

(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る、震源過程の研究にしる、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7年度の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要

1. OpenSWPC の GPU 対応

OpenSWPC の GPU 対応を実現するため、計算コア部分を抽出した小規模なエッセンシャル・コードを新たに作成し、これに対して複数のモダンな GPU プログラミングパラダイムを適用する数値実験的検討を行った。その結果、コーディング作業の負荷はやや大きいものの、すべてのメモリ移動を明示的に OpenACC 指示子で記述する手法が、高並列計算環境下では最も高い性能を示すことを明らかにした。

さらに検討過程において、地表面や海底面における空間差分精度の切り替え処理が、GPU における高速計算の律速要因となっていることが判明した。この問題に対し、数理的に等価なアルゴリズム表現への変形を行うことで、プログラミング上の「条件分岐による切り替え」を用いずに従来と等価な計算を実現する新たな手法を開発した。

これらの成果を OpenSWPC 本体コードに適用し、全計算コードの GPU 対応に成功した。本成果は OpenSWPC Version 25.05 として初期公開され、その後、軽微なバグ修正および必要メモリ量削減などの改良を加えた最新版 Version 25.05.2 として公開されている。

GPU 対応版の計算性能を、東京大学情報基盤センターの Wisteria-Odyssey/Aquarius および最先端共同 HPC 基盤施設 Miyabi において評価した結果、同一アーキテクチャ上の CPU と比較して約 4~6 倍の計算性能向上を達成した。この性能比は主として各システムのメモリバンド幅によって律速されており、本コードがその帯域をほぼ最大限に活用していること、すなわち現状で達成可能な性能限界に近いレベルまで高速化されていることが確認された。また、並列計算性能も極めて良好であり、Miyabi においては最大 512 GPU までほぼ理想的なスケーリングを示した。

近年、最先端スーパーコンピュータが急速に GPU 中心のアーキテクチャへ移行する中で、コミュニティコードである OpenSWPC が高性能計算に対応できなくなることが懸念されていたが、本年度の成果によりこの課題はほぼ解消された。一方で、震源要素数が 100 万点を超えるような実用的大規模計算においては、震源での地震波輻射計算が新たな GPU 実行性能の律速要因となることも明らかとなった。次年度以降は、さらなる性能チューニングを進めるとともに、利便性向上を目的とした周辺ツールの開発も継続する予定である。

2. コミュニティコード普及のための数値シミュレーション講習会の開催

前年度までに整備した教材および数値シミュレーション・コミュニティウェブを基盤として、2025年10月および11月に地震波動の数値シミュレーションに関するオンライン講習会を実施した。講習会は初級編と中級編の2段階で構成され、初級編では特定のソフトウェアに依存しない数値シミュレーションの基本原則を、中級編ではOpenSWPCを研究に活用するための実践的な手法を扱った。いずれも座学と実習を組み合わせた形式で実施した。

学部生から研究機関・大学の研究者まで30名以上が参加し、実施後のアンケートにおいて高い満足度が示された。今後の講習内容に関する多くの要望も寄せられており、次年度以降も内容の改善・拡張を行いながら継続的に実施する予定である。

3. 教科書の執筆

ソフトウェアのブラックボックス的利用やマニュアルでは十分に扱いきれない数値シミュレーションの原理的背景について、基礎から体系的に解説した教科書を執筆した。2025年度末に脱稿し、2026年中の出版を予定している。

・「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

本研究は、「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」に掲げられている、

「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進めるとともに、利用促進のための活動を行う」

という目標に対し、直接的かつ大きな貢献を果たした。本年度は、とくにGPU環境への本格対応と普及活動の両面において顕著な進展があった。今後も開発と利用促進をバランスよく推進し、開発者周辺にとどまらず研究計画全体へ広くツールを展開することで、災害軽減に資する関連研究への貢献を一層強化していく。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7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

・学会・シンポジウム等での発表

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, 2025-05-30.

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, 2025-05-30.

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, 2025-05-27.

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, 2025-10-21.

Hayato Hirai, Takuto Maeda, & Shiro Hirano Numerical simulations of seismic waveforms from

(9) 令和7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：

(10) 令和8年度実施計画の概要：

GPU化を達成した地震波動伝播計算コード OpenSWPC のさらなる高度化，ならびに地震波動伝播数値シミュレーションの普及・啓発活動を継続的に実施する。

OpenSWPC に関しては，巨大断層を模擬するために震源要素数を増加させた場合に GPU 実行性能が低下する課題が顕在化している。アルゴリズムの全面的な見直しも視野に入れ，対応策の検討を進める。また，球殻構造への対応や，粘弾性を正面から扱う吸収境界条件の実装など，計算精度および適用範囲の拡張に向けた改良を継続する。

普及活動については，講習会の継続開催に加え，参加者からのフィードバックを反映した新規教材の開発を進め，数値シミュレーション技術の定着と裾野拡大を図る。

(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