

審査の結果の要旨

氏名 村山 敏夫

電子機器の高速化、高密度実装化の進展により高度な信号処理を応用した様々な電子機器が開発され、実用に供されている。このような電子機器の動作時には複雑な電磁気現象に基づいた電磁雑音が発生し、無線通信障害や医療機器の誤動作などの様々な問題を発生させている。このような課題を解決するために数値電磁界解析手法が盛んに研究され、報告されてきている。しかしながら電磁雑音問題に代表される高周波周波数領域の数値解析は支配方程式であるヘルムホルツ波動方程式を辺要素で離散化した場合に悪条件となり、広く用いられている反復解法では求解困難となるため、その解決のための有効な解決策が必要である。これまでも問題を一部簡略化した静電界・静磁界現象、渦電流問題などに対して悪条件を緩和させる行列解析手法が多々報告されているが、高周波問題、特に 100 万自由度以上の複雑形状解析で有効な手段を報告した例は非常に少ない。また支配方程式の悪条件の要因となっている非回転場がどのような数理的原因により反復解法の収束性を悪化させるかという理論的定量的な検討はほとんど見られない。そこで本論文では支配方程式の数理的特徴を固有値分布の観点から検討し、クリロフ部分空間法における収束悪化原因を究明している。さらに、それらの原因に対して有効な前処理手法を新しく提案し、数値実験によりその有効性を確認している。また共有メモリ型並列計算機上で並列実装を行い、提案手法が並列化にも有効であることを実証している。

本論文は9つの章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と工学的価値、位置づけについて論じている。従来の高周波電磁界解析に対して得られている知見とその概要をまとめた後、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では研究の背景となる定式化理論について述べている。従来より広く用いられている離散定式化手法である辺要素を用いた六面体および四面体メッシュを用いた数学的背景について説明し、支配行列を導いている。

第3章では支配方程式であるヘルムホルツ波動方程式の数理的特徴を媒体材質の特性に基づいた固有値分布に基づき分析するとともに、行列解法として複

素対称行列のクリロフ部分空間法である COCG 法及び COCR 法の特徴を述べている。この際、解くべき行列の条件数と収束に要する反復計算との関係を論じている。

第 4 章では反復解法の収束性を改善するための前処理手法について高周波電磁界解析への適用について説明し、前処理手法として従来用いられているマルチグリッド法の特徴と課題について述べている。

第 5 章において、本研究の主題となる固有値操作による収束改善手法を、数理的特性をもとに新規提案している。考案した「重畳マルチグリッド法」による固有値操作の有効性を数値的に確認し、それを発展させた「拡張節点パッチ」と呼ばれる前処理手法について提案し、その目的と効果を論じている。

第 6 章では本提案手法の並列化について、マルチカラー手法に基づいた効果的な順序付けを提案し、最終的な実装プログラムの精度について理論値との比較を通じてその信頼性を示している。

第 7 章では複雑な構造を持ついくつかの解析対象について、構造・非構造メッシュで構成されるモデルについて一方向、面拡張を含む様々な前処理手法について実験を行い、従来法に比べ 10 倍程度の高速化を実現している。

第 8 章では、第 6 章で論じた順序付けについて数値実験を行い、本手法の共有メモリ計算機上での並列化効率を確認し、有効性を検証している。

第 9 章は結論であり、本研究で得られた知見と今後の研究の方向性について論じている。

以上を要するに、本研究では高周波周波数領域電磁界問題の数値解析分野において、問題の数理的特徴を明らかにして収束性困難原因を解明し、その知見に基づいて新たな前処理手法を提案、検証することによって、従来困難であった複雑形状対象物の効果的な解析を実現した点はシステム創成学分野にとって大きな価値があり、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。