

磁気応用分野における電磁界解析技術の最近の動向

— 電磁機器基盤解析技術調査専門委員会活動報告 —

藤原 耕二* (岡山大学), 齋藤 兆古 (法政大学)

Recent Trend of Methods for Electromagnetic Field Analysis in Applied Magnetics - A Report on Activities of Investigation Committee on Fundamental Technology for Analyzing Electromagnetic Devices in the IEE of Japan - Koji Fujiwara* (Okayama University) and Yoshifuru Saito (Hosei University)

Abstract

This paper reports on activities of "Investigation Committee on Fundamental Technology for Analyzing Electromagnetic Devices" established in the Institute of Electrical Engineers of Japan.

キーワード：磁気応用，磁性材料，磁気回路法，磁気特性のモデリング，高周波電磁界，電磁界の可視化
(applied magnetics, magnetic material, magnetic circuit method, modelling of magnetic properties, high frequency electromagnetic field, visualization of electromagnetic fields)

1. まえがき

電気学会「電磁機器基盤解析技術調査専門委員会」(委員長：藤原耕二，調査期間：2001年4月～2003年3月)は，磁気応用分野における電磁界解析技術の調査検討を行うためにA部門のマグネティックス技術委員会傘下に設置された「電磁機器解析手法技術調査専門委員会」(委員長：齋藤兆古，調査期間：1999年1月～2000年12月)の後継委員会であり，前委員会の活動をさらに進展させ，電磁機器設計に対して，現行の数値解析技術を高度化し，現実に即した解析技術へ改善するために，磁気回路法と数値解析法との理論的関係の明確化，磁性材料の磁気特性を表す構成方程式の系統的定式化と数値解析法への導入技術，電磁界の可視化技術と磁気特性評価法および磁気素子検査法への応用などを調査し整理することを目的として発足した。本稿では，委員会の概要および活動について報告する。

2. 電磁機器基盤解析技術調査専門委員会の概要

本委員会の概要は，以下に示すとおりである。

<2・1>目的 ここ数年における計算機の高速度・大容量化ならびに低価格化により，有限要素法や境界要素法などに代表される数値解析技術を用いた電磁界解析は，パーソナルコンピュータ上で実行可能になった。既に汎用の電磁界解析パッケージが市販されるに至り，企業の開発・設計者だけでなく，大学のような研究機関においても，数値解析法の開発を研究対象とせず電磁現象の把握に主眼を置いた研究者に対して，電磁界解析は身近な存在になり

つつある。しかしながら，例えば磁性材料の磁気特性の取扱いについて考えると，集中定数系解法である古典的な磁気回路法では，磁気飽和のみならずヒステリシス特性などの実際の現象に即した非線形性が比較的容易に考慮可能な磁気素子モデルが早くから提案され実用化されている。しかし，分布定数系解法である数値解析法においては，計算規模やコードの複雑さの観点からより高度な解析技術を必要とするため，主に磁気飽和特性のみを考慮するに留まっている。したがって，今後さらに高性能化される機器の設計に対して，現行の数値解析技術を高度化し，現実に即した解析技術へ改善する必要がある。

本調査専門委員会ではこのような現状を踏まえ，次世代の電磁機器の開発・設計に有用な実践的解析技術について調査研究を行う。特に，磁気回路法と数値解析法との理論的関係の明確化，磁性材料の磁気特性を表す構成方程式の系統的定式化および数値解析手法への導入技術，電磁界の可視化技術と磁気特性評価法および磁気素子検査法への応用などに関して検討を行う。

<2・2>内外の趨勢 古典的な磁気回路法は，磁性体の巨視的な非線形磁気特性の表現が可能なPreisach型モデルやChua型モデルなどの磁気素子モデルの導入が比較的容易であり，さらにSpiceやSimulinkなどの汎用電気回路シミュレータが利用可能であることから有用性が高く，我国のみならず，欧米諸国においても幅広く用いられ，高精度化のための改良が継続的に行われているのが現状である。しかしながら，有限要素法のような数値解析法と比較すると，理論上の差異については明確にされておらず，両手法の接点を究明し相互に補完することを目的とした基礎的な検討はなされていない。数値解析法に関しては，

Maxwellの電磁方程式を離散化するための種々の技術が整備された感があり、商用周波数帯で使用される電磁機器の三次元解析手法の開発はほぼ最終段階を迎え、応用研究を展開する時期が到来したという認識が、世界的に一般的になってきている。残された最重要課題の1つは、磁気特性のモデリングとその導入技術であるということも共通の認識である。特に磁気素子モデルは、従来のPreisachモデルが磁気異方性の取扱いが困難なスカラ型モデルであるため、それをベクトル型モデルに拡張する試みが盛んに行われている。我国では、Preisachモデルとは異なる新しいタイプのベクトル型モデルも検討されており、その諸パラメータ決定に必要な二次元磁気特性の測定技術も含めて、世界をリードする研究がなされている。

最近では、数値解析法の革新的な応用として、局所的な電磁界分布をその大きさだけではなく空間的および時間的位相も考慮して可視化し、その可視化情報から電磁界の発生源や媒質の配置などを求める斬新な逆問題解析手法が検討されており、我国が先陣を切っている。SQUIDの普及による生体磁気計測技術の開発や原子炉の非破壊検査技術の高精度・高信頼化に端を発した実用的研究分野であるが、近年の高度な磁気センサ技術を前提とした磁性材料の特性評価や電磁機器の環境電磁工学的評価への拡張も可能である。

このような背景のもとで、実践的な数値解析技術の開発とそれを応用した磁性材料や電磁機器の先進的な評価法の確立に関しては、我国が指導的役割を果たすことが期待されており、それに応じて国際的に貢献する必要がある。

＜2・3＞調査検討事項 次に示す4項目に重点を置いて、調査検討を行った。

- (1) 古典的磁気回路法と現代数値解析法の系統的統合化
- (2) 磁気特性を表す構成方程式の系統的定式化と数値解析法への導入技術
- (3) 電磁界の可視化技術とその応用
- (4) 電磁界系逆問題の実用化技術

＜2・4＞期待される効果 上記の調査検討事項に対して、以下のような効果が期待できると考えられる。

- (1) 磁気素子・装置の実践的解析技術の開発に対する指針
- (2) 磁気特性を表す構成方程式の系統的導出に対する指針
- (3) 磁気素子・装置解析への磁気特性導入技術の開発に対する指針
- (4) 磁気特性を表す構成方程式のパラメータ測定技術の開発に対する指針
- (5) 電磁界の可視化による非破壊検査・評価技術の開発に対する指針
- (6) 次世代電磁素子・装置の最適設計技術の開発に対する指針

＜2・5＞委員会構成メンバー 以下のメンバー（最終的

には21名）によって、調査活動を行った。

- 委員長 藤原 耕二（岡山大学）
 幹事 早乙女 英夫（千葉大学）、
 坂本 禎智（八戸工業大学）
 幹事補佐 土井 達也（足利工業大学）
 委員 荒 克之（岩手大学）*、
 五十嵐 一（北海道大学）、
 石原 好之（同志社大学）、
 伊藤 元哉（日立製作所）、
 岩原 正吉（金沢大学）、
 榎園 正人（大分大学）、
 大戸 基道（安川電機）、
 開道 力（新日本製鐵）、
 菊池 弘昭（岩手大学）§、
 齋藤 兆古（法政大学）、
 笹田 一郎（九州大学）§、
 佐藤 敏郎（信州大学）、
 園田 敏勝（近畿大学）、
 田島 克文（秋田大学）、
 橋本 光男（職業能力開発総合大学校）、
 二宮 保（九州大学）、
 松木 英敏（東北大学）、
 薮上 信（東北大学電気通信研究所）

*：途中退任者，§：途中就任者

＜2・6＞特徴 主要テーマの1つとして、電磁界の数値解析法を取り挙げている委員会は他にもある。しかしながら、磁性材料の磁気特性の取扱いをベースに、解析技術の問題点を洗い出し、改良を図ろうという観点から調査検討を行っているのは本委員会だけである。また委員会構成メンバーのほとんどが、解析および実験の両面から磁気応用に関する研究を行っているので、実際の電磁現象を解明するために不可欠な解析技術を十分に認識しているとともに、磁気特性のモデリングに必要なパラメータの評価に関する経験が豊富である。各メンバーが目指すアプリケーションも多岐にわたっており、多面的な検討が可能であった。

＜2・7＞調査報告書 以下の報告書を、技術報告として取りまとめる予定である。

- (1) 技術報告書名：「電磁機器基盤解析技術」
- (2) 目次
 - 第1章 まえがき
 - 第2章 磁気応用分野における電磁界解析技術の最近の動向
 - 第3章 磁気回路法を用いた解析手法
 - ・磁気回路法と有限要素法の理論的關係
 - ・磁気回路法における損失の考慮法
 - ・磁気回路法と回路シミュレータの併用による実用的解析法
 - ・パラメトリック発振回転機の解析法
 - 第4章 磁気特性の解析および評価の方法
 - ・電磁鋼板の磁気異方性のモデリング

- ・ヒステリシス現象のモデリング
 - ・フェライトの動的磁気損失測定法
 - ・バルク高温超電導体の電磁現象解析法
- 第5章 高周波電磁界の評価法
- ・高周波電磁界の解析法
 - ・高周波電磁界の測定法
 - ・高周波電磁界解析法の磁気応用デバイスへの応用
- 第6章 電磁界の可視化技術と電流源推定, 材料評価への応用
- ・画像処理技術を拡張した電磁界可視化手法
 - ・電磁界可視化手法の電流源推定への応用
 - ・電磁界可視化手法の材料評価への応用
 - ・渦電流を用いた非破壊検査技術
- 第7章 今後の課題
- 第8章 あとがき

3. 研究会資料

調査期間中に、3回の研究会に協賛した。発表資料は、以下に示すとおりである。

■2001年12月13日, 14日(六甲ハウス)

- (1) 角田浩一・早野誠治・齋藤兆古:「ベクトルカレントビューアによる電流の可視化」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-213 (2001)
 - (2) 白石加奈子・早野誠治・齋藤兆古:「多層基板における周波数別電流分布推定法」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-214 (2001)
 - (3) 天根賢一・園田敏勝・宮長博昭:「磁界制御形電流センサと検出分解能」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-215 (2001)
 - (4) 渡邊英和・遠藤久・早野誠治・齋藤兆古:「磁性流体を用いた浮き型傾斜センサーの提案」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-216 (2001)
 - (5) 藤田穰・寺島義浩・笹田一郎・野田保:「フラックスゲートを組み込んだ Dahle 型プローブによる強磁性金属の傷検出」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-217 (2001)
 - (6) 間潤周介・早野誠治・齋藤兆古:「一般化ベクトル型 SPM 法による抵抗トモグラフィ」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-221 (2001)
 - (7) 佐藤隆紀・早野誠治・齋藤兆古:「動画像認識手法の提案と電子・電磁機器の非破壊検査への応用」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-222 (2001)
 - (8) 土井達也・増田則夫・海老沼健嗣:「EO プローブによる電界測定と電磁界源推定に関する検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-223 (2001)
 - (9) 五十嵐一・本間利久:「電磁鋼板の磁区解析 —基礎検討—」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-226 (2001)
 - (10) 鳴田知和・遠藤久・早野誠治・齋藤兆古:「Chua 型磁化特性モデルのパラメータ測定に関する考察」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-227 (2001)
 - (11) 阿達孝之・藤原耕二:「二次元磁化特性を考慮した非線形磁界解析の収束特性 —解析精度および収束特性に影響を与える諸因子の検討—」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-228 (2001)
 - (12) 山光史哲, 園田敏勝, 宮長博昭:「バイアス磁界下における鉄損の振舞」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-229 (2001)
 - (13) 齋藤順孝・早野誠治・齋藤兆古:「薄膜磁性材料の磁化特性測定法 —補正コイル法における励磁コイルと補正コイルの長さ比の考察—」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-230 (2001)
 - (14) 大久保将克・土佐祐貴・夏坂光男・坂本禎智:「平面磁路積層形パラメトリックモータの固定子磁気異方性とモータ特性の関係」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-234 (2001)
 - (15) 田島克文・一ノ倉理・坂本禎智:「RNA 法を適用したパラメトリックモータの動作解析 —その3—」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-235 (2001)
 - (16) 藤井誠也・田頭忠幸・三島壮・宮武貴幸・園田敏勝・高崎佳明:「磁束制御形スポット溶接機の動特性」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-01-240 (2001)
- 2002年11月21日, 22日(佐賀大学理工学部)
- (17) 開道力・茂木尚:「積層鉄心における積層間短絡の解析手法について」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-137 (2002)
 - (18) 沖津隆志・村松和弘:「磁性体の磁気特性推定に用いる励磁コイルの配置・形状に関する検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-138 (2002)
 - (19) 遠藤久・早野誠治・齋藤兆古:「可飽和インダクタンスを含む回路解析に関する考察」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-139 (2002)
 - (20) 榎園正人・下地広泰:「二次元ベクトル磁気特性とベクトル磁気ヒステリシスモデリング」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-140 (2002)
 - (21) 下地広泰・堀部豊洋・榎園正人:「2次元ベクトル磁気特性を導入した磁界解析」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-141 (2002)
 - (22) 阿達孝之・藤原耕二:「二次元磁化特性を考慮した非線形磁界解析法 —磁化特性の近似法の改良に

- よる高速化—, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-142 (2002)
- (23) 大島賢一・山田陽介・小坂大吾・橋本光男:「渦電流探傷試験における SCC 自然き裂の数値解析モデルの検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-143 (2002)
- (24) 廣田章博・早野誠治・齋藤兆古:「新方式 ECT プローブの開発」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-144 (2002)
- (25) 田畑力・早野誠治・齋藤兆古:「変圧器型圧力センサーアレイとその応用に関する研究」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-145 (2002)
- (26) 土井達也・増田則夫:「ストリップライン近傍電磁界分布の S パラメータ分布による評価法の検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-146 (2002)
- (27) 藤井美紗子・早乙女英夫:「低周波磁界による生体内への非侵襲的充電システムの提案」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-147 (2002)
- (28) 藤井誠也・園田敏勝・高崎佳明:「スポット溶接機用変圧器構造に対する一検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-148 (2002)
- (29) 八島崇行・夏坂光男・坂本禎智:「単相励磁入力一三相パラメトリックモータの動作機構に関する基礎的検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-149 (2002)
- (30) 高坂真好・太田勝・坂本禎:「平面磁路形パラメトリックモータの内側共通磁路形状とモータ特性の関係」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-150 (2002)
- (31) 土佐祐貴・夏坂光男・坂本禎智:「磁化容易軸不平衡固定子を用いた平面形パラメトリックモータ特性の内側共通磁路幅依存性」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-151 (2002)
- (32) 長尾将典・園田敏勝:「直流バイアス差動方式磁界センサの励振条件と分解能」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-152 (2002)
- (33) 山本哲也・園田敏勝:「高精度交流基準電圧発生回路」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-153 (2002)
- (34) 藤田穰・笹田一郎:「フラックスゲートを組み込んだ Dahle 型プローブによる鋼板裏面傷検出」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-154 (2002)

■2003年3月31日(電気学会本部)

調査活動の取りまとめとして、本稿を含め MAG-03-54～64 の 11 件の発表を予定しているが、これらについては省略する。

4. むすび

本調査専門員会では、基盤解析技術の開発とそれを応用した磁性材料や電磁機器の評価法を審議し、電磁機器の開発・設計のために有用な種々の解析技術について整理することができた。しかしながら、それらの実用性に関しては、十分な検証を行うことができなかった。したがって、この点に関しては、新たに調査専門委員会を設立し、その活動と成果に期待したい。

原稿受付日	平成 15 年 3 月 13 日
-------	------------------