

## 論文の内容の要旨

論文題目： 大規模有限要素解析のためのグリッド利用技術に関する研究

氏名 村岡 (林) 雅江

工学・産業の分野における有力な計算力学の手法としてその役割を果たしている有限要素法は、非常に高い信頼性が求められる原子力や航空の分野において非常に重要な設計ツールとなっている。しかしながら、その信頼性に耐えうる計算精度に達するために必要な計算モデルの緻密化による数億から数百億自由度の大規模計算を実現するには計算資源が依然不足しているのが実情である。一方で、光伝送技術による超高速バックボーンネットワークが地球規模で整備される。そうしたネットワーク技術の発展を背景として、「ネットワーク上の計算，データ，実験装置，センサ，人間などのあらゆる資源を仮想化・統合し，必要に応じて仮想的な計算機や仮想的な組織を動的に形成するための基盤技術」であるグリッドコンピューティングがさまざまな分野で応用されている。グリッドコンピューティングでは，ネットワーク上に広がる計算資源を仮想的に一台の巨大スーパーコンピュータとして利用することができ，膨大な計算需要を背景とする有限要素解析のような設計ツールにおいてグリッドの利用が期待される。しかし，有限要素解析をはじめ，工学分野における数値解析手法の多くは並列化すると頻度の高い同期と通信を行うために，グリッド環境のような通信コストの高い環境での実行は効率の悪化が懸念され，実用化が進んでいない。そこで本研究では，大規模有限要素解析のためのグリッド利用をより効果的にするための利用技術の開発を行う。

1章では本研究の目的と背景を明らかにした。複雑なシステムで構築される現代の社会基盤・産業基盤の安心安全や産業競争力において計算力学が担う役割の大きさや求められる信頼性の高さに触れ，それに応えるために必要とされる計算機環境の規模は現在の世界最速のスーパーコンピュータでも及ばないことを例に挙げ，グリッドのような計算資源の拡張性に優れた計算環境の利用が重要であることを述べた。一方で，産業基盤分野における設計ツールとして実績を持つ有限要素法や有限体積法，差分法などは並列計算において頻度の高い通信を行うことから，大規模化のためのグリッド利用の難しさについて述べた。

2章において，グリッドコンピューティングの概要とグリッドコンピューティングの一般的な応用分野をまとめ，関連研究として WAN 上の複数のクラスタ間で実行される数値計算の研究事例を紹介した。

3章では，本研究の最初の課題である環境構築について述べ，既存の PC クラスタとインターネットという非常に身近な環境から，安全に並列有限要素解析が実行できる環境が構築可能であることを示した。

4章では，前半に本研究の数学的な背景となる有限要素法や連立一次方程式の反復解法についてまとめ，後半に並列化全般についてまとめた。

5章では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通信パターンの異なる二つの有限要素解析に関連する実アプリケーションを用い，2サイトのクラスタを

利用したアプリケーション実行についてその実用性を評価した。

6章以降では、密結合アプリケーションに焦点を絞ってグリッド利用技術について検討した。6章では、メモリ資源の枯渇によってグリッドを使わざるを得ないような状況を想定したグリッド利用について考えた。その例として超大規模な行列を扱う場合の **GMRES(k)**法の実行環境としてグリッド環境の利用を図った。扱った一億自由度の次元数をもつ例題では、**GMRES(k)**法はリスタート周期が小さい場合には残差ノルムの減少が停滞してしまっていたが、リスタート周期を増加させることで収束が得られるようになった。これは利用したプロセス数が 128 と大きかったからこそ実行できたことであり、このような場合にはグリッドの利用が非常に効果的であることを示した。

7章、8章では、実行性能や効率に踏み込んで、いわゆる一般的な並列有限要素解析すなわち、対称正定値行列を係数行列にもち、**CG**法のように通信頻度は高いが **GMRES(k)**法のようにメモリも必要としない有限要素解析においては典型的な反復解法に基づく場合のグリッド利用について掘り下げて議論した。大規模問題を扱う分散環境では多くのプロセッサを使うことが想定され、それらのプロセッサが異なるサイトに分散するため、プロセス数の増加に伴う通信コスト増加は単一の環境より顕著に現れてくる。分散メッシュから、通信性能を調べる簡単な実験をもとに計算および通信コストを見積もる手順を確立し、予測に用いたのと同様の 5 つの例題を用いて実際にサイト間で性能評価実験を行った。サイト間とサイト内では通信時間として最大でも約一桁の違いが生じるものの、不用意にプロセス数を大きくしてしまったような場合をのぞいては、通信時間の計算時間に対する影響は小さく、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から実行時間にして約 5%から 10%の増加で済んでいることがわかった。また予測結果と計測結果を比較し予測可能性を示した。

9章では、階層型通信パターンの提案を行った。適当なプロセス数の下では、サイト間の通信コストは計算時間に対して小さいことを確認したが、形状の違いによって生じる隣接プロセス数の違いにより、プロセス数の増加が進むと通信コストが急激に増加してしまう。利用した **Cluster-of-Clusters** のような環境の階層的なプロセス間の結合を考慮し、サイト間の通信コストを削減する階層型通信パターンを提案し、実装および評価を行った。その結果、隣接プロセス数が多いモデルでは効果的な通信コストの減少が得られた。

今後も急速な成長をつづけるネットワーク技術を背景として、これまで通信コストの高いグリッド環境では非実用的と考えられてきたような並列プログラムでさえその実行を許容できるような水準に達してきていることがいえる。これまで並列有限要素解析といえば、**HPC**の場面で高性能計算機環境における **Strong Scalability**の追求がなされてきたが、グリッド環境の利用においては、より大規模な問題をとくことを優先とした **Weak Scalability**の意味で利用価値を見出して行くことも不可欠である。そういった中で見出されてきた大規模有限要素解析のためのグリッド環境の利用意義は有限要素法の枠組みにとどまることなく、工学分野における多くの有力な数値計算手法においても当てはまる。より積極的なグリッド環境の活用が、計算力学の発展とコンピューシムレーションによって拓かれる産業分野の発展に貢献することを期待する。