

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年5月2日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2013

課題番号：23760271

研究課題名（和文）

並列計算環境を活用した高効率電気機器設計のための実用的電磁界数値解析技術の開発
研究課題名（英文）Development of Practical Electromagnetic Field Computation Technique
for High-Efficiency Electric Machines utilizing Parallel Computing Environment

研究代表者

高橋 康人（TAKAHASHI, Yasuhito）

同志社大学・理工学部・助教

研究者番号：90434290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）2,100,000円、（間接経費）630,000円

研究成果の概要（和文）：

渦電流損の高精度な評価を目的として、物理現象の時間的空間的周期性に着目して時間領域並列化有限要素法を開発し、PWM インバータ駆動永久磁石モータやかご形誘導機における損失計算の高速化が可能となった。一方、マクロモデルに基づく磁気ヒステリシスおよび磁気異方性モデル化手法の検討・開発を行い、実用的な計算コストでヒステリシス損の高精度評価が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The time domain parallel finite element method, which is based on spatial and time periodicity of electromagnetic phenomena, was developed as novel parallel computation technique. In addition, practical modelling methods of magnetic hysteresis and anisotropy were investigated. The developed method enables us to perform accurate iron loss analysis of electric machines driven by PWM inverter such as permanent magnet motors and induction motors within acceptable computational costs.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器、電磁界数値解析、鉄損、ヒステリシス

1. 研究開始当初の背景

社会基盤を支える電気機器の開発では、省エネルギー化への関心がますます高まっている。高効率な電気機器の設計を行うためには損失の合計値に加えて発生箇所と原因を精度よく把握する必要があり、そのための手段として数値シミュレーションが広く活用されている。計算機の高性能化・低価格化と電磁現象特有の困難さを克服するさまざまな数値解析手法の開発により、損失の詳細な要因分析に基づく最適設計が可能となるなど、高効率電気機器の開発に画期的な進歩がもたらされた。しかし、スロット高調波・インバータのキャリア高調波に起因する渦電流損やコイル端部の模擬によるフレームや押さえ板に発生する漂遊負荷損の考慮など、対象となる物理現象・形状がますます複雑となり、計算時間・計算精度においてさらなる高性能化が要求されている状況にある。

単体プロセッサの作動周波数が頭打ちに

なっている現状を考えると、数値解析のさらなる大規模・高速化を達成するためには並列計算技術の導入は不可欠と考えられる。電磁界解析分野においても、マルチコアプロセッサのような共有メモリ型並列計算機によるスレッド並列計算や、PC クラスタのような分散メモリ型並列計算システムによるプロセス並列計算に関する検討例が報告されている。電磁界数値解析では、磁気特性の非線形性・異方性や渦電流を考慮可能であるなど、その汎用性の高さから有限要素法が一般的に用いられているが、非零要素位置が不規則でスパースな係数行列を扱うため、i) 計算時間はメモリスループの影響を大きく受ける、ii) 未知変数の総数に対して演算密度が低い、iii) 連立一次方程式の求解に用いる反復法の収束性が並列数の増加に伴って劣化する、などの理由から並列化効果を得にくい難点がある。また、近年では GPU 等のアクセラレータを活用した並列計算に期待が集

っているが、上記に加えてハードウェアや開発環境の変化が激しく数年後の動向の予測が難しいなどの理由から、少なくとも有限要素電磁界解析では根本的なブレイクスルーとなるような検討例は未だ報告されていない。

すなわち、今後並列計算環境がさらに普及することは確実であるが、実用的な計算時間内で電気機器内に発生する損失を高精度に算出するには従来の並列計算手法のみでは不十分だと考えられる。したがって、電気機器設計の特徴を考慮し有限要素法の短所を補うとともに並列計算環境の性能を最大限に活用できるような数値シミュレーション技術の開発が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、今後ますます普及すると予想される並列計算環境を最大限に活用した新しい電磁界解析のアプローチを提案し、高効率電気機器設計のための高速高精度かつ実用的な数値解析手法の開発を目指す。本研究では特に、並列計算環境を最大限に活用した渦電流損・ヒステリシス損の高精度評価技術の開発に焦点を当てる。

(1) 渦電流損の高速高精度な評価法として、時間領域での新しい並列計算法について検討を行う。インバータ駆動モータではキャリア高調波に起因する渦電流損を精度よく評価するために時間刻み幅を細かくしなければならず、時間軸方向に非常に多くのステップ数が必要となる。本手法では、1周期（または半周期）すべての時刻における非線形連立方程式を一つにまとめる。この問題規模を拡大した連立一次方程式から、並列計算により定常解を直接算出する。本手法は、2次元解析のように未知数が少ない問題であっても、並列計算における粒度を得やすいため良好な並列化効果を有していると考えられる。インバータ駆動 IPM モータ・誘導電動機においてその有効性を検証し、高並列計算環境を活用した高精度渦電流解析技術の開発を目指す。

(2) ヒステリシス損の高精度評価を目的として、電磁鋼板の磁気特性モデリングに関する検討を行う。マイクロマグネティクス計算に基づくモデリングは磁化回転や磁壁移動といったミクロな現象を精度よく再現可能であるが、膨大な計算時間を要する難点がある。そこで、演算量を削減するために高速多重極法を導入し、さらにプロセス並列やハイブリッド並列（スレッド並列+プロセス並列）化、GPU による高速化を検討する。一方で、計算コストの観点から実用的だと思われるマクロなモデル化手法であるプレイモデルや磁気エネルギーに基づく磁気異方性モデリングの有効性について、計算時間や計算

精度、モデル同定の容易さなども含めて、実験値と比較しながら検証を進める。

3. 研究の方法

(1) 時間領域並列化有限要素法の開発

インバータ駆動モータのような時間ステップ数の多い回転機における高速高精度渦電流損評価手法の開発を目指して、時間領域並列化有限要素法について検討を行い、実機解析における有効性を明らかにする。物理現象の時間周期性に基づき、すべての時間ステップにおける非線形連立方程式をまとめる。この規模を拡大した大規模非線形連立方程式に対してニュートン・ラフソン法に代表される非線形反復解法を適用し、時間周期解を直接算出する。

図1および図2に、従来用いられている領域分割に基づく並列有限要素解析と、時間領域並列計算の概念図を示す。領域分割による従来の並列有限要素解析は空間的な並列計算であるのに対して、本手法では時刻ごとに各プロセスに未知変数を割り当てるため、時間軸方向並列計算とみなすことができる。したがって、各プロセスが読み込むメッシュデータなどの入力データはすべて同一であり、渦電流損計算などのポスト処理やデータの出力はプロセス毎に随時行っていけばよい。そのため、データの入出力も含めて効率的に並列化が可能である。また、時間積分法として後退差分を用いれば、ある時刻の物理量はその直前の物理量とのみ直接的な依存関係があるため、非線形反復内部で求解を行う連立一次方程式の係数行列は、非対称であるが対角近辺に非零要素が分布する。この特徴的な非零要素分布を活かし、並列数が増加しても線形反復法の収束性悪化を極力抑えることができるような前処理方法および通信方法についても検討する。

最終的に、PWM インバータで駆動された IPM モータを対象としてスロット高調波・キャリア高調波に起因した渦電流損の評価を行い、時間軸方向並列化手法の実機解析における有効性を検証する。

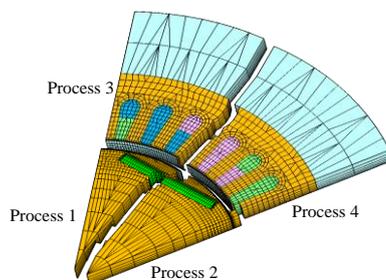


図1 領域分割に基づく空間的並列計算

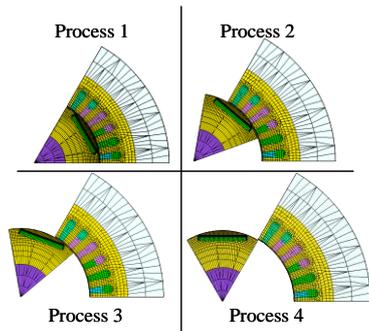


図2 時間領域並列計算

(2) 実用的磁気特性モデリング手法の確立
 磁性材料の磁気特性モデリングの実用化を目指す。マイクロマグネティクスでは磁壁のサイズ以下の詳細な要素分割が必要となるため、大きな磁区構造を有する強磁性体へ適用した場合には膨大な計算コストを要する。したがって、実用化の段階にまで引き上げるためにはさらなる高速化が必要である。そこで、高速多重極法を導入したマイクロマグネティクス計算のプロセス並列化を行う。また、コア数やノード数が大きい高並列計算環境においては通信がボトルネックとなることが多く、そのような場合にはスレッド並列とプロセス並列を組み合わせたハイブリッド並列化が有効である。そこで、高並列計算環境におけるさらなる高速化を目指して、ハイブリッド並列化についても検討を行う。近年、GPUによる科学技術計算が注目されており、低周波の電磁界解析においてもいくつか検討例が報告されつつある。マイクロマグネティクスでは密行列を扱うため、GPUの性能を十分に引き出せる可能性がある。そこで、GPUによる並列計算についても基礎的な検討を行い、設計現場でも使用可能なレベルにまで実用性を高めることを目標とする。

一方、計算コストの観点からは、マクロモデルの使用が望ましい。ヒステリシスモデルでは、精度が高く記述が簡単であるプレイモデルが注目されている。そこで、ヒステリシス磁界解析にプレイモデルを適用し、解析結果と測定結果の比較により、プレイモデルを用いて解析を行う際の測定データの取り扱い方法や留意点などについて検討を行う。また、新しい磁気異方性モデル化手法として、磁気エネルギーに基づく方法を検討する。通常、磁気異方性は二次元単板磁気特性試験器(2D-SST)で測定されるが、JISに準拠した一次元の単板磁気特性試験器(1D-SST)による測定と比べて難しい。ヒステリシスを無視した場合、磁気エネルギーは経路に依存しないため、圧延方向から角度別に切り出した単板試料の一次元的な磁気特性から推定可能であり、この磁気エネルギーの勾配が磁界と

なる。この考え方に基づき、一次元的な磁気特性評価に基づく磁気エネルギーを用いた二次元磁気特性モデリング法を構築する。最終的に、回転機の鉄損解析に適用し、その有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 時間領域並列化有限要素法の開発

並列計算環境を活用した渦電流損の実用的計算方法として、時間領域並列化有限要素法を開発した。本手法は、電気機器が有する物理現象の時間的・空間的周期性に着目し、1周期分の非線形方程式をまとめて取り扱う。したがって、図3に示すような回転機の2次元解析のように未知数が少ない問題であっても並列計算における粒度を得やすい特長を有する。また、係数行列が対角付近に分布するため、各プロセス間の通信がシンプルで通信量も小さく、プロセス数の増加に伴って反復法の収束性がほとんど変化しない。これらの長所から、図4に示すように良好な並列台数効果を有しており、並列数を多く取れるような環境における有効性が確認できる。

また、本手法は、図5に示すような1周期あたりのタイムステップ数が非常に多いインバータ駆動モータの損失解析に効果的である。図6に、キャリア高調波の有無による損失の差異を示す。キャリア高調波により、永久磁石中の渦電流損が大幅に増加していることがわかる。

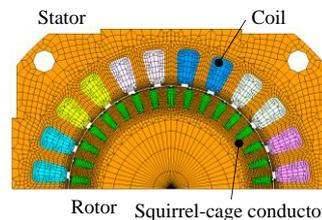


図3 誘導電動機の2Dメッシュ

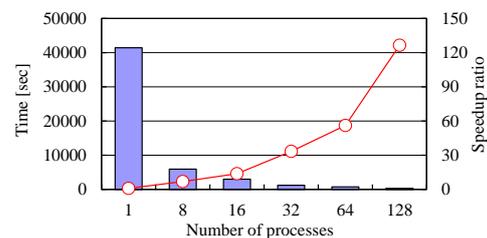


図4 誘導機モデルに対する並列台数効果

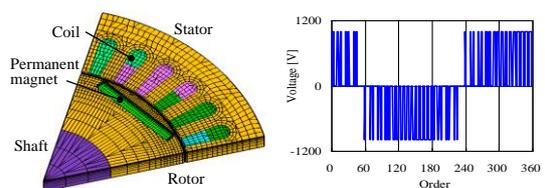


図5 インバータ駆動IPMモータモデル

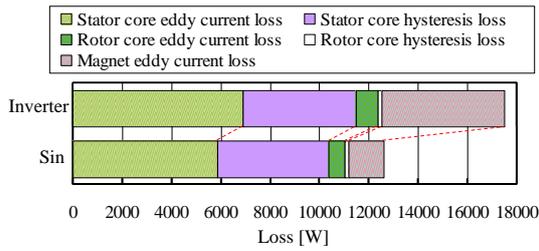


図5 IPM モータにおける損失

(2) 実用的磁気特性モデリング手法の確立
 マイクロマグネティクスでは、高速多重極法とプロセス並列計算を導入し、さらにマイクロマグネティクス計算に特有のメッシュ構造に着目した演算量削減アルゴリズムを用いて、垂直記録用磁気ヘッドの大規模解析を行った。その結果、図6に示すように、256 並列で約 200 倍の高速化を達成した。当初の研究計画では、その後、ハイブリッド並列化や GPU による高速化を経て、電磁鋼板の磁気特性モデリングに展開する予定であったが、他機関からマイクロマグネティクスの概念を取り入れた Grain Magnetics モデルが提案され、また現在までに芳しい結果が得られていない状況である。したがって、マイクロマグネティクス計算に基づくボトムアップ的磁気特性モデリングの開発は今後の課題である。

一方、プレイモデルに基づく磁気ヒステリシスモデリングについては、消磁や突入電流などヒステリシス磁界解析を行う際の留意点を明らかにするとともに、TP-EEC 法に基づく定常解の高速求解法を開発（図7参照）し、リング試料の測定結果との比較によりその有効性を明らかにした。また、電磁鋼板1枚を対象とした有限要素解析を実施し、さまざまな高調波を含む励磁条件下での測定結果との比較により、広範な周波数範囲で使用可能な渦電流損・ヒステリシス損の推定法を検討した。本手法は電気機器の有限要素解析における鉄損推定のための後処理としてそのまま活用することができ、また容易に並列化できるため、計算コスト・計算精度の観点から実用的な後処理鉄損評価法だと考えられる。

磁気異方性モデリングに関しては、角度別単板試料の測定結果に基づく2次元磁気特性モデル化方法を提案し、磁化曲線の取り扱い方、ニュートン・ラフソン法に適用した際の各係数の導出などを行うとともに、従来法との比較を行った。その結果、同程度の計算精度で、従来法よりも高速に計算が実行できることを明らかにした。また、磁気異方性を考慮した鉄損の後処理計算方法についても検討した。図8に示すように IPM モータの損失

解析に適用し、その有効性を検証した。

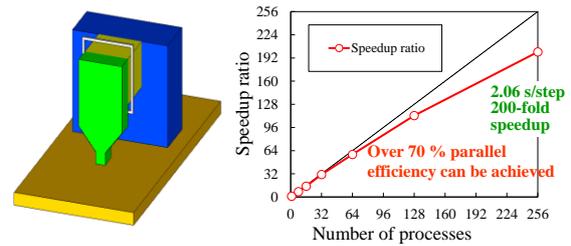
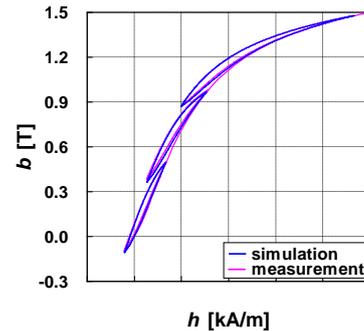
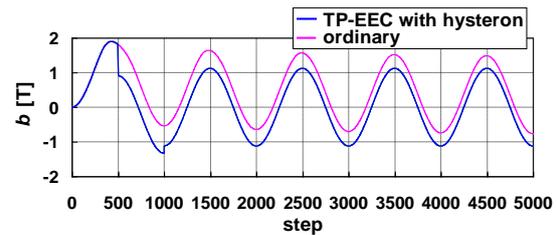


図6 磁気ヘッドモデルにおける速度向上率

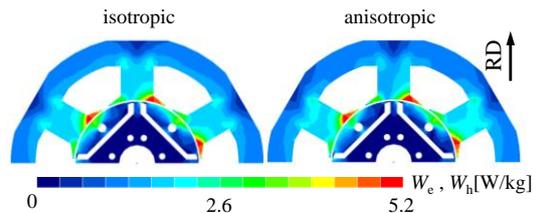


(a) 圧粉磁心におけるヒステリシスループ

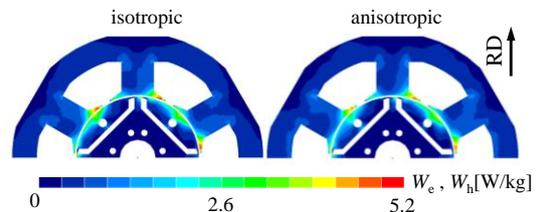


(b) 磁束密度の時間変化

図7 プレイモデルによる磁界解析結果



(a) Hysteresis loss density.



(b) Eddy-current loss density.

図8 IPM モータの損失解析結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① Y. Takahashi, T. Iwashita, H. Nakashima, S. Wakao, K. Fujiwara, and Y. Ishihara, “Micromagnetic Simulations of Perpendicular Recording Head Using the Parallel Fast Multipole Method Specialized for Uniform Brick Elements,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3805-3808 (2011.10) (査読有)
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2154305
- ② Y. Takahashi, T. Iwashita, H. Nakashima, T. Tokumasu, M. Fujita, S. Wakao, K. Fujiwara, and Y. Ishihara, “Parallel Time-Periodic Finite-Element Method for Steady-State Analysis of Rotating Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 1019-1022 (2012.2) (査読有)
DOI: 10.1109/TMAG.2011.2171923
- ③ J. Kitao, K. Hashimoto, Y. Takahashi, K. Fujiwara, Y. Ishihara, A. Ahagon, and T. Matsuo, “Magnetic Field Analysis of Ring Core Taking Account of Hysteretic Property Using Play Model,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3375-3378 (2012.11)
DOI: 10.1109/TMAG.2012.2204045
- ④ Y. Takahashi, T. Tokumasu, M. Fujita, T. Iwashita, H. Nakashima, S. Wakao, and K. Fujiwara, “Time-Domain Parallel Finite-Element Method for Fast Magnetic Field Analysis of Induction Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 5, pp. 2413-2416 (2013.5) (査読有)
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245114
- ⑤ S. Higuchi, Y. Takahashi, T. Tokumasu, and K. Fujiwara, “Comparison between Modeling Methods of Two-Dimensional Magnetic Properties in Magnetic Field Analysis of Synchronous Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, 7009104 (2014.2) (査読有)
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2283746

[学会発表] (計 65 件)

- ① 樋口真伍, 高橋康人, 徳増 正, 藤原耕二, 石原好之: 「一次元的な磁気特性の評価に基づく二次元磁気特性モデリング」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-11-67/RM-11-80 (2011.8)
- ② 高橋康人, 徳増 正, 藤田真史, 岩下武史, 若尾真治, 藤原耕二, 石原好之: 「時間領域並列化有限要素法を用いた誘導機の高速度電磁界解析」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-12-6/RM-12-6 (2012.1)

- ③ J. Kitao, K. Hashimoto, Y. Takahashi, K. Fujiwara, A. Ahagon, and T. Matsuo, “Representation of AC Hysteretic Property under PWM Excitation Using Play Model,” *Proc. of the 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Fields Computation (CEFC 2012)*, p. 38 (2012.11).
- ④ R. Akaki, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, “Iron Loss Evaluation Based on Eddy Current Analysis of an Electrical Steel Sheet Considering Magnetic Hysteresis,” *Proc. of the 21st Soft Magnetic Materials Conference (SMM 21)*, G1-12 (2013.9)
- ⑤ 竹田よし美, 高橋康人, 藤原耕二, 阿波根明, 松尾哲司: 「ヒステリシス特性を考慮した鉄損算出法に関する検討」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-13-86/RM-13-100 (2013.9)

[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

高橋 康人 (TAKAHASHI, Yasuhito)
同志社大学・理工学部・助教
研究者番号: 90434290