HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on model order reduction for Maxwell's equations based on Krylov subspace methods [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	比留間, 真悟
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第14580号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81667
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shingo_Hiruma_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（情報科学）　　氏名　比留間　真悟

学　位　論　文　題　名

Study on model order reduction for Maxwell's equations based on Krylov subspace methods
（クリロフ部分空間法によるマクスウェル方程式のモデル縮約法に関する研究）

昨今の地球温暖化問題を背景として電磁機器の高効率化が強く求められている. 変圧器やリアクトルなどの電力変換器は各種パワーエレクトロニクス回路や回転機制御回路などに広く用いられており, その損失低減は重要な課題である.

近年, パワーエレクトロニクス回路のスイッチングが高速化しており, 周辺回路の小型化・高周波数化が進んでいる. 高周波数において電磁機器内部には表皮・近接効果による渦電流が発生し損失が増加する. 渦電流損失を高精度に計算するには電磁機器の細部をモデル化し電磁界シミュレーションにより解析する必要があるが, 微細なメッシュを有するモデルの未知数が多くなり, 解析時間が長大になる問題がある. またパワーエレクトロニクス回路などの外部回路との連成のためには多数の未知数を有する大規模な方程式を繰り返し解かなければならず現実的ではない. このような問題に対して方程式の求解を高速化するための二つのアプローチがある. 一つは方程式を並列化して大規模問題を高速に解く方法, もう一つは方程式の低次元近似モデル (reduced order model: ROM) を生成して高速に解く方法 (model order reduction: MOR) である. 前者の方法では並列化の規模に応じて速度向上率が高くなるため, 計算資源が豊富にある場合に有効である. 一方で後者の方法では高精度な低次元近似モデルを生成できれば大幅な速度向上を望むことができ, さらに外部回路と強連成解析の高速化が期待される. 本研究後者のアプローチに着目し, 高精度な ROM の構築を目的として以下の検討を行った.

(1) 電磁場の支配方程式から Cauer 回路を生成する手法の定式化と一般化
(2) 上記手法 (1) の均質化法への適用と精度および計算時間評価
(3) 上記手法 (1) の変位電流を考慮した方程式への適用と精度および計算時間評価

第 1 章では研究の背景と既存の研究について記述し, それらの内容を踏まえて研究目的について述べた.

第 2 章では Maxwell 方程式を記述した. また,Maxwell 方程式の低周波近似である準静電界 (Electro-quasi-static), 準静磁界 (Magneto-quasi-static),Darwin モデル (Electromagneto-quasi-static) 近似について述べた. さらに, 本論文で使用する数値計算方法として有限要素法について概要を述べた.

第 3 章では (1) として近年提案された電磁場の方程式と等価な Cauer 回路を生成する手法 (Cauer ladder network method: CLN) に着目し, これを一般化した手法を提案した.CLN 法と電子回路分野で用いられる伝達関数の Pade 近似の方法 (Pade approximation via Lanczos: PVL) の関連性を Kyrlov 部分空間法の観点から明らかにし関連づけた. これにより一般化した方法 (Cauer via Lanczos: CVL) を提案した.CVL を用いることで任意の伝達関数を Stieltjes 連分数に近似し Cauer 回路を得ることが可能になった. 提案手法を電磁機器の ROM 生成に適用することで従来の損失解析では長大な時間を要する計算を短縮できることを示した.

第 4 章では (2) として CVL をモデル低次元化の手法の一つである均質化法と組み合わせることについて検討を行った. これにより均質材料の物性値の計算, 均質材料を含む系の ROM の導出, さらに古典的な渦電流損失式の高精度化が可能となった. 従来, 均質材料の物性は周波数ごとに方程式を解く必要があったが,CVL を適用することで少数回の解析のみで広い周波数における ROM を得ることが可能となることを示した. また, 均質化法を適用したモデルは依然として大規模な方程式であり, 繰り返し解くことは計算コストが大きい. これに対し,CVL を適用することで ROM として物理的な解釈が可能な等価回路を生成できることを示した. また古典的な渦電流算出モデルである Dowell の式に対して, 均質化法を適用することで高周波数における渦電流算出を高精度化できることを示した.

第 5 章では (3) として CVL を変位電流が考慮可能な定式化である Darwin モデルに適用する検討を行った. 近年のパワーエレクトロニクスの高周波化に伴い材料内の電界分布の検討が必要になると考えられる. 電界分布を考慮するための定式化として Darwin モデルがある.　しかしながら,Darwin モデルを従来の方法で離散化すると非対称な方程式になってしまうため, 繰り返し解くことが難しい. そのため, 本研究では CVL を適用することで ROM を生成することに着目した.CVL により Darwin モデルにおいても ROM の生成が可能であることを示し, 高速な解析が可能になることを示した.

第 6 章では, 本論文で得られた結果と知見を総括した.