

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560286

研究課題名（和文） 電動機のハイエンド CAE システムの構築

研究課題名（英文） Construction of High-End CAE System for Motors

研究代表者

河瀬順洋（KAWASE YOSHIHIRO）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20144735

研究成果の概要：

三次元有限要素法による磁界解析と熱伝導解析を連成して周囲温度や発熱を考慮した電動機のハイエンド CAE システムを構築した。キャリア高調波を考慮した IPM モータの温度分布を解析し、実測値と比較することにより、本システムの有用性を明らかにした。さらに偏芯やスキューを施すためのメッシュ修正法の開発ならびに電動機のための電磁界の並列計算の基礎的検討を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気工学・電気機器工学

キーワード：電動機，ハイエンド CAE システム，有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

電動機がロボットや電気自動車の動力として利用されるようになり、始動時や無負荷時をはじめ、さまざまな負荷状況下で使用されるようになった。どのような状況下に応じても効率よく運転するようなインテリジェントな側面をもつ電動機の登場が求められるようになってきたが、多様な状況下での使用を目的とした電動機の開発は緒に就いたば

かりであった。

永久磁石電動機に使用される稀土類磁石は熱による減磁・消磁が特に問題となるため、高温下での使用はもちろん、電動機自身の発熱による減磁・消磁は致命的な欠陥となる。

このようななか、パーソナル・コンピュータ上で実用的な数値解析が行われつつあるが、より実記に近い運転状態をシミュレートできる CAE システムの構築が望まれてい

る。すなわち、インテリジェントで高効率な電動機的设计・開発のためには、温度特性も視野に置いた磁気特性の解析、いわゆる、磁界と温度の連成手法の確立が求められている。

## 2. 研究の目的

三次元有限要素法をベースとした磁界解析と熱伝導解析を連成して周囲温度や発熱を考慮した電動機のハイエンドCAEシステムの構築を目的とする。また、本システムによって得られた結果と従来の温度分布を考慮しない磁界解析の結果を定量的に比較し、各種電動機のさまざまな運転特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

申請者がこれまでに構築してきた有限要素法による電気機器の三次元設計システムを拡張し、電動機の電氣的損失（ジュール損・ヒステリシス損・渦電流損など）を高精度で求めるための磁界解析と熱伝導解析を統合したハイエンドCAEシステムを構築する。本提案システムは、磁界解析で得られる各種損失から発熱量を計算し、それを熱伝導解析の入力とする。また、熱伝導解析によって得られた温度分布より、磁界解析の入力となるパラメータのうち温度によって影響を受ける諸定数（例えば、コイル抵抗や導体の導電率など）を変化させることにより熱伝導解析の結果を磁界解析に反映させる。このようにして計算した結果のやりとりは1回だけでは十分でないので、反復計算を行い、磁界と温度分布が両立する状態を求める。

磁界解析と熱伝導解析の連成には、多大な計算時間を必要とすることから、並列計算機システム化を視野に入れ、本ハイエンドCAEシステムの開発が一過性のものにとどまらず、継続的に発展できるようにする。

また、解析対象の複雑化に伴うユーザーの負担を減らすよう、入力データの合理化ならびに解析手順の簡略化を進めたシステムを構築する。

## 4. 研究成果

本研究を通して得られた成果は次の3つに大別できる。

(1) キャリア高調波を考慮したIPMモータ

の損失解析と温度分布解析。

(2) 偏芯やスキューといった各種電動機のメッシュ生成技術の開発。

(3) 並列計算の基礎的検討。

(1)は本研究の主眼である磁界解析と熱伝導解析を連成したハイエンドCAEシステムを用いた解析結果である。これまで、PWM電源により駆動された電動機は、正弦波電源を用いた電動機に比べて希土類永久磁石内に非常に大きな渦電流損失を生じさせることが数値解析的に明らかにされていた。しかしながら、永久磁石の減磁や消磁といった現象の原因となる発熱温度と周囲の温度分布にまで解析を発展させ、実機との比較をした実質的な解析例は、本研究が初めてである。また、従来、永久磁石の物理的な分割は永久磁石中の渦電流損を減少できることが数値解析的に検討されていたが、PWM電圧波形駆動の場合についても検討した。今後は、一般的な2レベルインバータ駆動だけでなく3レベルインバータ駆動時の損失ならびに温度分布解析やキャリア周波数（パルス数）の異なるPWMインバータを利用した際の特長解析など解析対象が発展し、実用的な応用解析例が拡大していくと考えられる。

(2)はさまざまな電動機の解析モデルを作成する際に開発した技術である。これまで、スキューのかかった回転子や偏芯した回転子を有する電動機の有限要素解析モデルの生成は容易ではなかった。本研究を通して、さまざまな電動機の有限要素解析に取り組むことにより、電動機のメッシュを生成する際に、基本的なメッシュを生成した後、節点を移動してメッシュを修正する方法がシステムの利用者にとって再現性にも優れ、利用しやすいことがわかった。この際、スキューや偏芯量に相当するポテンシャルを回転子の節点に与え、かつ、固定子等にゼロを与えてラプラス方程式を解くことにより、ギャップ等のメッシュをなめらかに変形できることが確認され、解析結果も妥当なものであることが明らかになった。本手法は、今後複雑になっていくであろう電動機の解析モデルの形状修正により有用に利用されると思われる。

(3)は電動機の有限要素解析に対する並列計算の基礎的研究である。電動機の解析モデルを複数の小領域に分割し、それらをPCクラスタを構成する各PCに分配して並列計算を行うことにより解析の高速化を図る。基礎的研究として、16台のPCからなるPCクラスタを構築し、連立方程式の並列計算手

法の開発し、並列動作させたCPU数に対する並列化率をIPMモータと小形モータの2つの電動機に対して行った。さらに、計算速度とメモリ容量の制限から1台では計算時間のかかる電動機に対して、コギングトルク解析を行い、1台のPCでは約6日を要する計算が16台のPCクラスタを用いることにより約9時間で完了することができた。今後、電動機のさまざまな解析に対する更なる手法の拡張が必要となるが、並列計算は、ますます解析規模が大きくなる電動機の有限要素解析の大きな飛躍をなるといっても過言ではない。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{雑誌論文}(計 1件)

[1] Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hidetomo Shiota and Masato Mizuno: "Novel Mesh Modification Method Using Laplace Equation for 3-D Motion Analysis with Finite Element Method", Journal of Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.17, No.3 (2009) To be published. 査読有り

{学会発表}(計 11件)

[1] 河瀬順洋, 山口忠, 森本貴文, 宮本栄治, 河野洋佑, 河邑茂雄: 「偏芯を考慮したブルーレイディスク用回転機の三次元有限要素解析」, 電気学会回転機研究会, RM-09-41, 東京都・電気学会本部(2009/5)

[2] 河瀬順洋, 山口忠, 近藤翔子, 森本貴文, 水野雅人, 宮本栄治, 河野洋佑, 河邑茂雄: 「偏芯を考慮した小形回転機のコギングトルクおよび電磁力の三次元解析」, 平成21年電気学会全国大会, No.5-018, 北海道・北海道大学(2009/3)

[3] 中野智仁, 河瀬順洋, 山口忠: 「PCクラスタによる電磁界の並列計算」, 平成21年電気学会全国大会, No.5-045, 北海道・北海道大学(2009/3)

[4] 中野智仁, 河瀬順洋, 山口忠, 鶴飼真吾: 「回転機のための並列計算の基礎的検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-09-27/RM-09-27, 東京都・早稲田大学(2009/1)

[5] 河瀬順洋, 山口忠, 梅村友裕, 花岡幸司,

牧島信吾, 岸田和也: 「PWM電圧波形および磁石分割がIPMモータの損失に及ぼす影響」, 電気学会回転機研究会, RM-08-101, 愛知県・中部大学(2008/11)

[6] 河瀬順洋, 山口忠, 若松慎司, 中橋鮎香, 中嶋及: 「三次元有限要素法を用いた小形コアレスモータの特性解析」, 電気学会回転機研究会, RM-08-109, 愛知県・中部大学(2008/11)

[7] Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Naotaka Toida, Shinji Wakamatsu, Kazuya Nakamura and Eri Fukushima: "3-D Finite Element Analysis of Miniature Motor with Off-Center of Rotor", The 2008 International Conference on electrical Machines, OC.2.3, Vilamoura, Portugal (2008/9)

[8] Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hidetomo Shiota and Masato Mizuno: "Novel Mesh Modification Method Using Laplace Equation for 3-D Motion Analysis with Finite Element Method", Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, p.30, Bangkok, Thai (2008/7)

[9] 河瀬順洋, 山口忠, 汐田英知, 水野雅人, 神谷宗宏, 小坂卓, 松井信行: 「キャリア高調波の影響を考慮したIPMモータの温度分布解析」, 平成20年電気学会全国大会, No.5-023, 福岡・福岡工業大学(2008/3)

[10] 河瀬順洋, 山口忠, 汐田英知, 神谷宗宏, 小坂卓, 松井信行: 「キャリア高調波を考慮したIPMモータにおける永久磁石の温度分布解析」, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会, MAG-8-35/SA-08-23/RM-08-23, 京都・同志社大学(2008/1)

[11] Munehiro Kamiya, Yoshihiro Kawase, Takashi Kosaka and Nobuyuki Matsui: "Temperature Distribution Analysis of Permanent Magnet in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering PWM Carrier Harmonics", International Conference on Electrical Machines and Systems 2007 (ICEMS2007), Intelligent Mechatronics for Robotics and Advanced Vehicles (HEV&FCEV), pp.15-19, Seoul, Korea (2007/10)

{図書}(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

河瀬順洋 (KAWASE YOSHIHIRO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20144735

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし