

電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術

電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術調査専門委員会編

	目	次	
1. まえがき	3	3.3 試験条件と結果	40
		3.4 解析結果と評価	43
2. 最近の解析技術動向	4		
2.1 損失解析	4	4. 設計への解析適用例	54
2.2 材料モデリング	8	4.1 設計システム	54
2.3 高速化	13	4.2 設計への適用例	55
2.4 最適化手法	22	4.3 最適化の事例	57
2.5 プリ・ポスト処理	25	4.4 連成解析の事例	61
3. ベンチマークモデル	36	5. あとがき	69
3.1 回転機関連のベンチマーク問題	36		
3.2 ベンチマークモデルの概要	37	付録. 回転機関連のベンチマーク問題集	69

電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術 調査専門委員会委員

委員長 藤田真史(株 東 芝)
幹事 赤津 観(芝浦工業大学)
藤岡琢志(株富士通ゼネラル)
幹事補佐 宮城大輔(岡山大学)
委 員 石原好之(同志社大学)
大神光司(株 フォトン)
大口英樹(富士電機システムズ株)
大戸基道(株 安川電機)
大矢 寛(Myway プラス株)
岡田幸弘(パナソニック株)
岡本吉史(宇都宮大学)
沖津隆志(株 明電舎)
貝森弘行(サイエンスソリューションズ株)
河瀬順洋(岐阜大学)
北川 亘(名古屋工業大学)
米谷晴之(三菱電機株)
高橋則雄(岡山大学)
滝沢大二郎(株本田技術研究所)
竹越邦夫(株 テラバイト)
筒井宏次(東芝三菱電機産業システム株)
中原明仁(株日立製作所)
野口 聡(北海道大学)
野見山琢磨(シンフォニアテクノロジー株)
樋口 大(信越化学工業株)
牧田真治(株 デンソー)
三須大輔(株 東 芝)
村松和弘(佐賀大学)
矢野博幸(株 エルフ)
藪見崇生(大同特殊鋼株)

委 員 山崎克巳(千葉工業大学)
山田 隆(株 J S O L)
和嶋 潔(新日本製鐵株)
途中退任 大杉保郎(新日本製鐵株)
委員 竹田 智(パナソニック四国エレクトロニクス株)
宮田浩二(信越化学工業株)
矢口博之(株本田技術研究所)
矢野史朗(株 エルフ)
渡辺直樹(信越化学工業株)
主な 阿部一俊(株 フォトン)
参加者 今給黎明大(富士電機システムズ株)
高 炎輝(佐賀大学)
柿原正伸(株 安川電機)
片桐弘雄(岐阜大学)
後藤剛史(信越化学工業株)
小林篤史(株 フォトン)
柴山義康(岐阜大学)
滝澤勇二(三菱電機株)
田中 憲(岐阜大学)
たに浩司(株 J S O L)
土井祐仁(信越化学工業株)
徳増 正(株 東 芝)
中野智仁(岐阜大学)
成田一行(株 J S O L)
福岡嵩之(千葉工業大学)
水野雄斗(岐阜大学)
宮田健治(株日立製作所)
山口 忠(岐阜大学)

1. まえがき

資源、エネルギー、環境問題をはじめとする社会的背景の中、回転機に関しても高効率化、高出力密度化といった性能面の要求が一層厳しくなっており、製品設計において、より精度良い性能評価を、より少ない時間と労力で行うことが求められている。

一方、電磁界解析に関しては、有限要素法が電気機器の解析に適用されて既に30年近く経過しているが⁽¹⁾、当初は数百～数千程度の未知数の二次元問題が主であったのに対し、最近では解析技術の発展や計算機環境の進歩により、数百万オーダーの未知数での三次元解析も行われている。

電気学会においても、回転機の電磁界解析技術の重要性を認識し、1980年代後半から回転機技術委員会の下に電磁界解析技術に関する調査専門委員会を設置してきており、これまでに多数の技術報告を出版し、当該分野の発展に寄与してきた^{(2)~(11)}。本委員会の前身である「電磁界解析による回転機の設計性能評価技術」調査専門委員会（2007年4月～2009年3月）では、回転機の高性能化および開発プロセスの効率化に対する電磁界解析技術の寄与を加速させることを目的として、回転機設計における解析技術の利用状況と、インバータ駆動時の損失評価方法や新しい解析技術の動向についての検討、調査を、設計に携わる技術者へのアンケート調査や文献調査、ベンチマーク問題の実測や解析等の活動を通して行い、多くの有用な知見が得られている⁽¹¹⁾。

しかしながら、実機の設計開発において、電磁界解析に対する課題は残されており、例えば、高磁束密度域、異方性、高調波重畳時などにおける損失や磁気特性の考え方や適用方法は、実機の運転環境や機器状態に即した条件での解析という意味では、十分に確立されているとは言えない。また、駆動回路と回転機の接続や、熱や振動などの物理現象と電磁現象との相互作用を同時に考慮した連成解析も設計現場で実用的なレベルで活用されているとは言い難い。また、設計への電磁界解析の適用が進むほど詳細なモデルの短時間での評価が必要になることから、ユーザインターフェイスの容易性や数値解析の高速化、ヒステリシスや積層鋼板の取り扱いといった複雑な事象を実用的な範囲で表現する解析手法が求められている。

このような背景のもと、本調査専門委員会では、回転機の高性能化や開発プロセス効率化への電磁界解析技術の寄与のさらなる加速を目的として、電磁界解析技術の適用と損失評価技術、および回転機設計に電磁界解析を活用する上での問題点と解析技術の動向について検討を行ってきた。

解析技術の動向に関しては、損失解析手法や材料特性の取り扱い、解析の三次元化、大規模化に対応した高速化手法やプリ・ポスト処理を始めとする新しい解析技術や、実際の機器設計における電磁界解析の適用例に関して、文献調査等による情報収集を行った。

また、これまでの調査専門委員会の流れを引き継ぎ、ベンチマーク問題を設定して、インバータ駆動やモータの高出力密度化などで課題になっている高調波損失、材料特性と各特性の関係、駆動回路との連成解析等の検討を行い、同時に前記の新しい解析技術を適用した検討も行った。さらに、材料特性と各種運転特性との関係を明らかにすべく、埋込磁石形同期モータ（以下、IPMSMと表記）を、永久磁石を除いたリラクタンスモータ（以下、Syn. RMと表記）として運転した場合の検討や、永久磁石中の渦電流損失を分離して測定することを目的とした試験方法の検討も行った。

本技術報告は、以上の結果をまとめたものであり、第2章以降、以下のように構成されている。

第2章は最近の解析技術として、損失解析、材料モデリング、高速化、最適化手法、プリ・ポストプロセッシング技術などについて技術動向を調査した結果をまとめている。

第3章はベンチマークモデルについて、モデルの概要、使用材料、測定と解析結果との比較についてまとめている。

第4章は設計への電磁界解析の適用例として、電磁界解析と組み合わせた設計システムの例、電磁界解析を適用することによって可能になった機器設計の例、最適化の事例、連成解析の事例についてまとめている。

第5章において、本技術報告を総括し、また、付録として、これまで電気学会の調査専門委員会で検討されてきた回転機関連のベンチマーク問題をまとめたものを補足資料として添付する。

参考文献

- (1) 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：「有限要素法による電力機器の電磁界解析の現状」，電学技報，II部No.118 (1981)
- (2) 回転機の電磁界数値解析法応用調査専門委員会：「回転機の電磁界数値解析法」，電学技報，No.375 (1991)
- (3) 回転機電磁界解析ソフトウェアの適用技術調査専門委員会：「回転機電磁界解析ソフトウェアの適用技術」，電学技報，No.486 (1994)
- (4) 回転機の電磁界高精度数値シミュレーション技術調査専門委員会：「回転機の高精度数値シミュレーション技術」，電学技報，No.565 (1996)
- (5) 回転機の電磁界解析応用技術調査専門委員会：「回転機の電磁界解析実用化技術の現状と実例」，電学技報，No.663 (1998)
- (6) 回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術調査専門委員会：「回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術」，電学技報，No.776 (2000)
- (7) 回転機の三次元CAEのための電磁界解析技術調査専門委員会：「回転機の三次元CAEのための電磁界解析技術」，電学技報，No.855 (2001)
- (8) 回転機の三次元電磁界解析高度化技術調査専門委員会：「回転機の電磁界解析高度化技術」，電学技報，No.942 (2004)
- (9) 回転機の電磁界解析高精度モデリング技術調査専門委員会：「回転機の電磁界解析高精度モデリング技術」，電学技報，No.1044 (2006)
- (10) 回転機の高速高精度電磁界解析技術調査専門委員会：「回転機の高速高精度電磁界解析技術」，電学技報，No.1094 (2007)
- (11) 電磁界解析による回転機の設計・性能評価技術調査専門委員会：「電磁界解析による回転機の設計・性能評価技術」，電学技報，No.1168 (2009)