

審査の結果の要旨

氏名 森田 直樹

本論文は、全 8 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と課題について説明し、それを踏まえ本研究の目的を述べている。はじめに、有限要素法による数値解析と連立一次方程式の解法について概観を述べている。本研究では、有限要素解析に要する計算時間のうち、連立一次方程式を解く線形ソルバがその多くを占めることを指摘し、線形ソルバを効率的に利用できる手法として、線形ソルバの統一的フレームワークを提案することを目的としている。さらに、提案したフレームワークを有用に適用できるよう、実問題の特徴に適した以下の手法、悪条件問題に対する反復法前処理、強スケーリングに対する反復法前処理、 3×3 ブロッキング構造要素の提案を実施するとしている。

第 2 章では、並列有限要素解析のための領域分割法と、線形ソルバの基礎理論について述べている。

第 3 章では、領域分割に基づく並列有限要素法に対し、線形ソルバの統一的フレームワークを提案している。提案するフレームワークは、線形ソルバを選定するサブフレームワークと、直接法・反復法を統一的に取り扱うサブフレームワークの 2 つから構成されるとしている。

はじめに、線形ソルバの最適な条件の設定が利用者個人の経験に委ねられている現状を指摘し、時間コストや計算資源コストを削減することを目的として、線形ソルバを選定するサブフレームワークを提案している。その基礎的検討として、線形ソルバと反復法前処理の組み合わせごとに、線形ソルバを選定する指標として反復回数を推定する深層学習を構築し、その汎化性能を評価している。

次に、直接法と反復法は機械学習において独立したラベルとして取り扱われるため、これら手法を滑らかに結ぶパラメータが定義できず、効率的な学習を実施できないことを指摘している。直接法・反復法を統一的に取り扱うサブフレームワークは、SPIKE 法を領域分割型並列有限要素法に拡張し、行列の値を棄却する閾値を設けることで、直接法と反復法を統一的に取り扱うことが可能なことを示している。

第 4 章では、悪条件問題に対する反復法前処理を提案している。解析メッシュに構造要素が用いられる場合、大きな条件数を持つ傾向から反復法の収束性が低下することを指摘している。条件数が大きな問題に有用な手法として、localized ISAINV(p)前処理と localized IRIF(p)前処理、これらの混合精度前処理を提案し、数値例によって提案手法の有効性を検討している。

第 5 章では、強スケーリングに対する反復法前処理を提案している。並列反復法の前処理は、アルゴリズムの並列性を阻害せぬよう分割領域ごとに局所化して適用されるこ

とを述べ、領域分割数が大きくなるに従って前処理性能が低下することを指摘している。この解決のため、直接法・反復法を統一的に取り扱うサブフレームワークに基づく **monolithic SPIKE** 前処理を提案し、数値例により提案手法の有効性を検証している。

第 6 章では、 3×3 ブロッキング構造要素を提案している。既存の 6×6 ブロッキング構造要素は、節点あたりの自由度数が異なる要素が混在する有限要素解析において、行列演算に関するプログラムの計算性能が低下する例があることを指摘した上で、 3×3 ブロッキング構造要素を提案し、数値例によってその有効性を検討している。

第 7 章では、産業界の実問題として構造物—地盤連成モデルの非線形応答解析を用いて評価している。本研究では、長継続時間地震動を効率よく解くことが求められる点から、提案手法の **monolithic SPIKE** 前処理を適用し、従来手法と計算時間の比較によって、その有効性を検討している。あわせて、プログラムのプロファイリングを実施し更なる計算最適化の余地を検討している。

第 8 章では、本研究で得られた結論をまとめて述べている。

以上の通り、本論文は線形ソルバを効率的に利用するための統一フレームワークと、実問題の特徴に適した周辺技術を提案し、数値例によりその有効性を示したものである。なお、本論文第 6 章は、米倉 一男、安住 一郎、津乗 充良、橋本 学、奥田洋司との共同研究の成果であるが、論文提出者が主体となって手法の提案、数値実験および考察を行っており、論文提出者の寄与が十分であると判断する。本研究で得られた知見は、各種の過渡応答解析に適用できるなど有限要素法解析全般に使用可能であり、その適用範囲は広い。試行錯誤的なプロセスを極力排除して、線形ソルバを効率的に運用可能なフレームワークの検討を行った点で工学的かつ工業的価値は高く、ひいては安心・安全な社会の形成に大きく寄与するものであると考えられる。従って、博士（環境学）の学位を授与できると認める。

以上 1 9 4 6 字