様式 S-2

共同利用実施報告書（研究実績報告書）
（大型計算機共同利用公募研究）

１．課題番号　　２０２５－S－B１０２

２．研究課題名（和文、英文の両方をご記載ください。）

和文：大規模地震動シミュレーションを活かした地震像の解明

英文：Understanding nature of earthquakes using large-scale seismic ground motion simulations

３．研究代表者　所属・氏名　九州大学大学院理学研究院・江本賢太郎

（地震研究所　担当教員名）　武村俊介

４．研究組織の詳細（研究代表者を含め、当課題に参加した全ての研究者を記載し、必要に応じ行を追加してください。）

氏名	所属・職名	担当
（代表者）江本賢太郎	九州大学　大学院理学研究院	准教授
（分担者）古村孝志	東京大学地震研究所	教授
加藤愛太郎	東京大学地震研究所	教授
綿田辰吾	東京大学地震研究所	准教授
行竹洋平	東京大学地震研究所	准教授
小野寺圭祐	岡山大学	准教授
山谷里奈	東京大学地震研究所	助教
前田拓人	弘前大学大学院　理工学研究科	教授
平野史朗	弘前大学大学院　理工学研究科	助教
貝淵美紗	弘前大学大学院　理工学研究科	大学院生（修士）
楠美紀公	弘前大学大学院　理工学研究科	大学院生（修士）
平井隼人	弘前大学大学院　理工学研究科	大学院生（修士）
中原恒	東北大学大学院　理学研究科	准教授
金亜伊	横浜市立大学大学院　生命ナノシステム科学研究科	准教授
吉光　奈奈	京都大学 大学院工学研究科	助教
（所内担当教員）武村俊介	東京大学地震研究所	准教授

５．研究計画の概要（800 字以内でご記載ください。申請書に記載した「研究計画」から変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。）

本課題では、課題メンバーが開発してきた地震波大規模並列シミュレーションコードである OpenSWPC を主に用い大規模シミュレーションを実施するとともに、コードの開発も引き続き進める。本課題では、3 次元地下不均質構造中の地震波伝播特性、それらを考慮した震源過程解析という共通点から、(1) 沈み込み帯の地震解析とモニタリング、(2) 火山周辺の地震活動解析の 2 つのグループは協力して研究を実施し、特に地震現象と地震発生帯の構造不均質や流体と地震の関係の理解を深めることを目的としている。前述の通り、(3) シミュレーションコード自体の拡張的開発も目的の一つである。

沈み込み帯ならびに火山周辺は地下構造が複雑であり、ルーチン的に実施されてきた 1 次元地下構造モデルによる震源過程解析が十分に機能しない。例えば、海域の地震については震源位置やメカニズム解を大きく誤推定してしまい、現象の包括的理解の大きな妨げとなっている。本研究課題では、3 次元地下不均質構造の地震波伝播特性を深く理解し、地震波伝播シミュレーションを積極的に活用することで、高精度に現象の運動学的特徴を推定し、それらの活動様式を解析することで地震発生帯や火山帯の特徴把握に迫る。高精度に推定された地震現象の運動学的特徴から、地震や火山現象のメカニズム、それらと流体の関与など、観測解析に充填をおきつつ包括的な理解を目指す。得られた震源モデルを用い、フォワードシミュレーションを実施することで、地震動、地殻変動、津波の予測研究へも役立てる。

6．研究成果の概要（図を含めて１～2 頁で記載してください。）

キーワード（3～5 語程度）：地震波伝播シミュレーション、３次元不均質構造、コード開発

研究計画で挙げた３つの項目に加え，それらをつなぐ関連テーマの成果の概略を列挙する．

（1）沈み込み帯の地震解析とモニタリング

【３次元グリーン関数を用いた浅部超低周波地震の解析】3 次元構造を考慮した Green 関数により，浅部超低周波地震の震源特性を評価し，震源特性に沈み込む海山が寄与している可能性を見出した（Takemura et al. 2025a）．

【震源メカニズム推定に与える構造の影響の評価】東北地方太平洋沖のアウターライズ域を対象に，海洋性レイリー波（海の存在により発生する後続のレイリー波）が海域で発生した地震のセントロイド･モーメントテンソル解析に与える影響を調べた．海洋性レイリー波を解析に用いた場合、特に浅い地震の深さや断層 dip 角に感度を持つモーメントテンソルの成分が制約できることがわかった．

（2）火山周辺の地震活動解析

【機械学習に基づく火山生地震の分類】浅間山で観測された火山性地震波形を用いて，A 型地震・B 型地震・ノイズを自動分類するための Transformer encoder ベースの深層学習モデルを構築した．三成分の生波形を直接入力として用いることで．より客観的かつ効率的な分類手法を実現した．データ拡張を導入することで BACC は 0.968，F1 値は A 型地震 0.959，B 型地震 0.957，ノイズ 0.987 まで向上し，CNN ベース手法を上回る性能を示した。さらに，attention weight の可視化により，モデルが P 波周辺など人手判読でも重要とされる波形特徴に着目して分類していることを示した．加えて，火口から 3 km 以内の観測点が分類性能と解釈性の向上に重要であることを示し，他火山への転移学習や汎化に向けた基盤的知見を得た．

【海水中を伝播する T 波のモデリング】海底火山などでの浅い事象で見られる T 波について，高解像度な海底地形モデルによる地震波伝播シミュレーションを用いてその励起・伝播特性を網羅的に評価した．T 波は津波よりも伝播速度が速いことから，島嶼部の事象の津波予測への貢献が期待される（Takemura, 2025b）．

（3）地震波伝播シミュレーションコードの継続的開発

OpenSWPC の GPU 対応を実施した．対応においては CPU 環境と GPU 環境の可搬性を最重視し，OpenMP と同様にディレクティブベースで利用できる OpenACC およびその中での mamaged memory の利用の有無，標準言語規格に基づく GPU 利用（stdpar）の性能を比較した．その結果，stdpar はもっともコーディングがシンプルであるが，DO ループの書き換えにともなう CPU 環境下における顕著な性能劣化が起こること，stdpar や OpenACC でも CPU-GPU 間のメモリ移動をコンパイラが自動的に判断する managed memory 機能を用いる場合には，CPU を介さずに複数の GPU 同士で MPI 通信を行なう cuda-aware MPI の利用が困難であるなどの制約が明らかになり，CPU-GPU 間のメモリ移動をすべて明示的に記述する OpenACC の利用が最適であると判断した．また，GPU 化にあたっては多重ループ内で同一の計算を行っていることが肝要である．地表面や海底面といった媒質内部境界面に伴う分岐処理が GPU を利用した高速化を大きく阻害することが判明した．この問題については，ロジックの論理的書き換えにより，多重ループ内での分岐を用いず符号関数を用いて従来と等価な処理を実現する新しいアルゴリズムを考案することで解決に至った．

これらの予備的な検討を踏まえ，OpenSWPC に OpenACC ディレクティブを追加しつつ必要なアルゴリズム更新を行い，単一のコードで CPU と GPU の双方への対応を実現した．すでに計算コード本体の全機能の GPU 対応が完了しており，その成果は Version 25.05.2 として GitHub を通じて公開されている．このコードの性能を Wisteira を含む複数の環境で行ったところ，その性能は極

めて良好であり，Wisteria/Aquarius(GPU)，同 Odyssey(CPU)，miyabi(CPU/GPU) でそれぞれ最大 CPU/GPU 数まで安定したストロングスケーリング性能を実現した（図）．EIC コンピュータの 2CPU で 1379 秒かかる計算が，miyabi の 256GPU では 2.3 秒で完了するなど，GPU の利用による大幅な性能向上を実現した．GPU 対応のために行ったアルゴリズム検討が CPU においても良好な結果を示し，Wisteria/Odyssey 上においても従来コードと比べて実行性能が向上した．この一連の検討により，Wisteria をこれまで以上に効率的に使えるようになり，かつ次年度移行にスムーズに miyabi に移行できる準備が整った．

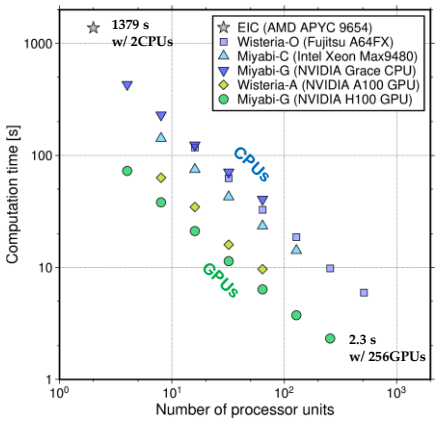


図 GPU に対応した OpenSWPC の計算時間ベンチマーク結果．複数のアーキテクチャにおいて CPU もしくは GPU の数を変えながら，同じ空間グリッドサイズ 1024x1024x1024 のモデルを 1000 時間ステップ計算するのにかかった計算時間を示す．

(4) 沈み込み帯や火山周辺をつなぐ地震波伝播シミュレーションの活用

【長周期地震動の生成要因の解明】新潟県長岡平野西縁断層帯周辺において，レイリー波の群速度分散曲線を用いて推定された深さ 10 ㎞程度以浅の浅部地震波速度構造に対して，OpenSWPC を用いて地震波伝播の数値シミュレーションを行い，計算された長周期地震動記録の特徴について検討を行った．Mw7 クラスの地震に対しては，長周期地震動階級 4 の地震動が予想されること，平野中央部の堆積層が厚い観測点では長周期地震動が発達すること，震源直上では場合によっては上下動の絶対速度応答が最大となることなどが明らかになった．

【東北地方背弧日本海側のエンベロープ拡大とその数値モデリング】震源から輻射されたインパルス状の実体波が短波長不均質構造による散乱の影響を受けて，エンベロープ幅が拡大する．沈み込み帯における既往研究と異なり，本研究では日本海側の歪集中帯で発生する浅発地震のエンベロープ拡大現象を調べた．エンベロープ拡大をもたらす原因の空間分布は東北地方の火山周辺に狭く分布し，空間的に局在化した強い不均質がその成因となっていることを強く示唆する結果が得られた．さらに，既存のコミュニティモデルを基準とし，様々な条件を変化させた 2 次元および 3 次元の数値シミュレーションから，地形変化，速度不均質，平坦ではない成層構造，海水層の存在といった様々な要素が地震波エンベロープ形状に与える影響を精査した．海水層中の多重反射が海岸近傍の観測記録に局所的に大きく影響している可能性が示唆された．

【火星のインパクトイベントの数値モデリング】火星内部構造は地球よりも短波長の不均質性が強くかつ減衰が弱く，月よりは不均質性が弱く減衰が強いことが知られている．ただし，火星の地震計記録は 1 点しかないため，震源決定の不確実性が常に付きまとうという問題があった．そこで本研究では衛星写真によるクレータ痕の同定からその震央位置が明瞭にわかっているインパクトイベント S1034a に着目し，その波形解析ならびに数値モデリングを実施した．観測された記録には低周波帯において時間軸上に局在した Rayleigh 波とみられる波束があり，その波形形状と上下動-ラディアル成分比（楕円率）に注目した地殻ごく浅部（レゴリス層）の厚さや速度，重畳させる短波長ランダム不均質構造に関するフォワードモデリングを行った．2 次元のモデリングでは観測記録の特徴を再現することができ，火星の地殻構造に対して一定の制約を与えることができた．ただし，より現実的な 3 次元モデリングでは火星の大規模な地形変動の効果が表面波を強く散乱し，時間的に局在した波束を再現することが困難であった．これについては今後のさらなる研究課題である．

７．研究実績

※所外の課題代表者は、所内担当教員に必ず実績について地震研業績 DB への登録依頼をしてください。

国際学会発表（招待講演）

（学会発表かつ招待講演の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）、招待について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 (invited))

該当なし.

国際学会発表

（学会発表の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 ）

S. Hirano, R. Doke, & T. Maeda, Ground acceleration with deterministic and stochastic source models for the 2025 Mandalay earthquake in Myanmar, 12th ACES International Workshop, Taipei, 2025.

H. Hirai, T. Maeda, & S. Hirano, Numerical simulations of seismic waveforms from the Martian impact event S1034a: Investigating shallow crustal heterogeneity, 12th ACES International Workshop, Taipei, D2-11, 2025.

国内学会発表

貝淵美紗・前田拓人・平野史朗, 深発およびやや深発地震に伴う sP 波の震源位置依存性とその要因, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 幕張, SSS09-P10, 2025.

前田拓人・古村孝志・武村俊介, CPU と GPU の双方で動作する高速並列地震波動伝播計算コードの開発, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 幕張, SSS09-P02, 2025.

平井隼人・前田拓人・平野史朗, 火星の隕石衝突による火震 S1034a の地震波形記録に基づく火星内部不均質構造の地震波数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 幕張, PPS09-P07, 2025.

楠美紀公・前田拓人・平野 史朗, 東北日本背孤側における S 波エンベロープ拡大推定の安定性, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 幕張, SSS09-P08, 2025.

平井隼人・前田拓人・平野史朗, 隕石衝突火震 S1034a の地震波形モデリングを通じた浅部不均質構造の検討 : 表面波楕円率と P 波コーダによる波形形状特徴再現, 日本地震学会 2025 年度秋季大会, 福岡, S21-04, 2025.

平野史朗・道家涼介・前田拓人, 2025 年ミャンマー・マンダレー地震における破壊伝播速度の変遷, 日本地震学会 2025 年度秋季大会, 福岡, S08-26, 2025.

平井隼人・前田拓人・平野史朗, 隕石衝突火震 S1034a の数値シミュレーションによる火星浅部地殻不均質構造の検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会『超高密度多点地震観測と波動研究による日本列島解像論』, 東京, S25-19, 2025.

楠美紀公・前田拓人・平野史朗, 東北地方日本海東縁の地震における S 波エンベロープ拡大現象, 令和 7 年度東北地域災害研究集会, いわき, 2025.

金亜伊, 鈴木悠悟, 行竹洋平, オートエンコーダを用いた火山性地震波形の特徴抽出と分類, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 幕張, 2025.

山谷里奈，震源及び構造パラメータが海洋性レイリー波に与える影響の評価，日本地球惑星科学連合 2025 年大会，幕張，2025.

川嶋祥之助，江本賢太郎，波動伝播シミュレーションを活用した加速度波形とひずみ速度波形の比較，日本地球惑星科学連合 2025 年大会，幕張，2025.

論文

（下記表の項目について記載してください。）

#	論文情報（著者、論文タイトル、雑誌名、巻、頁、出版年、DOI）	査読の有／無	出版年月	著者に地震研所員を含む／含まない	謝辞の有／無
記載例	Kazushige Obara, Aitaro Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. Science 353, 253-257 (2016). DOI:10.1126/science.aaf1512	有	2016.7	含む	無
1	Shunsuke Takemura, Suguru Yabe, Kentaro Emoto, and Satoru Baba, Along-dip variations in source characteristics of shallow slow earthquakes controlled by topography of subducted oceanic plate. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130, e2024JB030751 (2025). DOI:10.1029/2024JB030751	有	2025.4	含む	有
2	Shunsuke Takemura, Characteristics of T-wave generation around submarine volcanoes. Earth Planets Space 77, 150 (2025). DOI:10.1186/s40623-025-02284-9	有	2025.9	含む	有
3	Shiro Hirano, Ryosuke Doke, and Takuto Maeda, Supershear-subshear-supershear rupture sequence during the 2025 Mandalay Earthquake in Myanmar. Seismica, 4(2) (2025). DOI:10.26443/seismica.v4i2.1785	有	2025.8	含まない	有
4	Yugo Suzuki, Yohei Yukutake, Takao Ohminato, Masami Yamasaki, and Ahyi Kim, Automated Classification of Volcanic Earthquakes Using Transformer Encoders: Insights into Data Quality and Model Interpretability. Seismological Research Letters, 97(2A), 1032-1047 (2025). DOI: 10.1785/0220240494	有	2025.9	含む	無
5	楠美紀公・前田拓人・平野史朗 (2026), 東北地方日本海東縁の地震における S 波エンベロープ拡大現象. 東北地域災害科学研究, 62, 31–36	無	2027.3	含まない	無

８．外部資金の申請・採択状況（任意、本紙提出後に採択の際にはメールでお知らせください。）

・令和８年度 挑戦的研究（萌芽）「海中音波による浅発地震・火山・津波モニタリングの実現」（審査中）