

物性不均質性・不確かさを考慮した信頼性の高い数値計算・パラメータ推定による固着すべり・推移予測・地震津波ハザード予測の統合的研究

堀 高峰 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

堀 高峰*¹、安藤 亮輔*²、楠本 聡*¹、今井 健太郎*¹、縣 亮一郎*¹

*¹ 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター、*² 東京大学大学院 理学系研究科

本課題では、ES4を活用した地下構造・断層摩擦パラメータの不均質性の導入・多数モデル計算による不確かさの考慮により、地震津波ハザード予測への適用に向けて、より信頼性の高い数値計算・パラメータ推定などを進めている。これにより、プレート境界断層すべりの現状把握・推移予測・推移予測により得られる地震断層シナリオに基づく地震津波ハザード予測の統合的研究を推進している。本年度は、地震サイクル全体を考える上で重要な、現実的な3次元断層形状を考慮した実地震現象の動的破壊過程の大規模シミュレーションを、2016年カイコウラ地震を対象に実施した。また、津波ハザード予測精度の向上につながる研究として、アメリカ西岸にあるサンフランシスコ及びサンディエゴの検潮所で観測された潮位記録と津波伝播の数値シミュレーションの波形比較から安政東海・南海地震の発生時間差を推定した。さらに、地震ハザード予測のために長周期地震動を数値計算する上で重要な、面的な広がりをもった震源モデルに対する地震動応答の計算に、断層面上の連続的なすべりをより精度よく入力できる手法を導入し、従来法との比較により精度検証を行った。

キーワード: 地震の動的破壊過程シミュレーション, 安政東海・南海地震, 津波伝播シミュレーション, 長周期地震動, 面震源

1. はじめに

地震津波予測研究開発センターでは、陸・海域の地震波・地殻変動観測データを用いたプレート境界断層すべりの現状把握・推移予測と、推移予測から得られる地震断層シナリオに基づく地震・津波ハザード予測を行うための研究を推進している。本課題では、ES4を活用した地下構造・断層摩擦パラメータの不均質性の導入や多数モデル計算による不確かさの考慮により、ハザード予測への適用に向けたより信頼性の高い数値シミュレーション・パラメータ推定手法の構築することを目指す。関係する各計算コンポーネントについて、以下のような点に着目して研究を行なっている。

A. 現状把握: (I) 3次元不均質地殻構造モデル・実観測データを用いた日本海溝域・南海トラフ域の断層すべりの時空間変化の推定。(II) 多数モデルの導入によりすべり分布・地下構造等の不確かさを考慮した断層すべり推定手法の実データへの適用を進める。

B. 推移予測: 地震サイクル計算と観測データを同化した推移予測のため、探索対象である空間的に不均質な断層摩擦パラメータの候補を理論解析に基づき絞り込むことを目指したシミュレーション等を実施する。

C. 津波ハザード予測: 特定のモデル地区を対象とした、マルチシナリオによる建物被害や木質瓦礫発生予測を含めた津波ハザード予測と、海底地すべりによる津波の影響評価を実施する。

D. 地震ハザード予測: 地震動計算のための大規模有限要素計算プログラム・E-wave FEM[1][2][3]の開発を、数値解析リポジトリの1つの柱であるサイト地震動評価のために進めている。3次元不均質な地下構造を考慮した、海溝型巨大地震に対する長周期地震動計算をE-wave FEMを用いて行い、実用性を検証する。

本稿ではこの中から、「B. 推移予測」・「C. 津波ハザード予測」・「D. 地震ハザード予測」について、当該年度に得られた成果について、それぞれ2・3・4章で報告する。

2. 現実的な3次元断層形状を考慮した実地震現象の動的破壊過程シミュレーション (B. 推移予測)

現実的な3次元断層形状を考慮した実地震現象の動的破壊過程を大規模シミュレーションにより再現することは、その地震が発生した後の推移を予測するための初期条件の評価として重要である[1]。今回、ES4を使用してそのような大規模動的破壊過程シミュレーションを実施した。対象とした地震は、詳細な観測が得られている2016年カイコウラ地震である。この地震の後、余効すべりやSSEが引き続いて発生し、その後の大地震発生の可能性評価を政府が求めたことで知られる地震である。今年度は、観測の不確か性による初期値パラメータの不確か性が結果に与える効果を、パラメタスタディにより調べた。その結果、図1中の赤丸で囲んだ断層面上の領域の滑り量が、ばらつきの影響を大きく受けることが分かった。しかしながら、この領域の滑りの大きさの定量的な違いが、全体的な破壊過程に与える効果は小さいことが明らかとなった。

本解析の1ランに用いた計算機資源は、ES4の32ノードで1時間程度である。なお同規模の計算は、Oakforest-PACSにおいて128ノードを用いて行っていたものであるが、ES4のメモリサイズがOFPに比較して4倍程度あるのとCPUの速度向上のおかげで計算の効率化が実現した。

3. 北米西岸の津波波形から推定される1854年安政東海・南海地震の発生時間差 (C. 津波ハザード予測)

アメリカ西岸にあるサンフランシスコ及びサンディエゴの観測所で観測された潮位記録と津波伝播の数値シミュレーションの波形比較から安政東海・南海地震の発生時間差を推定した(図2)[2]。津波伝播の数値シミュレーションはES4CPUを使用した。OpenMP/MPIハイブリッド並列で20スレッド並列・50ノード(1ノードあたり2プロセス)の合計100プロセスを生成して計算ジョブを実行したところ、津波伝播24時間の計算を終えるのにおよそ18時間かかった。なおデータ容量は1シナリオ当たりおよそ2TBであった。

安政東海地震の津波シグナルは顕著であるものの、安政南海地震の津波シグナルは安政東海地震津波の後続波によって乱されていた[3]。安政南海地震津波の津波励起時刻を12月24日7時(GMT)と仮定して津波数値解析を行ったところ、観測波形より数十分早く到達した。観測波形と計算波形の正規化二乗平均誤差は、計算波形を0.4時間遅らせた場合に最小になる。すなわち、安政南海地震の津波励起時刻は12月24日7時24分(GMT)頃と推定される。先行研究によれば安政東海地震の津波励起時刻は12月23日0時30分(GMT)頃であるため、これらの発生時間差は30.9時間と推定される。潮位記録の時間分解能と地震発生当時採用されていた不定時法の時間分解能は大きく異なるものの、本研究で得られた成果と歴史被害記録に基づいた発生時間差は概ね整合的であった[4]。これは歴史被害記録の情報が歴史地震の発生時間の決定に大きく役立つことを示唆している[5]。

4. 大規模有限要素計算プログラム・E-wave FEMを用いた地震ハザード予測のための基礎的検討(D.地震ハザード予測)

将来の発生が懸念される海溝型巨大地震による長周期地震動の推定は、都市部の地震被害対策を進めていくうえで重要である。そのためには、適切に設定された震源断層モデルに対し、複雑な地盤ならびに地殻構造における地震波動場を数値計算することが必要である。震源断層モデルについて、比較的小規模の地震においては点震源による震源のモデル化が有効である。一方、海溝型巨大地震による長周期地震動の計算では、断層の面的な広がりや断層破壊の伝播を考慮した震源モデルに対する応答の計算が必要となる。面的な広がりをもった震源モデルを数値計算に導入する方法としては、

(i) 一定の間隔で分布する点震源の集合体をもつ震源モデルとみなす方法(多重点震源)

(ii) 節点分割法[6]

の二つが考えられる。節点分割法は、断層面上に位置する節点の両側での仮想的な食い違い変位を考え、それと等価な体積力に対する応答を計算する方法である。(i)はこれまで差分法を中心とした構造格子ベースの計算スキームにおいて多く用いられてきており、国の長周期地震動被害想定においても採用されるなど、実績のある手法である。しかし、有限要素法のような非構造要素を使用可能な数値計算手法においては、断層面位置に節点を配置

して節点分割法を導入することで、点震源の集合を与える場合と比べて、曲面上の断層における連続的なすべりをより精度よく考慮することができるものと期待されている。しかし、(ii)は理論上有効と期待される一方、地震動計算において参考にできる現実的な問題設定での検証例はあまりない。本課題で活用を進める地震動計算のための大規模有限要素計算プログラムE-wave FEM[7][8][9]では、(i)(ii)の双方を扱うことが可能となっている。そこで、両者を比較することで、節点分割法を使用した震源断層のモデリングに関する精度検証を行った。一般的に表れる複雑な設定を適切に抽象化した問題設定として、「面震源が曲面に入力される場合」と「面震源が物性(速度)境界に入力される場合」の二つの設定で検証を行った。本稿では後者について紹介する。

水平二層構造の速度境界を断層とみなした設定を考える。物性値を表1に、水平面内における震源断層位置と観測点位置を図3に示す。断層は速度境界に位置し、xy平面上で正方形の平面断層(深さ6km)である。すべり量はx成分のみを持ち、面に沿う方向に下盤側から見て一様に大きさ1mとする。図3星印に示される破壊開始点から3km/sで同心円状に破壊伝播する。震源時間関数は三角型で、ライズタイムは2秒とした。E-wave FEMでの計算においては、計算領域を $-24\text{km} \leq x \leq 24\text{km}$ 、 $-24\text{km} \leq y \leq 24\text{km}$ 、 $-27\text{km} \leq z \leq 0\text{km}$ と設定した。2.5Hz以下の周波数をターゲットとし、1波長当たり最低5要素を確保する設定とした。地表面・層境界の水平方向メッシュサイズは75m・25mの2パターンを用意した。多重点震源計算については、曲面上で等間隔になるように6,561個の点震源を75m間隔、58,081個を25m間隔で、それぞれのモデルに対して配置した。面震源におけるすべり量を各点震源の地震モーメントに変換するためには剛性率が必要であるが、面震源が物性境界に位置する場合においては境界の両側のいずれの物性値も直接用いることができない。本検討では、[5]により示される「有効剛性率」、すなわち両側の剛性率の調和平均を用いることとした。

まず75mメッシュについて比較したところ、節点分割法と多重点震源による計算結果は全体的によく合っているように見えた。ただ、波形を拡大すると、振幅にわずかなずれがある部分があることが分かった。そこで、25mメッシュのモデルと比較すると、波形を拡大しても振幅がよく一致した(図4)。ただ、メッシュサイズの変更前後双方の設定において波形全体の一致は非常に良いといえ、いずれの場合にしても今回の検証目的に対して十分な検討ができていると考える。

本検討では、「面震源が物性(速度)境界に入力される場合」において、適切な設定下では節点分割法と多重点震源による計算結果はよく一致することを確認した。一方で、点震源の配置の密度が十分でない場合には両者に振幅のわずかなずれが発生し得ることも確認された。「面震源が曲面に入力される場合」に対しても、同様の知見を得ることとなった。従来広く使われる多重点震源の代わりに節点分割法を用いることの利点をより詳しく整理する

ことは今後の課題である。

本研究で実施した検討について、計算用モデルの作成（計算用メッシュの生成と並列計算用の領域分割）にES4GPU(1 計算ノード×1 時間程度×複数回)を使用した。地震動計算の一部にES4VEを使用した(16 計算ノード×1 時間程度×複数回)。本稿に記載できなかったE-wave FEMを使用した検討についても、計算用モデル生成でES4GPUを、異なる計算スキームでの結果の比較のための差分法による地震動計算でES4VEを、それぞれ使用した。

謝辞

本研究の一部(FEMによる地震動計算)は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「大規模数値シミュレーションによる地震発生から地震動・地盤増幅評価までの統合的予測システムの構築とその社会実装」(課題ID: hp200126, hp210171)の一環として実施されたものであり、東京大学地震研究所が開発中のコードを当該プロジェクトで提供頂き、機構で独自に改変・運用し得られたものです。また本課題の地震動計算にはES4に加えて、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施したのも一部含まれます。

文献

- [1] Ando, R. and Kaneko, Y., “Dynamic Rupture Simulation Reproduces Spontaneous Multifault Rupture and Arrest During the 2016 Mw 7.9 Kaikoura Earthquake” *Geophys. Res. Lett.*, 45, 23, 12875-12883 (2018).
- [2] Baba, T., Allgeyer, S., Hossen, J., Cummins, P.R., Tsushima, H., Imai, K., Ymashita, K., and Kato, T., “Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change”, *Ocean Model.*, 111, 46-54, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.01.002> (2017)
- [3] Kusumoto, S., Imai, K., Obayashi, R., Hori, T., Takahashi, N., Ho, T.C., Uno, K., Tanioka, Y. and Satake, K., “Origin Time of the 1854 Ansei-Tokai Tsunami Estimated from Tide Gauge Records on the West Coast of North America”, *Seism. Res. Lett.*, 91(5), 2624-2630 (2020).
- [4] Kusumoto, S., Imai, K., and Hori, T., “Time difference between the 1854 CE Ansei-Tokai and Ansei-Nankai earthquakes estimated from distant tsunami waveforms on the west coast of North America” *Progress Earth Planet. Sci.*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00458-z> (2021).
- [5] Sugimori, R., Ariizumi, K. and Satake, K., “Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake Recorded in the Logbook of the Russian Frigate Diana”, *J. Disaster Res.*, 17 (3), <https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0409> (2022).
- [6] Melosh, H., and Raefsky, A., “A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(5), 1391-1400 (1981).
- [7] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “A hybrid multiresolution

meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography”, *Geophys. J. Int.*, 177, Issue 3, 1221-1232 (2009).

[8] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., and Kobayashi, H., “Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 Bln DOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation”, SC'14, (2014).

[9] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Maddegedara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation”, SC'15, (2015).

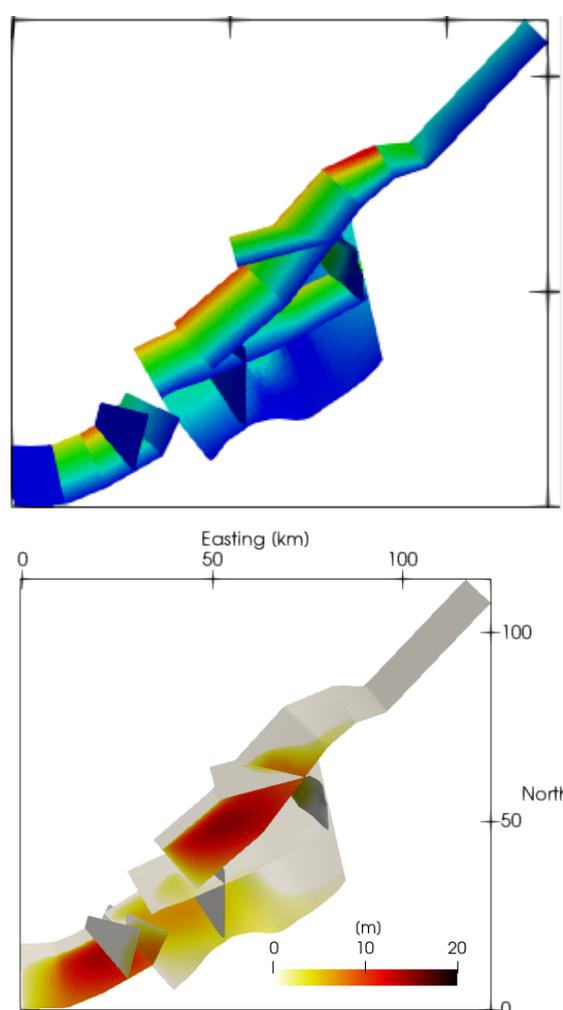


図1. 3次元動的破壊シミュレーションに用いた断層モデルと計算結果の例。3次元断層を上からみたところ。色は(上)入力する初期応力分布, (下)動的地震破壊によって生じる断層滑り分布のシミュレーション結果を示す。

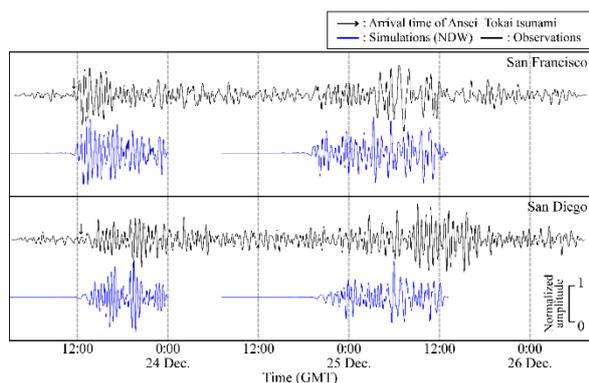


図2. サンフランシスコとサンディエゴの検潮所における観測と非線形分散波 (NDW) を考慮した数値シミュレーションの結果の比較。黒と青の曲線は、それぞれカットオフ期間が 16 分と 128 分の低域と高域のバンドパスフィルターを適用した後の観測波形とシミュレーション波形を示している。

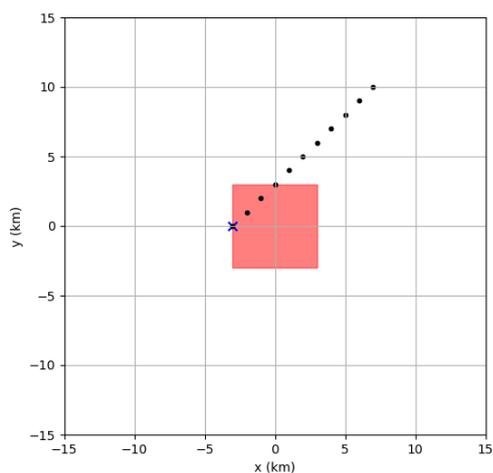


図3. 水平二層構造における観測点配置 (黒点)、断層面 (赤四角・線)、破壊開始点 (青バツ印) の水平位置関係。

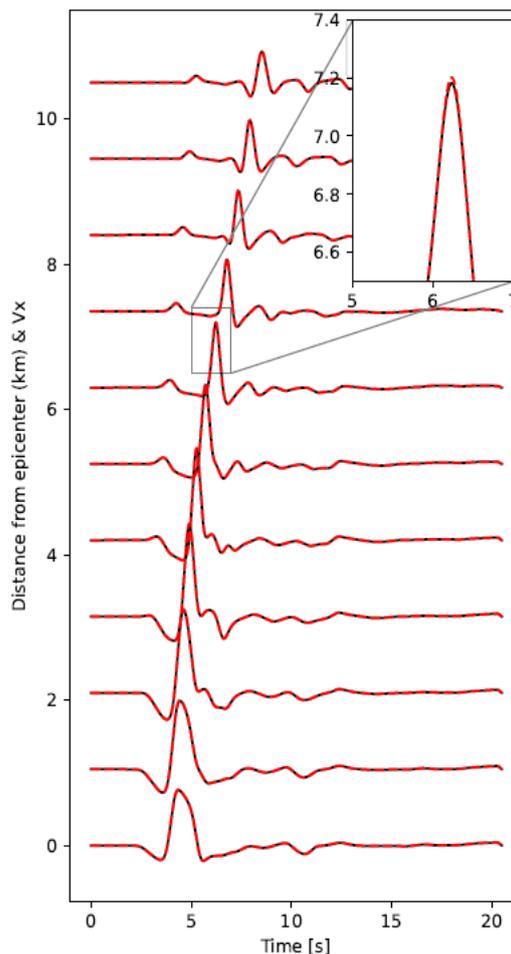


図4. 速度境界面震源に対し、水平方向メッシュサイズ 25m で計算した x 方向速度波形の比較。赤点線が節点分割法、黒線が多重点震源。

表1 水平二層モデルの物性値。

	厚さ (km)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (km/m^3)	Q_p	Q_s
堆積層	6	4,000	2,000	2,600	80	80
母岩	∞	6,000	3,464	2,700	140	140

Integrated Research for Fault Slip Estimation, Prediction of Spatio-Temporal Evolution of Fault Slip and Earthquake/Tsunami Damage Estimation Considering Heterogeneous Material Property and Uncertainty

Project Representative

Takane Hori Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Takane Hori *¹, Ryosuke Ando*², Satoshi Kusumoto*¹, Kentaro Imai*¹, Ryoichiro Agata*¹

*¹Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Research Institute for Marine Geodynamics, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *²School of Science, The University of Tokyo,

We've conducted numerical calculations and parameter estimations that are reliable enough for seismic and tsunami hazard prediction by introducing heterogeneity of subsurface structure and fault friction parameters considering uncertainty by multiple-model calculations. Thus, we are promoting an integrated study of seismic and tsunami hazard prediction based on fault rupture scenarios based on estimation and forecasting of spatio-temporal evolution of fault slips on the plate boundary. Large-scale simulations of the dynamic rupture process considering realistic 3D fault geometry were performed for the 2016 Kaikoura earthquake. And, aiming at enhancing tsunami hazard prediction, the time difference between the 1854 Ansei-Tokai and Ansei-Nankai earthquakes was estimated from a comparison of the observations of tide gauge stations at San Francisco and San Diego and the simulated results of tsunami propagation. Furthermore, we performed a verification for a method to introduce continuous slip on a finite fault more accurately to numerical simulation of long-period ground motions, by comparing the result with the conventional method.

Keywords : Dynamic rupture simulation for earthquake, Ansei-Tokai and Ansei-Nankai earthquakes, tsunami propagation simulation, long-period ground motions, finite fault

1. Introduction

Research and Development Center for Earthquake and Tsunami is promoting research to understand the current status and forecast spatio-temporal evolution of fault slip on the plate boundary using land and seafloor observation of seismic wave and crustal deformation, aiming at predicting seismic and tsunami hazards based on earthquake fault scenarios more reliably. In this project, we aim to develop reliable numerical simulation and parameter estimation methods for hazard prediction by introducing heterogeneity of subsurface structure and fault friction parameters and considering uncertainty by multiple model calculation using ES4. Computational components involved in this study is listed below. A. Monitoring spatio-temporal evolution of fault slip. B. Forecasting spatio-temporal evolution of fault slip. C. Tsunami hazard predictions. D. Seismic hazard predictions. Here, we report the results obtained in FY2021 for " B. Forecasting spatio-temporal evolution of fault slip," "C. Tsunami Hazard Prediction," and "D. Seismic Hazard Prediction" in Chapters 2, 3, and 4, respectively.

2. Dynamic rupture simulation for earthquake in realistic 3-D fault geometry (B. Forecasting spatio-temporal evolution of fault slip)

We conducted large scale simulations to reproduce dynamic rupture processes of natural earthquakes with realistic fault geometry models [1]. The targeted earthquake event is the 2016, Kaikoura, NZ, earthquake, where the detailed observations are

obtained. This year's focus was the parameter study to clarify the effect of observational uncertainty in the input parameters on the resulting rupture processes. As the result, we find the slip amount on the fault area marked by the red circle on the figure is affected significantly but this quantitative difference does not affect on the overall rupture process very much. For one run of the above analyses is about one hour with 32 nodes of ES4CPU.

3. Time Difference Between the 1854 CE Ansei-Tokai and Ansei-Nankai Earthquakes Estimated from Distant Tsunami Waveforms on the West Coast of North America (C. Tsunami hazard predictions)

In the study, the time difference between the 1854 Ansei-Tokai and Ansei-Nankai earthquakes was estimated from a comparison of the observations of tide gauge stations at San Francisco and San Diego and the simulated results of tsunami propagation [2]. Numerical simulations were performed on Earth Simulator 4, JAMSTEC. When a total of 100 processes with 50 nodes (2 processes per node) and 20 threads per processes were generated and executed in OpenMP/MPI hybrid parallel computation, it took about 18 hours to complete the calculation for 24 hours of tsunami propagation. The data capacity was approximately 2TB per scenarios. The first signals of the Ansei-Tokai tsunami were apparent, whereas those of the Ansei-Nankai tsunami were obscured by the later waves of the Ansei-Tokai tsunami [3]. Waveforms of the Ansei-Nankai tsunami simulated with non-linear dispersive wave theory by assuming an origin time of

07:00 GMT on 24 Dec. arrived earlier than in the observations. The normalized root mean square and the misfit between the simulated and observed waveforms of the Ansei–Nankai tsunami showed a time difference between them of approximately 0.4 h. This finding suggests that the actual origin time of the Ansei–Nankai tsunami was approximately 07:24 GMT on 24 Dec. A previous study estimated the origin time of the Ansei–Tokai tsunami to be about 00:30 GMT on 23 Dec. Thus, we concluded that the time difference between the 1854 CE Ansei–Tokai and Ansei–Nankai tsunamis was 30.9 h. Despite the significant difference in the time resolution between the seasonal timekeeping system used in Japan in 1854 and waveform digitization, our result is roughly in agreement with historical descriptions of the tsunamis [4], suggesting that such information can be effectively used to determine the origin times of historical earthquakes [5].

4. Basic for seismic hazard prediction using a large-scale finite element calculation program, E-wave FEM (D. Seismic hazard predictions)

Estimation of long-period ground motions caused by a possible future giant subduction zone earthquake is important for the countermeasures against seismic damage in urban areas. For this purpose, it is necessary to numerically calculate seismic wavefields in complex subsurface structures for an appropriate source fault model. To model source faults, using a point source is effective for targeting relatively small earthquakes. On the other hand, it is necessary to consider finite fault and rupture propagation for the calculation of long-period seismic motions caused by a giant subduction zone earthquake. The following two methods are available for introducing such a complex source model in numerical simulation of ground motions. (i) Modeling by using a collection of point source. (ii) Split node technique [6]. E-wave FEM [7][8][9], a computer program that some project members have been using for large-scale finite element analysis of seismic ground motion, can handle both (i) and (ii). Therefore, by comparing the two, we conducted an accuracy verification on the modeling of source faults using (ii). Problem settings that appropriately abstracts complex settings that appear in real-world problems were adopted. Specifically, the verification was conducted in two settings: the case where a finite-fault source model is input to a curved surface and the case where a finite-fault source model is input to a layer boundary of seismic velocity structures. By obtaining results of numerical simulation using ES4 and other environments, we confirmed that the results of calculations using the split node technique and multiple point sources agree sufficiently under appropriate settings in both cases.

Acknowledgement

This work was partially supported by MEXT as “Program for Promoting Researches on the Supercomputer Fugaku” (Large-

scale numerical simulation of earthquake generation, wave propagation and soil amplification, Project ID: hp200126, hp210171) and used computational resources of supercomputer Fugaku provided by the RIKEN Center for Computational Science. The results in 4. were obtained from the code developed by the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, which was provided in the Fugaku Project and modified and operated by JAMSTEC.

References

- [1] Ando, R. and Kaneko, Y., “Dynamic Rupture Simulation Reproduces Spontaneous Multifault Rupture and Arrest During the 2016 Mw 7.9 Kaikoura Earthquake” *Geophys. Res. Lett.*, 45, 23, 12875-12883 (2018).
- [2] Baba, T., Allgeyer, S., Hossen, J., Cummins, P.R., Tsushima, H., Imai, K., Ymashita, K., and Kato, T., “Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change”, *Ocean Model.*, 111, 46–54, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.01.002> (2017)
- [3] Kusumoto, S., Imai, K., Obayashi, R., Hori, T., Takahashi, N., Ho, T.C., Uno, K., Tanioka, Y. and Satake, K., “Origin Time of the 1854 Ansei–Tokai Tsunami Estimated from Tide Gauge Records on the West Coast of North America, *Seism. Res. Lett.*, 91(5), 2624-2630 (2020).
- [4] Kusumoto, S., Imai, K., and Hori, T., “Time difference between the 1854 CE Ansei–Tokai and Ansei–Nankai earthquakes estimated from distant tsunami waveforms on the west coast of North America” *Progress Earth Planet. Sci.*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00458-z> (2021).
- [5] Sugimori, R., Ariizumi, K. and Satake, K. “Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake Recorded in the Logbook of the Russian Frigate Diana”, *J. Disaster Res.*, 17 (3), <https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0409> (2022).
- [6] Melosh, H., and Raefsky, A., “A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71(5), 1391–1400 (1981).
- [7] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography”, *Geophys. J. Int.*, 177, Issue 3, 1221-1232 (2009).
- [8] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., and Kobayashi, H., “Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 Bln DOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation”, SC'14, (2014).
- [9] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Maddegadara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation”, SC'15, (2015).