

地球シミュレータを用いた南海トラフにおける強震動シミュレーション

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, 江本 賢太郎*2, 山谷 里奈*1, 前田 拓人*3, 古村 孝志*1

*1 東京大学地震研究所, *2 東北大学, *3 弘前大学

本稿では、地球シミュレータを利用して2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震 (Mw 5.9) の強震動シミュレーションを実施した。本公募課題グループで開発した OpenSWPC を地球シミュレータに最適化し、2,736 の Vector Element と 50 TB のメモリを利用することで、5 Hz までの強震動を安定的にシミュレーションすることに成功した。2011 年に海洋研究開発機構により敷設された DONET が三重県南東沖の地震の強震動を捉えていたため、シミュレーション結果と比較した。今回行ったシミュレーションには詳細な震源破壊過程や地盤増幅効果が含まれていないにも関わらず、シミュレーション波形は観測波形の包絡線形状を概ね再現していた。南海トラフ域で発生する地震の強震動が、3次元地下不均質構造の影響を強くうけていることが示唆される。南海トラフで発生する地震またはスロー地震の実態解明や将来の発生が懸念される南海トラフ大地震の強震動予測の高精度化ため、シミュレーションコードや強震動の性質理解の研究の継続が望まれる。

キーワード：地震波伝播シミュレーション, 地球シミュレータ, OpenSWPC, 南海トラフ

1. はじめに

南海トラフをはじめとする沈み込み帯では、100-150 年に一度、M8 以上の海溝型巨大地震が発生しており、それらによる地震・津波被害予測は喫緊の課題である。大型構造物の被害に影響する周期数秒以上の長周期地震動から、木造家屋などの被害に影響する短周期地震動までの、広帯域強震動伝播を正確に計算することが重要であるが、短周期地震動 (強震動) のモデル化には多くの計算資源が必要であり、シミュレーション研究の発展が期待される。

2021年3月に更新された地球シミュレータ (第4世代) では、より大規模な地震波伝播シミュレーションの実施が可能である。そこで、本公募課題グループで開発した地震波伝播シミュレーションコード OpenSWPC (Maeda et al., 2017[1] <https://doi.org/10.5281/zenodo.5284656>) を用い、南海トラフで発生した地震の強震動シミュレーションを地球シミュレータで実施したので、その結果を報告する。

2. 南海トラフにおける強震動シミュレーション

2016年4月1日に発生した Mw 5.9 のプレート境界型の地震 (以下、三重沖の地震) に関する地震波伝播シミュレーションを実施した。海洋研究開発機構に敷設された DONET を利用し観測波形との比較を実施する。この地震は、同地域で70年ぶりに発生したプレート境界型の地震である。また、将来発生する南海トラフ巨大地震においても震源域直上の強震動を DONET が観測することが期待されるため、三重県沖の地震の強震動をシミュレーションで再現することは、海溝型巨大地震の強震動予測にとって重要な課題である。

Takemura et al. (2020a)[2] の CMT 解析の結果をメカニズム解として利用し、震源時間関数は 0.1 秒の Küpper 関数とし、シンプルな震源モデルを採用した。全国1次地下構造モデル (Koketsu et al. 2012[3]) と同地域に敷設された

DONET 下の1次元S波速度構造モデル (Tonegawa et al., 2017[4]) を利用した3次元S波速度構造モデルを用いて地震波伝播シミュレーションを実施した。1 Hz 以上の高周波数地震動を計算することから、上述で構築した層構造モデルにランダムな地震波速度のゆらぎを重畳した。地震波速度のゆらぎは、指数関数型の自己相関関数で表現され、相関距離やゆらぎの強さなどは Takemura et al. (2020b)[5]と同様にした。

対象領域は厚く低速度な海洋堆積物に覆われているため、最低S波速度を 0.5 km/s とした。5 Hz までの強震動を安定的に計算するために、 $165 \times 97.5 \times 45 \text{ km}^3$ の計算領域 (図1左側の青い長方形の領域) を 0.015 km で離散化した。地球シミュレータ 2,736 Vector Elements と 50TB のメモリを利用し、75 秒間の地震動を7時間で計算することができた。

図1右側に M.KMA03、M.KMB06、M.KMB09 および M.KMD13 の上下動成分の観測記録とシミュレーション波形の比較を示す。今回の地震波伝播シミュレーションでは三重沖の地震の震源破壊過程や観測点直下の極浅層地盤の影響を考慮に入れていないため、計算波形の振幅は各波形の最大振幅で規格化し、波形の包絡線形状のみ注目する。また、観測およびシミュレーション波形には、1-5 Hz のバンドパスフィルターをかけた。

震源破壊の不均質性や地盤増幅の影響を考慮していないにも関わらず、観測波形のような継続時間の長く紡錘形の包絡線形状を再現している。観測波形に見られる複雑な地震波は、震源の不均質性より、観測点周辺の3次元地下不均質構造により、紡錘形の包絡線形状となったことが示唆される[5]。震源破壊過程の不均質性や観測点直下の極浅層地盤による増幅効果まで考慮することで、より実用的な強震動シミュレーションが可能となる。

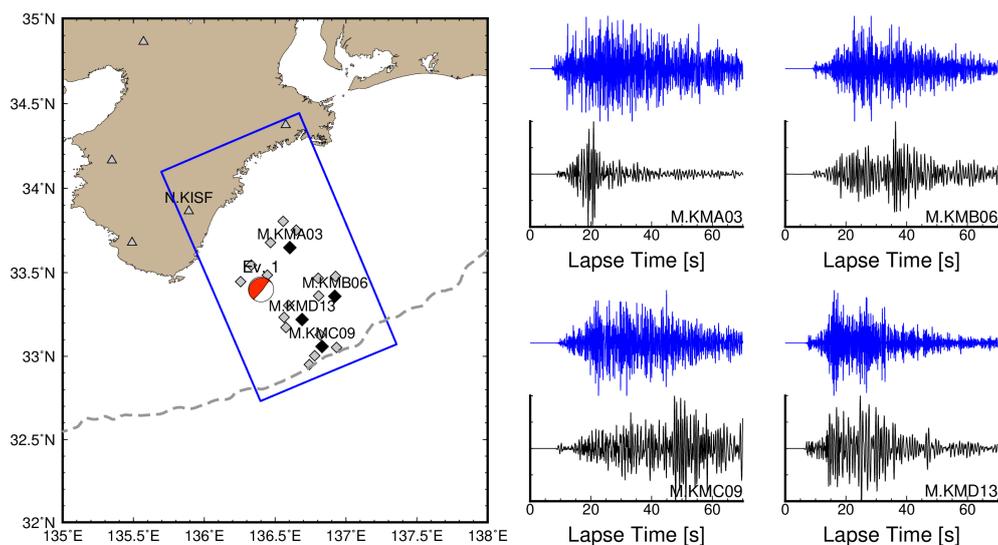


図1. シミュレーションで利用した観測点と震源の位置 (左側) と DONET 観測点における 1-5 Hz の上下動速度波形の比較 (右側)。地図中の青い長方形が計算領域で、DONET 観測点を菱形で示しており、比較に使用したものは黒く塗りつぶしている。赤い震源球は、Takemura et al. (2020a)[2]により推定された、この地震の CMT 解である、観測波形は黒色、シミュレーション波形を青色で示している。

3. まとめ

本報告書では、2021年3月に更新された地球シミュレータ(第4世代)を用いてDONET1域における強震動シミュレーションを実施した。対象領域は厚く低速な堆積層に覆われているが、現実的な地震波伝播シミュレーションを実施できることを確認した。

強震動シミュレーション技術の向上は、巨大地震震源域直上(海域)の強震動モデリング、海域の地震波伝播過程の解明に加え、テクトニック微動などを含めた高周波数の地震現象のモデル化を推し進めることにつながる。地球シミュレータを活用し、地震現象の解明など地球科学的な課題に加え、海溝型巨大地震の強震動生成・伝播過程といった防災へ貢献する課題に取り組む。

謝辞

防災科学技術研究所 DONET (Aoi et al., 2020 [6]; <https://doi.org/10.17598/NIED.0008>) の強震記録を利用しました。Takemura et al. 2020[2] の CMT 解を <https://doi.org/10.5281/zenodo.4412026> よりダウンロードした。

文献

- [1] 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
- [2] Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., & Noda, A., Centroid moment tensor inversions of offshore earthquakes using a three-dimensional velocity

structure model: Slip distributions on the plate boundary along the Nankai Trough, *Geophysical Journal International*, 222 (2), 1109-1125, 2020年5月

- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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

Strong Ground Motion Simulation along the Nankai Trough using the Earth Simulator

Project Representative

Takashi Furumura, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Authors

Shunsuke Takemura ^{*1}, Kentaro Emoto ^{*2}, Lina Yamaya^{*1}, Takuto Maeda^{*3},
Takashi Furumura^{*1}

^{*1}Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ^{*2}Graduate School of Science, Tohoku University, ^{*3}Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

Using our open-source simulation code “OpenSWPC” and the Earth Simulator, we conducted a simulation of strong ground motion for the M_w 5.9 2016 southeast off Mie earthquake. The simulation required computer memory of 50 TB and parallel computing using 2,736 vector elements of the Earth Simulator. We compared our simulation result with seismograms observed at DONET stations. Our simulation roughly reproduced the envelope shapes of observed high-frequency seismograms. This result indicates that our simulation method and subsurface velocity structure model well reproduce seismic wave propagation in this region. To deepen our understating of strong ground motions and sources of seismic phenomena in the Nankai region, we will effectively use our developed code “OpenSWPC” and the Earth Simulator.

Keywords : Ground motion simulation, Earth Simulator, OpenSWPC, Nankai Trough

1. Introduction

To achieve precise simulations of strong ground motions for future large earthquakes, we should develop simulation methods and models. We conducted a strong ground motion simulation of the 2016 southeast off Mie earthquake using our developed code “OpneSWPC” (Maeda et al. 2017[1] <https://doi.org/10.5281/zenodo.5284656>) on the Earth Simulator. This event was a moderate-size (M_w 5.9) earthquake but occurred close to the large slip area of the 1944 Tonankai earthquake. Thus, a simulation of the 2016 southeast off Mie earthquake is important for evaluating strong ground motions for future large earthquakes in the Nankai region.

2. Strong Ground Motion Simulation

We conducted a simulation of seismic wave propagation within the simulation volume of $165 \times 97.5 \times 45$ km³, which was discretized by a uniform grid of 0.015 km. The horizontal coverage of our simulation model is illustrated in the left panel of Figure 1. The focal mechanism of the 2016 southeast off Mie earthquake is referred from the CMT solution by Takemura et al. (2020a)[2]. The source time function in our simulation is a 0.1-s Küpper wavelet. In this simulation, we did not consider a detailed source rupture heterogeneity of the 2016 southeast off Mie earthquake.

We employed the local 3D velocity structure model, which was constructed by Koketsu et al. (2012)[3] and Tonegawa et al. (2017)[4]. Tonegawa et al. (2017)[4] provided the 1D S-wave velocity model beneath the DONET stations (diamonds in Figure 1), which is the ocean bottom seismometer network deployed in this region. To model the scattering of seismic waves for

frequencies higher than 1 Hz, we embedded stochastic random velocity fluctuations in the background 3D layered structure model. Detailed parameters of stochastic random velocity fluctuations in each layer were referred from Takemura et al. (2020b)[5]. We fixed the minimum S-wave velocity of 0.5 km/s in the elastic volume. Our simulation for synthesizing 75-s seismograms required computer memory of 50 TB and 7-hour parallel computation using 2,736 vector elements of the Earth Simulator.

Comparisons between observed and simulated vertical velocity seismograms at M.KMA03, M.KMB06, M.KMC09, and M.KMD13 are illustrated in the right panel of Figure 1. We applied a band-pass filter with passed frequencies of 1-5 Hz to both observed and simulated seismograms. We didn't assume a detailed source rupture process and site amplifications. Thus, we focused our attention on envelope shapes of normalized velocity seismograms.

Our simulated seismograms roughly agreed with the envelope shapes of observed seismograms. Thus, complicated envelope shapes of observed seismograms can be mainly caused by 3D heterogeneous structures beneath this region [5], rather than a source rupture complexity. By introducing a detailed rupture process and site amplification in the future study, we will conduct a more practical strong ground motion simulation.

3. Summary and future perspective

In this report, we conducted a strong ground motion simulation of the 2016 southeast off Mie earthquake using OpenSWPC on the Earth Simulator. Our simulation can practically model the effects of the local 3D heterogeneous velocity structures in this

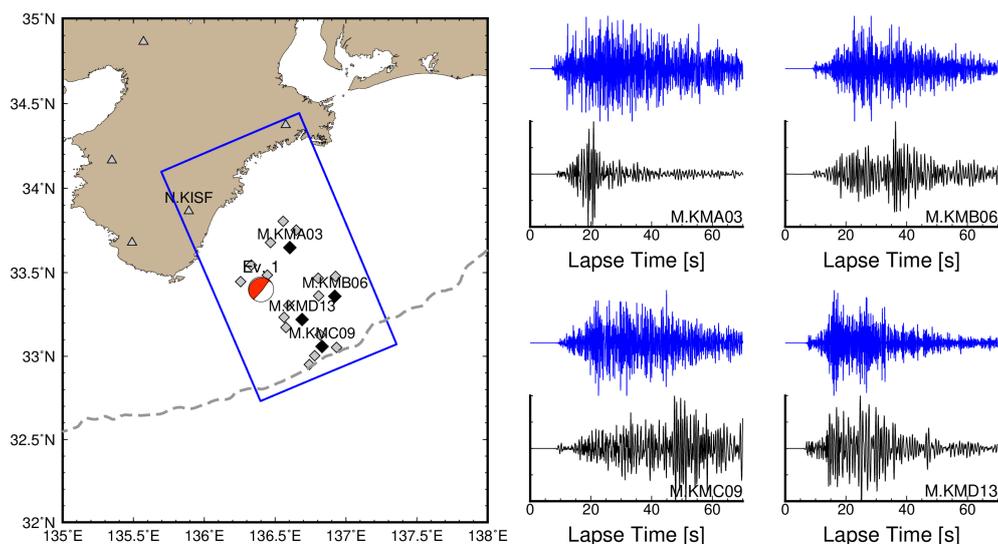


Figure 1. Locations of a source (red focal sphere) and DONET stations (diamonds) used in the simulation and comparisons of filtered vertical velocity seismograms at DONET stations between observation (black lines) and simulation (blue lines). The blue rectangle in the map is the horizontal coverage of our simulation model.

region, where the subducted Philippine Sea plate and thick (> 2 km) oceanic sediments exist.

Developments of strong ground motion simulations are important for modeling megathrust earthquakes, seismic wave propagation in offshore regions, and various seismic phenomena that are dominantly appearing in high-frequency components. To deepen our understanding of seismic phenomena and contribute to disaster mitigation for future large earthquakes, we will effectively use our simulation code and calculation resources of the Earth Simulator.

Acknowledgement

We used NIED DONET data (Aoi et al., 2020 [6]; <https://doi.org/10.17598/NIED.0008>) and a CMT solution of the 2016 southeast Mie earthquake of Takemura et al. (2020a)[2] <https://doi.org/10.5281/zenodo.4412026>

References

- [1] 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
- [2] Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., & Noda, A., Centroid moment tensor inversions of offshore earthquakes using a three-dimensional velocity structure model: Slip distributions on the plate boundary along the Nankai Trough, *Geophysical Journal International*, 222 (2), 1109-1125, May 2020
- [3] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., Japan Integrated Velocity Structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 1-4, September 2012

- [4] 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, December 2017
- [5] 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, August 2020
- [7] 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.