

(1) 実施機関名：

弘前大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）基盤的研究ツールとしての地震波動伝播シミュレーションコミュニティコードの開発・発展
および普及活動

（英文）Development and dissemination of the community codes of seismic wave propagation
simulations

(3) 関連の深い建議の項目：

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度かつ大規模な地震・火山噴火現象の解明

地震

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

(2) 地震の災害誘因の即時予測手法の高度化（重点研究）

ア. 地震動の即時予測手法

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(6) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 本課題の5か年の到達目標：

不均質な地球内部構造における地震波の計算は、地球内部構造の研究にしろ、震源過程の研究にしろ、常に中核をなすツールであり続けてきた。本課題では地震学者にとって使いやすいツールとしてこれまで開発してきた並列差分法地震波動場計算ソフトウェアOpenSWPCの高度化を継続的に実施し、最先端のスーパーコンピュータの能力を最大限に活かすにつづけるためのアップデート、新機能の継続的な開発を実施するとともに、それを活用する人材の育成と普及啓発活動を実施する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

1. 最先端スーパーコンピュータに適合するGPUコードの開発

大学の情報基盤センターや国研が所有し、地震学を含む幅広い分野の研究者が利用するスーパーコンピュータは、その計算機アーキテクチャに適合した専門のチューニングが必要不可欠である。特に2024年度からは、共同利用として使われるスーパーコンピュータのアーキテクチャがCPUからGPUへと移行することが見込まれており、現在公開されているコードそのままでは、最先端のスーパーコンピュータの性能を享受できなくなる可能性すらある。従来はGPUを効率的に用いるためには専用のプログラミングが必要であり、敷居が高いとともにCPU環境との併存に困難があったが、最新のFortranおよびFortranコンパイラが標準文法の範囲でGPUにおける演算をサポートしつつある。本項目では、まず公開コードから煩雑な入出力部分を廃し、重要な演算部分のみを含むベンチマーク用標準コードを作成・公開し（R6年度）、そのFortran標準文法ならびにOpenACCによるGPU利用の検証を行う（R6～R8年度）。それによって実現したGPU演算バージョンを公開コードに反映する（R8～

R10年度)。ただし、それまでの開発で必要とされた元コードへの改変の必要性の度合いによって、公開コードにそのまま合流するか、あるいは独立なGPU専用バージョンとするかを判断する。

2. 数値シミュレーションの最新アルゴリズムの実装

差分法は地震学において最も古い数値計算法のひとつであるが、現在に至るも継続的に新たなアルゴリズムが開発され続けている。このような最新の数値計算技術にキャッチアップし、それらを積極的に実装していくことで、シミュレーションコードの計算精度および計算速度・省メモリ性能のさらなる高度化を図る。本項目はR6年度からR10年度まで継続的に実施し、都度OpenSWPCのバージョンアップを通じて公開する。

3. 数値シミュレーション利活用促進のための普及啓発活動

数値シミュレーションの利活用を促進するためには、ただツールを開発するだけでなく、それを使いこなせる人材の育成も必要である。OpenSWPCにはすでにその利用法を詳細に記したマニュアルが存在するが、それにとどまらず、より踏み込んだノウハウ集や原理を深く学びたい研究者・学生のための解説、逆に最初に使い始める際の敷居を下げるための教材開発と講習会を実施する。R6年度前半から準備をはじめ、R6年度後半から講習会の開催を始め、R10年度まで継続的に実施する。また、講習会参加者を中心としたオンラインコミュニティを形成（R7年度～）し、利用に関するFAQや活用事例などの収集・公開にあたる。

(7) 令和6年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1) 最先端スーパーコンピュータに適合するGPUコードの開発

近年のGeneral Purpose computing on Graphics Processing Units (GPGPU) のハードおよびソフトウェアの進展状況のサーベイを行った結果、現状ではGPUにおいて高性能計算を実現するアプローチに複数の方法があることが判明した。われわれが開発してきた地震波動伝播コードOpenSWPCのGPU移植にあたり、移植コストならびにCPU版との並列可能性の観点から適切な方法について検討を実施していくこととした。

今年度はまずその方法のうちの一つ、標準Fortran文法を用いたGPU化についてその性能を検証した。この方法は計算コード中の多重doループをFortran2018の標準文法 do concurrentに置き換えることで、そのループ内の計算をGPUにオフロードするというものである。OpenSWPCの時間発展計算のカーネル部分を切り出したテストコードにおいてこの方法を実装して速度評価を行ったところ、ワークステーションにおけるCPU（Intel Core i9）に対するGPU（NVIDIA RTX4070 Ti）と、東京大学情報基盤センターのWisteria/BDEC-01シミュレーションノード群CPU（Fujitsu A64FX）に対する学習ノード群GPU（NVIDIA A100）で、それぞれCPU対GPU比で5倍から10倍の計算性能を達成した。このことはOpenSWPCがGPUを用いた高速計算に対する高い適合性をもつことを示唆するものである。

(2) 数値シミュレーションの最新アルゴリズムの実装

これまでに継続して2024年度にもOpenSWPCの機能強化を継続的にを行い、Version 24.09および25.01の2つのメジャーバージョンリリースを行った。ここではそのうちの大きな改善点について述べる。

(2-a) データ出力時の通信隠蔽による性能向上

OpenSWPCでは、離散化された時間ステップ毎に全波動場の状態を差分法計算によりアップデートしていく。そのなかで一定の時間ステップ毎に波動場状態の空間スナップショットを出力する機能を有する。波動場の状態は複数のノード（演算器）に分散して計算が行われているため、スナップショット出力時にはMessage Passing Interface (MPI)のライブラリを通じてデータ出力用のノードにデータを集約してから出力がなされていた。大規模並列計算時にはこのデータ集約通信の負荷が比較的大きく、データ出力量によっては計算時間の約半分を占めるまでとなっていた。

まず通信のレイアウト自体を見直し、データが出力される2次元断面に関わりない計算ノードを排除し

た、スナップショット出力専用の通信コミュニケータを定義することによって通信量の最適化を行った。そのうえで、MPI-3.0の最新規格で実装された関数を用いて、スナップショット出力用のデータの集約通信を行っている最中に次の時間ステップの計算を始めてしまう、通信と計算のオーバーラップによる隠蔽を試みた。この方法はコードの煩雑化を伴うが、同時にFortran2008文法に基づくコード全体のモダン化を実施することで、コード可読性の低下を最小限にとどめた。これらの方策により、数百ステップに1度出力する標準的なユースケースにおいては、スナップショット出力にかかる時間的負荷を全体の1%以下にまで圧縮することに成功した。

(2-b) 入出力の機能強化

OpenSWPCでは複数の速度構造モデルからユーザーが選択することで柔軟性の高い構造モデル入力を実現している。そのなかで、これまでも使われてきた階段型の成層構造モデルをもとに、構造が深さとともになめらかに変化する新しい速度構造モデルを実装した。これは開発側ではなく利用者コミュニティから実装の希望が寄せられていたものに対応したものである。その他、観測点における地震波形出力を、tar形式にまとめることで出力ファイル数を削減することや、計算途中でも波形を逐次出力することにより、長時間にわたる計算途中であっても計算結果の予備的なモニタリングができるようにするなどの機能改善を実施した。

(3) 数値シミュレーション利活用促進のための普及啓発活動

(3-a) 数値シミュレーション普及活動のための教材開発

本課題の中で、数値シミュレーションを専門としない研究者や学生のための講習会の実施を計画している。本年度はそのための準備として、講習会で活用することを前提としつつ、自習にも用いることのできるようなクラウド利用のハンズオン教材を開発した。この教材は文章による解説を読みながら、具体例について自らの手で計算を実行したり、そのパラメタを変更する実験を行うことで、数値シミュレーション原理の理解を深められるように工夫されている。この教材資料は <https://github.com/tktmyd/ipynbs/fdm> から公開されている。教材からはGoogle Colaboratoryにリンクできるようになっており、利用者はウェブブラウザさえあればGoogleのクラウド環境を用いて教材を実行することができる。

(3-b) 地震波動伝播計算コミュニティWebの構築

継続的に開発している教材コンテンツの集約・公開の場として、地震波動伝播計算コミュニティWebを整備し、<https://seismic-wave-hpc.github.io/> として公開した。このWebには特に地震学者が共同利用等で利用する機会の多いスーパーコンピュータの利用を始めるにあたってのガイド記事を整備しており、数値シミュレーション研究をはじめ際のハードルを下げる効果が期待される。将来的には本課題で実施を予定している数値シミュレーションの講習会資料等の集約の場としても活用される予定である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

6 観測基盤と研究推進体制の整備 (1) 観測研究基盤の開発・整備 イ. 観測・解析技術の開発 には「地球内部構造推定、震源過程解析、強震動の事前・即時予測に共通の基盤として、可用性の高い大規模地震波動伝播シミュレーションコードの開発を継続的に実施し、先端的な数値計算技法の実装を継続するとともに、利用促進のための活動も行う。」ことが目標として掲げられており、まさにその目的通りの着実な進展があった。さらに、本課題で開発しているコミュニティコード用いた事例として、海中音波（T波）を用いた未知の震源課程の検討（Takemura et al., 2024）や海陸結合系を伝播するRayleigh波を用いたモーメントテンソル解析（Yamaya et al., 2024）、アジョイント法の開発を通じた震源イメージングの研究（森田・他, 2024）など、さまざまな利活用実績も挙げることができた。今後は普及活動にさらに力点を置くことにより、開発者周辺だけでなく本研究計画全体に広くツールの周知を行うことで、災害の軽減に貢献する諸研究への貢献を目指す。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・ 論文・報告書等

Yamaya, L., Kubo, H., Shiomi, K., Takemura, S. (2024). Impact of offshore seismograph network and 3-D seismic velocity structure model on centroid moment tensor analysis for offshore earthquake: Application to the Japan Trench subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 129(11), e2024JB029944. <https://doi.org/10.1029/2024JB029944>,査読有,謝辞無

Takemura, S., Kubota, T., & Sandanbata, O. (2024). Successive tsunamigenic events near the Sofu Seamount inferred from high-frequency teleseismic P and regional T waves. *Journal of Geophysical Research*, 129(10), e2024JB029746, <https://doi.org/10.1029/2024JB029746>,査読有,謝辞無

Takemura, S., Emoto, K., & Yabe, S. (2024). Revisiting seismic energy of shallow tremors: Amplifications due to site and propagation path effects near the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research*. 129(6), e2024JB029168, <https://doi.org/10.1029/2024JB029168>,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Yamaya, L., S. Takemura, H. Kubo, T. Saito, & K. Shiomi (2024). Advances in Centroid Moment Tensor Inversion for Shallow Offshore Earthquakes Using Ocean-Influenced Rayleigh Wave, AGU Fall Meeting 2024, S31A-04.

Takemura, S., T. Kubota, & O. Sandanbata, T-wave Characteristics of the Accompanying Sesimic Events during the Tsunamigenic Events near the Sofu Seamount. AGU Fall Meeting 2024, V01-13.

山谷里奈・久保久彦・齊藤竜彦・武村俊介・汐見勝彦 (2024). 海域で発生した地震のCMT解析の高精度化におけるocean-influenced Rayleigh waveの活用, 日本地震学会2024年度秋季大会, S01-12.

汐見勝彦・武村俊介・松原誠・木村武志・関口渉次 (2024). 三次元地震波速度構造に基づく地震情報の迅速な把握と活用, 日本地震学会2024年度秋季大会, S23P-18.

山谷里奈・武村俊介・久保久彦・汐見勝彦・齊藤竜彦 (2024). High-resolution CMT inversion for shallow offshore earthquake utilizing ocean-influenced Rayleigh wave thanks to thick seawater layer, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS03-04

森田寅靖・古村孝志・前田拓人 (2024). アジョイント方程式に基づく地震波動場のデータ同化と震源メカニズム推定, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS07-03.

森田寅靖・古村孝志・前田拓人 (2024). アジョイント法による地震波動場震源推定の試み: 2次元地震波動場への適用, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「震源インバージョンワークショップ～多様なデータと解析手法で明らかにする「ほんとうの」震源像～」.

森田寅靖・古村孝志・前田拓人 (2024). アジョイント方程式に基づく地震波動場のデータ同化と震源メカニズム推定: MeSO-net観測データへの適用, 日本地震学会 2024年秋季大会, S01P-10.

Morita, T., Furumura, T. and Maeda, T. (2024). Data assimilation of seismic wavefields and estimation of source mechanism based on adjoint equations: Application to MeSO-net data, ERI-IPGP Workshop 2024, Paris

Takayama, A., Y. Sawaki, Y. Ruan, Y. Ito, T. Maeda, and T. Shibutani (2024). Relationship between shear-wave velocity anomalies and spatial variations in deep tectonic tremor activity around the plate interface in the Nankai trough subduction zone, AGU Fall Meeting 2024, S43D-3480.

平井隼人・前田拓人・平野史朗 (2024). 火星のインパクトイベント S1034a の観測記録に基づく火星内部不均質構造の検討,東京大学地震研究所共同利用研究集会『大気・海洋・固体地球の波形解剖学: 新たな海陸高密度観測に基づく高分解能イメージングと震源過程解析』, S24-P02.

貝淵美紗・前田拓人・平野史朗 (2024). 深発地震に伴う sP 波の地域性, 東京大学地震研究所共同利用研究集会『大気・海洋・固体地球の波形解剖学：新たな海陸高密度観測に基づく高分解能イメージングと震源過程解析』, S24-P03

楠美紀公・前田拓人・平野史朗 (2024). 東北日本背弧側における地震波エンベロープ拡大, 東京大学地震研究所共同利用研究集会『大気・海洋・固体地球の波形解剖学：新たな海陸高密度観測に基づく高分解能イメージングと震源過程解析』, S24-P07

(9) 令和 6 年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：ソフトウェア開発（解析）

概要：地震波動伝播コード OpenSWPC Version 24.09.1

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13772795>

項目：ソフトウェア開発（解析）

概要：地震波動伝播コード OpenSWPC Version 25.01

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14599185>

(10) 令和 7 年度実施計画の概要：

地震波動伝播計算コードのGPU化, OpenSWPCへの最新アルゴリズムの実装, ならびに地震波動伝播数値シミュレーション普及啓発活動の3点について, 以下の通り継続的に研究開発を実施する.

計算コードのGPU化については, これまで検討してきたFortran標準規格にくわえOpenACCディレクティブの利用について検討し, プロトタイプコードの性能比較を通じて, 演算カーネル部分や通信性能を含めた総合的な評価を行う. GPU化における検討結果をOpenSWPCの開発にフィードバックし, 2026年度内のGPU環境で動作するコードの公開を目指して開発を加速させる. また, 数値シミュレーション研究の普及啓発を目的とし2025年6月を目処に地震波動伝播数値シミュレーション講習会を実施する. 講習会は初学者向けの入門編と, OpenSWPCを実用的に使ってみたい層に向けた実践編の2コースを作成する.

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

前田 拓人（弘前大学大学院理工学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

古村 孝志（東京大学地震研究所）, 武村 俊介（東京大学地震研究所）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：弘前大学大学院理工学研究科

電話：0172-39-3608

e-mail：tktmyd@hirosaki-u.ac.jp

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：前田拓人

所属：弘前大学大学院理工学研究科