

先進電磁界解析による 設計高度化技術

先進電磁界解析による設計高度化技術調査専門委員会編

目 次

まえがき	3	3. 電磁材料のモデリング技術	63
		3.1 ベクトルヒステリシスモデル	63
1. 電磁界解析の現状と進展	4	3.2 ベクトルヒステリシスベンチマーク問題	72
1.1 定常解の高速計算	4	3.3 交流ヒステリシスベンチマーク問題の検討	76
1.2 非線形時間調和渦電流解析への ニュートン・ラフソン法の適用	5	3.4 異常渦電流損のモデリング	83
1.3 連成解析技術	8	3.5 電磁力解析	85
1.4 高周波解析技術	10	4. 電磁界解析の設計応用	93
1.5 マルチスケール解析	14	4.1 非接触給電の解析	93
1.6 開領域問題の電磁界数値解析法	16	4.2 磁気増幅器の解析	96
1.7 電磁界解析ソフトウェア	18	4.3 インバータ駆動電動機の絶縁設計	98
2. 新しい電磁界解析法	21	4.4 誘導加熱の解析	100
2.1 等価回路モデル	21	4.5 プリント基板の大規模解析	104
2.2 モデル縮約法	40	4.6 最適化を用いた設計	105
2.3 並列計算技術	45	あとがき	111

先進電磁界解析による設計高度化技術調査専門委員会委員

委員長	五十嵐 一(北海道大学)	濱田 昌司(京都大学)	
幹事	阿波根 明(サイエンスソリューションズ)	樋口 大(信越化学工業)	
幹事	岡本 吉史(法政大学)	房安 浩嗣(パナソニック)	
幹事補佐	米津 大吾(関西大学)	藤田 真史(東芝)	
委員	池田 文昭(フオートン)	藤原 耕二(同志社大学)	
	岩下 武史(北海道大学)	古屋 篤史(富士通)	
	生野 壮一郎(東京工科大学)	松尾 哲司(京都大学)	
	上原 裕二(富士通)	美 船 健(京都大学)	
	榎園 正人(大分大学)	宮城 大輔(東北大学)	
	大場 彰人(ミュージック)	宮田 健治(日立製作所)	
	岡田 勉(村田製作所)	村松 和弘(佐賀大学)	
	金山 寛(日本女子大学)	元吉 研太(三菱電機)	
	亀有 昭久(サイエンスソリューションズ)	若尾 真治(早稲田大学)	
	河瀬 順洋(岐阜大学)	李 燦(日立製作所)	
	北川 亘(名古屋工業大学)		
	結石 友宏(住友電気工業)	主な参加者	伊藤 俊平(京都大学)
	近藤 継男(豊田中央研究所)		梅谷 和弘(岡山大学)
	坂本 宏紀(明電舎)		小野木 悠真(岐阜大学)
	笹山 瑛由(九州大学)		高 炎輝(佐賀大学)
	島 和男(金沢工業大学)		片桐 弘雄(J S O L)
	島崎 眞昭(応用科学研究所)		加藤 大地(岐阜大学)
	進藤 裕司(川崎重工業)		北尾 純士(三菱電機)
	菅原 賢悟(近畿大学)		佐藤 孝洋(東芝)
	杉本 振一郎(諏訪東京理科大学)		佐藤 佑樹(北海道大学)
	高橋 康人(同志社大学)		竹田 よし美(同志社大学)
	武居 周(宮崎大学)		塚田 彰太(岐阜大学)
	田邊 洋一(富士通ゼネラル)		圓谷 友紀(福岡大学)
	礪 浩司(J S O L)		中野 智仁(日立製作所)
	坪井 始(福山平成大学)		日高 勇気(三菱電機)
	徳増 正(東芝)		三輪 將彦(J S O L)
	徳良 晋(I H I)		森 一真(岐阜大学)
	野口 聡(北海道大学)		山口 忠(岐阜大学)
	羽野 光夫(山口大学)		山田 隆(J S O L)

まえがき

電磁界解析技術は電力機器の開発に欠かせないものとなっている。近年では、電磁界解析の商用ソフトウェアが広く普及し、その利便性も格段に向上したため、設計過程における使用頻度も格段に増してきている。しかし電磁機器で広く用いられている電磁鋼板の磁気特性のモデル化が確立されておらず、高精度の損失解析が難しいという問題がある。さらに3次元過渡解析の計算時間が長大であるため、電磁界解析を設計検討に十分に生かせないという問題も残っている。

電気学会では、1977年に「有限要素法による電力機器の電磁界解析法調査専門委員会」(小貫委員長)が設立され、その後、継続的に電磁界解析に関する調査が精力的に行われてきた(下表参照)。この間、辺有限要素の導入により高精度の3次元電磁界解析が可能となるなど、大きな進歩があり、これらの成果が技術報告としてまとめられてきた。近年では、上記のように電磁界解析への期待が大きくなり、その結果、求められる技術水準が高くなってきている。このような背景から、上で述べた電磁界解析法の問題点を解決することが求められている。2010年度に設立された「電磁界解析高度利用技術調査専門委員会」(宮田委員長)において、これらの技術課題に関する調査検討が行われた。この結果、多くの成果が得られたが、引き続き調査を行うことが必要との結論に至った。このため、本調査専門委員会の成果を踏まえ、これらの技術課題を引き続き調査検討するとともに、電磁界解析技術を電力機器の設計最適化に最大限に活用するための技術について体系的にまとめ、電力機器の高性能化と低炭素化、安全性・信頼性の高度化に資することを目的として、先進電磁界解析による設計高度化技術調査専門委員会を2013年4月に設置し、2016年3月まで3年間、調査検討活動を行った。この間、委員会を24回、静止器・回転機合同研究会(回転機技術委員会と共催)を6回、全国大会シンポジウムを1回、電力・エネルギーフォーラム(電磁界数値解析に関するセミナー)を2回開催した。本技術報告は、これらにより得た調査検討結果をまとめたものである。

1章では、「電磁界解析の現状と進展」について述べている。1.1節では回転機などの時間領域解析を高速化するために有効なTP-EEC法について述べている。特に多相交流に対する簡易TP-EEC法(方程式を解かずに誤差を補正する方法)の収束性について詳しく述べている。1.2節では非線形j ω 法において現れる非正則関数に対するニュートン・ラフソン法について述べている。1.3節では、回転機の振動解析について詳細に述べている。1.4節では次数の異なる高次辺有限要素の高周波問題への適用について議論しており、特にスプリアス(非物理)解の出現について論じている。1.5節では捩り線コイルの有限要素解析について、1.6節では有限要素法による開放領域の解析法について論じている。

2章では「新しい電磁界解析法」について述べている。2.1節では、まず渦電流を考慮した電磁鋼板の複素透磁率と、等価回路表現について論じている。またCauer型等価回路の物理的意味、均質化法との関係について述べている。つぎに2.1.6節において、前節までの方法を一般化し、表面インピーダンスや円柱、球内の渦電流場解析に適用するための定式化が与えられている。特に、直交多項式と等価ラダー回路の関係について議論がなされている。さらに2.1.7節ではCauer等価回路による動的ヒステリシス特性の表現について論じている。2.2節では有限要素方程式の未知数を減少させるためのモデル縮約法について述べている。またモデル縮約法を用いて有限要素方程式から直接的に等価回路を生成する方法を紹介している。2.3節では並列計算技術について述べている。マルチカラーオーダリングによるICCG法の並列化、GPU・MICを用いた並列計算技術、並列化TP-EEC法、スライドメッシュを考慮した領域分割型並列有限要素法、additive-Schwarz法、階層型領域分割法、FDTD法の時空間タイリングについて述べている。また並列計算の応用として、ボクセル人体モデルを用いた電磁界解析を紹介している。

3章では「電磁材料のモデリング技術」について述べている。3.1節では種々のベクトルヒステリシスモデルを紹介している。3.2節では、3.1節で述べたヒステリシスモデルをベンチマーク問題(田形モデル)に適應した結果を比較検討している。3.3節ではリング試料の交流ヒステリシス特性について、Cauer型等価回路により得られる特性と実測結果を比較検討している。3.4節では異常渦電流損のモデリングについて論じている。3.5節では、材料中の電磁力分布の解析法について詳しく論じている。

4章では「電磁界解析の設計応用」について述べている。具体的には、非接触給電の解析、磁気増幅器の解析、インバータ駆動電動機の絶縁設計、誘導加熱、プリント基板の大規模解析について紹介している。また4.6節ではトポロジー最適化を用いた電気機器の設計について述べている。

電気学会で発足された電磁界解析に関する調査専門委員会の変遷

調査機関	調査専門委員会名
1977年4月～1980年3月	有限要素法による電力機器の電磁界解析法
1980年4月～1984年3月	電磁界数値解析法の電力機器への応用
1984年4月～1987年3月	三次元電磁界計算技術
1987年4月～1990年3月	過電流場数値計算技術
1990年4月～1993年3月	三次元電磁界数値計算実用化技術
1993年4月～1996年3月	電磁界解析とその逆・最適化問題への応用
1996年4月～1999年3月	電磁界問題最適化手法の高度化
1999年4月～2002年3月	実用設計のための電磁界数値解析新技術
2002年4月～2005年3月	高速大規模電磁界数値解析技術
2005年4月～2007年3月	実規模電磁界解析のための数値計算技術
2007年4月～2010年3月	電磁界数値解析の有効利用技術
2010年4月～2013年3月	電磁界解析高度利用技術