

## 審査の結果の要旨

氏名 山口 拓真

本論文は、地震被害軽減のための地震シミュレーションの性能向上を目的として、計算科学・計算機科学的検討により、最新の計算機機構に適した数値解析アルゴリズムを開発し、これに基づく三次元粘弾性地殻変動解析手法、三次元地盤震動解析手法、三次元広域都市地震解析手法に関する技術開発を行い、米国 Oak Ridge National Laboratory の Summit をはじめとする大規模計算機への実装を行い、適用例を示している。

昨今のデータの蓄積に伴い、地震時の挙動を数値解析により予測・想定する地震シミュレーションの震災軽減への寄与が期待されている。このような地震シミュレーションには、対象物の不均質性が高く、かつ、応力フリーの境界条件を満足させる必要があるため、低次の非構造要素に基づく三次元有限要素解析（以下、三次元低次非構造有限要素解析）が適しているとされる。一方で、地震シミュレーションが対象とする領域は大きく、かつ、要求分解能が高くなる。そのため、必然的に大規模な三次元低次非構造有限要素解析が必要となることから、この実現を目指して、京コンピュータを始めとする大規模計算機を用いた地震シミュレーションの研究開発が行われてきているが、未だ十分ではない。また、このような解析結果の信頼性を高めるためには、地震シミュレーション用のモデルの性能を最適化により高めたり、モデルのもつ曖昧さを考慮したりする必要がある。しかし、このような最適化や曖昧さを考慮するためには更なる多数回の解析が必要となるが、この実現はさらに難しい状況にあった。一方で、演算性能の高い新たな演算加速器として Graphics Processing Unit (GPU) があり、この活用により上記の大規模解析の実現を阻んでいる大規模一次方程式の求解を高速化することが期待されていた。しかし、GPU を用いた演算においては、不規則なメモリアクセスが卓越する三次元低次非構造有限要素解析ではその性能を発揮することが難しいこと、CPU-GPU 間や GPU-GPU 間の通信性能が演算性能に比べて低いこと、GPU がさらに高い演算性能を発揮する低精度演算を活用すること、に配慮しなければ GPU の恩恵を受けることは出来ない。そのため、GPU を用いた三次元低次非構造有限要素解析における大規模一次方程式の

求解の高速化のためには、これらの GPU の特性を考慮した数値解析アルゴリズム・実装上の手法開発が必要となる。

本論文では、GPU を用いた高速かつ大規模な三次元低次非構造有限要素解析実現を阻む上記の GPU の特性に対して、最終的に要求される倍精度よりも低精度な単精度や半精度の変数や独自に定義した低精度変数 (FP21) による精度変動演算を大規模一次方程式の求解のためのソルバー部に導入することで、演算コストに対するメモリアクセスコストを相対的に減少させつつ、GPU の計算機機構に適した実装を緻密に行うことで、課題の解決を見出し、解析コストの低減を図り、従来は難しいとされてきた解析を実現した。具体的には、第二章において、地中海地方の約 24 億自由度の三次元有限要素モデルを構築し、Swiss National Supercomputing Centre の GPU による大規模計算機である Piz Daint により 2,000 時間ステップ分の粘弾性地殻変動を 80 分程度で実行できることを示した。第三章において、地震シミュレーション用のモデルの性能を高めることを目的とした、約 300 万自由度の三次元低次非構造有限要素解析による三次元地盤震動解析を 1500 回行う最適化を現実的なタイムフレームで実現するために、1/160 倍の高速化を GPU 導入などにより実現している。第四章において、カスケディア沈み込み帯の地震発生の全系解析を念頭に地殻変動解析の更なる高速化を低精度演算の活用により実現し、米国 Oak Ridge National Laboratory の GPU による大規模計算機である Summit において三次元低次非構造有限要素解析の要素剛性マトリクス演算のカーネルレベルで 1.10-ExaFLOPS を、ソルバー全体で 416-PFLOPS という物理シミュレーション用ソルバーとしては世界最速レベルの高性能ソルバーを実現した。第五章において、FP21 を用いてメモリアクセス量を軽減し GPU 演算のメモリバンド幅律速を回避することで、CPU による解析に比べ 14 倍高速な三次元広域都市地震解析を実現するとともに、低精度演算導入によるソルバーの収束性についても議論を行っている。以上の適用例は、いずれも三次元粘弾性地殻変動解析、三次元地盤震動解析、三次元広域都市地震解析において実現が望まれていた大規模解析の state of art であり、従来は実現が難しいとされてきた地震シミュレーションを本論文による研究開発により実現した具体例である。本論文により得られた知見が地震シミュレーションの性能向上に大きな寄与を果たすことが期待される。

以上のように、本論文では、地震被害軽減のための地震シミュレーションの性能向上のための技術開発と実装に関して、計算機科学・計算科学的観点から、大規模計算機への実装まで十分な検討がなされていること、実際に開発された手法の性能を示すと同時に適用例によりその有効性を示している。

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。