

大規模数値シミュレーションを用いた南海トラフプレート境界浅部の地震モニタリングへ向けた地震波伝播特性の解析

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, 矢部 優*², 江本 賢太郎*³

*¹ 東京大学地震研究所, *² 産業総合技術研究所, *³ 東北大学

2011年以降、巨大地震発生域周辺の海域に定常的な海底地震観測網が敷設され、巨大地震発生域の地下構造や地震活動解析に関する研究が大きく進んだ。しかし、海底地震計の周辺は沈み込む海洋プレート、海洋堆積物、海底地形や海水などの不均質構造があり、観測された地震波形には震源での断層破壊履歴の他にそれらの不均質構造の影響が含まれていると考えられる。巨大地震発生域の地震活動や構造的特徴の詳細把握、ひいては次世代の地震活動モニタリングへ向け、海底地震計に含まれる様々な不均質構造の影響を評価する必要がある。本稿では、南海トラフを対象地域として、海底地震計に含まれる種々の不均質構造が高周波数地震動へ及ぼす影響を地震波伝播シミュレーションにより詳細に調べた。シミュレーションの結果、震源から放射された地震波は、厚い付加体内にトラップ・増幅されることで立ち上がり不明瞭で継続時間の長い紡錘形の地震波形エンベロープとなることを明らかにした。地下構造の影響を考慮して、精確に震源の特徴を捉えるためには、大規模地震波伝播シミュレーション環境および高精度地下構造モデルの整備が喫緊の課題である。

キーワード: 南海トラフ, 海底地震計, 不均質構造, 地震波伝播シミュレーション, 地震活動モニタリング

1. はじめに

海溝型巨大地震による地震動・津波予測、即時解析や防災対応への貢献のため、南海トラフと日本海溝沿いに地震・津波観測網 (DONETとS-net) が整備された (Aoi et al., 2020[1])。これらの地震観測網の登場により、遠い陸域では検知不可能だったスロー地震を含めた巨大地震震源域周辺の微小な地震活動を捉えることが可能となった (例えば、Araki et al., 2017[2]; Nishikawa et al., 2019[3])。巨大地震発生域周辺で発生する地震活動解析の高度化、より正確なモニタリングシステム提案のために、海底地震計で得られる地震波形の性質を理解することは重要である。本稿では、地球シミュレータの計算資源を利用したTakemura, Yabe & Emoto (2020) [4]の結果をベースに、海底地震計記録への海域特有の不均質構造の影響を議論し、海底地震計を用いたモニタリング研究の今後の展開を議論する。

2. 陸域・海底地震計の微小地震の地震波形比較

図1に広帯域地震観測網F-netで得られた地殻内地震の速度波形、DONETでえられたプレート境界地震の速度波形、浅部微動 (スロー地震の1種) の速度波形を示す。いずれも、M3程度のイベントである。地殻内地震の観測波形はS波の立ち上がりが明瞭であり、継続時間も短くパルス的な包絡線 (以下、エンベロープ) 形状をしている。一方で、同規模のプレート境界型地震では、震源の破壊時間も同程度と考えられるのに対し、DONETの地震波形記録ではS波直後に様々な波群が確認でき、それにより継続時間も長くなっていることがわかる。通常の地震と比べ、ゆっくりとした断層破壊を伴うスロー地震 (浅部微動) で

は、S波の立ち上がりも不明瞭で紡錘形のエンベロープ形状をしている。

このような地震波形の特徴の差異は、地震計の設置場所周辺の不均質構造の差異が原因と考えられる。DONETが設置されている紀伊半島南東沖では、沈み込むフィリピン海プレート、海水、海底地形などの不均質構造に加え、観測点直下はS波速度の遅い海洋堆積物 (以下、単に付加体と呼ぶ) に覆われており、地震波振幅の増幅、付加体内への地震波の多重反射など複雑な波動伝播となることが予想される。このような、複雑な地下構造での地震波伝播特性を明らかにするために、次のセクションでは地震波伝播シミュレーションの手法と結果の概要を記す。

3. 3次元地震波伝播シミュレーション

地震波伝播シミュレーションは、全国1次地下構造モデル (Koketsu et al. 2012[5]) とDONET下の1次元S波速度構造モデル (Tonegawa et al., 2017[6]) を利用した3次元S波速度構造モデルを用いて実施した。本公募課題グループで開発した差分法コードOpenSWPC (Maeda et al. 2017[7], <https://doi.org/10.5281/zenodo.3712649>)、地球シミュレータ1,280ノード、24TBのメモリを利用して図2a-cのような地震波伝播計算を実施した。解析周波数はM3程度の微小地震や浅部微動が十分観測できる、1-5Hzの帯域とした。図2cで確認できるように、沈み込む海洋プレート、地殻、付加体および海水が含まれている。詳細は、Takemura, Yabe & Emoto (2020) [4]に記載されているが、ここでは浅部微動 (Event A、図2aの赤い震源球) の結果にフォーカスして紹介する。

図2d-eに示すのは図2aのX-X'断面の地震波伝播シミュレーションの結果を示す。

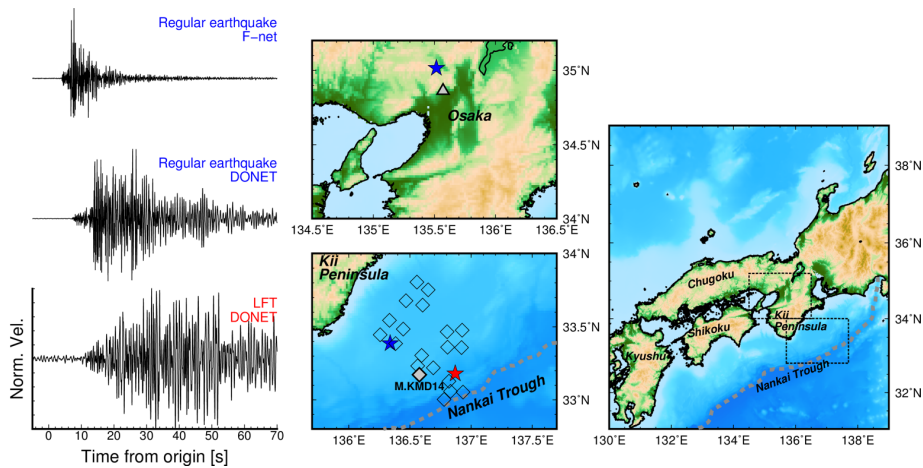


図1. 広帯域地震観測網 F-net の地殻内地震の波形記録、DONET のプレート境界型地震の波形記録、DONET の浅部微動の波形記録の比較。いずれの南北成分の速度波形であり、地殻内地震（真ん中上段の青い星）は 2015 年 1 月 24 日、プレート境界地震（真ん中下段の青い星）は 2016 年 4 月 1 日に発生した M3 程度のイベントである。真ん中下段の赤い星は 2016 年 4 月 3 日に発生した浅部微動の震央位置である。

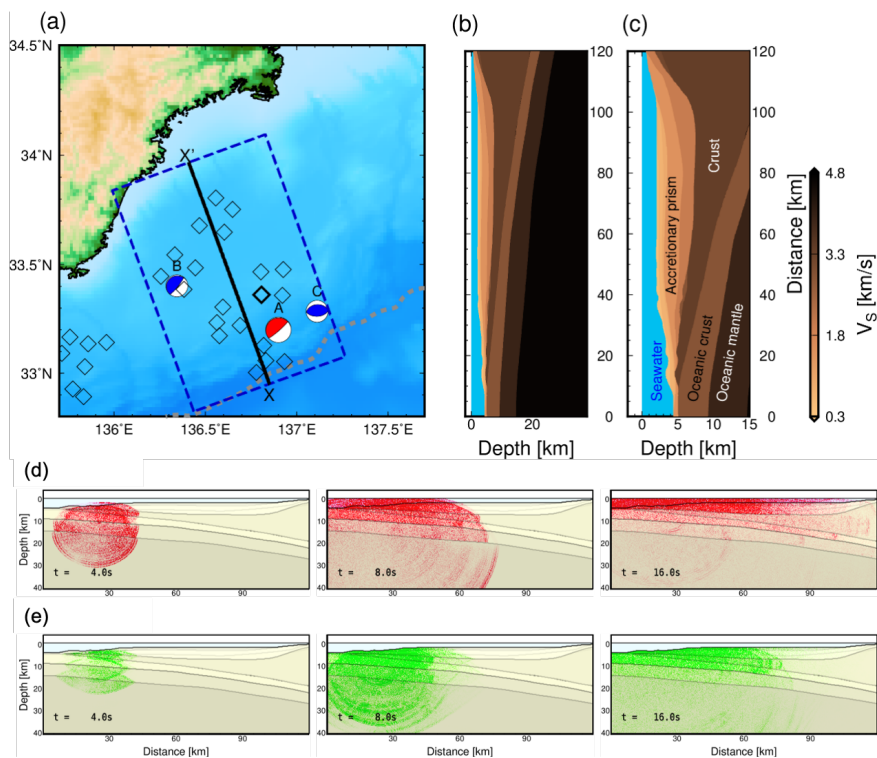


図2. (a)計算領域と DONET 観測点および仮定した震源、(b) X-X'断面の S 波速度構造、(c) X-X'断面の浅部 S 波速度構造、(d) 浅部微動 (Event A) シミュレーションの P 波波動場、(e) 浅部微動 (Event A) シミュレーションの P シミュレーション S 波波動場。

シミュレーションの結果である。P 波と S 波の波動場をわけて示しているが、付加体の直下で発生する浅部微動の場合、震源から放射された地震波はただちに付加体へ入射し、エネルギーは付加体の中にトラップされ、ゆれが長く続くことが伺える。浅部微動の実際の震源関数を推定することは難しいため、ここでは 0.2 秒の三角関数を仮定し、1-5 Hz の 3 成分合成 RMS エンベロープを作成した(図3)。

パルスの震源にも関わらず計算された速度波形エンベロープの継続時間は震源に近い KMB06 観測点でさえ 10 秒以上と長く、伝播距離の増大に伴い長大化する傾向が伺える。実際に 2016 年 4 月 16 日 22 時 36 分 (JST) に同様の位置で発生した浅部微動の観測エンベロープを見てみると、シミュレーションと比べ継続時間は倍以上長いものの、紡錘形のエンベロープ形状、伝播距離の増大に伴い

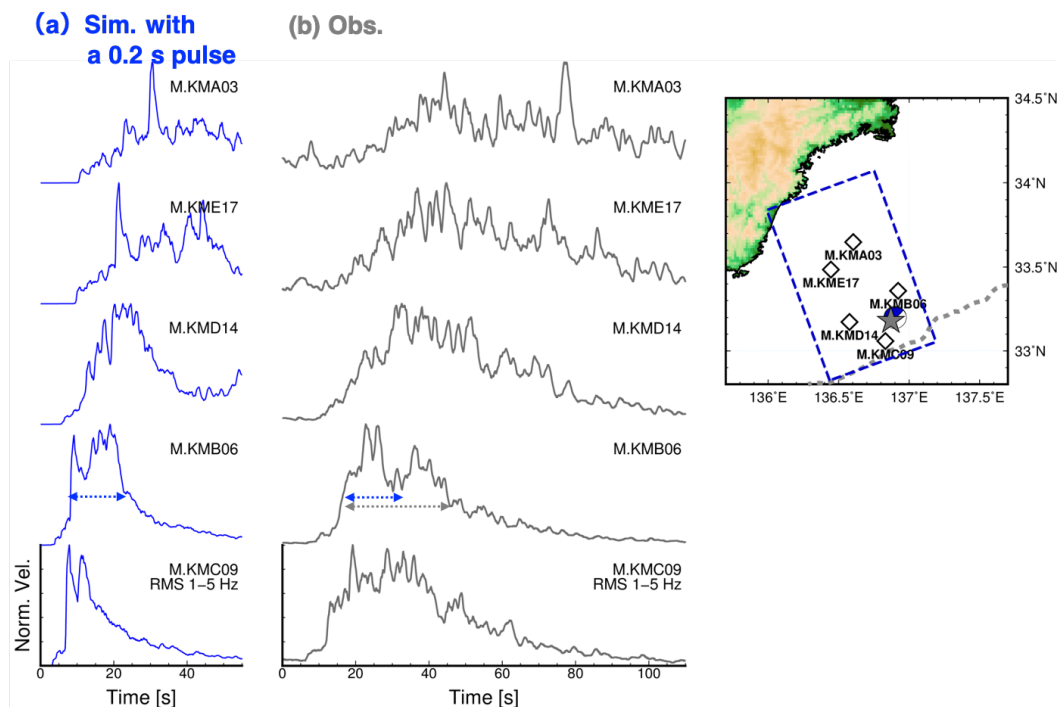


図 3. (a)0.2 秒の三角関数を仮定した浅部微動の地震波伝播シミュレーションの結果と (b) 2016 年 4 月 16 日 22 時 36 分 (JST) に発生した浅部微動の観測エンベロップ。1-5 Hz のバンドパスフィルターをかけ、3 成分合成 RMS エンベロップを作成し描画した。地図中の星は震央位置を示す。

継続時間が増す特徴は共通している。

本シミュレーション研究より、南海トラフに敷設される DONET 地震計の高周波数記録には、付加体による増幅およびエネルギーのトラップの影響が強く、特に震源の浅い浅部微動の場合、仮に震源がパルス的であったとしても、震央距離 10 km 程度の速度波形エンベロップの継続時間は 10 秒以上となり、伝播距離の増大に伴い継続時間も増加する。

震源が深くなる (図 2 の Event B と C) と、付加体でのエネルギートラップの効果が少なくなるが、それらの詳細は Takemura, Yabe & Emoto (2020) [4] に記載されているので、そちらを参照してほしい。

4. 結論と今後の展開

本報告書では、近年、発展の目覚ましい海底地震計記録について、観測点周辺の不均質構造が高周波数地震動に及ぼす影響を地震波伝播シミュレーションの結果を基に紹介した。浅部微動のような震源が浅い場合、輻射された地震波は直ちに付加体などの海洋堆積物層へ入射し、振幅の増幅やエネルギーのトラップにより紡錘形のエンベロップ形状となる。震源時間関数がパルスの短いものであったとしても、震央距離 10 km 程度でエンベロップの継続時間は 10 秒をこえ、伝播距離の増大に伴い継続時間はさらに増大する。

そのような海底地震計記録から、従来利用されてきた簡易な手法により震源の情報を正確に推定することは難しく、精緻な地下構造モデルを用いた大規模地震波伝播

シミュレーションにより地下構造の影響を含んだ Green 関数データベースの構築、それらを用いた震源解析の手法開発、南海トラフ巨大地震準備状況把握のためのモニタリングツール開発を進めることが重要である。

謝辞

本報告書で紹介した内容は、主に Takemura, Yabe and Emoto (2020) [4] に掲載されている。防災科学技術研究所の F-net (<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>) および DONET (<https://doi.org/10.17598/NIED.0008>) を利用しました。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を利用しました。本研究は、JSPS 科研費 19H04626 の助成を受けた。

文献

- [1] Aoi, S., Asano, Y., Kunigu, T., Kimura, T., Uchira, K., Takahashi, N., Ueda, H., Shiomi, K., Matsumoto, T., & Fujiwara, H., MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, Earth, Planets, and Space, 72:126, 2020 年 9 月
- [2] Araki, E., Saffer, D., Kopf, A., Wallace, L., Kimura, T., Machida, Y., Ide, S., Davis, E., IODP Expedition 365 shipboard scientist, Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, Science, 356(6343), 1157-1160, 2017 年 6 月
- [3] Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T., & Ide, S., The slow earthquake spectrum in

- the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observations, *Science*, 365(6455), 808-813, 2019 年 8 月
- [4] Takemura, S., Yabe, S., & Emoto, K., Modelling high-frequency seismograms at ocean bottom seismometers: effects of heterogeneous structures on source parameter estimation for small earthquakes and shallow low-frequency tremors, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1708-1723, 2020 年 8 月
- [5] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., Japan Integrated Velocity Structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-4, 2012 年 9 月
- [6] Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano M., & Suzuki, K., Sporadic low-frequency volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters, *Nature Communications*, 8(1), 2048, 2017 年 12 月
- [7] 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*, 69:102, 2017 年 7 月

Simulation Study of High-frequency Seismic Wave Propagation for Monitoring Seismicity in the Nankai Subduction Zone

Project Representative

Takashi Furumura

Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Authors

Shunsuke Takemura*¹, Suguru Yabe*², Kentaro Emoto*³

*¹Earthquake Research Institute, the University of Tokyo *²Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, *³Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Due to strong 3D heterogeneities in offshore regions, conventional monitoring methods may misestimate source parameters such as the duration and radiation energy. Estimations could become severe inaccuracies for small offshore seismic events because high-frequency (> 1 Hz) seismograms, which are strongly affected by 3D heterogeneities, are only available for analysis because of their signal-to-noise ratio. To investigate the effects of offshore heterogeneities on source parameter estimation and monitoring for small seismic events, we analyzed both observed and simulated high-frequency seismograms southeast off the Kii Peninsula, Japan, in the Nankai subduction zone. The model simulations demonstrated that the thick low-velocity accretionary prism has significant effects on high-frequency seismic wave propagation. Especially for shallow tremors occurring at depths just below the accretionary prism toe, seismogram durations are significantly broader than an assumed source duration. Spindle-shape seismogram envelopes were observed even at such close stations. Our results suggest that incorporating three-dimensional heterogeneities is necessary for practical estimation of source parameters and reliable monitoring for small offshore events in the Nankai subduction zone.

Keywords : Nankai Trough, ocean bottom seismometer, heterogeneous subsurface structure, simulation, monitoring

1. Introduction

Recent developments of ocean bottom instruments (e.g., Aoi et al., 2020[1]) provide us good opportunities to analysis offshore seismicity just around the megathrust zones (e.g., Araki et al., 2017[2]; Nishikawa et al., 2019[3]). In this report, we introduce the study of high-frequency (> 1 Hz) seismic wave propagation around ocean bottom seismometer (OBS) network DONET for precise modeling and monitoring seismic sources of offshore small seismic events in Nankai subduction zone, including shallow slow earthquakes. Details were described in the published paper of Takemura, Yabe & Emoto (2020)[4].

2. Observed seismograms at onshore and offshore seismic stations

Examples of observed NS-component velocity seismograms at onshore and offshore broadband stations. These event sizes are almost similar, but the source duration of shallow tremor (bottom panel of left part in Figure 1) is expected to be significantly longer than other two regular earthquakes. Onshore seismogram (upper panel of left part in Figure 1) shows clear onset and short-duration *S* wave. On the other hand, at offshore stations (middle panel of left part in Figure 1), many reflected phases appeared after the *S* arrival, and consequently, *S*-wave envelope was elongated. The envelope shape of a shallow tremor is more complicated than others, showing a spindle shape. These differences could be caused by differences in the heterogeneous structures around onshore and offshore seismic stations. The effects of offshore

heterogeneities can be evaluated by realistic 3D numerical simulations of high-frequency seismic wave propagation.

3. Numerical simulations of seismic wave propagation in a 3D heterogeneous structure model

We mainly discussed the simulation result of Event A in Figure 2a, which was a modeled source of a shallow tremor. The 3D model (Figure 2bc) was constructed from the JIVSM (Koketsu et al., 2012[5]) and shallower low-velocity (< 2.8 km/s) structures (Tonegawa et al., 2017[6]). Although typical durations of shallow tremors are longer than 10 s, we assumed a low-angle thrust mechanism with a 0.2-s triangle-type moment rate function to focus propagation features of high-frequency (> 1 Hz) seismic waves. We used an open-source seismic wave propagation finite-difference code of OpneSWPC (Maeda et al., 2017[7], <https://doi.org/10.5281/zenodo.3712649>), which has been developed by our group.

Figures 2de show the simulated *P* and *S* wavefields of Event A along X-X' profile. Simulated waves were trapped and amplified due to the accretionary prism (shallower sedimentary structures). We assumed a pulsive (0.2-s) source on the plate boundary, but simulated envelopes were characterized by unclear onset and longer durations (Figure 3a). The durations of simulated envelopes were broadened as increasing distance. Although source time functions were completely different in observed and simulated seismograms, this distance-dependence feature was also confirmed in observed envelopes (Figure 3b).

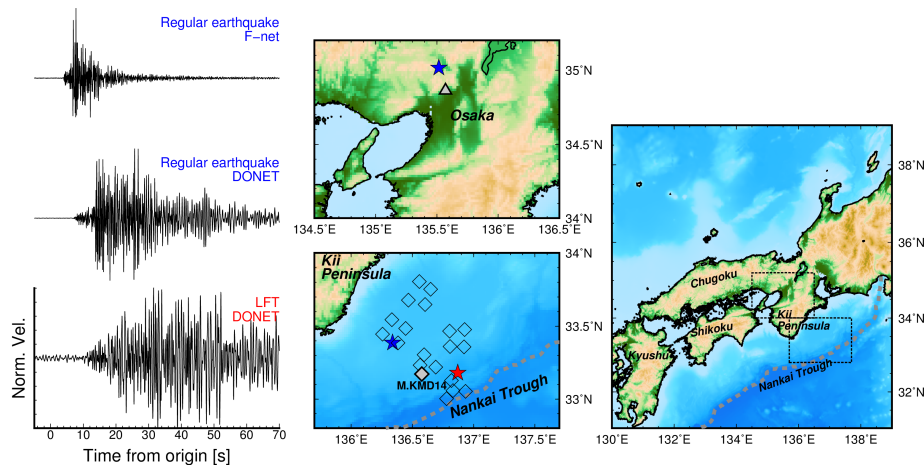


Figure 1. Examples of observed NS-component seismograms for a crustal earthquake, an offshore interplate earthquake, and a shallow tremor (LFT). Crustal and offshore interplate earthquakes occurred on 24 January 2015 and 1 April 2016, respectively. A shallow tremor occurred on 3 April 2016. The magnitudes of these events were approximately 3, and epicentral distances were also similar. The blue and red stars in enlarged maps are the epicenters of regular earthquakes and shallow tremor, respectively. The triangle and diamond symbols show the locations of the F-net and DONET stations, respectively.

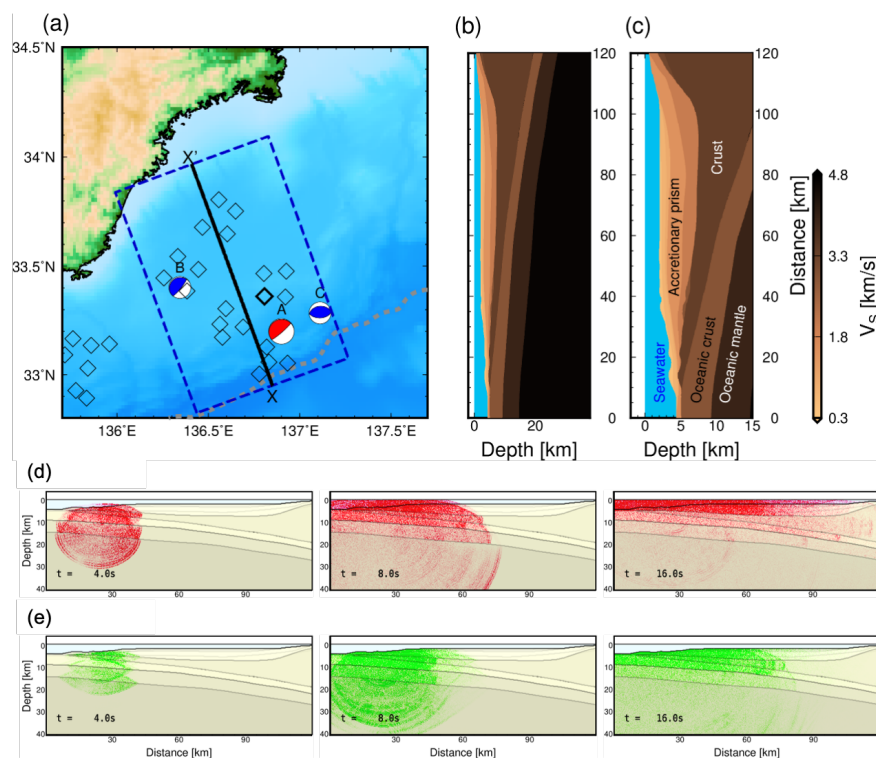


Figure 2. (a) Map of the simulation region and cross-sections of the (b) S -wave velocity model along the $X-X'$ profile and (c) S -wave velocity model at shallower (< 15 km) depths. The red and blue focal mechanisms are source models of a shallow tremor and regular earthquakes, respectively. Simulated snapshots of (d) P and (e) S wavefields along profile $X-X'$ for the shallow tremor simulation.

Other simulation results of Events b and c (interplate and intraslab regular earthquakes) were described in Takemura, Yabe & Emoto (2020)[b]. In the cases of deeper seismic sources, the effects of the accretionary prism become small compared with a simulation of shallow tremor.

4. Conclusions and reliable seismic monitoring

In this report, we conducted numerical simulations of high-frequency seismic wave propagation using a realistic 3D velocity structure model. Simulation results show unclear S -wave onsets and spindle-shape envelopes even for a pulse-like source time

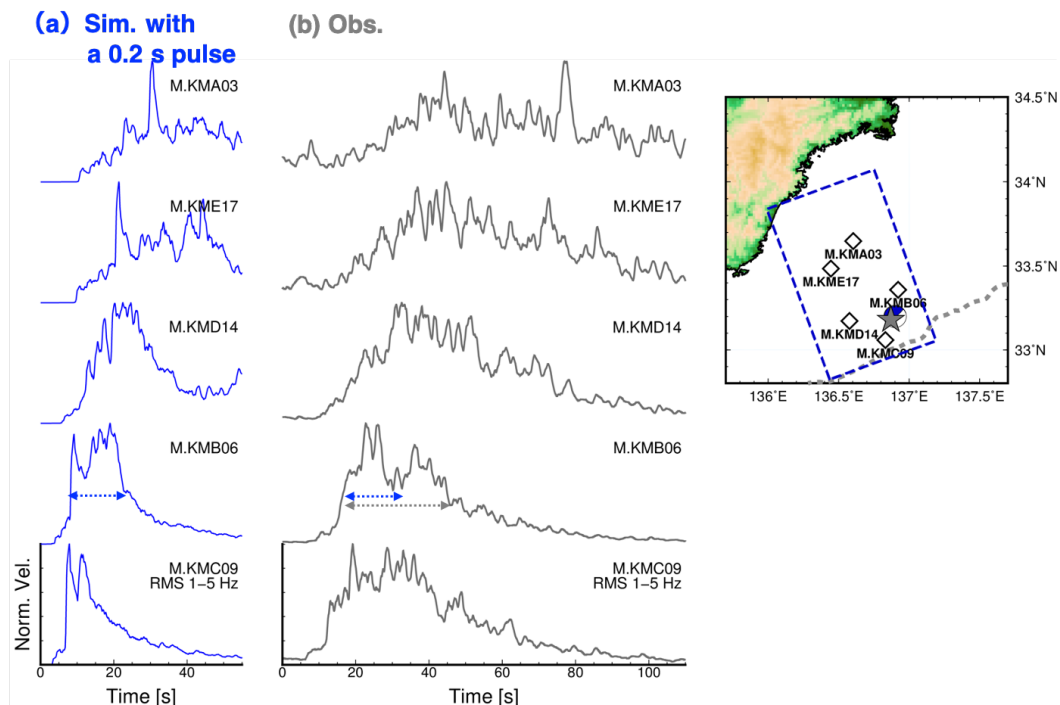


Figure 3. Comparisons of (a) simulated RMS envelopes for frequencies of 1-5 Hz and (b) observed envelopes of a shallow tremor at 22:36 on 16 April 2016 (JST).

function. It is indicating that characteristics of seismic sources on the plate boundary cannot be resolved by convectonal approaches due to strong amplification and trap effects of the accretionary prism just below seismic stations.

To achieve reliable monitoring of seismicity around the megathrust zones in the Nankai subduction zone, the effects of offshore heterogeneities, especially the accretionary prism, can not be negligible. The Green's function database derived from large-scale simulations using a high-resolution 3D subsurface structure model should be required for monitoring in future studies.

Acknowledgment

We used continuous broadband velocity records at NIED F-net (<https://doi.org/10.17598/NIED.0005>) and DONET stations (<https://doi.org/10.17598/NIED.0008>). Numerical simulations were conducted on the Earth Simulator at the Japan Agency for Earth-Marine Science and Technology. This study was supported by the JSPS KAKENHI #19H04626.

References

- [1] Aoi, S., Asano, Y., Kunigu, T., Kimura, T., Uehira, K., Takahashi, N., Ueda, H., Shiomi, K., Matsumoto, T., & Fujiwara, H., MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, *Earth, Planets, and Space*, 72:126, 2020.
- [2] Araki, E., Saffer, D., Kopf, A., Wallace, L., Kimura, T., Machida, Y., Ide, S., Davis, E, IODP Expedition 365

shipboard scientist, Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust, *Science*, 356(6343), 1157-1160, 2017.

- [3] Nishikawa, T., Matsuzawa, T., Ohta, K., Uchida, N., Nishimura, T., & Ide, S., The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observations, *Science*, 365(6455), 808-813, 2019.
- [4] Takemura, S., Yabe, S., & Emoto, K., Modelling high-frequency seismograms at ocean bottom seismometers: effects of heterogeneous structures on source parameter estimation for small earthquakes and shallow low-frequency tremors, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1708-1723, 2020.
- [5] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., Japan Integrated Velocity Structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-4, 2012.
- [6] Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano M., & Suzuki, K., Sporadic low-frequency volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters, *Nature Communications*, 8(1), 2048, 2017.
- [7] 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*, 69:102, 2017.