

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 カンタリオネルティエリ

カンタリオネルティエリ氏は、地震発生断層の動的破壊シミュレーションのための新しい **PDS-FEM** を用いた変位ベースの解析手法を開発した。**PDS-FEM** を拡張することで、既存のせん断亀裂における摩擦接触、滑り弱化摩擦則、断層の破壊と修復プロセス、及び、歪ベースのハミルトニアン の定式化により、動的亀裂伝播の正確なシミュレーションを実現した。これらの成果は全て数値検証された。ここでは複雑形状を持つ大規模な断層を解析するため、**C11/C++11** のアトミックおよびメモリバリア機能を用いた新しい **MPI-MPI** ハイブリッド並列プログラムを実装した。**Palu-Koro** 断層モデルにおいて、**sub-Rayleigh** 地震及び **super-shear** 地震の実証解析を行い、**super-shear** 破壊によって発生する地震波の特性を分析した。

既往研究とは異なり、開発手法においては連続体力学と摩擦則によって応答が一意に定まり、結果として解析対象の応答は遠方における境界条件と断層の初期状態によって求まることとなる。また、提案手法においては断層の回復をモデル化することも可能であり、遠方における地殻構造の境界条件に応じた断層の進展過程を解析できることとなる。なお、グリーン関数や応力-速度空間の定式化による従来手法においては断層特性を外生的に設定し、また、応力状態を経験的に設定することとなるため、遠方における外力条件に応じた断層の進展を一意に求めることができないが、開発手法によりこのような解析も可能となる。提案手法において残る課題は、過去の履歴に応じて決まる現時点での応力状態、及び、対象断層の状態を再現するための遠方境界条件を推定することとなる。

リオネル氏は十分な空間解像度をもつ大規模解析を実現するため、通常の **HPC** における **MPI + OpenMP** あるいは **MPI + Pthread** によるハイブリッド並列の代わりに、**C11/C++11** のアトミックおよびメモリバリアを利用した **MPI-MPI** ハイブリッド並列プログラムを開発した。**MPI + MPI** ハイブリッド並列化においては、必要なデータのみスレッド間で共有できるため、通常の並列化方法に比べて共有データを誤って操作する危険性を低減できる。そこでリオネル氏は **C11/C++11** におけるアトミックとメモリバリアを使って **MPI** の共有メモリウィンドウを管理する実装を開発した。ここでのメモリバリアとは、共有メモリス

レッド間でアトミック変数と非アトミック変数のメモリ同期を順序付けるための低レベルの操作を指す。緩和されたメモリバリアを使用したアルゴリズムの正当性の証明はチャレンジングであるが、リオル氏は任意の型付きデータを共有メモリ計算機内における MPI プロセス間で共有するテンプレートクラスを開発することで、ハイブリッド並列プログラムを実装した。これにより、内積演算などの基本的な演算の浮動小数点演算性能や通信性能がフラット MPI による実装と比べて改善された。

リオル氏は大きさ 190 km x 65 km x 24 km の Palu-Koro 断層系における sub-Rayleigh 地震および super-shear 地震の解析を行い、super-shear 地震の周波数特性を分析することで開発手法の有用性を示した。ここでは遠方での境界条件を変化させた複数の数値実験を通して、Palu-Koro 断層の応力状態を最もよく再現する境界条件を設定した。Super-shear 地震解析の結果においてはエネルギーのほとんどが 10Hz 以下の低周波数帯に集中しており、原子力発電所等の断層近傍の重要構造物に影響を及ぼす可能性を示唆する結果となった。適切な摩擦モデルを提案手法に組み込むことでスロー地震の解析も可能となり、より広範な断層のふるまいを調べることができるようになると期待される。

委員のコメント

審査委員会は全員一致にてカンタ リオル ティエリ氏の研究に新規性と実用性を認め、論文の品質が十分であるとの結論に至った。堀教授は「このレベルでの博士論文を執筆できる留学生在が本学にいることは誇らしいと思われる」とコメントするなど特に高く評価した。審査委員会において議論された主要内容を以下に示す。

市村教授は、モデルの空間分解能と解析結果の収束性について、2 つの重要なコメントをし、後に審査委員会にて議論された。リオル氏は、メッシュの空間分解能は 5Hz までの解析を対象としていると説明した。5Hz 以上の高解像度の解析は新型コロナウイルスによる研究室への立ち入り制限の影響により困難であったと説明した。しかしながら、複数のメッシュ再分割ケースによって得られた解析結果は 2Hz までのみ収束しており、2Hz 以上の周波数帯においてスペクトルは共通の特性を示したものの数値解の厳密な収束を示すものではなかった。リオル氏は、解析は super-shear 地震の周波数スペクトルの一般的な特性を求めるために行っているものであるため、高周波数帯までの応答の収束を実現するのは難しいと答えた。委員の何人かはこの回答は不十分であると評価したが、数値解の収束の問題は論文における主要なポイントではなく発展的な内容であるため論文自体の品質を損なうものではないことが確認された。数値解の収束について、追加の数値実験と現象の性質に応じた適切な回答ができれば

より優れた内容となっていたと期待される。

その他に審査委員により、super-shear および sub-Rayleigh 破壊における低周波数・高周波数成分の内訳、super-shear 破壊における断層直角方向と断層に沿った方向の周波数成分の内訳、及び、super-shear 破壊が隣接する断層に飛び移る条件について質問があった。リオル氏はこれらの質問に対して適切に回答した。

まとめ

審査委員会は全員一致にてカンタ リオル ティエリ氏の研究に新規性と実用性を認め、論文の品質が十分であるとの結論に至った。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。