとの定常速度である。

この時空間モデルを利用して2020年までの余効変動の時系列を精査したところ、2015年2月以降に北海道から中部地方にかけての広域において一定速度で進行する新たな変動が見いだされた。この一定速度成分も新たに関数項として追加することで、時空間モデルの余効変動の推定精度を向上させた。

一般に、微小な地殻変動を時系列から検出するためには、対象となる場所や時期に合わせて近傍に基準となる固定点を設定したり、広域の変動を除去するためにトレンドを観測点ごとに推定したりといったモデル化をその都度ごとに行う必要がある。本報告は、このモデル化を時空間モデルであらかじめ与えてしまうものである。最初にローカルな変動の抽出例として、2018年5月末～7月に発生した房総半島SSEについて図1に示す（固定点 福江）。数十日間の短期ではあるが、単純に2時期の差分をとった図1左では東北沖地震の余効変動があちこちに含まれており、そのパターンも一様でない。しかし、改良した時空間モデルを使用して時間変化を求めた図1右では房総半島のSSEのみがきれいに抽出されており、単純の2時期の差とは比べものにならない地殻変動抽出力を持っている。

この時空間モデルはさまざまな微小な変位現象を抽出するのに有効である。もちろん、上記のようなローカルな現象にも使えるが、ローカルな範囲内では大地震の余効変動という広域の現象は均一的に現れるた

め、ローカルな範囲内のみの差分でも十分なことが多い。したがって、本時空間モデルが真価を発揮するのは広域にわたる微小な現象の抽出である。こうした広域で微小な変動を検出する例として積雪による荷重変形による変動を図2に示す。この図は、例年3月上旬頃が最深積雪になることから地震後の各年（2015年を除く）3月11日前後の実測値から時空間モデルの残差を求め、その平均値を描いたものである。1~2mmという非常に小さな変化を求めてこうした図を作成するには各点で変化をモデル化するなど複雑な操作が必要になるが、時空間モデルを差し引くだけでこうした図が簡単に描くことができる。

この時空間モデルの特徴は、広域（北海道～中部地方）、高精度、簡便（観測値から差し引くだけ）、将来予測可能（新たな広域の現象が現れなければ使い続けられる）であり、変動検出には応用範囲も広い強力なツールである。

参考文献 Tobita M (2016) Earth Planets Space. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4>

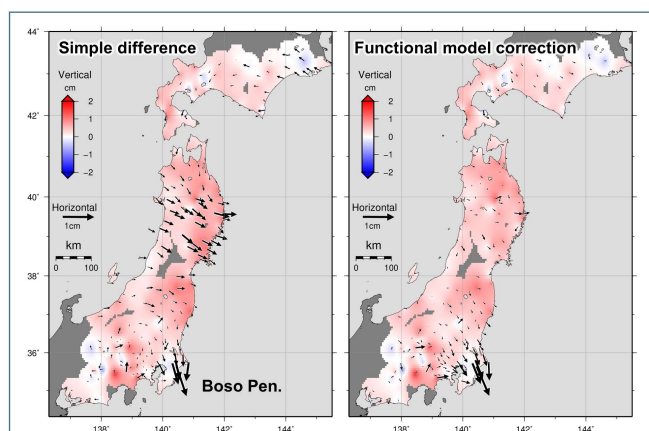


図1 2018年6月の房総半島沖SSEによる地殻変動
 左 5月末～6月末の10日間ごとの単純差（固定点 福江）
 右 上記から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去

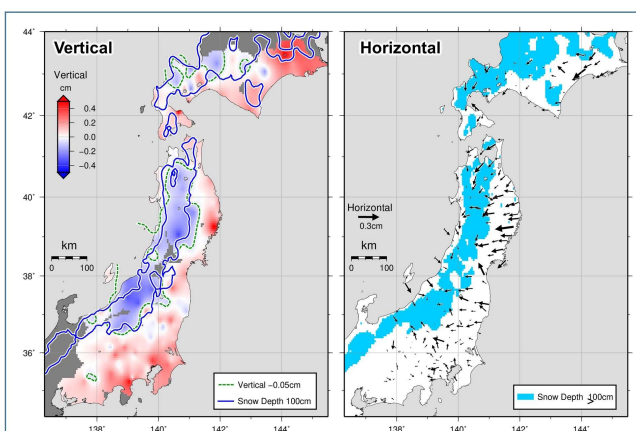


図2 各年3月上旬の余効変動モデルからのずれと積雪量
 左 上下変位
 右 水平変位
 各変位量は、各年（2015年を除く、2012年～2020年の3月11日前後10日間平均値から東北地震余効変動関数モデルによる変化を除去して求めている。

能登半島で発生した群発地震と、それに伴ってゆっくりと進行する地殻変動

Slow crustal deformation observed together with earthquake swarm in Noto peninsula

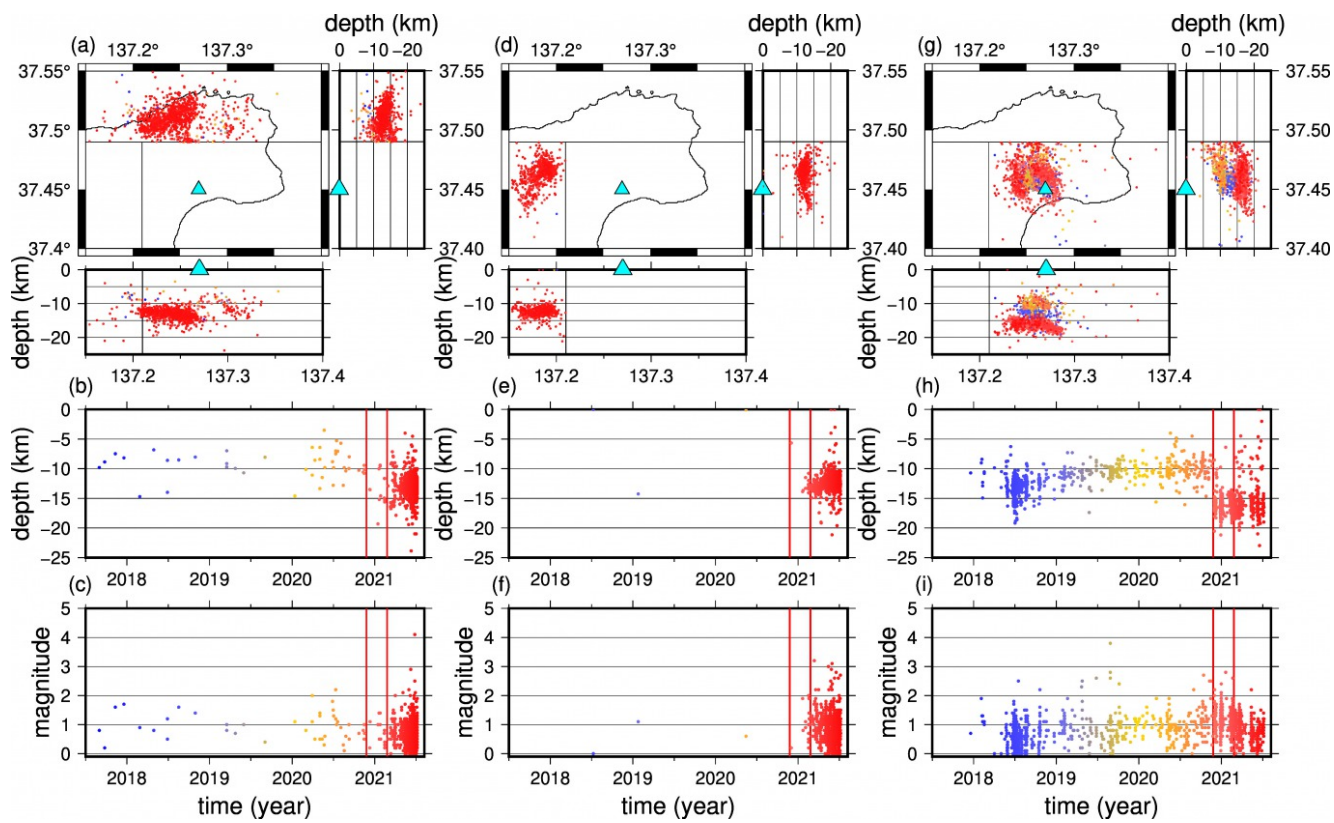
*田中 優作¹、鷺谷 威¹

*Yusaku TANAKA¹, Takeshi Sagiya¹

1. 名古屋大学

1. Nagoya Univ.

地震、すなわち断層すべり運動の進行速度は幅広い帯域で観測される。このうち、非常にゆっくりとした速度で進行するものをスロー地震と呼び、特に、地震波の検出が困難であるため地殻変動を通して検出されるものをスロースリッピイベント (SSE) と呼ぶ。SSEはこれまで環太平洋の多くの沈み込み帯で観測されているが、内陸においての検出事例はほとんど報告されていない。これには内陸でSSEが発生しづらい何らかの物理的要因が存在する可能性が考えられるが、それに加えて、SSEが内陸で発生したとしても、その地殻変動の振幅や空間スケールが小さく、明確にそのシグナルがSSEであると判断することが困難であるという事情もある。これまでに報告された数少ない内陸SSEの観測報告としては、2012年に北海道で発生した群発地震と同時期に観測された局地的な地殻変動を、群発地震を引き起こしたSSEによるものとみなして説明を試みた Ohzono et al., (2015) があるが、内陸で発生した群発地震に伴ってSSEによると見られる地殻変動が発見された事例は他に無かった。本発表では、2018年から現在まで引き続き発生している能登半島における群発地震と、その活動の変化に伴って2020年11月から進行し始めた、ゆっくりとした地殻変動について報告する。当該群発地震は2018年に能登半島北部、深さ約 13 km の地点で発生し、その後、非常にゆっくりと深さ約 8 km までマイグレーションした様子が観測されている。そのマイグレーションは2020年11月に終息したが、それとほぼ同時に、その下部、深さ約 17 km の地点で群発地震が発生した。更に、この群発地震の下方移動と同時に、その直上のGNSS観測点(GEONET, 珠州)で地殻変動が進行を開始した。この地殻変動は、水平方向の変動は2021年2月ごろ終息したものの、上下方向については2021年7月末においても隆起を続けている。また、2021年2月ごろ及び3月ごろのそれぞれに、それまでに群発地震が観測されていた領域の西部と北部で、別の群発地震が開始した。これまでの多くの研究で、群発地震やSSEの発生には、断層中の流体移動が関与していることが示唆されている。能登半島については、火山地帯ではないものの温泉が湧くことで有名であり、また、マントルからヘリウムガスが湧き出てくとも知られている(Umeda et al., 2009)。このように、能登半島の地下には多くの流体が存在することが分かっている。また、多くの先行研究で、能登半島の地下には多くの断層が存在することも分かっているため、今回観測された現象には、能登半島地下の断層中の流体移動が関与していることが疑われる。そこで、本発表では、この現象の詳細と、それを説明するモデルを提唱する予定である。



陸上ボアホール歪観測による紀伊半島沖浅部SSEの検出

Detection of shallow SSE off the Kii Peninsula by onshore borehole strainmeter

*板場 智史¹、太田 和晃²、長谷川 浩³*Satoshi ITABA¹, Kazuaki OHTA², Hiroshi HASEGAWA³

1. 産業技術総合研究所、2. 防災科学技術研究所、3. 気象庁

1. AIST, 2. NIED, 3. JMA

2020年12月上旬から翌1月下旬にかけて、紀伊半島沖熊野灘において活発な浅部微動活動が観測された[太田ほか, 2021]。2020年12月中旬～翌1月中旬にかけては、産総研のボアホール歪観測3点においてわずかな変化が観測された。観測された歪変化からプレート境界面上におけるすべりを仮定して断層面を推定したところ、微動発生域のうち西側・深部側においてMw6.2のすべりが推定された(図1 model A)。微動発生域全体がすべったと仮定して断層面を推定したところ、その規模はMw6.6と推定された(図1 model B)。

海域のボアホールにおける間隙水圧観測などによると、この領域では繰り返し浅部SSEが発生していることが報告されている[Araki *et al.*, 2017]。観測条件が良好な場合(SSEの規模が大きい、降雨・気圧変化が少ない、深部SSEが発生していない等)については陸域のボアホール歪観測でも有意な変化が検出され断層モデルの推定が可能であることが分かっている(例えば2016年4月)。スタッキング手法[宮岡・横田, 2012]を用いて過去の観測波形を網羅的に調査したところ、これらのイベント以外にもいくつかの浅部SSE発生の可能性のある事例が検出された。陸域の観測網は、浅部SSE発生領域からは大きく離れており、海溝軸(dip)方向へのすべりの広がり把握することは困難である。一方でstrike方向の広がりなど、大まかな全体像を把握するには有用であると考えられる。

本講演では、上述の2020年末～2021年初めのイベントのほか、いくつかの浅部SSE検出事例を紹介する。

参考文献

Araki, E., D. Saffer, A. Kopf, L. M. Wallace, T. Kimura, Y. Machida, S. Ide, E. Davis, IODP Expedition 365 shipboard scientists (2017), *Science*, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120.

太田和晃, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (2021), 紀伊半島南東沖の微動活動(2020年12月～2021年1月), 地震予知連絡会会報, 106, 印刷中。

宮岡一樹, 横田崇 (2012), 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発ー東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用ー, 地震 2, 65, 205-218.

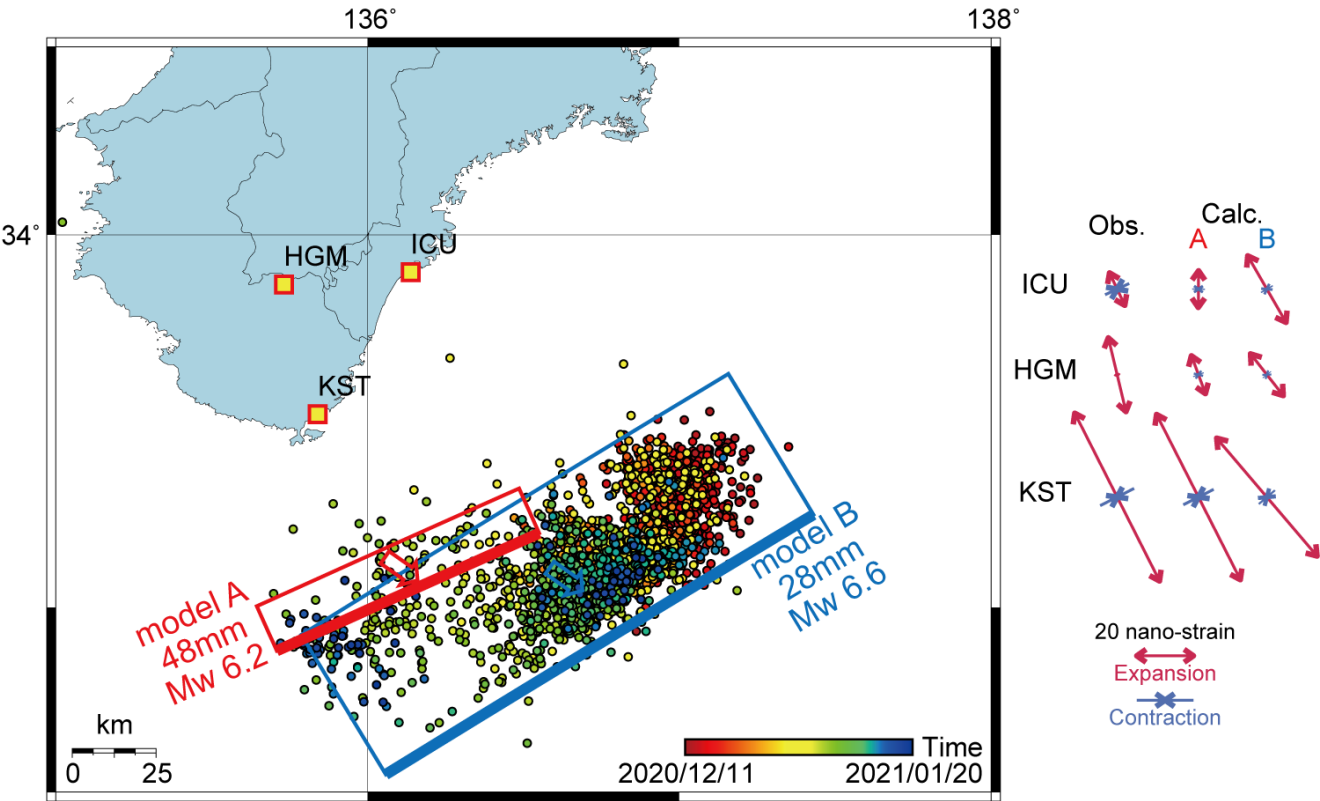


図1 2020年末～2021年初めに発生した浅部SSEの推定断層モデル(赤色矩形: model A, 青色矩形: model B) および浅部微動の震央分布. 右側は, 主歪の観測値および理論値の比較.

継続時間1時間のスロースリップイベント

Slow-slip events of one-hour duration

*勝間田 明男¹、宮岡 一樹³、露木 貴裕⁵、板場 智史⁴、田中 昌之⁵、伊藤 武男⁶、高森 昭光²、新谷 昌人²

*Akio KATSUMATA¹, Kazuki Miyaoka³, Takahiro Tsuyuki⁵, Satoshi Itaba⁴, Masayuki Tanaka⁵, Takeo Ito⁶, Akiteru Takamori², Akito Araya²

1. 富山大学、2. 東大地震研究所、3. 気象庁、4. 産総研、5. 気象研究所、6. 名古屋大学

1. Univ. of Toyama, 2. ERI, Univ. of Tokyo, 3. JMA, 4. AIST, 5. MRI, JMA, 6. Nagoya Univ.

これまで様々な継続時間のスロースリップ現象が報告されている。継続時間が数十秒より短い深部低周波微動・地震や超低周波地震は地震計によって検知されている。また、継続時間数日の短期的スロースリップはボアホール型ひずみ計や傾斜計あるいはGNSSなどにより検知されている。継続時間が数十秒と数日の間のスロースリップ現象はあまり知られていない。ここでは、その間の継続時間を持つスロースリップ現象についてレーザー伸縮計とひずみ計のデータを用いて調査した。

我々は犬山観測点及び天竜船明観測点に設置されているレーザーひずみ計と気象庁・産業技術総合研究所が設置している及びボアホール型多成分ひずみ計のデータを用いて、継続時間1時間のスロースリップ現象を解析した。まず、観測ひずみデータとランプ関数との間の相関をとり、複数観測点において同時に相関が高くなる時間帯を見つける。その時間帯について宮岡・横田(2012)によるスタッキング手法により規模等を推定した。スタッキング法においては、断層位置・すべり方向を仮定して、ノイズレベルに基づき重みをつけて複数観測点のデータを足し合わせた。ノイズは対象とする時間帯の1～3時間前の範囲の値を評価した。推定された規模はM4.7からM5.0程度であった(図)。この規模は、Ida et al.(2007)によって提唱されたスロー地震のスケールリング則に調和的である。ただし、検出された信号のレベルはノイズに比べて明確に大きなものでなく、ソースの位置やすべり方向をデータだけから推定することは困難であった。ここでは短期的スロースリップの場所を仮定して規模を求めた。そのため解析対称は短期的スロースリップの発生時間帯に限られている。なお、微動活動の位置・発生時間帯を参照して検出を試みたが、有意な結果は得られていない。

図の説明

地図の青丸の位置は仮定した震源断層の位置を表す。用いた観測点の場所も示す。観測点に示す線分はひずみ計の方位を表している。灰色の点は、産業技術総合技術研究所が求めた深部低周波微動の震央である。下の図はスタッキングの結果を示す。中央の部分が検出した継続時間1時間のスロースリップ現象であり、規模はMw4.9と推定された。左側の2本の赤い波線で示す範囲でノイズレベルを評価した。

