

審査の結果の要旨

氏名 村岡(林) 雅江

有限要素法は航空宇宙産業、原子力、自動車産業、重工業といった産業競争力の強化が特に求められる基盤分野における有力な設計ツールであり、イノベーションの鍵を握るシミュレーションツールである。そうした基盤分野で求められる安全基準は非常に高く、それに耐えうる信頼性をコンピュータシミュレーションで達成しようとするためには実環境規模かつ精緻化した解析モデルを扱うことが不可欠である。連続体を扱う離散化手法である有限要素法においては、モデルの精緻化やマルチスケール化・マルチフィジクス化に伴って計算コストは指数的に増加するため、より大規模な計算環境が求められる。本研究はそうした膨大な計算需要を抱える大規模有限要素解析において、計算資源の拡張性に優れたグリッドの利用技術について研究するものである。

3、4章においては本研究が想定する有限要素解析のグリッドコンピューティングとして、実用性の高いグリッド環境の一つである **Cluster-of-Clusters** 環境の構築方法や、大規模化・並列化に対応した既存の並列有限要素解析として汎用的な **MPI** プログラムを異なるサイトのクラスタ間で実行する方法について示した。また、並列有限要素解析の通信パターンを分析し、その特徴的な通信を整理した。

5、6章では大規模有限要素解析のためのグリッド利用として、本研究が行った事例を示しそれらの性能評価を行った。5章ではまず、密結合アプリケーションと疎結合アプリケーションと呼ばれる通信パターンの異なる二つの有限要素解析に関連するアプリケーションを用い、サイトの異なる2台のクラスタ間で実行したときの性能評価を行った。密結合アプリケーションにおいては4章で分析した並列有限要素解析に特徴的な通信だけを単独で実行したとき、サイト間とサイト内で通信時間は約10倍の差が生じていることが観察された。その上で、並列有限要素解析全体の実行時間を見たとき、サイト間の実行であっても通信時間の影響は小さく、性能の低いクラスタから見れば、クラスタ単体で実行した場合とほぼ同等の時間で計算できることがわかった。一方、疎結合アプリケーションについてはすでにグリッド利用の実用例が多く挙げられているように、有限要素解析であっても **Cluster-of-Clusters** 環境の利用は効果的であり、ヘテロな計算資源で構成されるグリッド環境では非常に重要な負荷分散に適用できる高い柔軟性を持つことがわかった。

つづいて、6章ではグリッドがもつメモリ資源の拡張性に注目した適用例として、非常に大きなメモリ容量を必要とする **GMRES(k)**法の実行について検討した。**GMRES(k)**法は反復あたりの内積計算が頻繁に発生するために通信コストとしては非常に高くグリッドのよ

うな通信コストの高い環境での実行効率は低い、グリッドの利用によって既存の単一環境では解けなかった問題が解けるようになり、グリッド利用による GMRES(k)法の高性能化が図られることを示した。

7章、8章においては密結合アプリケーションに焦点を絞り、より多くのモデルを用いた性能評価実験を行い、実行性能（ワークレシオ）には予測可能性があることを示した。その際、ワークレシオを分散メッシュと基礎的な通信実験から予測する手法を確立した。そして、通信コストと計算コストの予測における代表的な値である一プロセスあたりの剛性行列の非ゼロ成分の数と隣接プロセス数に対してワークレシオが特徴的に分布することを示し、予測において計算規模に対して分割数が適切に設定されていれば高いワークレシオが期待できることを示した。予測で用いたおなじ例題、実行環境を用いて実際に数値実験を行ったところ、予測と同様に計算規模に対して分割数が適切に設定されていれば高いワークレシオでの実行が可能であり、また4章で得た結果と同様に適切な分割数の下では計算時間に対する通信時間の影響は小さく、性能の低いクラスタから見ればクラスタ単体による実行時間に対して約5%から10%の増加で済むことが確かめられた。さらに64プロセスや128プロセスといった比較的大きなプロセス数においても実用に耐えるワークレシオが観測され、大規模な密結合アプリケーションのためのグリッド利用の可能性について展望が開かれた。

9章においては、さらなる実用性の向上にむけ、階層型通信パターンの提案を行った。それにより、密結合アプリケーションでも特に隣接プロセスを多く持つような解析モデルにおいては、効果的に通信コストの削減が可能であること示した。

以上の結果に加えて今後も急速な成長を続けるネットワーク技術を背景に、これまで通信コストの高いグリッド環境を並列有限要素解析のような密結合アプリケーションの実行に利用することは非現実的と考えられてきたが、そうした通信頻度の高い並列計算においてもその実用化が十分現実的なものとみなされる水準にまで達している。単体の計算環境を上回るような規模の問題の解決を図りたいとき、グリッドの利用は有効な解決手段である。そして、本研究で議論された密結合アプリケーションに関する知見は、並列有限要素解析に限らず、差分法や有限体積法など産業基盤分野における多くの有力な数値解析手法にも適用できるものである。

本論文によって産業競争力や国の安全安心の鍵を握るコンピュータシミュレーションが抱える膨大な計算需要を解決する方法としてグリッド利用の有用性が示された。産業基盤や安心安全に密接に結びつくシステム量子工学の発展に貢献するものである。

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。