HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	モデル縮約法の電磁界解析への応用に関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	佐藤, 佑樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12648号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65693
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuki_Sato_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（工学）　氏名　佐藤　佑樹

学 位 論 文 題 名

モデル縮約法の電磁界解析への応用に関する研究

（Study on Application of Model Order Reduction to Electromagnetic Field Analysis）

近年, 電気システムに用いられているインダクタや変圧器, モータ等の開発・設計の過程では, 数値シミュレータによる電磁界解析が行われている. これらの電磁界解析では, 電磁機器の特性・性能の評価を容易に概算できるため, 電磁機器の設計・開発の過程では非常に有効な手段である. その一方で, 従来のこれらの機器の設計・開発の過程では 2 次元における電磁界解析で近似的に特性・性能評価が行われてきた. さらなる高効率, 省エネルギーな電磁機器の開発・設計のために, 電磁機器の 3 次元構造を考慮した 3 次元電磁界解析の要請が高まっている.

境界要素法や FDTD 法等の様々な 3 次元電磁界解析手法が提案されているが, 現在では有限要素法が広く用いられてる. 有限要素法は他の手法に比べて, 要素形状を四面体, 六面体, 三角柱と選択可能で表現能力に非常に優れている. また, 非線形問題に対しても他手法と比較して非常に有効な手法である. しかし,2 次元有限要素解析と比べて,3 次元問題のような大規模問題となればなるほど, 計算時間が長大となってしまう.

そこで,3 次元有限要素解析の高速化を目的として, 力学, 流体解析分野等で用いられているモデル縮約法 (MOR:Model Order Reduction) に着目した. モデル縮約法では, 有限要素方程式の数十万から数千万次元の解ベクトルを少数の基底ベクトルではられた部分空間に射影し, その空間において解を近似的に求める手法である. モデル縮約法は, 近年電磁界解析の分野でも盛んに研究されている. しかし, 解の精度はその部分空間を生成する基底ベクトルの本数やその生成法に依存してしまう. また, 線形問題には非常に有効な手段だが, 非線形問題では解の精度が大幅に劣化してしまう. 上記の問題を解決するために, 部分領域モデル縮約法と Discrete Emprical Interpolation 法を併用した手法を提案した. この手法を用いることで非線形問題の解の精度を維持しながら計算時間も従来のモデル縮約法とほぼ同程度の解析時間で実行できることを示した.

電気システム全体の特性評価を行う場合, 解析時間の観点からパワーエレクトロニクス回路内の電磁機器は等価回路で表現される. しかし, 従来のこれらの等価回路は,(a) 周波数特性を評価できない,(b) 初期磁化やヒステリシス特性を評価できない,(c) 渦電流損やヒステリシス損を評価できないといった欠点を有している. これらの問題点を解決するために,3 次元有限要素モデルによる電磁機器の等価回路生成手法を提案した. この手法では, まず有限要素モデルをモデル縮約法を用いて電磁機器のアドミタンス関数を周波数の陽な有理関数にしている. 有理関数算出後, この有理関数を満たすような等価回路を生成する. このとき, 物理的な意味を有している Cauer 型の等価回路とすることで, 非線形特性を評価することが可能となる. 本手法を DC-DC コンバータ内のインダクタや誘導加熱装置等に適用し, 通常の 3 次元有限要素解析と同精度の解析を行えることを示した.

また, 電磁機器は, 損失低減や高効率化のためにモータやインダクタ, 変圧器等には Litz 線や電磁鋼板, 圧粉磁心等が用いられており,3 次元的に非常に微細な構造をしている. これらの 3 次元的に微細な構造を持つ機器の特性同定は非常に重要となるが, これらを用いている電磁機器はマルチス

ケール性の大きい問題となってしまうため, これらの機器の 3 次元有限要素解析の計算時間は長大となってしまう. これらの特性同定のためには, 均質化が非常に有効な手段となる. そこで, マルチターンコイルと圧粉磁心の特性評価同定のための均質化手法を提案した. この手法では任意形状における表皮効果や近接効果を考慮した透磁率をあらかじめ解析的, 数値的に求めておき, その透磁率を Ollendorff の式に代入することで巨視的な透磁率を算出する. 任意形状のこの巨視的な透磁率を求める際に本手法では, モデル縮約法を用いている. この巨視的な透磁率を用いて, 有限要素解析を行うことで従来の有限要素解析と比較して, 大幅にメッシュ数を削減することができ, 従来の有限要素解析とほぼ同精度の解析が行うことができる. 本手法の妥当性を示すために,200 本の円形, 楕円形, 四角形型の断面を持つマルチターンコイルの巨視的な透磁率を算出し, 有限要素解析に適用した. 周波数, 時間領域ともに従来の有限要素解析と同等の結果を計算時間を大幅に短縮し, 得ることができた. また, 圧粉磁心の特性同定のために, 圧粉磁心を用いているインダクタの時間領域解析を行った. 本解析では, 巨視的な透磁率の Cauer 型の等価回路を各要素に振り分けることにより, 圧粉磁心を用いたインダクタの時間領域解析を実現した. 本手法では, 非線形性を有している圧粉磁心にも適用可能で, 本論文では圧粉磁心が非線形性を有していない場合と有している場合で比較を行い, 本手法の有効性を示した.