

## 論文の内容の要旨

論文題目 不確実性を考慮したグリッド援用有限要素法に関する研究

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、有限要素法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有限要素解析を行う必要がある。

有限要素法で不確実性を扱う方法としては、モンテカルロ法と組み合わせる方法、確率有限要素法、ファジィ有限要素法が挙げられる。確率有限要素法は、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。特に、確率変数をテイラー展開して扱う方法を摂動確率有限要素法 (Perturbation SFEM) と呼ぶ。ファジィ有限要素法は不確実性をファジィ数によって表す手法で、確率変数では表すことができない不確実性を扱うことができる。本研究では、計算量は多いが数学的に簡便で、小さな確率変動であれば一次摂動項までの計算で期待する精度が得られるという理由で摂動法に基づく確率有限要素法を取り上げる。

摂動法に基づく確率有限要素法においては、一次の摂動成分までを求める場合、各要素がそれぞれ確率変数を含むときに、次元数  $n$  (= 系の自由度数) の行列方程式  $Ax_m = b_m$  を要素数回解かなければならない。係数行列  $A$  は共通であるため、一度  $A$  を LU 分解すれば少ない計算コストで解くことができる。しかし、大規模問題においては  $A$  を LU 分解することは計算量の観点からみて困難である。このため、確率有限要素法の大規模問題への適用は現実的ではないと考えられてきた。

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として、Seed アルゴリズムが提案されている。これは、最初の問題に生成された Krylov 部分空間を残りの問題で再利用することで、計算コストの減少を図るものである。本研究では Seed アルゴリズムに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。問題によって適用効果は変わるが、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、提案手法の適用効果と行列方程式の係数行列の性質との関係を調べ、その予測手法を提案した。

一方で、摂動確率有限要素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。この点に着目し、前述の提案する一括型反復解法を分散環境上に実装した。ここでは分散環境としておおまかに 2 種類を想定した。1 つはデスクトップ

グリッド環境，もう 1 つはメタコンピューティング環境である．デスクトップグリッド環境は例えば大学の研究室が所有する複数の PC からなる環境である．本研究では，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，この環境では，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システムを構築した．Amazon Elastic Computing Cloud (EC2) はスケーラブルな仮想ホスティングサービスとも考えることができる商用のクラウドサービスである．利用者は任意の時間，任意の数の仮想マシンを起動して利用することができ，時間単位で課金がされる．このようなクラウドサービス一般は，特に中小規模な組織のための一時的な計算機資源としても費用対効果の面から便利に利用できるものであると考えている．本研究ではデスクトップグリッド環境に外部のクラウドサービスを一時的に取り入れてグリッド資源として仮想化して利用する利用手法を提案し，実装した．具体的には，デスクトップグリッドの資源とジョブを管理する BOINC サーバを改良し，負荷の監視とクラウド上のリソースマネージメント機能を追加し，必要に応じてクラウド上のリソースをデスクトップグリッドに追加できる仕組みを実装し，その有効性を確かめた．

中小規模の 1 組織が所有する計算機資源を確率有限要素法のような高い計算コストを要求するアプリケーションで有効に利用するための仕組みとして提案するデスクトップグリッド環境は有効なものであるが，その問題規模によってはスパコンの利用が不可欠である．また，さらに大規模な問題では 1 台のスパコンで解くことが困難であったり，1 台のスパコンを占有することが困難である場合も稀ではない．本研究では，複数のスパコンを用いるメタコンピューティングの領域においても BOINC を用いた資源とジョブの管理を行い，デスクトップグリッドで解くことができない規模の問題を複数のスパコン上で解くことを可能にした．スパコンへのジョブの投入・回収が自動化されることにより，ユーザはデスクトップグリッドとスパコンの違いを意識することなく確率有限要素解析を行うことができる．

本研究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つ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，計算機利用コストを考慮し，コモディティ環境とスパコン環境を同一のインタフェースで利用する技術も，他分野においても重要な技術となりうるからである．