

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14809

研究課題名（和文）地殻変動・地震データの系統的解析に基づく非地震性すべりの地域性とその原因解明

研究課題名（英文）Study on spatial variations of aseismic slips inferred from systematic analyses of geodetic and seismic data

研究代表者

高木 涼太（Takagi, Ryota）

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：10735963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：間欠的な非地震性すべりであるスロースリップの空間変化とその原因を理解するため、地殻変動データおよび地震波形データからスロースリップ発生様式と発生場としての地震波速度構造の空間変化を推定した。GNSS連続データの系統的な解析から、関東地方のフィリピン海プレート上面で発生するスロースリップの発生様式の走向方向の変化を明らかにした。また、常時微動の相互相関解析とそれに基づく表面波トモグラフィー手法を高度化し、沈み込み帯の海底地震観測網への適用を可能にした。S-netデータを用いて、日本海溝沿いプレート境界周辺の3次元S波速度構造を推定することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレート境界で発生するスロースリップの発生様式は空間的に変化するが、詳細な空間分布やその原因は未解明な点が多い。本研究では、陸上の地殻変動観測網のデータや近年設置された海底地震観測網のデータを有効活用することで、スロースリップ発生様式の空間変化とプレート境界周辺の地震波速度構造を推定した。以上から両者の比較検討が可能になり、スロースリップの空間変化の原因解明や地震準備過程の理解につながると期待される。また、本研究の中で開発した手法や得られた結果は、最先端の海底地震観測網のデータ利活用を促進させ、沈み込み帯における地震やスロースリップの発生機構に関する新たな知見の創出に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to understand spatial variations of episodic slow slip events, we estimated the spatial variations of slow slip activity and seismic velocity structure around slow slip source areas from geodetic and seismic data, respectively. Systematic analysis of GNSS continuous data revealed along-strike variations in characteristics of slow slip events on the Philippine Sea Plate off the Kanto area. We developed ambient noise cross-correlation analysis and ambient noise surface wave tomography for application to ocean-bottom seismic networks. We successfully estimated a three-dimensional shear velocity structure around the plate interface along the Japan Trench.

研究分野：地震学

キーワード：スロースリップ 沈み込み帯 地震波速度構造 S-net

1. 研究開始当初の背景

地震や地殻変動観測網の発展により、間欠的な非地震性すべりであるスロースリップは世界の多くのプレート境界で発生する普遍的な現象であることがわかってきた (e.g., Obara & Kato, 2016)。また、これまでの研究により、スロースリップは様々な発生様式を持ち、その発生様式は空間的に変化することも示されている。しかし、何がスロースリップ発生様式の空間変化を規定しているのかは明らかになっておらず、この問題の解決はスロースリップの発生メカニズムを理解する上でも重要である。先行研究では、比較的ローカルな領域におけるスロースリップ発生域と地震波速度構造の比較から、プレート傾斜方向のプレート境界滑り様式変化と発生環境の関係を議論することが多かった (e.g., Kodaira et al., 2004)。しかし、スロースリップ発生様式は走向方向にも空間変化するため、発生様式と発生環境の関係についての理解をさらに深める必要がある。

2. 研究の目的

スロースリップ発生様式と発生環境の関係についての理解深化のため、発生様式を特徴づける断層パラメータと発生環境を特徴づける地震波速度構造の系統的な比較を目指す。そのために、地殻変動データ解析に基づきスロースリップの断層パラメータの空間変化を抽出すること、地震波形データ解析に基づきプレート境界周辺の地震波速度構造を推定することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) GNSS データ解析に基づくスロースリップイベントの系統的検出

GNSS 連続観測点における地殻変動データに対して、これまで開発してきたスロースリップの系統的検出手法 (引用文献①) を適用し、スロースリップの検出および断層パラメータの推定を行う。作成したスロースリップの包括的なカタログに基づき、各種断層パラメータの空間分布を推定し、スロースリップ発生様式の地域的特徴を抽出する。

(2) 常時微動相互相関解析に基づくプレート境界周辺の地震波速度構造の推定

地震観測網で観測される常時微動の相互相関解析に基づき、観測点間を伝播する表面波を抽出する。抽出した表面波を用いてトモグラフィ解析を行い、プレート境界付近の地震波速度構造を推定する。地震波速度構造とスロースリップの断層パラメータの相関関係を系統的に調査し、スロースリップの発生様式を規定する原因を考察する。

4. 研究成果

(1) 関東地方におけるスロースリップイベントの検出と発生様式の空間変化

国土地理院の GEONET 観測点における GNSS データを用いて、関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生するスロースリップイベント (SSE) の系統的検出を行った。その結果、1996~2018 年の期間において、既知の房総沖 SSE (Mw6.6-6.8 程度) に加え、Mw5.9-6.5 程度の小規模な SSE である可能性のあるイベントを 25 個検出した。これらの小規模 SSE の多くは、既知の房総沖 SSE の東に位置する。また、既知の房総沖 SSE に比べて発生間隔は短く、すべり量は小さいことから、安定すべりから間欠的なすべりへのプレート走向方向のすべり特性変化を示している可能性が考えられる。また、2011 年以降に SSE の発生数が増加しており、先行研究 (Uchida et al. 2016) で指摘されている 2011 年東北沖地震以降のフィリピン海プレートの沈み込み速度上昇を反映していると考えられる。

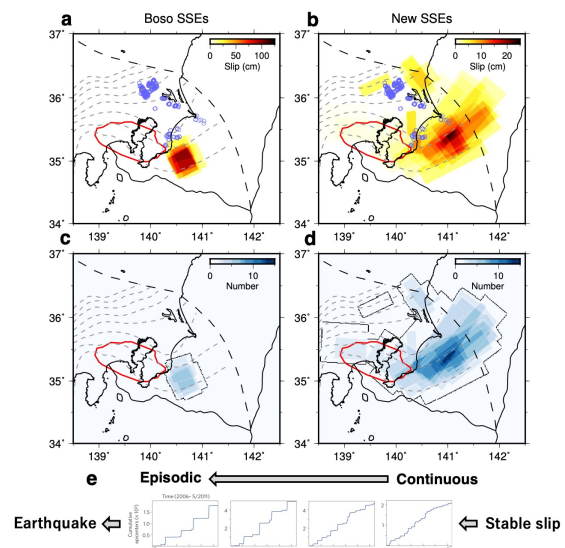


図1. 房総沖SSEと新たに検出された小規模SSEの積算滑り量(a, b)および発生個数(c, d)。赤線は関東地震滑り域、青丸は小繰り返し地震 (Uchida et al. 2016)、灰色と黒色破線はフィリピン海プレートの等深線 (Nakajima et al. 2019) と北東端 Uchida et al. (2010)を表す。(e) Cascadiaにおける低周波微動発生様式のプレート沈み込み方向の変化 (Wech & Creager 2011)。

(2) S-net を用いた日本海溝沿いプレート境界周辺の 3 次元 S 波速度構造推定

日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) で観測された常時微動データを用いた相互相関解析に基づく表面波トモグラフィーを行い、プレート境界周辺の地震波速度構造推定を行なった。研究を遂行する中で、当初は予期していなかった技術的な問題および海底観測における常時微動表面波解析の本質的な困難に直面したが、下記①~③に示すようにこれらの問題を一つ一つ解決することで、下記④における 3 次元 S 波速度構造の推定が可能になった。

① S-net のセンサー設置姿勢・方位の推定

S-net 観測点は海底に設置されているため、そのセンサー設置姿勢・方位が不明であり、そのままでは観測データを十分には活用できなかった。そのため、S-net の加速度計観測データに基づき、S-net 観測点のセンサー設置姿勢・方位を推定した。150 観測点全点において、設置姿勢・方位が精度良く推定され、観測データを上下成分と水平二成分に分解できることを示した。論文として公表した推定結果は、S-net を用いた他の多くの研究で使用される重要な研究リソースとなっている (引用文献②)。

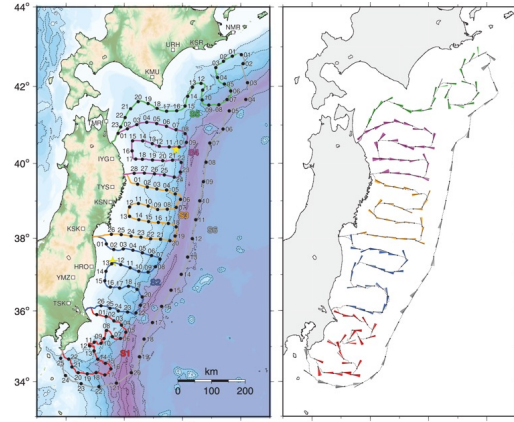


図2. S-net観測点分布と推定された方位 (Takagi et al. 2019)。

② 常時微動相互相関解析における機器ノイズ除去手法の開発

微小な信号を利用する常時微動相互相関解析には観測データに含まれる非常に小さな機器ノイズが影響するが、S-net データにも観測点間でコヒーレントな 2 種類の機器ノイズが含まれることを発見した。さらに、これらの機器ノイズの特徴を整理し、機器ノイズを効果的に除去する新手法を開発した。開発した手法を適用することで、ノイズ除去を行わない場合では全く信号を検出できなかった周波数帯域 0.03-0.1 Hz において複数モードの表面波信号の抽出に成功した。この周波数帯域の表面波は、海域の堆積層以深の地震発生層の S 波速度に感度を持ったため、浅部プレート境界周辺の S 波速度構造推定のために有用なデータである。開発した手法は同様の機器ノイズを含む国内外の地震観測データにも適用できるものであり、常時微動の相互相関解析の適用周波数範囲を拡大できる可能性があることを示すことができた (引用文献③)。

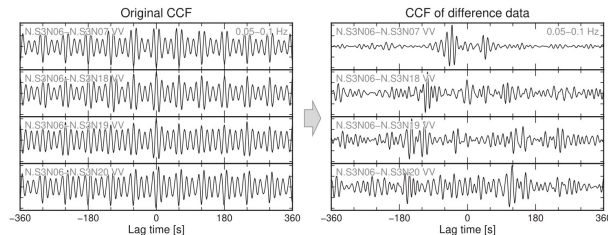


図3. 上下成分同士の間での常時微動相互相関関数 (Takagi et al. 2021)。左はノイズ除去前、右はノイズ除去後を示す。

③ マルチモード表面波分散曲線推定手法の開発

海域における常時微動表面波は、海水層および堆積層の影響で分散性が強く、複数のモードから構成される。また、沈み込み帯では構造の水平方向の変化が大きく表面波分散性の空間変化も大きいこと、データの S/N が高くないことにより、これまでの解析手法ではマルチモードの表面波を有効活用できなかった。そこで、1 次元速度構造をモデルパラメータとする非線形波形フィッティングにより分散曲線を推定する手法を開発し、多成分相互相関関数からマルチモードの表面波分散曲線をロバストに推定することに成功した。マルチモードの表面波分散曲線が利用可能になったことで、構造推定における非一意性が軽減され、対象領域における地震波速度構造を高い深さ分解能で推定できると期待される (引用文献④)。

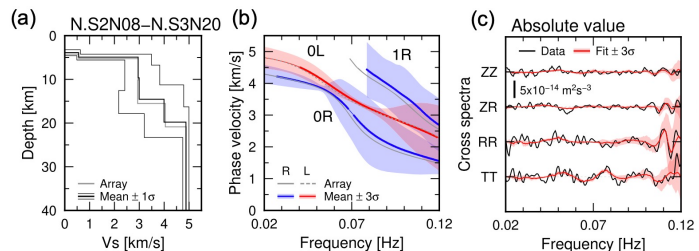


図4. 波形フィッティングにより推定したマルチモード位相速度分散曲線 (Takagi & Nishida 2022)。 (a)モデルパラメータとした1次元速度構造、(b)推定した分散曲線、(c)観測および理論クロススペクトルのフィッティング。

④ 沈み込み帯海域における 3 次元 S 波速度構造推定手法の高度化

常時微動の相互相関解析に基づく表面波トモグラフィー手法を高度化し、表面波伝播が複雑な沈み込み帯の海域においても高分解能な 3 次元 S 波速度構造を推定できる手法を開発した。開発した手法は、マルチモード表面波を活用するとともに、有限周波数効果を考慮することで、従来の常時微動トモグラフィー手法よりも深さ方向・水平方向ともに構造推定の分解能を向上さ

せた。この手法を上記①～③の成果に基づいて S-net データに適用して、北海道・東北・関東沖の日本海溝沿い前弧海域における 3 次元 S 波速度構造の推定を実現した。得られた 3 次元 S 波速度構造はスロースリップの発生環境に対して有益な情報を与えると考えられる。得られたプレート境界周辺の地震波速度構造と千島海溝・日本海溝・相模トラフに沿ったスロー地震分布とを詳細に比較することが重要であり、今後の課題である。

<引用文献>

- ① Takagi, R., Uchida, N., & Obara, K. (2019). Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 3853-3880, doi: 10.1029/2018JB016738.
- ② Takagi, R., N. Uchida, T. Nakayama, R. Azuma, A. Ishigami, T. Okada, T. Nakamura, and K. Shiomi (2019), Estimation of the orientations of the S-net cabled ocean bottom sensors, *Seismological Research Letters*, 90(6), 2175-2187, doi: 10.1785/0220190093.
- ③ Takagi, R., G. Toyokuni, and N. Chikasada (2021), Ambient noise correlation analysis of the S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels, *Geophysical Journal International*, 224, 1640-1657, doi: 10.1093/gji/ggaa548.
- ④ Takagi, R. & Nishida, K. (2022). Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions, *Geophysical Journal International*. 231, 1196–1220, doi: 10.1093/gji/ggac225.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takagi Ryota, Nishida Kiwamu	4. 巻 231
2. 論文標題 Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1196 ~ 1220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggac225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tonegawa T., Takagi R., Sawazaki K., Shiomi K.	4. 巻 128
2. 論文標題 Short Term and Long Term Variations in Seismic Velocity at Shallow Depths of the Overriding Plate West of the Japan Trench	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022jb025262	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nishida Kiwamu, Takagi Ryota	4. 巻 127
2. 論文標題 A Global Centroid Single Force Catalog of P Wave Microseisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB023484	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Naoki, Nakajima Junichi, Wang Kelin, Takagi Ryota, Yoshida Keisuke, Nakayama Takashi, Hino Ryota, Okada Tomomi, Asano Youichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Stagnant forearc mantle wedge inferred from mapping of shear-wave anisotropy using S-net seafloor seismometers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19541-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim HyeJeong, Kawakatsu Hitoshi, Akuhara Takeshi, Shinohara Masanao, Shiobara Hajime, Sugioka Hiroko, Takagi Ryota	4. 巻 126
2. 論文標題 Receiver Function Imaging of the Amphibious NE Japan Subduction Zone?Effects of Low Velocity Sediment Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB021918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JB021918	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Keisuke, Uchida Naoki, Kubo Hisahiko, Takagi Ryota, Xu Shiqing	4. 巻 578
2. 論文標題 Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117306 ~ 117306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2021.117306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takagi Ryota, Toyokuni Genti, Chikasada Naotaka	4. 巻 224
2. 論文標題 Ambient noise correlation analysis of S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1640 ~ 1657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa548	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Takagi, Naoki Uchida, Takashi Nakayama, Ryosuke Azuma, Akira Ishigami, Tomomi Okada, Takeshi Nakamura, Katsuhiko Shiomi	4. 巻 90
2. 論文標題 Estimation of the Orientations of the S net Cabled Ocean Bottom Sensors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Seismological Research Letters	6. 最初と最後の頁 2175 ~ 2187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0220190093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Uchida, Ryota Takagi, Youichi Asano, Kazushige Obara	4. 巻 531
2. 論文標題 Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 115986 ~ 115986
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.115986	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda Hiroki, Takagi Ryota	4. 巻 71
2. 論文標題 Coseismic changes in subsurface structure associated with the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake detected using autocorrelation analysis of ambient seismic noise	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1051-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 高木涼太、西田究
2. 発表標題 常時微動トモグラフィーによる日本海溝・千島海溝沿い前弧海域下の3次元S波速度構造
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木涼太、西田究
2. 発表標題 常時微動トモグラフィーによる日本海溝沈み込み帯浅部の3次元S波速度構造推定
3. 学会等名 研究集会「陸海両域での超高密度観測時代の観測・解析手法と地震波伝播理論の新展開」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Takagi, Kiwamu Nishida
2. 発表標題 Ambient noise tomography in the offshore forearc region along the Japan trench using S-net data
3. 学会等名 2021 JpGU Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木涼太
2. 発表標題 地震・地殻変動多点連続観測データに基づく地球内部広帯域変動現象の研究
3. 学会等名 日本地震学会2021 年度秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Takagi, Akira Ishigami, Genti Toyokuni, Ryosuke Azuma, Mare Yamamoto
2. 発表標題 Seismic velocity structure along the Japan trench inferred from ambient noise and teleseismic surface waves observed by S-net
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木涼太、西田究
2. 発表標題 S-netを用いた東北日本前弧海域における常時微動トモグラフィ
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Takagi, Naoki Uchida, Kazushige Obara
2. 発表標題 Detection of slow slip events on the Philippine Sea plate beneath the Kanto region
3. 学会等名 Slow Earthquake Workshop 2020 Virtual
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木涼太、西田究
2. 発表標題 S-netデータを用いた東北日本前弧海域における常時微動トモグラフィ
3. 学会等名 研究集会「固体地球の多様な波動現象へのアプローチ：多量データ解析と大規模計算を両輪に」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Takagi, Naoki Uchida, Takashi Nakayama, Ryosuke Azuma, Akira Ishigami, Tomomi Okada, Yusaku Ohta, Ryota Hino
2. 発表標題 Investigations of sensor orientation and a possibility of detecting crustal deformation based on accelerometer records of S-net
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木涼太、豊国源知、山本希
2. 発表標題 S-netを用いた常時微動相互相関解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木涼太、内田直希、小原一成
2. 発表標題 関東地方におけるスロースリップイベントの系統的検出の試み
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Takagi, Naoki Uchida, Kazushige Obara
2. 発表標題 Systematic detection of slow slip events beneath Kanto, Japan
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------