氏　　　　名　美舩　健（みふね　たけし）
学位(専攻分野)　博　士（工　学）
学位記番号　工　博　第2226号
学位授与の日付　平成15年3月24日
学位授与の要件　学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻　工学研究科電気工学専攻
学位論文題目　電磁界解析における代数マルチグリッド法とその応用

論文調査委員　（主査）教授　島崎眞昭　教授　奥村浩士　教授　萩原朋道

論文内容の要旨

近年，CADの進歩，普及に伴い，電気機器，電子機器の設計・開発分野において数値電磁界シミュレーションが重要な位置を占めている。有限要素法による数値電磁界解析に必要とされる計算時間の大部分が連立一次方程式の求解部分で占められることから，大規模連立一次方程式の高速解法に対する要求が大きい。本論文は，数値電磁界解析に現れる連立一次方程式の求解に有効な代数マルチグリッド法を開発することにより，安定かつ高速の数値電磁界解析法を確立することを目的としている。本論文は7章から成り，各章の内容は次の通りである。

第1章は序論であり，数値電磁界解析における大規模連立一次方程式に対する高速解法の重要性と代数マルチグリッド法を用いる利点について述べ，各章の内容説明を行っている。

第2章では，代数マルチグリッド法の特徴とそのアルゴリズムについて概説し，代表的な代数マルチグリッド法であるスカラーアルゴリズムの詳細について述べている。静磁界解析にスカラーアルゴリズムを適用した結果についても触れ，そこでは，この種の解析で標準的な解法とされる不完全LU分解前処理付き共役勾配法を使用する場合と比較して，代数マルチグリッド解法を適用することにより解析を著しく高速化できることを確認している。

第3章では，代数マルチグリッド法と大規模科学技術計算分野で主流となりつつある並列処理との連繋による高速ソルバの開発について述べている。渦電流解析及び静磁界解析で現れる連立一次方程式を扱い，それぞれの場合に適合した並列化手法を提案している。分散メモリ型並列計算機SR2201上で行った数値解析により，ブロック並列不完全LU分解前処理付き共役勾配法を適用した場合と比較し，開発された並列代数マルチグリッドソルバの高速性と良好な並列化効率とを示している。

第4章では，M行列を対象とした代数マルチグリッド解法の適用対象を，対角成分が正であるH行列へと拡張する手法を提案している。対角成分が正であるN次H行列を係数行列とする連立一次方程式の求解が，2N次M行列を係数行列とする連立一次方程式の求解に帰着されることを証明し，さらに，2N次M行列に対する代数マルチグリッドアルゴリズムの記憶容量と計算量を節約する手法を提案している。結果的に，実対称M行列を対象として開発されたスカラーアルゴリズムの補間演算子に僅かな修正を加えることで，対角成分が正であるH行列を係数行列とする連立一次方程式に対して効果的な代数マルチグリッド解法を実現している。数値解析例の一つとして，全ての非対角成分が正でありスカラーアルゴリズムによるコースニングが不可能な問題をとりあげ，本論文で提案した代数マルチグリッド法がこの問題に対しても有効であることを示した。

第5章では，辺要素を用いた電磁界解析において効果的な代数マルチグリッド法を開発しており，シフトされた係数行列に対する代数マルチグリッド法を共役勾配法の前処理に利用するAMG-CG法を提案し，この種の解析でしばしば現れる係数行列の特異性を回避することに成功している。この際導入したシフトパラメータについて，ソルバの収束性への影響が小さく，パラメータの最適値探索の必要性が無いという優れた特性を有することを計算例により示している。

第６章では，非対称行列が現れる実用的な解析例としてMHD発電機内の電磁流体解析及び移動導体を含む３次元渦電流解析をとりあげ，これらに対しても代数マルチグリッド解法の有効性が高いことを示している。MHDチャネル内解析と移動導体を含む渦電流解析では，それぞれ，第２章と第５章の代数マルチグリッド法を応用しており，対象としている問題が非対称係数行列を持つことから，代数マルチグリッド法を前処理とし，クリロフ部分空間法として安定化双共役勾配法を使用するAMG-BiCGSTAB法を提案している。両解析で，代数マルチグリッド法が優れた性能を持つことを示している。

第７章は，結論であり，本研究で得られた成果のまとめを示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は，電気機器，電子機器の数値解析の詳細化，大規模化および限界設計法の実現を目指し，有限要素法による安定かつ高速の数値電磁界解析法を確立するために，代数マルチグリッド法に基づく数値電磁界解析法について研究した結果をまとめたものであり，得られた主な成果は次のとおりである。

1．有限要素法による静磁界解析，渦電流解析において現れる連立一次方程式の求解に関して，それぞれに効率的な代数マルチグリッド法の並列化手法を提案し，分散メモリ型並列計算機SR2201を用いた数値計算により，それらの並列化手法の有効性を確認した。

2．従来の代数マルチグリッド法では係数行列がM行列であることを前提とし，係数行列の非対角要素はすべて負である必要があったため適用範囲が限定的であったのに対し，代数マルチグリッド法における補間関数の変形を提案し，対角成分が正であるH行列まで，代数マルチグリッド法の適用範囲を拡大する手法を与えた。

3．数値電磁界解析に特有のベクトルポテンシャルを用いた辺要素有限要素法では係数行列の特異性の問題があり，従来の代数マルチグリッド法の適用が不可能であることに対し，代数マルチグリッド法を前処理として用いるAMG-CG法を提案して特異性の問題を解決し，さらにこのAMG-CG法におけるシフトパラメータの性質と選択法を明らかにした。

4．移流項を含む系や移動導体を含む系の解析で現れる非対称行列の連立一次方程式に対し，代数マルチグリッド法による前処理を用いたAMG-BiCGSTAB法を提案し，電磁流体発電機のファラデー形MHDチャネル内の電磁界解析，移動導体を含む渦電流解析に適用し，その有効性を確認している。

以上要するに，本論文は，数値電磁界解析において，有限要素法により導出される大規模連立一次方程式に対し，代数マルチグリッド法に基づいた解法の開発を行い，実用上重要な電磁界解析問題に適用し，提案手法が従来法と比較して大幅に高速であることを示すとともに，代数マルチグリッド法の適用範囲を拡大したものであって，学術上，実際上寄与するところが少なくない。よって，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また，平成15年１月22日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果，合格と認めた。