

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 縣 亮一郎

本論文は、地震被害推定高度化を目的として、高詳細な地殻構造モデルを用いた地殻変動解析手法と地殻構造モデル最適化手法の技術開発を行い、京コンピュータをはじめとする大規模計算機への実装を行い、地殻変動および地震被害推定への適用例を示している。

地殻変動解析は、津波波高推定や震源断層のモニタリングなどに用いられ、地震被害推定において重要な役割を果たしている。地表面形状や地殻構造の不均質性が地殻変動解析結果に及ぼす影響が大きいことが既往研究により指摘されているものの、その解析コストが膨大となることから、半無限媒体を仮定した解析解が従来の地殻変動解析では主に用いられている。本論文では、ハイパフォーマンスコンピューティング技術を地殻変動解析に適用することで、地表面形状や地殻構造の不均質性の影響を考慮可能な高詳細な地殻構造モデルを用いた地殻変動解析を実現することを目的としている。本研究における主な課題は、1) 日本列島規模で高詳細な地殻構造モデルを用いた地殻変動解析を実現すること、2) 現状の地殻構造モデルには不十分な点があるため観測データを再現可能なように地殻構造モデルを改良する必要があること、である。

上記課題 1) の解決策として、境界条件・対象の幾何形状を適切に考慮可能な数値解析手法である有限要素法により日本列島規模の高詳細な地殻構造モデルを構築し、その応答を数値解析することが考えられる。しかし、対象となる領域が広大 ($3000 \times 3000 \times 850 \text{ km}$) かつ高い分解能 (1km) が必要とされるため、その自由度は 100 億自由度程度となり、その解析コストは膨大となる。本論文では、大規模計算機上でハイパフォーマンスコンピューティング技術を駆使することで、良好なスケーラビリティを確保しつつ、高い実行性能で上記の地殻変動解析が可能となる解析手法を開発している。また、開発した解析手法を京コンピュータに実装することにより、8192 計算機ノードを用いて 88% のストロングスケーラビリティを達成し、100 億自由度規模の高詳細な地殻構造モデルを用いた地震直後の地殻変動を 35.5 秒で、地震から 33 ヶ月間の地殻変動を 988.8 秒で実施している。京コンピュータの性能を引き出すことが可能な手法を開発し、さらに、京コンピュータの多数計算機ノードを用いて日本列島規模の地殻変動解析を実際に行ったことは、地震工学・地震学的な観点からのみではなく、計算科学的な観点からも高く評価される。

上記課題 2) の解決策として、上記で開発した地殻変動解析手法と最適化手法を組み合わせた非線形最適化により観測データを再現可能なように地殻構造モデルを改良することが考えられる。現実的な時間・解析規模で十分な精度で解が得られるように、実現可能な最適化問題を設定することがポイントとなる。本論文では、時定数を座標変換することで、

誤差関数の十分な感度を担保できるようにしている。また、開発した地殻変動解析手法は高速ではあるものの、解析規模が大きすぎるため、現実的な時間・解析規模で最適化を行うためには、最適化の過程で行う地殻変動解析の解析数を抑制する必要がある。そのため、開発した地殻変動解析手法にアジョイント法を導入することで、誤差関数の勾配を効率的に計算できるようにした。また、開発した解析手法を京コンピュータに実装することにより、日本列島規模の高詳細な地殻構造モデルの改良に必要な 591 のパラメータを、日本列島規模の高詳細な地殻構造モデルを用いた 109 回の地殻変動解析により最適化することに成功した。

本論文では、上記の高詳細な地殻構造モデルを用いた地殻変動解析手法と地殻構造モデル最適化手法の技術開発だけではなく、本手法の津波波高推定への適用例も示された。従来主に用いられる半無限媒体を仮定した解析解による地殻変動解析による津波波高推定と本手法による推定では、場合によっては 200% 程度の大きな差が生じることが示された。

以上のように、本論文では地震被害推定高度化を目的とした技術開発と実装に関して、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ともに適用例を示し有効性を示していること、さらに、将来の課題として本研究内容の改良と応用の具体的な方向を示していることが審査会で示された。

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。