

南海トラフの3次元地下構造を考慮した浅部スロー地震の 長期的な活動把握

課題責任者

古村 孝志

東京大学地震研究所

著者

武村 俊介*¹

*¹ 東京大学地震研究所

巨大地震の発生が懸念される南海トラフでは、通常の地震に加えてスロー地震が頻発している。スロー地震は通常の地震と比べ破壊伝播速度が遅い上に、通常の地震発生域では活動が低調である。通常の地震とスロー地震の空間分布を詳細に知ることは、プレート境界の摩擦状態の空間的不均質を抑えることにつながる。しかし、巨大地震発生域のごく近傍の海溝軸沿いで発生する浅部スロー地震は、海域の不均質構造の影響により従来法で精度良く発生位置やメカニズム解を拘束することができない。そこで、南海トラフ域の3次元地下構造モデルを仮定した地震動シミュレーションを地球シミュレータで行い、その結果をGreen関数として活用することで、浅部超低周波地震の詳細な位置とメカニズム解の推定を試みた。解析の結果、陸域の広帯域地震計記録と3次元地下構造モデルによるGreen関数を併用することで、海底地震計で推定した浅部超低周波地震と同様の解を得ることができた。本解析手法を、海底地震計ネットワーク設置以前を含む15年分の浅部超低周波地震に適用することで、南海トラフ浅部で発生するスロー地震の長期的な活動把握に成功した。

キーワード：南海トラフ、スロー地震、3次元地下不均質構造、CMT解析、地震動シミュレーション

1. はじめに

巨大地震の発生が懸念される南海トラフでは、プレート境界型の通常の地震活動は非常に低調である一方、巨大地震発生域の周囲でスロー地震が頻繁に発生している（例えば、Obara and Kato, 2016[1]）。スロー地震はプレート境界で発生する地震現象であるが、通常の地震と比べて破壊伝播速度が非常に遅いことから、巨大地震とスロー地震の発生域の構造的な違いや、巨大地震とスロー地震の相互作用に注目が集まっている。防災科学技術研究所や国土地理院による陸域の地震およびGNSSの観測網により低周波微動、超低周波地震、スロースリップイベントなど様々なスロー地震現象が観測され、特に深さ30km程度で発生する深部スロー地震の解析が進み、活動の特徴が把握されつつある。

しかし、巨大地震の大すべり域近傍で発生する浅部スロー地震についてはその限りではない。陸域の地震観測網により沖合で発生する浅部超低周波地震の検知および震央推定が行われている（例えば、Asano et al., 2008[2]）が、海域の複雑な3次元地下構造の影響を考慮していないため、地震動伝播特性の影響が正しくモデル化されておらず、推定位置が大きくばらつく。近年、海溝軸付近に敷設された地震・津波観測監視システム（DONET）の記録を用いることでこれらの問題は解決する（Nakano et al., 2018[3]）が、海底地震計登場以前の活動を含めた長期的なスロー地震活動の把握には、陸域の観測記録に頼らざるを得ない。

本報告書では、そのような海域の地震現象の長期的で正確な震源物理特性の推定のために我々のグループで2018年度に実施した、（1）南海トラフの付加体構造の

モデル化（Takemura, Kubo et al., 2019[4]）、（2）3次元地震動シミュレーションにより生成したGreen関数による浅部低周波地震のCentroid moment tensor (CMT) 解析（Takemura, Matsuzawa et al., 2019[5]）、の2つの成果について紹介する。

2. 地下構造モデルとCMT解析手法

解析に使用する3次元地下構造モデルは、全国1次地下構造モデル（Koketsu et al. 2012[6]）を基本に、低速度の付加体のみDOENT下の1次元S波速度構造モデル（Tonegawa et al. 2017[7]）により作成した。全国1次地下構造モデルの付加体は $V_s = 1\text{km/s}$ の均質な低速度層としてモデル化されているが、実際には深さ方向に地震波速度が変化しており、より現実的な地震動シミュレーションを行うには不十分である。そのため、Tonegawa et al. (2017) [7]が推定した各DONET点における1次元S波速度構造を、鉛直方向へのS波走時へ変換し、S波走時を説明するような鉛直速度勾配を持つ簡易な堆積層構造を作成した。作成した簡易堆積層構造モデルのパラメーターをDONETの観測網内で補間、観測網外へ補外し、南海トラフ域の3次元付加体構造モデルを構築した。

構築した3次元地下構造モデルと地震動シミュレーションの詳細はTakemura, Kubo et al. (2019) [4]に記載されているが、例えば、2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震の地震動シミュレーションは、周期5-50秒と広い帯域の観測波形を再現することに成功した（図1）。

作成した地下構造モデル（Takemura, Kubo et al.,

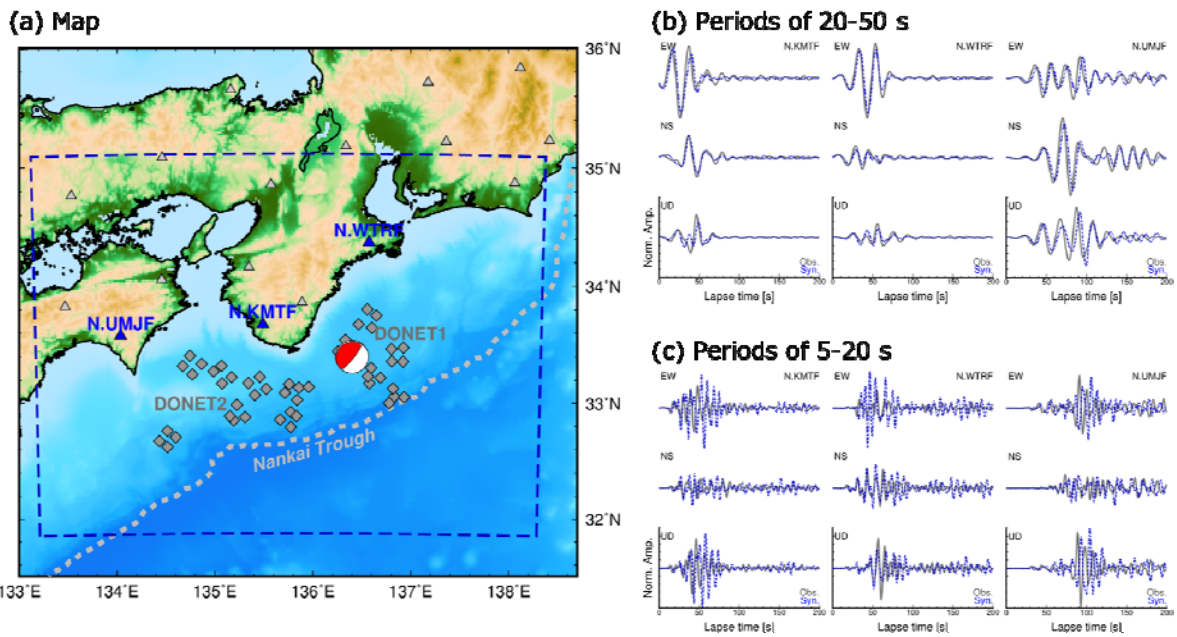


図 1. (a) 対象とした室戸沖から紀伊半島南東沖の地図、(b) (c) 2016 年三重県南東沖の地震（地図中の赤い震源球）のシミュレーション結果（青線）と観測波形（灰色線）の比較。地図中の三角と菱形は、F-net および DONET の観測点位置を示し、青い破線は計算領域である。(b) と (c) の波形は、周期 20-50 秒と 5-20 秒のバンドパスフィルターをかけ、観測点毎に 6 成分最大振幅で規格化されている。

2019[4]) を利用して、浅部超低周波地震を解析するための Green 関数データベースを作成した。浅部超低周波地震はプレート境界で発生するすべり現象であると考え、海溝軸付近のプレート境界に 0.1° 毎に仮想震源を仮定した。仮想震源からの地震動伝播を差分法 (Furumura and Chen, 2004[8]; Maeda et al., 2017[9]) を用いて評価し、それらの結果を Green 関数とした。震源時間関数は 10~50 秒の継続時間を持つ Küpper wavelet とした。室戸岬沖から紀伊半島南東沖で発生した浅部超低周波を対象として、防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net の連続波形記録に周期 20-50 秒のバンドパスフィルターをかけ、CMT 解析を実施した。観測波形と CMT 解による合成波形との間で Variance Reduction (VR) を評価し、VR 最大となる解の震央位置、セントロイド時刻、メカニズム解および震源パルス幅を最適解とした。

3. 南海トラフ沿いの浅部超低周波地震活動の時空間変化

図 2 に解析結果をまとめる。2003 年 6 月から 2018 年 5 月までの間に、Asano et al. (2008) [2] の手法で検知された浅部超低周波地震について、3 次元地下構造モデルを考慮した CMT 解析手法により再解析を行い、その中から VR が 20% 以上のものを用いて議論を行う。図 2(a) に浅部超低周波地震活動のスナップショットを示す。推定された浅部超低周波地震のほとんどは、プレート境界でのすべり現象を示唆する低角逆断層のメカニズム解を持つ。また、フィリピン海プレートの深さ 30 km の等深線に沿うようにベルト状に分布する深部スロー地震

活動と異なり、浅部超低周波地震は室戸岬沖、紀伊水道沖と紀伊半島南東沖でのみ活発であり、紀伊半島南方沖ではほとんど発生しない。

図 2 (b) に (A) 室戸岬沖・紀伊水道沖、(B) 紀伊半島南方沖と (C) 紀伊半島南東沖のそれぞれの活動セグメントにおける浅部超低周波地震活動の時間変化を示す。図 2 (b) 上段は個々の浅部超低周波地震の地震モーメント、中段は各セグメントの浅部超低周波地震の積算個数、下段は地震モーメントの積算値 (積算モーメント) を示す。活発な浅部超低周波地震は、室戸岬沖と紀伊水道沖では 2003 年、2004 年、2009 年、2015 および 2018 年に、紀伊半島南東沖では 2004 年、2009 年および 2016 年に確認された。室戸岬沖と紀伊水道沖の 2009 年と 2018 年、紀伊半島南東沖の 2016 年の活動時に、測地学的あるいは間隙流体圧の観測からスロースリップイベントが発生していたことが報告されており (Araki et al., 2017[10]; Yokota & Ishikawa, 2019 [11])、浅部超低周波地震をモニタリングすることでプレート境界のすべり現象の把握が可能であると示唆される。

2003 年 6 月から 2018 年 5 月までの浅部超低周波地震カタログを利用して、浅部超低周波活動の空間変化とプレート境界のすべり欠損速度 (Noda et al., 2018[12]) や地震波速度構造 (Tonogawa et al., 2017[7]) を比較し、浅部スロー地震発生領域の特徴を調べた。浅部スロー地震は、すべり欠損速度が大きな領域の周囲で、プレート境界付近に低速度異常が検知された領域で活発に活動していることを明らかにした。

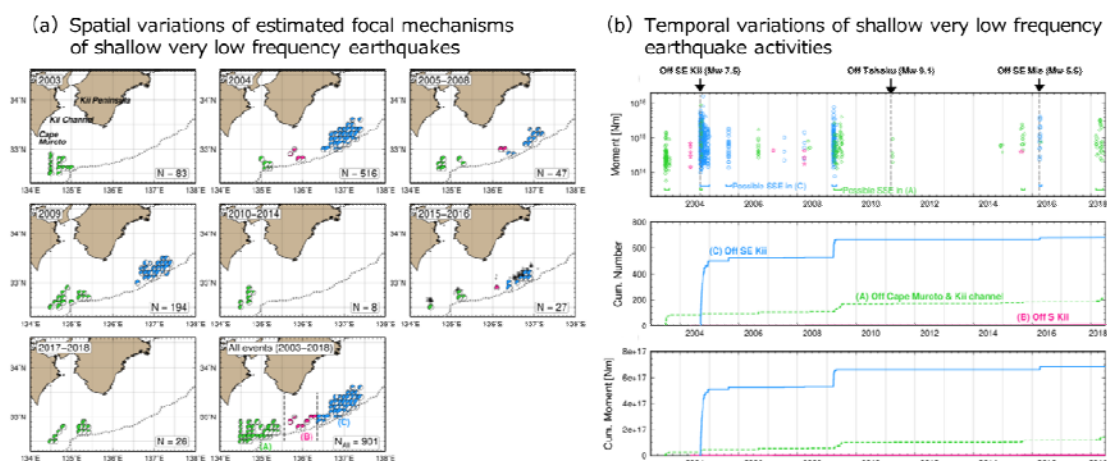


図2. 浅部超低周波地震の (a) 震源メカニズム解の空間分布と (b) 活動度の時間変化。浅部超低周波地震の震源球の色と活動度の時間変化のシンボルと緑色を対応させてある。2003年6月から2018年5月までの解析期間の中で発生した浅部超低周波地震のうち、CMT解析のVRが20%以上のもののみを用いて浅部超低周波地震の時空間変化の解析を行った。(a)中の2015-2016年のパネルにプロットされている黒点は、DONETにより推定された浅部超低周波地震の震央位置を示す(Nakano et al., 2018[3])。この図は、Takemura, Matsuzawa et al. (2019) [5]の図に加筆し、作成した。

4. まとめ

本報告書では、地球シミュレータの計算資源を利用して実施された、海域の地下構造のモデル化(Takemura, Kubo et al., 2019[4])とそれを用いたスロー地震活動モニタリング(Takemura, Matsuzawa, et al., 2019[5])の2つの成果を紹介した。海域の3次元地下構造モデル(特に低速な付加体)を高度化することで、広い帯域の地震動伝播の再現が可能となった。高度化した3次元地下構造モデルと陸域の広帯域地震計記録を海域で発生する地震現象の震源物理特性の推定へ応用し、これまで海底地震計でなければ精度良く推定することが難しかった浅部超低周波地震の位置とメカニズム解を正確に推定する手法を確立した。海底地震計は観測期間が限られているが、本研究で開発した手法により、海域観測以前にさかのぼり解析が可能となり、南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震の長期的な活動把握に成功した。

本課題の成果のような、地震動シミュレーションを用いた震源物理特性の推定法の開発は、海溝型巨大地震を含めた地震発生の物理の理解の深化に大きく貢献するだけでなく、CMT解を基にした地震動・津波予測システムなどへの応用が可能であり、今後の発展が期待される。

謝辞

本報告書で紹介した研究では、防災科学技術研究所のF-net (<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>)の連続波形記録を利用した。Nakano et al. (2018) [3]の浅部超低周波地震カタログは、スロー地震データベース

(<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>; Kano et al., 2018[13])よりダウンロードした。地震動シミュレーションは、海洋研究開発機構の地球シミュ

レータの計算資源を利用し、実施した。本報告書で紹介した研究成果[4][5]は、JSPS 科研費 17K14382 と JP16H06477 の助成を受けた。本課題の研究として得られた浅部超低周波地震のカタログは、Takemura, Matsuzawa et al. (2019) [5]、あるいはスロー地震データベースにて広く公開されている。

文献

- [1] Obara, K., & Kato, A., "Connecting slow earthquakes to huge earthquakes", *Science* 353 (6296), 253-257, 2016.
- [2] Asano, Y., Obara, K., & Ito, Y., "Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in Tokachi0oki near the junction of the Kuril and Japan trenches by using array signal processing", *Earth, Planets and Space*, 60 (8), 871-875, 2008.
- [3] Nakano, M., Hori, T., Araki, E., Kodaira, S., & Ide, S., "Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone", *Nature Comm.*, 9 (1), 984, 2018.
- [4] Takemura, S., Kubo, H., Tonegawa, T., Saito, T., & Shiomi, K., "Modeling of long-period ground motions in the Nankai subduction zone: model simulation using the accretionary prism derived from oceanfloor local S-wave velocity structures", *Pure Appl. Geophys.*, 176 (2), 627-647, 2019.
- [5] Takemura, S., Matsuzawa, T., Noda, A., Tonegawa, T., Asano, Y., Kimura, T., & Shiomi, K., "Structural Characteristics of the Nankai Trough shallow plate boundary inferred from shallow very low frequency earthquakes", *Geophys. Res. Lett.*, 46 (8),

- 4192-4201, 2019.
- [6] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., “Japan integrated velocity structure model version 1”, Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, 2012.
- [7] Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano, M., & Suzuki, K., “Sporadic low-velocity volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters”, *Nature Comm.*, 8 (1), 2048, 2017.
- [8] Furumura, T., & Chen, L., “Large scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield and earth simulator”, *Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 6 (2), 153-168, 2004
- [9] Maeda, T., Takemura, S., & Furumura, T., “OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media”, *Earth, Planets and Space*, 69 (1), 102, 2017
- [10] Araki, E., Saffer, D., Kopf, A., et al., “Recurring and triggering slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust”, *Science*, 356 (6343), 1157-1160, 2017.
- [11] Yokota, Y., & Ishikawa, T., “Shallow long-term slow slip events along the Nankai Trough detected by the GNSS-A”, *EarthArXiv*, <https://doi.org/10.31223/osf.io/vq6ca>, 2019
- [12] Noda, A., Saito, T., & Fukuyama, E., “Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere”, *J. Geophys. Res.*, 123 (9), 8125-8142, 2018.
- [13] Kano, M., Aso, N., Matsuzawa, T., Ide, S., et al., “Development of a slow earthquake database”, *Seismol. Res. Lett.*, 89 (4), 1566-1575, 2018.

Long-term Activity of Shallow Slow Earthquakes along the Nankai Trough based on Green's Functions of the 3D Heterogeneous Structure Model

Project Representative

Takashi Furumura Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Author

Shunsuke Takemura *¹

*¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

To investigate the long-term activity of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough, which frequently occurs in the regions surrounding megathrust rupture zones, we conducted centroid moment tensor (CMT) inversions of shallow very low frequency earthquakes (shallow VLFEs), including events before offshore observations. Green's functions for CMT inversions were evaluated via finite-difference method simulation using the regional 3D velocity structure model. This 3D model was constructed from the community model of Japan and local offshore *S*-wave velocity structures. By using 3D Green's functions, we obtained accurate and long-term CMT catalog of shallow VLFE along the Nankai Trough. Our CMT catalog revealed spatiotemporal characteristics of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough.

Keywords : Nankai Trough, Slow earthquake, the 3D heterogeneous subsurface structure, CMT inversion, Ground motion simulation

1. Introduction

Along the Nankai Trough, where megathrust earthquakes have repeatedly occurred, seismicity of regular earthquakes on the plate boundary is very low but slow earthquakes frequently occur (Obara and Kanto, 2016[1]). Several types of slow earthquakes, such as low frequency tremor, very low frequency earthquakes (VLFEs), slow slip events (SSEs) and coupled phenomena (ETS; episodic tremor and slip), have been observed. To understand the physical characteristics of the plate boundary, slow earthquakes have been extensively investigated in various subduction zones.

Although dense and high-quality onshore seismological networks were developed in Japan, characteristics of slow earthquakes are not fully understood. Especially, because source regions are near the trench, far from onshore seismic stations, it is difficult to evaluate shallow slow earthquakes precisely, which occurred at shallower extensions of megathrust rupture zones. Conventional one-dimensional (1D) approaches based on onshore seismograms (e.g., Asano et al., 2008[2]) provide incorrect results, especially for focal mechanisms and epicenters, due to three-dimensional (3D) offshore heterogeneous structures. To overcome these problems, the permanent offshore network of DONET is very useful (Nakano et al., 2018[3]) but the observation period is still limited. To understand the long-term activity of slow earthquakes, we should re-visit long-term onshore seismic records.

In this report, first, we introduce studies of modeling subsurface velocity structure, especially accretionary prism (Takemura, Kubo, et al. 2019[4]), which explained observed long-period ground motions. By using the constructed model,

centroid moment tensor analysis of shallow VLFE was conducted (Takemura, Matsuzawa, et al. 2019[5]). According to the long-term CMT catalog of shallow VLFE, we evaluated slow earthquake activity along the Nankai Trough.

2. Structural model and method

We used the 3D model of Koketsu et al. (2012)[6]. The structure within the low-velocity accretionary prism was constructed from 1D local *S*-wave velocity structures beneath DONET stations (gray diamonds in Figure 1) by Tonegawa et al. (2017)[7]. By interpolating and extrapolating these 1D structures, we constructed the 3D model of the accretionary prism along the Nankai Trough.

The finite-difference method simulation of seismic wave propagation (Furumura and Chen, 2004[8]; Maeda et al., 2017[9]) for the southeast off Mie earthquake occurred on 1 April 2016 was conducted using the constructed model. Our model simulation well explained observed long-period ground motions (Figure 1). Details of model descriptions and validations were described in Takemura, Kubo, et al. (2019)[4].

To investigate the long-term activity of shallow slow earthquake along the Nankai Trough, we conducted centroid moment tensor (CMT) inversions of shallow VLFEs using long-term onshore seismograms. The Green's functions for CMT inversion were evaluated via finite-difference simulations using the 3D model of Takemura, Kubo, et al. (2019)[4]. Details of CMT inversion were described in Takemura, Matsuzawa, et al. (2019). After CMT inversion, we obtained centroid location, time, moment magnitude, focal mechanism and source duration of each shallow VLFE.

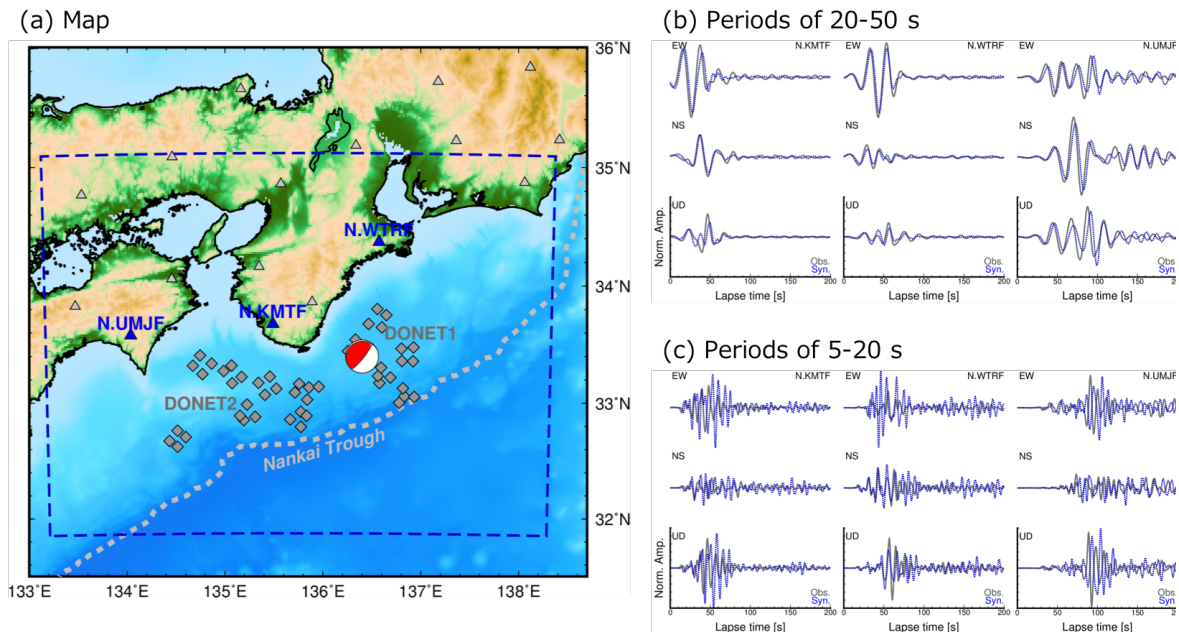


Figure 1. (a) The Map of the target region, (b)(c) simulation results of the southeast off Mie earthquake (a red focal mechanism). The triangles and diamonds in (a) are F-net and DONET stations, respectively. The blue dashed rectangle in (a) represents the calculation region. The gray solid and blue dotted lines in (b) and (c) are observed and simulated waveforms, respectively. Amplitudes of each trace were normalized by the maximum amplitude of 6-component seismograms at each station.

3. Long-term activity of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough

Figure 2 shows the spatiotemporal variation of shallow VLFE activity along the Nankai Trough from June 2003 to May 2018. Almost of obtained CMT solutions were characterized by a low-angle thrust faulting mechanism (Figure 2a), suggesting seismic slip on the plate boundary. Shallow VLFE actively occurred in two regions: (A) off the Cape Muroto and Kii channel, (C) southeast off the Kii

Peninsula. Temporal variations of shallow VLFE activities (Figure 2b) illustrated the episodic occurrence of shallow VLFEs. During some shallow VLFE episodes, SSEs simultaneously occurred (Araki et al., 2017[10]; Yokota and Ishikawa, 2019[11]). Thus, the activity of shallow VLFEs is important for monitoring slip behavior on the plate boundary.

By comparing the slip-deficit rate on the plate boundary (Noda et al., 2018[12]) and offshore velocity structure (Tonegawa et al., 2017[7]), we concluded that shallow VLFE is activated by decreasing effective strength due to rich pore

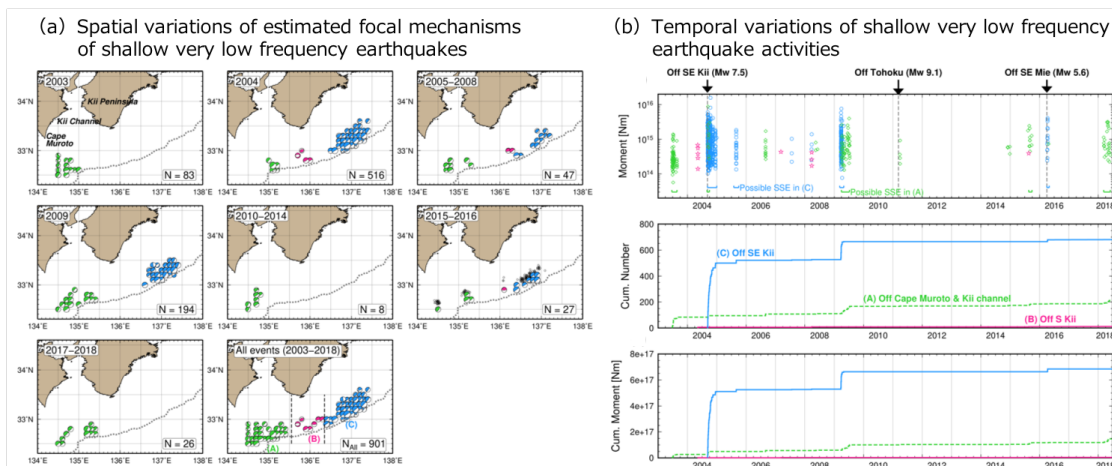


Figure 2. Spatiotemporal variations of shallow VLFE activity along the Nankai Trough. The difference in colors of focal mechanisms and lines represents a difference in segments of shallow VLFE activities. The back open circles in (a) are epicenters of shallow VLFEs estimated by DONET record (Nakano et al., 2018[3]). Figures were modified from the original figures of Takemura, Matsuzawa et al. (2019)[5].

fluid in the regions surrounding strongly locked zones.

4. Summary

By using calculation resources of the Earth Simulator, we developed the subsurface structure model (Takemura, Kubo, et al., 2019[4]) and CMT inversion method for offshore seismic events (Takemura, Matsuzawa, et al., 2019[5]). According to the obtained CMT catalog of shallow VLFs along the Nankai Trough, spatiotemporal activity patterns of shallow slow earthquakes were illustrated.

Such long-term and detailed activity of shallow slow earthquakes could be investigated by the combined use of long-term onshore seismic record and large-scale computer simulations. Our developments will contribute to understanding the physical mechanisms of megathrust earthquakes and warning systems of strong ground motions and tsunamis.

Acknowledgment

F-net waveform data were downloaded from the NIED website <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>. The catalog of Nakano et al. (2018)[3] was downloaded from the “Slow earthquake database” (Kano et al., 2018[13]; <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>). The simulations of seismic wave propagation were conducted on the Earth Simulator of Japan Agency for Earth-Marine Science and Technology. Our studies of Takemura, Kubo, et al. (2019)[4] and Takemura, Matsuzawa et al. (2019)[5] were supported by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Numbers 17K14382 and JP16H06477. Our catalog of shallow VLFE [5] is available from the journal website and “slow earthquake database”.

References

- [1] Obara, K., & Kato, A., “Connecting slow earthquakes to huge earthquakes”, *Science* 353 (6296), 253-257, 2016.
- [2] Asano, Y., Obara, K., & Ito, Y., “Spatiotemporal distribution of very-low frequency earthquakes in TokachiOoki near the junction of the Kuril and Japan trenches by using array signal processing”, *Earth, Planets and Space*, 60 (8), 871-875, 2008.
- [3] Nakano, M., Hori, T., Araki, E., Kodaira, S., & Ide, S., “Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone”, *Nature Comm.*, 9 (1), 984, 2018.
- [4] Takemura, S., Kubo, H., Tonegawa, T., Saito, T., & Shiomi, K., “Modeling of long-period ground motions in the Nankai subduction zone: model simulation using the accretionary prism derived from oceanfloor local S-wave velocity structures”, *Pure Appl. Geophys.*, 176 (2), 627-647, 2019.
- [5] Takemura, S., Matsuzawa, T., Noda, A., Tonegawa, T., Asano, Y., Kimura, T., & Shiomi, K., “Structural Characteristics of the Nankai Trough shallow plate boundary inferred from shallow very low frequency earthquakes”, *Geophys. Res. Lett.*, 46 (8), 4192-4201, 2019.
- [6] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., “Japan integrated velocity structure model version 1”, *Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering*, 2012.
- [7] Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano, M., & Suzuki, K., “Sporadic low-velocity volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters”, *Nature Comm.*, 8 (1), 2048, 2017.
- [8] Furumura, T., & Chen, L., “Large scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield and earth simulator”, *Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 6 (2), 153-168, 2004
- [9] Maeda, T., Takemura, S., & Furumura, T., “OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media”, *Earth, Planets and Space*, 69 (1), 102, 2017
- [10] Araki, E., Saffer, D., Kopf, A., et al., “Recurring and triggering slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust”, *Science*, 356 (6343), 1157-1160, 2017.
- [11] Yokota, Y., & Ishikawa, T., “Shallow long-term slow slip events along the Nankai Trough detected by the GNSS-A”, *EarthArXiv*, <https://doi.org/10.31223/osf.io/vq6ca>, 2019
- [12] Noda, A., Saito, T., & Fukuyama, E., “Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere”, *J. Geophys. Res.*, 123 (9), 8125-8142, 2018.
- [13] Kano, M., Aso, N., Matsuzawa, T., Ide, S., et al., “Development of a slow earthquake database”, *Seismol. Res. Lett.*, 89 (4), 1566-1575, 2018.