

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05936

研究課題名(和文) 電磁界と熱伝導を融合した電動機解析のための並列計算システムの構築

研究課題名(英文) Development of parallel computing system for motor analysis coupled with electromagnetic and heat transfer analysis

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱伝導解析と電磁界解析を連成した三次元有限要素法による電動機解析のための連成解析をPCクラスタによる並列計算機システム上に構築し、その有用性を明らかにすることを試みた。しかしながら、解析精度向上のために解析規模が大きくなると解析ステップ数が増えるとともに、熱伝導解析と電磁界解析の間のメッシュの粗密の差によって精度を保ちにくくなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We tried to clarify usefulness of parallel computing system with PC cluster for motor analysis based on the 3-D parallel finite element method, which is coupled with the electromagnetic field and the heat transfer analysis. However, in order to improve the accuracy of the analysis, the scale of analysis increases and the number of analysis time steps increases. It becomes difficult to maintain precision due to the difference in mesh density between heat transfer analysis and electromagnetic field analysis.

研究分野：工学

キーワード：三次元並列有限要素法 PCクラスタ 電動機 電磁界解析 熱伝導解析 並列計算機システム

1. 研究開始当初の背景

(1) 電動機の特性を詳細に求めようとすればするほど、多大な計算時間が必要となる。そのため、たとえマルチコアをもつ CPU や複数 CPU を PC に搭載しても、その機能を十分に発揮できるプログラムを用いなければ、数値計算解析ソフトウェアは、ユーザの計算速度向上の要求に応えることができない。

(2) 電動機の特性解析のための並列計算を用いた電磁界解析は、スーパーコンピュータ等の特別な環境において行われており、商用ソフトウェアを含め、実用的な電動機のための電磁界解析のほとんどは、従来の PC 上で構築されている。

2. 研究の目的

コイル発熱等による材料特性の変化を考慮した電動機の特性解析のための並列計算機システムを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

三次元並列熱伝導解析システムを構築するとともに、簡易 TP-EEC 法を三次元並列電磁界解析システムへ導入する。これらのシステム間における連成解析を通して、より実機に近い状態の電動機をシミュレートし、電動機の特性算出におけるコンピュータの有効利用を推進する並列計算システムを構築する。

4. 研究成果

(1) 三次元並列磁界解析の高速化 (三角柱辺要素の適用と簡易 TP-EEC 法の導入)

これまでに、PC クラスタを用いた三次元並列有限要素法による電磁界解析の並列計算機システムにおいて、従来の四面体辺要素を用いるよりも三角柱辺要素を用いた方が、高精度を保ったまま計算時間を短縮できることを確認しているが、このことが一般的な回転機解析においても同様に実現できるかを実験した。

新たに開発した回転機の磁界解析のための三角柱辺要素を用いた並列有限要素法解析システムは、いわゆる従来の単体 PC において行われる回転機解析特有の処理 (周期境界を考慮した領域分割、回転子の回転処理) をはじめ、高速解析のための各種解析手法 (渦電流の高速解析法: A-φ 法、電圧源を考慮したマトリクスの生成ならびに時間周期性を用いた過渡解析の高速解法: 簡易 TP-EEC 法) を有し、回転機解析のための更なる高速・高精度並列解析システムを構築することができた。

図 1 は周期境界を考慮した三角柱辺要素領域分割の例である。

図 2 に全周モデルと周期境界を用いて生成される半周モデルにおける磁束密度ベクトル分布を示す。図より、これらの結果はよく一致しており、周期境界を考慮した並列磁

界解析の妥当性が確認できた。なお、16 並列で計算した場合、半周モデルは全周モデルと比べて約 2.3 倍高速化できている。また、台数効果、並列化効率ならびに ICCG 法の反復回数は CPU 数によらず半周モデルの方が全周モデルより小さくなることを確認した。

A-φ 法による磁界解析の高速化、簡易 TP-EEC 法による時間ステップの回数の削減も同様に実現した。図 3 は TP-EEC 法を適用したトルク解析の結果である。電気角 360°以降には、数値解析的過渡状態がほぼ削減され、定常トルクが得られていることがわかる。

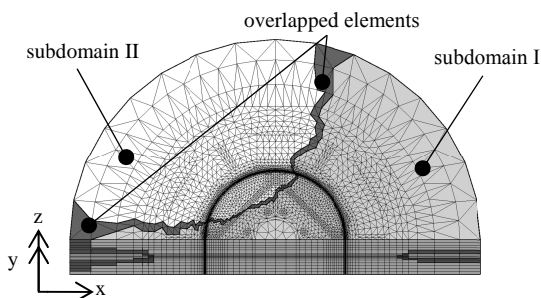
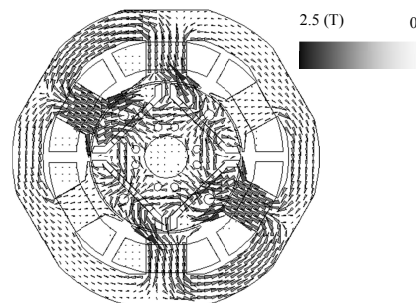
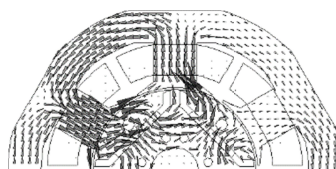


図 1 周期境界を考慮した領域分割



(a) whole model



(b) half model

図 2 磁束密度ベクトル分布

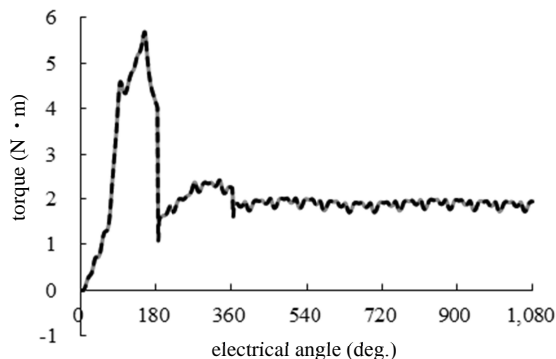


図 3 トルク波形 (簡易 TP-EEC 法使用)

## (2) 熱・電圧・磁界の連成解析

高速回転するモータは、鉄損が増加してしまうという問題があり、高精度な諸特性の解析には、銅損（コイル損）や鉄損による発熱とそれによるコイル自身の抵抗の温度変化を考慮して磁界解析する必要があり、これまでも手法の開発と実験検証を行ってきている。文献では、着磁解析を通して永久磁石内の磁化を求め、その永久磁石を用いた小形高出力モータにおいて熱・電圧・磁界の連成解析を行った。図4に解析モデルを示す。

回転機の熱伝導解析では、解析領域外との熱の出入りは、いわゆる熱伝達係数を解析領域の表面に設定して行われるが、この値は流れの形態や固体の物性によっても変化する。この値を求めるため、コイル温度の時間変化の実測値と解析による温度変化を比較した（図5）。この例では、熱伝達係数  $12\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$  が実測の時間変化とよく一致することがわかった。

温度分布を考慮した磁界解析では、入力電流が減少することによるトルクの減少が見取れた（図6）。

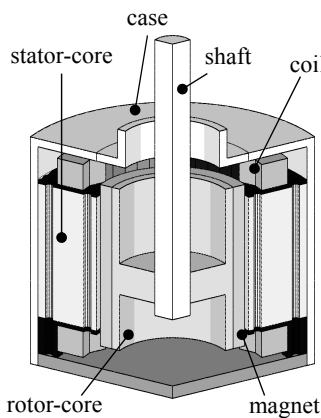


図4 解析モデル

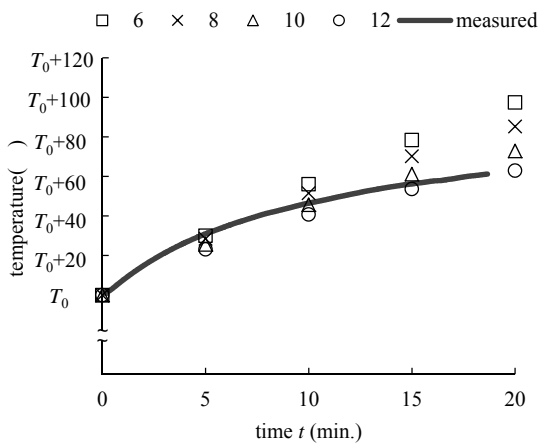


図5 コイルの温度の時間変化

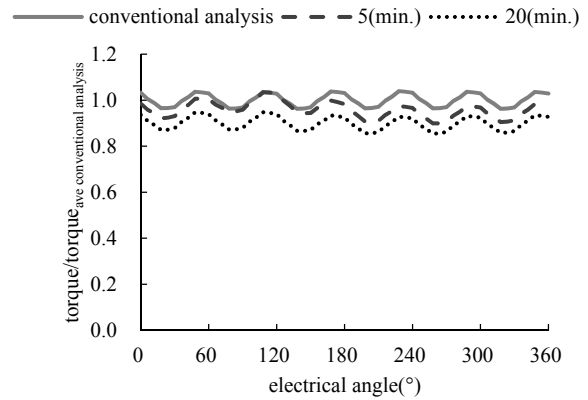


図6 トルク波形

## (3) 誘導電動機の横流損解析

前節で発熱を伴う高速回転モータの磁界解析について述べたが、高速回転モータは大形化が容易でないことから、数値解析の解析モデルも自ずと小さくなり、並列計算向きでない。

そこで、かご形誘導電動機を解析対象として温度分布解析のもととなる渦電流損等の諸特性の算出を試みた。かご形誘導電動機的设计において問題となるのが、回転子内に設置されたそれぞれのロータバーの間を回転子鉄心自身を通して流れる渦電流（いわゆる横流）である。

研究を通して、横流の流れ方が、ロータスロット数や、ロータバーと回転子鉄心の接触の具合、ロータバーのねじり（スキュー）具合によって大きく変化することが数値解析的に明らかにされた。

発熱源となる渦電流の精度よい解析のためには、ロータバーならびに回転子鉄心の詳細な分割が必要となるが、そのメッシュの粗密の分布が激しいと熱伝導解析の十分な精度が得られない。また、温度分布の測定自体も容易でないことから、温度解析のための諸定数を決めることができず、熱伝導解析との連成は実現できず今後の課題となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Yoshiki Iwai, Koki Akiyama, Naotaka Toida, Tomoyasu Furukawa and Hiroshi Kawano: "Numerical analysis of skewed squirrel-cage induction motor taking into account interbar current using 3-D finite element method", COMPEL, The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol.36, No.1, pp.378-384 (2017) (査読有り)

河瀬順洋, 山口忠, 秋山弘毅, 浅井啓史, 古川智康, 河野寛: 「スキュー形状および

ロータスロット数が異なるかご形誘導電動機の横流解析」, 日本 AEM 学会誌, 25 巻, 2 号, pp.94-99 (2017) (査読有り)

〔学会発表〕(計 8 件)

河瀬順洋、山口忠、長田俊一:「三角柱辺要素を用いた三次元並列有限要素法による回転機の動作特性解析」, 電気学会静止器・回転機合同研究会、2016.01.20 ~ 2016.01.21、富士通(株)本社事務所(東京都・港区)(査読無し)

河瀬順洋、山口忠、長田俊一:「回転機のための三角柱辺要素を用いた並列電磁界解析」, 電気学会静止器・回転機合同研究会、2016.09.07 ~ 2016.09.08、石垣市商工会研修室(沖縄県・石垣市)(査読無し)

河瀬順洋、山口忠、佐竹慶紀:「三次元有限要素法による小形高出力モータの熱・電圧・磁界の連成解析」, 電気学会静止器・回転機合同研究会、2016.09.07 ~ 2016.09.08、石垣市商工会研修室(沖縄県・石垣市)(査読無し)

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi and Shunichi Osada: “Electromagnetic Field Analysis of Rotating Machines Using 3-D Parallel Finite Element Method with Edge Elements”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016), 2016.11.13 ~ 2016.11.16, APA Hotel & Resort Tokyo Bay Makuhari Hall (Japan) (査読有り)

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi and Shunichi Osada: “3-D Parallel Finite Element Method with Prismatic Edge Elements for Electromagnetic Field Analysis of IPM Motor”, The 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag2017), 2017.06.18 ~ 2017.06.22, Daejeon (Korea) (査読有り)

Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Hirofumi Asai, Masahide Shibata, Naotaka Toida, Tomoyasu Furukawa and Hiroshi Kawano: “3-D Finite Element Analysis of Interbar Current of Skewed Squirrel-cage Induction Motor Taking into Account of Contact Resistance”, The 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF2017), 2017.09.14 ~ 2017.09.16, Lodz (Poland) (査読有り)

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hirofumi Asai, Masahide Shibata, Naotaka Toida, Tomoyasu Furukawa and Hiroshi Kawano: “Interbar Current Analysis of Skewed Squirrel-cage Induction Motor Using 3-D Parallel Finite Element Method”, The 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering

(ISEF2017), 2017.09.14 ~ 2017.09.16, Lodz (Poland) (査読有り)

Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Masahiro Morikita, Koshiro Matsuda and Keiichi Morinaga: “Reduction of Eddy Current Loss of Axial Gap-Type Motor by Division of Permanent Magnet”, The 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF2017), 2017.09.14 ~ 2017.09.16, Lodz (Poland) (査読有り)

〔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