

海底地震計における高周波数地震動の伝播過程の検討

課題責任者

武村 俊介

東京大学地震研究所

著者

武村 俊介*1, 江本 賢太郎*2, 矢部 優*3

*1 東京大学地震研究所, *2 九州大学, *3 産業技術総合研究所

キーワード：南海トラフ, DONET, 高周波数地震動, スロー地震, OpenSWPC

1. はじめに

近年、海洋研究開発機構ならびに防災科学技術研究所により海域の地震計ネットワークが構築され、巨大地震震源域近傍の地震現象のモニタリングが可能となった（観測網の詳細は Aoi et al., 2020[1]）。しかし、そこで捉えられたすべり現象（特に浅部スロー地震）の震源物理特性を正確に評価するためには陸上の地震計の解析と異なり、

(1) 海底地震計下の厚い堆積層（S 波速度 0.6-2 km/s 程度）の伝播効果、(2) 地盤増幅効果（例えば、Kubo et al., 2018[2]; Yabe et al., 2019[3]）などの影響を考慮する必要がある。地盤増幅効果については、F-net などの陸域の岩盤点を基準点として、遠地 S 波の距離減衰式から推定されることが一般的である。陸上の F-net 点に比べて、10 倍を超える地盤増幅係数が推定されているが、この場合、鉛直下方入射を仮定し、厚い堆積層と海底面付近（観測点直下）の薄い低速度層の両方の効果をあわせた値が推定される。プレート境界浅部（ ≤ 10 km）で発生する地震やスロー地震の場合、鉛直下方入射の仮定が崩れるとともに堆積層内の伝播効果が顕在化することが考えられる（例えば、Takemura et al., 2020[4]）。

そこで、我々は 1 次元地震波速度構造モデルを用いて、厚い堆積層による伝播増幅効果を地震動シミュレーションにより検討した。本報告書の内容の詳細は、国際誌へ投稿済みであり、Takemura et al. 2023[5] のプレプリントの内容の一部である。

2. シミュレーション手法

地震動シミュレーションには Maeda et al. (2017)[6] の OpenSWPC を利用した。南海トラフ浅部を模擬するために DONET 下の 1 次元 P 波速度構造 (Nakano et al., 2013[7]) を仮定した。S 波速度、密度、非弾性減衰などのパラメータは P 波速度との経験則 (Borcher, 2005[8], 2008[9]) に基づき作成した。このモデルを DONET1D と呼ぶことにする。このモデルから、S 波速度 2.8 km/s 以下の堆積層を除いて、地殻物質の物性パラメータに置き換えた構造を DONET1D' とし、両者を比較することで厚い (> 5 km) 堆積層による伝播効果を検討する。

紀伊半島南東沖では、低角逆断層で特徴づけられる浅部プレート境界ではテクトニック微動やプレート境界地

震、20 km 以深では正断層などのスラブ内地震が卓越するため、プレート境界に低角逆断層、40 km に正断層の 2 ケースのシミュレーションを実施した。それぞれ、浅部テクトニック微動とスラブ内地震を模擬している。ただし、地下構造の影響を明確化するために、震源時間関数は単一のパルスを仮定している。

3. シミュレーション結果

図 1 に示すのは、シミュレーションによる P 波（赤い粒子）および S 波（緑の粒子）の波動伝播の様子である。ここでは、浅部テクトニック微動のみに着目し、堆積層の有無による地震波伝播の違いのみを示す。堆積層がない場合（図 1a）、P 波、S 波およびその他の変換波の波面は明瞭である。また、海表面と海底面の間で P 波が多重反射している様子も可視化された。一方で、堆積層を含むモデル（DONET1D; 図 1b）では、堆積層内の多重反射により波動場は複雑となり、それぞれの波面は不明瞭となる。

次に、図 2 にテクトニック微動の場合の震央距離 20 km と 40 km における Radial 成分の 2-8 Hz の速度波形の比較を示す。2-8 Hz は、微小地震やテクトニック微動（地震学的スロー地震の一種）の解析でよく使われる帯域である。堆積層のない DONET1D'（図 2 赤線）では、P 波、sP 変換波、S 波および海表面からの多重反射 P 波が明瞭に確認できる。堆積層を導入したことで DONET1D（図 2 青線）では、直達波および変換波は不明瞭となり、堆積層基盤からの反射が明瞭になる。伝播距離が長くなると、海底面と堆積層基盤の間を多重反射し、エネルギーがトラップされてしまうようになる。結果として、大きなエンベロープ拡大を示す。

DONET1D および DONET1D' で得られた速度波形を 2 乗積分し、3 成分合成エンベロープ（以下、単に 2 乗エンベロープ）を作成した。2 乗エンベロープに 5 秒の移動平均を施し、半値幅を計測、半値幅の範囲内で積分し、 $2\pi V_{sp} R^2$ をかけることで地震波エネルギーを算出した。ここで、R は各観測点の震源距離、S 波速度 $V_s = 3,500$ m/s、密度 $\rho = 2,700$ kg/m³ とした。各震央距離で算出したエネルギーについて、DONET1D と DONET1D' の比を取ることによって厚い堆積層による伝播増幅効果を検討した（図 3）。図 3a はスラブ内地震の地震波エネルギーへの堆積層の伝播

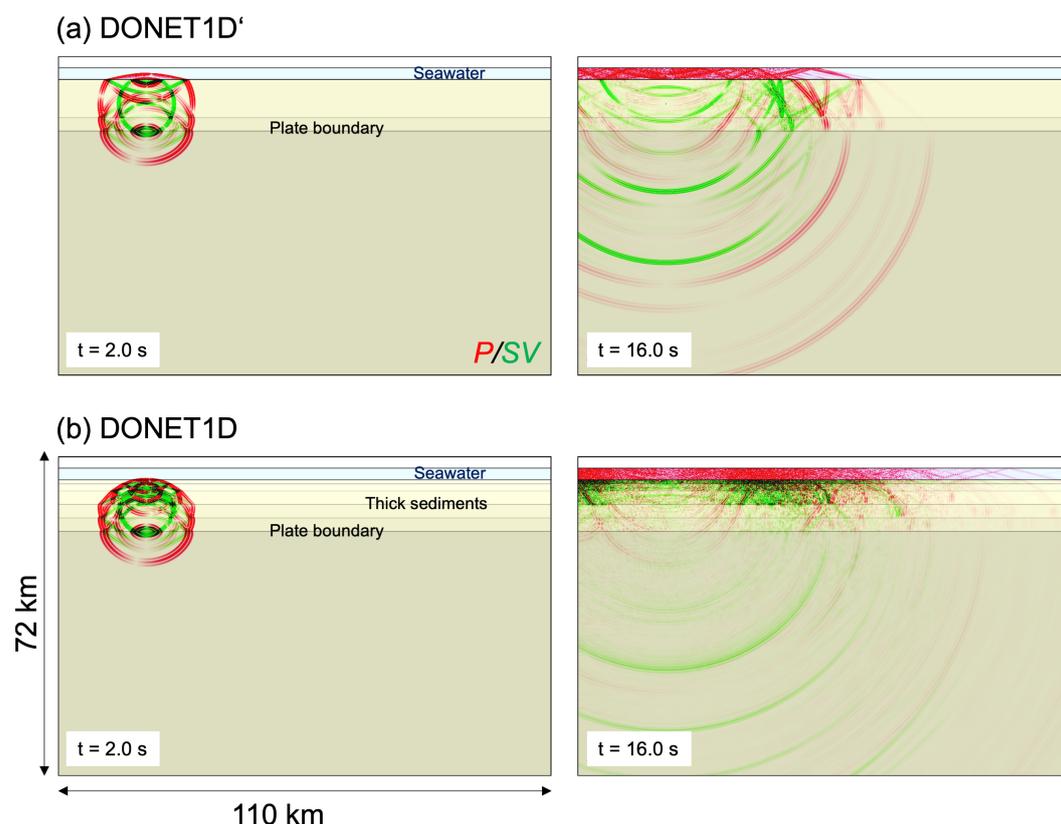


図 1. (a) DONET1D'および (b) DONET1D における浅部テクトニック微動の地震波伝播シミュレーション。P 波を赤い粒子、S 波を緑色の粒子で示している。

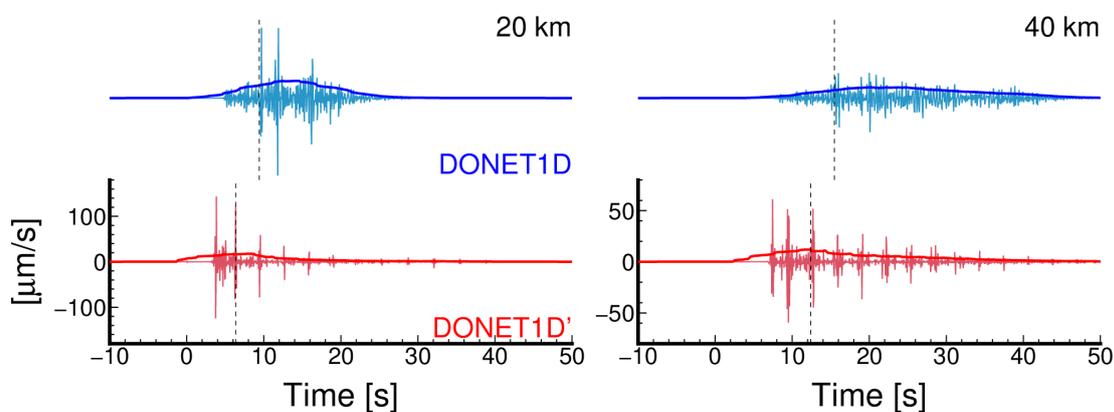


図 2. Mw 3.0 を仮定した場合の浅部テクトニック微動のシミュレーション波形の例。青色で DONET1D、赤色で DONET1D' の結果を示す。濃い青線および赤線は速度波形エンベロープであり、5 秒の時間窓で移動平均をとっている。

増幅効果を示す。距離によらずおおよそ 2 倍程度の増幅であり、鉛直下方入射を仮定して推定したサイト増幅係数のほとんどが海底面付近の薄い低速度層の影響と考えることができる。一方で、テクトニック微動の場合 (図 3b) は、震央距離に応じた増幅効果が見られる。特に、前述した堆積層基盤からの反射波のエネルギーが顕著な 5~20 km の範囲では最大で 10 倍程度の増幅が認められる。

4. まとめと今後の課題

1 次元速度構造モデルによる地震波伝播シミュレーションにより、堆積層の厚い地域に敷設された伝播増幅効果について検討した。浅部テクトニック微動など堆積層直下で発生する地震現象は、スラブ内地震などと異なり鉛直下方入射の仮定が大きく崩れ、伝播距離に応じた伝

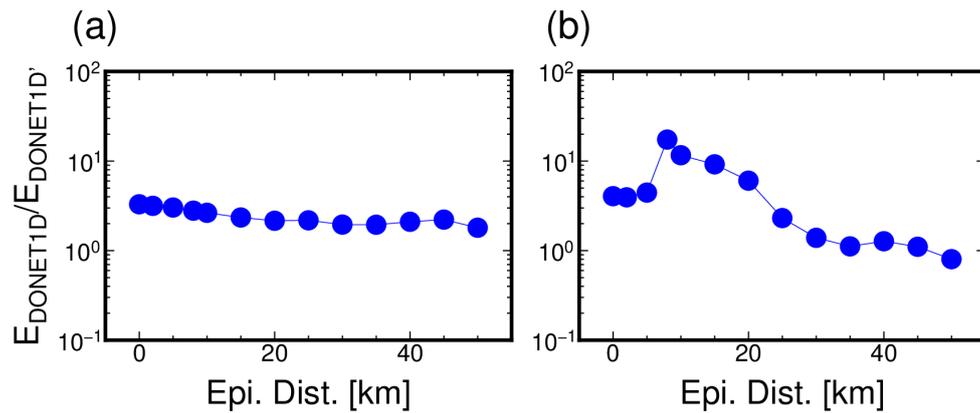


図3. 堆積層による各観測点の地震波エネルギーの増幅の様子。(a) 深さ40 kmのスラブ内地震、(b) プレート境界で発生した浅部テクトニック微動の結果。

播増幅効果が現れることを明らかにした。

20年以上の陸上観測、10年以上の海域観測と熱心な地下構造・地質研究により、浅部スロー地震の特徴の理解も進んできた (Takemura Hamada et al., 2023[10])にまとめられている)。一方で、それらの震源物理の定量的理解へは未だ遠い。今後は、伝播増幅効果の補正法を開発し、既存の浅部テクトニック微動カタログの地震波エネルギーの再評価、その統計性の検討を通して、プレート境界浅部におけるスロー地震の定量的なモニタリングを進めたい。

謝辞

地球シミュレーター公募課題の計算資源を利用しました。地球シミュレータの管理・運用に携わる皆様に記して感謝申し上げます。

文献

- [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年9月
- [2] Kubo, H., Nakamura, T., Suzuki, W., Kunugi, T., Takahashi, N., & Aoi, S., Site amplification characteristics at Nankai seafloor observation network, DONET1, Japan, evaluated spectral inversion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2018年3月
- [3] Yabe, S., Tonegawa, T., & Nakano, M., Scaled energy estimation for shallow slow earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 2019年1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 offshore earthquakes and shallow low-frequency tremors, *Geophys. J. Int.*, 2020年8月
- [5] Takemura, S., Emoto, K., & Yabe, S., Revisiting seismic energy of shallow tremors: amplifications due to site and propagation path effects near the Nankai Trough, *ESS Open Archive*, 2023年8月
<https://doi.org/10.22541/essoar.169945671.19582309/v1>
- [6] 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
- [7] Nakano, M., Nakamura, T., Kamiya, S., Ohori, M., & Kaneda, Y., Intensive seismic activity around the Nankai trough revealed by DONET ocean-floor seismic observations, *Earth, Planets and Space*, 2013年2月
- [8] Brocher, T., Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2005年1月
- [9] Brocher, T., Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations, *J. Seismol.*, 2007年8月
- [10] Takemura, S., Hamada, Y., Okuda, H., Okada, Y., Okubo, K., Akuhara, T., Noda, A., Tonegawa, T., A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough. *Earth Planets Space*, 2023年10月

High-frequency seismic wave propagation within a thick sedimentary layer near the Nankai Trough

Project Representative

Shunsuke TAKEMURA Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Authors

Shunsuke TAKEMURA ^{*1}, Kentaro EMOTO ^{*2}, Suguru YABE ^{*3}

^{*1}Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ^{*2}Kyushu University, ^{*3}Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Keywords : Nankai Trough, DONET, high-frequency seismic wave, slow earthquake, OpenSWPC

1. Introduction

Developments of permanent networks of ocean bottom seismometers (OBSs) by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) and the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) provide us with the opportunity to investigate seismic activity near megathrust zones. Details of OBS networks were summarized in Aoi et al. (2020)[1]. However, precise estimations of source parameters for offshore events are still challenging issues, even for the use of near-source OBSs. The seismograms at OBSs could be complicated due to site amplifications (e.g., Kubo et al. 2018[2]; Yabe et al. 2019[3]) and propagation path effects due to the thick sedimentary layer (Takemura et al. 2020[4]).

In this report, we briefly review the preprint of Takemura et al. (2023)[5]. In this preprint, we investigated propagation path effects within a thick (~5km) sedimentary layer near the Nankai Trough based on numerical simulations in a one-dimensional (1D) velocity model.

2. Simulation method

Numerical simulations of seismic wave propagation were conducted using the OpenSWPC (Maeda et al. 2017[6]). We assumed the 1D P-wave velocity model of Nakano et al. (2013)[7]. Other physical parameters were employed from the empirical laws of Brocher (2005[8], 2008[9]). This model (referred to as "DONET1D") includes thick (5 km) sedimentary layers with S-wave velocities of 0.6-2 km/s. We also prepared DONET1D', where the physical parameters of sedimentary layers were replaced with those of the crust. Comparing simulation results between DONET1D and DONET1D' provides us with propagation path effects of thick sedimentary layers.

We simulated seismograms from a shallow tectonic tremor and an intraslab earthquake. The former is the low-angle thrust mechanism on the plate boundary, and the latter is normal faulting within the oceanic mantle. The depths of a shallow tectonic tremor and an intraslab earthquake are 8.07 and 40 km,

respectively. A simple short-duration pulse was assumed as the source time function of all simulations to discuss path effects.

3. Simulation results

Figure 1 shows the simulated wavefield of a shallow tectonic tremor in DONET1D' and DONET1D. In DONET1D' (Fig. 1a), we confirmed P, S, and sP converted signals. Multiple reflections from the sea surface were also clearly illustrated. On the other hand, a complicated wavefield due to multiple reflections within sedimentary layers was recognized in DONET1D (Fig. 1b).

Figure 2 shows radial-component simulated seismograms of a shallow tectonic tremor at epicentral distances of 20 and 40 km. A band-pass filter with frequencies of 2-8 Hz was applied to each trace. This frequency band is typically used in the analysis of tectonic tremors. In DONET1D', P, S, sP and multiple reflections from the sea surface were identified. By introducing thick sedimentary layers (DONET1D), these signals became unclear, and reflections from the basement of sedimentary layers (the plate boundary) were clearly observed. As distance increases, seismic energy is trapped within thick sedimentary layers due to multiple reflections from the basement and ocean bottom. Consequently, strong envelope broadening was confirmed in DONET1D (Takemura et al. 2020[4]).

We measured source radiated energy from simulated waveforms. We calculated three-component square envelopes at each station. Then, to measure the duration of the envelopes stably, we applied a 5-s moving average to squared envelopes. We measured the half-value widths of envelopes. Then, we integrated squared envelopes within each half-value width. By multiplying $2\pi V_s \rho R^2$, we obtained the source radiated energy of simulated seismograms. S-wave velocity (V_s) of 3,500 m/s and density (ρ) of 2,700 kg/m³ were assumed. R is hypocentral distance. Finally, we calculated the ratio of source radiated energies at each distance between DONET1D and DONET1D'. This ratio represents amplifications of source radiated energy due to thick sedimentary layers. Figure 3 shows source radiated energy amplification for an intraslab earthquake and a shallow tectonic tremor. Almost constant (~2) amplification was observed in an intraslab case (Figure 3a). This result implies that

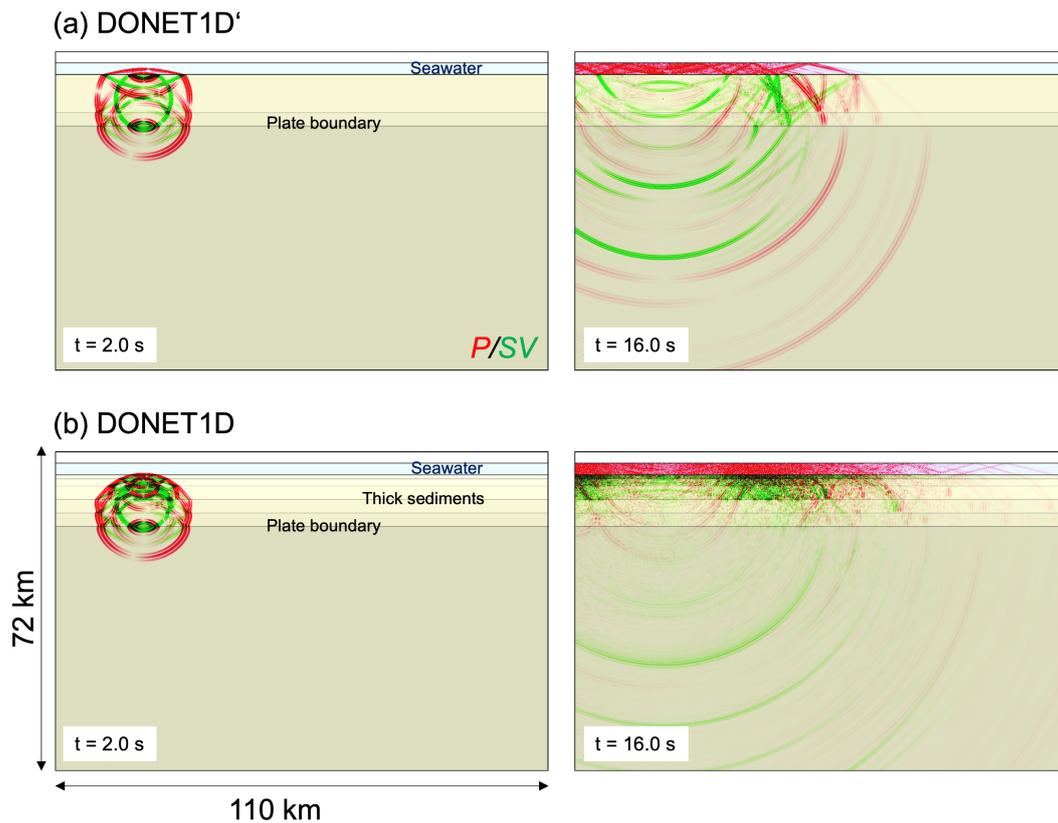


Figure 1. Simulated wavefield of a shallow tectonic tremors in (a) DONET1D' and (b) DONET1D.

site amplifications compared to rock sites are mostly controlled by thin lower-velocity ($V_s < 0.6$ km/s) sediments just below OBSs. On the other hand, distance-dependent amplification was observed in a shallow tectonic tremor. Especially at distances of 5-20 km, approximately one-order amplification was recognized.

4. Summary and future perspective

By using numerical simulations of seismic wave propagation in various 1D models and sources, we investigated the propagation-path effects of thick sedimentary layers near the Nankai Trough on high-frequency seismic waves. Distance-dependent amplifications due to thick sedimentary layers were confirmed in a shallow tectonic tremor case, which is located just below the basement of thick sedimentary layers.

Characteristics of shallow slow earthquakes and tectonic setting of shallow plate boundary along the Nankai Trough are summarized in a recent review paper (Takemura, Hamada et al. 2023[10]). However, detailed mechanisms of shallow slow earthquakes are still an open question. To achieve a unified model of shallow slow earthquakes, we should precisely estimate source parameters of shallow slow earthquakes in the future.

Acknowledgment

We used the calculation resources of the Earth Simulator on JAMSTEC.

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, September 2020
- [2] Kubo, H., Nakamura, T., Suzuki, W., Kunugi, T., Takahashi, N., & Aoi, S., Site amplification characteristics at Nankai seafloor observation network, DONET1, Japan, evaluated spectral inversion, Bull. Seismol. Soc. Am., March 2018
- [3] Yabe, S., Tonegawa, T., & Nakano, M., Scaled energy estimation for shallow slow earthquakes, J. Geophys. Res., January 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 offshore earthquakes and shallow low-frequency tremors, Geophys. J. Int., August 2020
- [5] Takemura, S., Emoto, K., & Yabe, S., Revisiting seismic energy of shallow tremors: amplifications due to site and propagation path effects near the Nankai Trough, ESS Open Archive, August 2023
<https://doi.org/10.22541/essoar.169945671.19582309/v1>
- [6] 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, July 2017

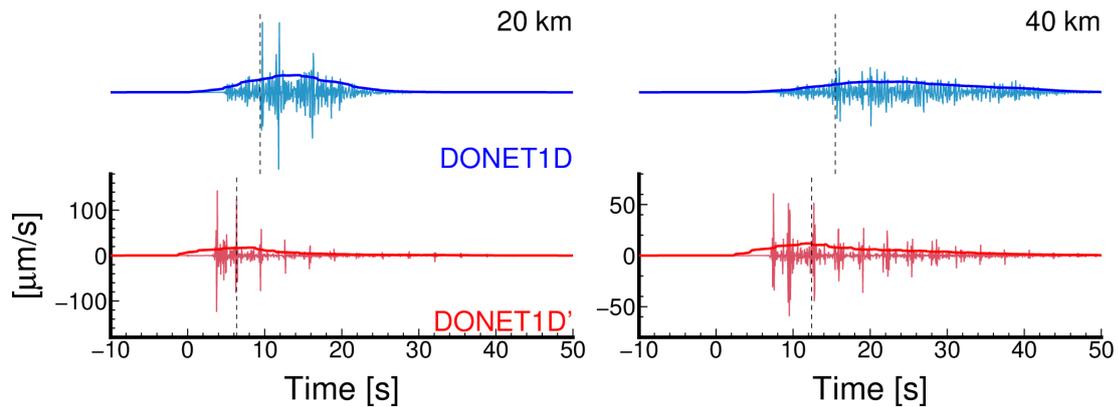


Figure 2. Radial-component simulated velocity seismograms of DONET1D (blue lines) and DONET1D' (red lines) at epicentral distances of 20 and 40 km. A shallow tectonic tremor source and band-pass filter of 2-8 Hz were applied.

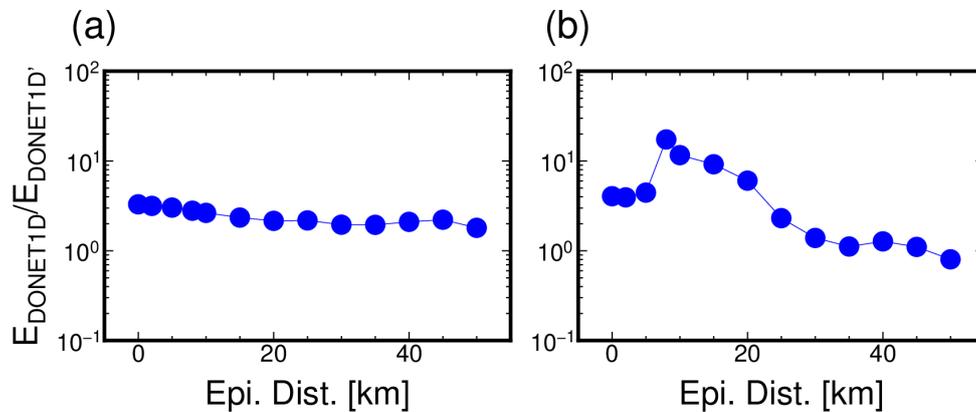


Figure 3. Source radiated energy amplifications at each distance for (a) an intraslab earthquake and (b) a shallow tectonic tremor.

- [7] Nakano, M., Nakamura, T., Kamiya, S., Ohori, M., & Kaneda, Y., Intensive seismic activity around the Nankai trough revealed by DONET ocean-floor seismic observations, Earth, Planets and Space, February 2013
- [8] Brocher, T., Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust, Bull. Seismol. Soc. Am., January 2005
- [9] Brocher, T., Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations, J. Seismol., August 2007
- [10] Takemura, S., Hamada, Y., Okuda, H., Okada, Y., Okubo, K., Akuhara, T., Noda, A., Tonegawa, T., A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough. Earth Planets Space, October 2023