

審査の結果の要旨

氏名 佐藤陽平

今日、コンピュータハードウェアや並列アルゴリズムの進歩により、計算機シミュレーションで扱うモデルは大規模、複雑化している。そのようなモデルの精密性を生かすためには、境界条件、物性値などにも同じ精密性が求められるが、それらの情報は事実上わからないことが多い。そういった場合には、その不確実性を考慮してシミュレーションを行う必要がある。有限要素法は産業分野において特に有力なシミュレーションツールとして広く用いられている。有限要素法で不確実性を扱う方法の一つとして摂動確率有限要素法が挙げられるが、これは不確実性を確率変数で記述し有限要素法の枠組みの中で離散化して解く方法である。この手法は計算量の観点から解析規模の大規模化は現実的でないとされてきた。本研究は、数理的な改良手法の提案とその分散環境への実装を通じてその大規模化を現実的な物にするものである。

2、3章ではグリッドコンピューティングに代表される、分散コンピューティング技術の現状について延べ、実際に利用可能な環境の性能調査を行った。

4、5章では、従来の一括型反復解法のレビューを行い、本研究で確率有限要素法における摂動項計算のための分散環境を考慮した一括型反復解法の改良手法について述べた。まず4章では、係数行列が等しい一連の行列方程式群を効率的に解く共役勾配法の改良手法である、Seed アルゴリズムについて延べた。これは、一連の行列方程式群のなかで Krylov 部分空間を再利用することで、計算コストの減少を図るものである。次に5章では Seed アルゴリズムに確率有限要素法向け、分散環境向けの独自の改良を加えて確率有限要素法に適用することで摂動確率有限要素法における行列方程式の求解部分を高速化した。例題において実行時間を最大 50%減少することができた。また、提案手法の有効性を確かめるため、複数の行列に対して提案手法を適用し、その効果を調べた。その結果、提案手法の適用効果は行列の性質によって大きく変化することがわかった。さらに、その行列の性質を反復履歴から低い計算コストで比較的容易に表すことができる数値的指標を提案し、提案手法の効果予測を可能とした。

6、7章では、BOINC を用いたデスクトップグリッド環境の構築と、その環境へ5章で提案した手法を実装した。また、デスクトップグリッド環境とクラウドやスパコンを連携させたシステムを提案した。まず6章では摂動確率有限要素法解析においてその節動項を求める計算部分は、互いに依存のない個々の独立した計算であり、莫大な計算コストである

反面その計算は非同期分散的に実行することが可能である点に着目し、摂動項計算のようなタスク並列型の計算を行うためのグリッド環境を構築した。ボランティアコンピューティングの基盤として開発された BOINC をデスクトップグリッドのためのフレームワークとして用い、組織が所有する計算機の余剰資源を 1 つのグリッド環境として仮想的な 1 つの計算機として用いることができる環境を構築した。また、計算機資源需要の大きな変動に耐える、つまり一時的なピークの需要に耐えるために十分な計算機資源を用意するのがコスト的に難しいという問題がある。本研究では、一時的に増える計算資源需要のピークに応えるため、構築したデスクトップグリッドからクラウド上の資源をシームレスに利用できる利用法を提案し、システムを構築した。7 章では構築した環境、ソフトウェアを用いて例題を解いた。従来は解析が困難であった規模の問題を現実的な計算時間で解くことができた。また、こうして求めた不確実性を考慮した計算結果の利用法についても説明した。

以上では、不確実性を有限要素解析で扱う手法の莫大な計算コストを数理的手法で軽減し、かつ分散環境の利用で現実的な計算時間で解けるようにする手法とシステムを提案したが、これは確率有限要素法だけではなく、数値シミュレーション一般や分散環境利用技術一般に寄与するものである。数値シミュレーションで不確実性を考慮する場合の多くは、確定的な解析と比較した計算規模の増大を避けることはできないし、また、提案した計算機環境の利用形態は不確実性を考慮した有限要素法のみならず、多くのタスク並列型のシミュレーションにも適用可能なものである。デスクトップグリッド環境の一部としてクラウド上の資源を利用する点では、その利用形態と技術の面で新規性が認められ、クラウドの科学技術計算への利用可能性も示した。

本論文によって、不確実性を考慮したシミュレーションの大規模化の可能性が示された。不確実性の考慮はリスク管理の面から安全のためには欠かすことが出来ず、また産業分野においては効率的な製品開発のために今後ますます重要なツールとなっていくと考えられ、その点から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。