

博士学位論文審査要旨

2009年2月17日

論文題目： 電磁界数値解析技術の高度化および基盤構築に関する研究

学位申請者： 北川 亘

審査委員：

主 査： 同志社大学工学研究科 教授 石原 好之

副 査： 同志社大学工学研究科 教授 戸高 敏之

副 査： 岐阜大学工学研究科 教授 河瀬 順洋

要 旨：

現在、環境問題、省エネルギーなどの観点から、電気機器においても高効率化が求められているが、特に電気機器の一つであるモータは総電力消費の半分を占めるため、その高効率化に対する要求が強い。現在ではモータをはじめとする電気機器の開発には、コンピュータを援用した方法が広く用いられており、そのなかでも有限要素法などによる、電磁界数値解析を用いた高効率機器の開発が広く行われている。この方法の有効活用のためには、数値解析法の開発、鉄心に使用される磁性材料の特性の精確な取り扱い、最適形状を求める手法の開発などが要求されている。

本論文ではこのような観点から、電磁界数値解析の高度化と基盤構築に関して研究を行った結果をまとめている。

第1章では、研究の背景及び目的、論文の構成、方向性について述べている。

第2章では、電気機器の磁界解析を行うために必要な、鉄心材料として使用される電磁鋼板、永久磁石など、種々の磁性材料のデータベースを構築している。そのデータベースの構成、取り扱う材料の特性の種類、材料データの入力法、データベースの使用法について述べている。

第3章では、モータの磁界解析を例に取り、磁性材料の近似がどのように解析結果に影響を及ぼすかを明らかにするとともに、特に、近年増加している高性能の永久磁石を用いたときに生じる、飽和磁束密度領域で動作する場合の材料特性の近似法を検討し、それが機器特性に与える影響について述べている。

第4章では、電磁クラッチなど電磁アクチュエータを例にとり、形状最適化のために用いられる遺伝的アルゴリズムを改良した拡張型遺伝的アルゴリズムを提案し、計算時間の短縮を可能としている。

第5章では、電磁機器騒音発生原因のひとつである磁歪による鉄心の変形、及びそれに起因する振動解析のため磁界解析と構造解析・固有振動解析の連

携手法を提案している。電磁鋼板一枚、及びモデル鉄心による実験と解析との比較により、提案手法の有効性を確認している。

第3章から第5章の解析では、第2章で提案した磁性材料のデータベースを使用し、その有効性を確認している。

第6章では、本論文の研究を総括するとともに、将来展望を述べている。

本論文の成果は、省エネルギーの観点から、今後ますます重要となる回転機、リニアアクチュエータなどの高効率電磁機器の開発に寄与するところが大きい。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

総合試験結果の要旨

2009年2月17日

論文題目： 電磁界数値解析技術の高度化および基盤構築に関する研究

学位申請者： 北川 亘

審査委員：

主 査： 同志社大学工学研究科 教授 石原 好之

副 査： 同志社大学工学研究科 教授 戸高 敏之

副 査： 岐阜大学工学研究科 教授 河瀬 順洋

要 旨：

本論文提出者は、2002年3月本学工学研究科博士課程前期課程を修了した後、日本アイ・ビー・エム(株)に入社し、ソフトウェア開発研究所などの勤務を経た後、2007年1月レノボ・ジャパン(株)に入社、先端技術研究所に勤務している。2006年4月より本学大学院工学研究科博士課程後期課程に在学している。

本論文の主たる内容は、電気学会論文誌に2編、IOS Pressに1編がすでに公表され十分な評価を受けている。また、日本 AEM 学会誌、電気学会論文誌 D に投稿中である。

本年1月23日午後3時30分より約1時間40分にわたり、提出論文に関する学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに講演会終了後、審査委員により、論文に関係した諸問題について口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認できた。又、各年度において優れた研究成果を挙げ、英語の語学試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力を有すると認定されている。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士学位論文要旨

論文題目： 電磁界数値解析技術の高度化および基盤構築に関する研究

氏名： 北川 亘

要 旨：

近年、回転機はパワーエレクトロニクス技術の発達や、永久磁石を含む磁性材料の高品質・高性能化などの技術革新により、構造の多様化や高効率化が進んでいる。現在、小型モータが、制御機器や家電製品など非常に広範な分野で使われ、高効率化と小型化を実現するために永久磁石を用いたモータの開発が進んでいる。しかし、モータに永久磁石を用いることによりコギングトルクと呼ばれる脈動トルクが発生し、それは永久磁石が高性能になるほど顕著となっており、対策が必要となっている。また、永久磁石の高性能化に伴い、その特性を十分把握して、適切に活用しなければ、鉄心が局部的に飽和するなどの現象を生じ、期待通りの特性が出ない場合もあり、当然、解析と測定結果が一致しない例も生じている。これらの、問題を解決するためには鉄心に使用する磁性材料の磁気特性をできるだけ正確に近似すると共に、電磁界数値解析手法の確立が必要となっている。

また、近年、アクチュエータなどの電磁機器には回転機同様、小型、軽量、高出力、高信頼性、低価格といった要求があるが、これらは相反する要求であることが多く、それらの要求を総合的に満たしつつ、目的に適応する、形状や推力などを見出す必要がある。その中でも電磁機器の鉄心形状は、諸特性を決定する主要因であるために、適切な磁性材料の選択と共に形状最適化が重要となる。電磁機器の形状最適化には有限要素法と組み合わせた遺伝的アルゴリズムのような線形または進化計画法が広く用いられている。しかし、遺伝的アルゴリズムは実際のプログラミングの詳細を規定しない緩やかな枠組みであるため、初期遺伝子数や突然変異率、交差数などのパラメータの設定方法などに、不特定要素が多い方法論であるため、局所解に到達する恐れがあるなどの問題点が指摘されている。さらに、多大な解析時間が必要であるという大きな問題点もある。

また、電磁機器の鉄心では磁歪による振動・騒音の問題があり、特に、磁歪に起因する騒音は変圧器の電磁騒音の主原因である。そのため、この振動・騒音を低減するため、共振を生じないように、機器の固有振動数が駆動周波数と一致することを避けるなどの対応が必要である。

このように電磁機器の有限要素法などの電磁界数値解析手法による特性の解析では、磁界解析法と共に材料に関する知見と高精度の材料データが必要である。このため、電磁界数値解析に活用できる磁性材料データベースが強く求められている。高精度の磁性材料データベースを用いることにより、解析精度の向上が期待できると共に、煩雑な材料特性のデータ入力を回避し、人的ミスをも最小限に防ぎ作業時間の削減が可能となる。

そこで、本論文では電磁機器の特性解析を、電磁界数値解析の高度化と数値解析を支える基盤構築の2つの視点から検討する。まず、高度化の観点として、回転機の磁界解析に用いる電磁鋼板の、飽和磁束密度以上の領域での磁化特性の近似法について検討する。また、リニアアクチュエータなどの電磁機器の最適設計について、計算時間短縮のための手法を検討する。さらに、電磁騒音の主要因の一つである磁歪による鉄心の形状変形解析を実現するため、電磁界数値解析と構造解析の連携解析について検討する。基盤構築の観点からは、電磁機器の特性解析で必要となる磁性材料の磁気特性のデータベースの構築とそれを用いた電磁界数値解析技術について検討する。

第1章では、研究の背景および目的について述べた。さらに、本論文の構成をまとめ、研究の方向性を示した。

第2章では、ユニバーサル・データベースシステムを用いて、提案する磁性材料データベースの概要、テーブル定義、および入力・出力インターフェースについて述べた。

本論文では、構築するサーバアプリケーション群の例として、フリーウェアのデータベースソフトウェアである MySQL, Apache HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) サーバ, PHP (Hypertext Preprocessor) を活用したデータベースを構築し、プリプロセスの作業時間の低減を可能とした。

磁性材料データベースで取り扱う材料は、電磁機器鉄心として使用される、方向性電磁鋼帯、無方向性電磁鋼帯、機械構造用炭素鋼鋼材、一般構造用圧延鋼材、フェライト、永久磁石とした。材料によって扱うデータ項目は多少異なるが、磁界解析による機器特性の把握に必要な「圧延方向、直角方向、混合の磁化特性」、「二次元磁化特性」、「鉄損特性」、「応力特性」、「ヒステリシス特性」、「密度、抵抗率、抵抗温度係数、試料寸法、温度係数、残留磁束密度、保磁力、最大エネルギー積、等」と、データの入手先、及びその信頼性を確保するため「測定日、測定場所、測定者、測定条件」を必須の項目とした。この磁性材料データベースは、サンプルデータベースを作成すると共に、データベースへの入力方法を示している。出力は PHP から SQL (Structured Query Language) を発行し、Web ブラウザ上からデータを取得することを可能とした。また、有限要素法などのプログラムからデータを呼び出す場合は、プログラム内に SQL の検索文を組み込むことにより、データを取り出すことを可能とした。また、各 Web ページから PHP を通して、アイコンやデータを出力することも可能とした。データの出力は HTML (Hyper Text Markup Language) 形式、XML (Extensible Markup Language) 形式、XLS (Microsoft EXCEL Format) でも出力可能とした。

第3章では、回転機の電磁界数値解析による特性の解析においては、特に、鉄心の一部が飽和磁束密度以上になる場合の解析に焦点を当て、実測値と種々の磁化特性の近似を用いた解析値を比較・検討した。またコギングトルクの計算では、さまざまな専門的な知識や技術を必要とし、軟磁性材料および永久磁石材料などの磁化特性のみならず、細かい設

定について要求されるため、これらの解析には磁性材料データベースを用い、プリプロセスの作業時間低減を実証した。

第4章では、電磁クラッチなどの電磁アクチュエータの電磁界数値解析による、形状最適化に拡張型遺伝的アルゴリズムを提案し、計算時間低減を可能とした。この手法についても、磁性材料データベースを適用し、材料特性の取得での、プリ・ポストプロセスの作業の低減を図った。

提案する拡張型遺伝的アルゴリズムは、最初に探索範囲の分割数に対応できる分割図を自動分割により作成し、遺伝子番号に従って、あらかじめ設定しておいた材料定数を割り当てる。さらにこれを2段階行うことにより最適形状を導き出す手法である。これによって、従来の遺伝的アルゴリズムよりも計算時間を短縮することを可能とした。

第5章では、有限要素法による構造解析手法を用いた磁歪による鉄心の変形の解析手法を提案した。多くの論文では一般に構造解析や振動解析を行う方法として、NASTRANに代表される汎用の有限要素法構造解析ソフトウェアなどを用いて数値解析を行っている。このような汎用のソフトを用いた解析は半ばブラックボックス化しており、またほとんどの場合、ソースファイルが確認できない。そのため、磁歪による鉄心の変形を解析する際に、鉄心中の要素毎の磁束分布を考慮した節点力の方向を定めることが不可能である。

本章では、磁歪による鉄心の変形及びそれに起因する振動解析のため、磁界解析と構造解析・固有振動解析の連携手法を提案した。この連携解析では磁界解析で求めた鉄心中の要素ごとの磁束分布から磁歪による節点力を求める。これを用いて構造解析・固有振動解析を行うことにより、磁歪による変形及び共振周波数の算定を可能とした。またこの手法にも磁性材料データベースの適用し、材料特性のプログラムへの入力の高効率化について述べた。この手法を用いて磁歪による電磁鋼板及び単相モデル変圧器の変形及び振動を算定すると共に実験によりその妥当性を確認した。

第6章では、本論文の研究を統括するとともに将来の展望を述べた。