HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 均質化有限要素法とインピーダンス境界条件を用いた準定常電磁界解析に関する研究［論文内容及び審査の要旨］ |
| Author(s) | 藤田, 祥伍 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(情報科学) |
| Dissertation Number | 甲第14142号 |
| Issue Date | 2020-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/78436 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Shogo_Fujita_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　藤田祥伍

学　位　論　文　題　名

均質化有限要素法とインピーダンス境界条件を用いた準定常電磁界解析に関する研究
（Study on Quasi-Static Electromagnetic Field Analysis Using Homogenization-Based Finite Element Method and Impedance Boundary Conditions）

現在, わが国における消費エネルギーのうち,50 パーセント以上が電気エネルギーを占めており, その内の 50 パーセントはモータや変圧器を駆動するために消費されている. これらの電気機器の損失には, 鉄芯中の鉄損と巻線内部の Joule 損に起因する銅損がある. これら損失の低減と電気機器利用効率の改善は, 温室効果ガスの排出量の削減, 環境汚染や地球温暖化の防止に寄与する.

こうした目的のための電気機器の高効率化に伴い, それぞれの素子の小型化が図られている. そのために, 近年電気機器の駆動周波数が高くなる傾向にある. 高周波化が進むと, 体積は小さくなるものの, 界磁巻線における銅損が顕著となる. 銅損には電源からの電流による表皮効果と, 素線に印加される近接効果から発生する渦電流損がある.

例えば, 近接効果損失低減のためには, 銅線を薄い磁性体で被覆した磁性被覆線が有効である. 磁性被覆線においては, 外部磁束は磁性体に集中し, 銅線と鎖交する磁束が低減するため, 近接効果を抑制することが可能である. 別の方策として, 占積率を向上するために, 素線の平角線化が注目されている. 平角線を用いると, 表皮効果を抑制でき, 占積率が 90 パーセント程度にまで改善できる.

一方で, 鉄損の低減のために, 現在圧粉磁芯を用いた磁性体コアを用いることが検討されている. この磁性体コアは, フェライト等とは異なり, 透磁率がやや低いものの, 磁気飽和と渦電流損を抑制できる. また, 磁性粉体は 3 次元形状を生成しやすく, 製造に向いているという利点も有している.

上記のような電気機器の構造を変化させることによる銅損, 鉄損の損失の低減に加えて, 外部漏洩磁界の低減も重要になる. そのためには, 電気機器の一部を電磁シールドで覆うことが必要になる. 現在は, 数 $\mu$m の厚さの電磁シールドが用いられている.

これらを考慮した電気機器の設計には, 多数のパラメータがあり, 実験ベースでは試作・製造コストが膨大である. そこで, 電磁界有限要素解析により電気機器の最適化を行うことが重要となる. しかし, 磁性被覆線や電磁シールドを含む系はいずれも微細な構造を有しており, 直接的な有限要素解析が難しい. 本博士論文においては, これらの渦電流特性を考慮した解析を行うための均質化有限要素法, インピーダンス境界条件の導入を行い, 電気機器の損失を精度よく評価するための方法を提案する.

第 1 章では, 本研究の背景である高周波帯域で電気機器が使用されている現状, また磁性被覆線や平角線についての有効性について述べる. つぎに, 有限要素法のマルチスケール性に関して述べ, 均質化有限要素法, インピーダンス境界条件を導入することの意義について述べる. 最後に, 本論文の構成について述べる.

第 2 章では, 本研究で使用する電磁界数値解析手法である有限要素法について述べる. 本論文で使用する有限要素は三角形要素, 四面体要素であり, 電磁ポテンシャルを割り当てるための 0 次,1 次 Whitney 要素について述べる. さらに, 軸対称系の場合,3 次元解析における有限要素法の定式化

を与える. また,IPM モータ等の回転機解析のための基本に関して述べる. さらに, 電圧源を考慮した解析手法や, 座標変換行列に関しても述べる.

第 3 章では, 第 1 章で述べた均質化有限要素法に関して, 周波数領域で議論する. まず, マクロ複素透磁率を得るために, 基本となる静磁界中の磁性体に対する Ollendorff の式を導く. つぎに, 複素透磁率を, 磁性板, 導線, 圧粉磁芯について, それぞれ求める. 求めたマクロ複素実効透磁率の周波数特性を調べ, 物理的な効果について述べる. 本論文で解析対象となる導線は, 通常の円筒形細線, 円筒形磁性被覆線, 楕円近似された平角線, 楕円近似された磁性平角線である. また, 圧粉磁芯の形状は真球, 楕円体を仮定する.

第 4 章では, 第 3 章で提案した均質化法の妥当性を周波数領域で確認する. まず, マクロ複素透磁率が,Unit-Cell Approach で求めた場合と, 解析解から得られた複素透磁率を Ollendorff の式に代入することによって求めた場合で, 十分に一致することを示す. 解析対象として, マルチターンコイルの実効インピーダンス, 磁束線の分布, 外部磁界を提案手法と従来の準静電磁界解析で解析した結果が良好に一致することを示す.

第 5 章では, 第 4 章において, 均質化有限要素解析が妥当性であることを確認したことを踏まえて, 磁性被覆コイルの構造最適化を行う. 磁性被覆線の設計に求められる要件はいくつかあるが, 本研究では交流抵抗の最小化を目的とする. まず, 磁性被覆コイルの交流抵抗の磁性被覆厚や透磁率依存性を調べる.GA を用いて, 磁性被覆の交流抵抗を最小化することを検討する.

第 6 章では, 第 3 章で定義した磁性粒子の複素透磁率を用いて, 磁気的接触を考慮した SMC コアの周波数領域のマクロ透磁率を数値的に求める方法について述べる. また, 提案手法を応用して, 時間領域解析を近似的に行うことを検討する.

第 7 章では, 第 3 章で議論した周波数領域で定義された複素透磁率を時間領域解析で行うための手法に関して述べる. 複素透磁率の連分数表示を用い,Padè 近似を介して部分分数分解されたマクロ複素透磁率を逆 Laplace 変換することで, 時間領域における実効磁気抵抗を求める. 逆 Laplace 変換された有限要素方程式において, 実効磁気抵抗と磁束密度の畳み込み積分を効率的に計算する RC(Recursive convolution) 法について述べる. 本法により, 通常の銅巻線, 磁性被覆コイル, 楕円柱コイル, 平角線コイル, 磁性平角線コイルの電流や電力の時間波形が従来の有限要素法とよい精度で一致することを示す.

第 8 章では, 提案手法を用いて, 磁性被覆線を用いた電気機器の銅損低減に関して議論する. 解析対象として, リアクトル,IPM モータを例に挙げる. 銅損の実効値の磁性被覆の透磁率への依存性を数値解析で評価し, 磁性被覆線の有用性を明らかにする.

第 9 章では, 電磁シールドのモデル化に有効なインピーダンス境界条件について, 周波数領域で定義し, 有限要素方程式と連成するための定式化について述べる. つぎに, 周波数領域で, 導線とインピーダンス境界条件を用いた解析結果が, 従来の準静電磁界解析の場合と良好に一致することを示す. さらに, 周波数領域において定義されたインピーダンス境界条件を, 時間領域解析において適用するための方法に関しても議論する.

最後に, 第 10 章では, 本博士論文の総括を行う. 均質化有限要素法, インピーダンス境界条件を導入することによる有限要素数の低減, 磁性被覆コイルの構造最適化, 磁性被覆線による近接効果損失の低減, 等についてまとめる. また, 磁性体の磁気的接触を考慮するため解析手法に関してもまとめる.