

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560329

研究課題名(和文) 電動機の磁界・応力連成解析のための並列計算機システムの開発

研究課題名(英文) Development of a parallel computing system for magnetic field - stress coupled analysis of electrical 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：PCクラスタによる電動機の特長解析のための三次元並列有限要素法による電磁界解析システムを構築した。三角柱による要素分割を用いることにより、四面体による要素分割を用いるよりも高速・高精度なシステムとなった。また、応力解析との連成のための電磁界解析での電磁力の取り扱いについて検討した。さらに、種々の電気機器の解析を通して、本システムの有用性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A parallel computing system for the electromagnetic field analysis of motors using the three-dimensional finite element method is developed. The parallel computing system using the prismatic elements is faster and higher precision than that using tetrahedral elements. The electromagnetic force in the electromagnetic field analysis is studied to be coupled with the stress analysis. The utility of the system is clarified through the analyses of several electromagnetic apparatus.

研究分野：工学

キーワード：電動機 並列計算機システム 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

(1) 電動機のトルクや効率、損失など諸特性を数値解析的に求めるために有限要素法は広く一般に利用されており、電動機単体の特性を求めるだけでなく、電源回路との連立や制御方法に対する検討、周辺部位での損失計算など、磁界解析が求められる適用範囲はこれまで以上に拡大し、電動機を取り巻く三次元的に分布する電磁界を正確かつ精密にシミュレーションできる解析技術と解析システムの登場が切望されていた。

(2) 一方、電動機の振動・騒音解析は、実験によることが多く、振動の原因を特定することは困難を極めた。振動・騒音に対する数値シミュレーションは応力解析をベースとして行われるが、二次元解析で済まされることが多く、周辺部材に対して三次元的に分布する電磁力やその中の応力を計算した例は少なく、また、時定数や計算規模の異なる電磁界解析と応力解析を併用して電動機の特解析を進める際に注意すべき事柄について言及した報告もほとんどなかった。

2. 研究の目的

高効率かつ堅牢な電動機を開発するためには、電動機の入出力や電氣的損失の把握はもとより、振動や騒音の発生を抑えるために、電動機を構成する部材の機械的な特性を把握する必要がある。これまでも、電動機の磁界解析による特性解析や応力解析による振動モード解析等が行われた例があるが、計算時間や使用メモリの制限等により磁界と応力の連成解析は二次元解析によるものがほとんどであった。

(1) 本研究では、電動機の磁界解析に対して分散メモリ型並列計算システムを用いることにより、計算時間や使用メモリによる制約を少なくするとともに、磁界解析と応力解析を総括的に取り扱うことのできる連成解析システムを構築し、さまざまな電動機の電磁気ならびに機械的特性を定量的に求めることを目的とする。

3. 研究の方法

周辺部材を含む電動機の磁界と応力分布を連成解析するためには、①周辺部材を含む電動機の高速度・高精度な電磁界解析システムの構築と②磁界解析と応力解析の間のデータの取り扱いに関する検討を行い、連成解析システムの構築を行う。

(1) 周辺部材を含む電動機の磁界解析のための並列計算機システムの構築するために、従来シングルCPUを搭載したPC上に構築してきた電動機の磁界解析システムで実現してきた回転子の回転処理を並列計算機システムに移植する。

(2) 三次元磁界解析によって得られた節点

に働く電磁力ベクトルを応力解析の入力データとして取り扱い、電磁界解析と応力解析の連成システムを構築する。

4. 研究成果

(1) 本研究の根幹となる電磁界解析と応力解析の連成では、電磁界解析において電磁界と電磁力の高精度な算出が不可欠である。そこで、鉄心の非線形性と鉄心中の渦電流を考慮し、かつ、回路方程式と連立して電圧源で駆動する、くま取りコイル付き交流電磁石(図1参照)の電磁界ならびに応力の合計である電磁力を、本連成解析システムのベースとなる三次元並列有限要素法による電磁界解析システムを用いて解析した①。解析領域全体を粗分割あるいは密分割というように2通りのメッシュ分割を用いて解析精度に及ぼす影響を明らかにした。この研究を通して、電磁力は解析領域全体のメッシュ分割の疎密の影響を受けにくい(図2参照)が、鉄心中の磁束密度や渦電流がメッシュ分割の粗密に大きな影響を受けることがわかった。図3に損失の比較を示す。同図より、メッシュを細かくすることによって算出される損失が実測に近づくことがわかる。

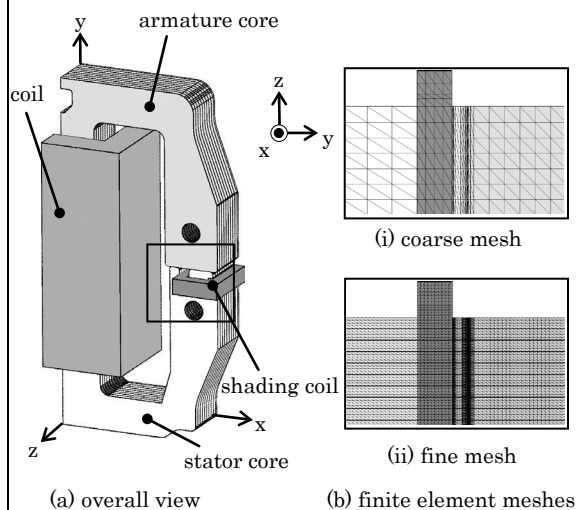


図1 くま取りコイル付き交流電磁石

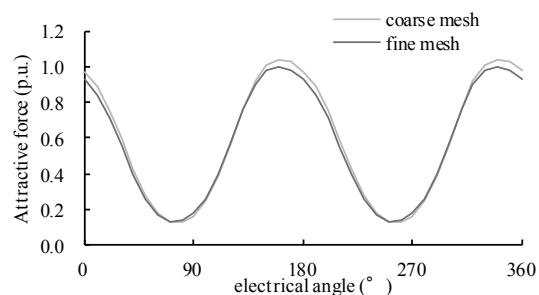


図2 吸引力の時間的变化

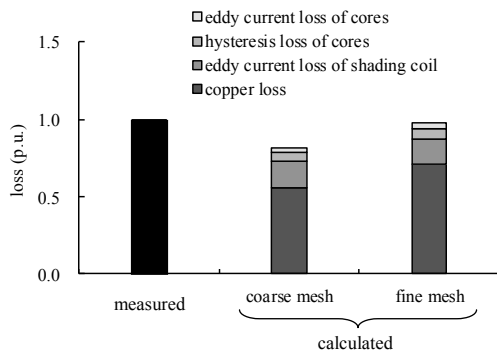
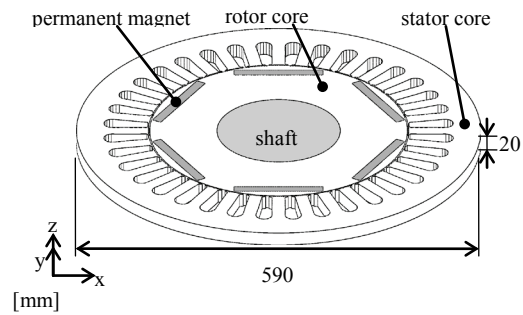


図3 損失解析

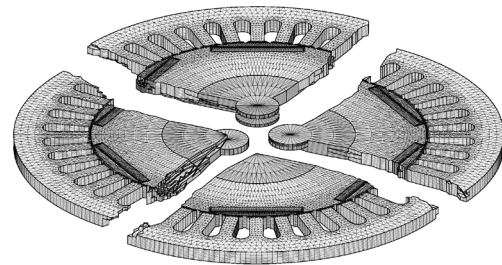
(2) 上記(1)より、高い精度を得るには、十分細かなメッシュ分割を必要とすることが確認されたが、必要以上に多いメッシュ分割を用いることは計算時間が莫大になる。そこで、解析領域内での要素分割に粗密をつけて計算時間の短縮をはかるのが一般的である。しかしながら、研究を進めるうちに、そのようにして作成した粗密を含むメッシュでは、四面体要素を用いた三次元並列磁界解析では十分な精度が得られないモデルが現れた。そこで、少ない要素分割でも比較的高精度な解析結果を算出する三角柱要素を用いて、新たに三次元並列電磁界解析システムを構築し、鉄心の非線形性を考慮し、かつ、電圧方程式と連立した電磁界解析の計算精度ならびに計算時間の確認を行った②。これにより、三角柱要素を用いた場合は、四面体要素を用いた場合と同等以上の計算精度を保って解析ができることがわかった。また、三角柱要素を用いた場合は、1 CPU で計算したときの計算時間が四面体要素を用いた場合の1/3程度で済むため、並列数を大きくしても台数効果があまり大きくなるようには見られなかったが、三角柱要素を用いて16CPUで計算したときの計算時間は四面体要素を用いて1 CPU で計算したときと比べて、粗メッシュでは約1/20(図4参照)、密メッシュでは約1/33と大幅な高速化が可能であることがわかった。

(3) 上記(2)の研究を発展させ、三角柱辺要素を用いた三次元並列電磁界解析システムにおいて、応力の合計である電磁力の計算ならびに運動方程式との連成機能を追加し、三角柱辺要素の精度検証と有用性を明らかにした③、④。これにより、並列数にかかわらず、三角柱要素を用いた場合は、四面体要素を用いた場合に比べて、計算時間が約2/3になることがわかった。

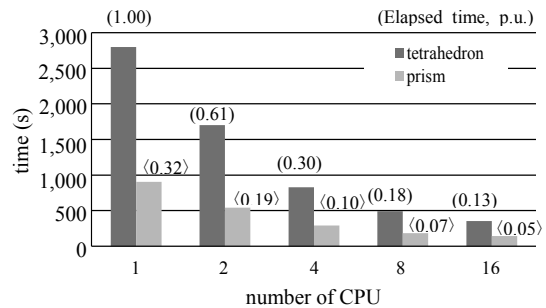
(4) 三角柱辺要素を用いた三次元並列電磁界解析システムにおいて、渦電流を考慮した磁界解析の有用性を明らかにした⑤。ここで解析対象としたワイヤレス給電コイルは、広い空間の中に細かなコイルを2つ設けて、それらの間で磁界変化を用いて給電する装置



(a) 解析モデル



(b) 分割図 (粗メッシュ, 4分割)



(c) 計算時間(粗メッシュ)

図4 四面体要素と三角柱要素

であり、解析空間内でメッシュの粗密が大きく異なる。文献中では触れられていないが、本解析モデルは、同様の粗密の要素分割をもつ四面体要素では精度よく解析できなかったモデルの一つである。

<引用文献>

- ① Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Tomohiro Nakano, Tatsuya Asano, Ryosuke Kawai and Takanori Takemoto: "Electrical Loss Analysis of AC Electromagnet With Shading Coil Taking Into Account Eddy Current in Laminated Cores", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, 2014, DOI:10.1109/TMAG.2013.2280652.
- ② 河瀬順洋, 山口忠, 堀峻輔: 「三角柱辺要素を用いた三次元有限要素法による並列計算の基礎的検討」, 電気学会静止器/回転機合同研究会資料, SA-13-69/RM-13-83, 2014.
- ③ 河瀬順洋, 山口忠, 片桐弘雄, 堀峻輔, 岩井良樹: 「三次元並列有限要素法による電磁石の動作特性解析」, 電気学会静止器/回転機

合同研究会資料, SA-14-27/RM-14-27, 2014.

④河瀬順洋, 山口忠, 片桐弘雄, 堀峻輔, 岩井良樹:「三次元並列有限法の性能評価-三角柱要素と四面体要素の比較-」, 平成 26 年電気学会全国大会, No. 5-192, 2014.

⑤河瀬順洋, 山口忠, 小林駿:「ワイヤレス給電コイルの三次元有限要素解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会資料, SA-15-40/RM-15-32, 2015.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Tomohiro Nakano, Tatsuya Asano, Ryosuke Kawai and Takanori Takemoto: “Electrical Loss Analysis of AC Electromagnet With Shading Coil Taking Into Account Eddy Current in Laminated Cores”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, 2014, DOI:10.1109/TMAG.2013.2280652, 査読有

[学会発表] (計 17 件)

①河瀬順洋, 山口忠, 小林駿, 太田智浩:「ワイヤレス給電コイルの三次元有限要素解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, 2015. 03. 05~2015. 03. 06, 宮古島マリンターミナル (沖縄県・宮古島市)

②河瀬順洋, 山口忠, 岩井良樹, 樋田直孝, 古川智康:「三次元並列有限要素法によるスキューを施したかご形誘導電動機の横流解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, 2014. 09. 25~2014. 09. 26, 宇都宮大学 (栃木県・宇都宮市)

③河瀬順洋, 山口忠, 岩井良樹, 樋田直孝, 古川智康:「電機子巻線中の渦電流を考慮したかご形誘導電動機の磁界解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, 2014. 09. 25~2014. 09. 26, 宇都宮大学 (栃木県・宇都宮市)

④ Y.Kawase, T.Yamaguchi, M.Otsubo, Y.Iwai, N.Toida and K.Sato: “Operating Characteristics Analysis of Cage-Rotor Induction Motor Using 3-D Finite Element Method”, 2014 XXIth International Conference on Electrical Machines (ICEM2014), 2014.09.01~2014.09.05, Berlin (Germany)

⑤河瀬順洋, 山口忠, 大坪正樹, 岩井良樹, 樋田直孝, 佐藤浩一:「三次元並列有限要素法による横流を考慮したかご形誘導電動機の解析」, 電気学会回転機/リニアドライブ/家電・民生合同研究会, 2014. 08. 06~2014. 08. 07, 静岡工科大学 (静岡県・袋井市)

⑥ Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hirokatsu Katagiri, Shunsuke Hori and Yoshiki Iwai: “Dynamic Analysis of Electromagnet Using 3-D Parallel Finite Element Method with Prismatic Edge Elements”, The 16th Biennial IEEE Conference of Electromagnetic Field Computation (CEFC2014), 2014.05.25~2014.05.28, Annecy (France)

⑦ Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hirokatsu Katagiri, Shun Kobayashi, Katsuhiko Hirata, Tomohiro Ota and Satoshi Suzuki: “3-D Finite Element Analysis of Wireless Power Transmission Coil with Transposition”, The 16th Biennial IEEE Conference of Electromagnetic Field Computation (CEFC2014), 2014.05.25~2014.05.28, Annecy (France)

⑧河瀬順洋, 山口忠, 片桐弘雄, 堀峻輔, 岩井良樹:「三次元並列有限要素法の性能評価-三角柱要素と四面体要素の比較-」, 電気学会全国大会, 2014. 03. 18~2014. 03. 20, 愛媛大学城北キャンパス (愛媛県・松山市)

⑨河瀬順洋, 山口忠, 片桐弘雄, 堀峻輔, 岩井良樹:「三次元並列有限要素法による電磁石の動作特性解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, 2014. 01. 23~2014. 01. 24, 東京工科大学 (東京都・八王子市)

⑩河瀬順洋, 山口忠, 堀峻輔:「三角柱辺要素を用いた三次元有限要素法による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, 2013. 09. 26~2013. 09. 27, 秋田にぎわい交流館 (秋田県・秋田市)

⑪ Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Shunsuke Hori, Koji Hanaoka, Kazuya Kishida, Keiichi Morinaga and Hiroko Omori: “Numerical Analysis of Leakage Flux of DC-Reactor Using 3-D Finite Element Method”, The 16th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF2013), 2013.09.12~2013.09.14, Ohrid (Macedonia)

⑫ Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Tomohiro Nakano, Tatsuya Asano, Ryosuke Kawai and Takanori Takemoto: “Electrical Loss Analysis of A.C. Electromagnet Using Parallel Computing”, The 19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Field (COMPUMAG2013), 2013.06.30~2013.07.04, Budapest (Hungary)

⑬河瀬順洋, 山口忠, 堀峻輔, 花岡幸司, 岸田和也, 森永圭一, 大森裕子:「三次元有限要素法による直流リアクトルの磁性体部品に関する検討」, 電気学会全国大会, 2013. 03. 20~2013. 03. 22, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

⑭河瀬順洋, 山口忠, 太田信治:「三次元有限要素法によるインバータ駆動集中巻 IPMSM の諸特性解析」, 電気学会全国大会, 2013. 03. 20~2013. 03. 22, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

⑮山口忠, 河瀬順洋, 中野智仁, 浅野達也, 河合良祐, 竹本貴紀:「三次元有限要素法による交流電磁石の損失解析」, 電気学会全国大会, 2013. 03. 20~2013. 03. 22, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

⑯河瀬順洋, 山口忠, 堀峻輔, 花岡幸司, 岸田和也, 森永圭一, 大森裕子:「三次元有限要素法による直流リアクトルの漏洩磁束の解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会,

2013. 01. 24～2013. 01. 25, 芝浦工業大学 (東京都・江東区)

⑰山口忠, 河瀬順洋, 中野智仁, 浅野達也, 河合良祐, 竹本貴紀: 「並列計算システムによる積層鋼板中の渦電流を考慮した交流電磁石の損失解析」, 電気学会静止器/回転機合同研究会, 2013. 01. 24～2013. 01. 25, 芝浦工業大学 (東京都・江東区)

〔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: 2 0 1 4 4 7 3 5