

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04324

研究課題名（和文）実用的な回転機の磁界解析のための三次元ハイブリッド並列計算システムの構築

研究課題名（英文）Creation of 3-D hybrid parallel computing system for practical magnetic field analysis of rotating machines

研究代表者

河瀬 順洋（Kawase, Yoshihiro）

岐阜大学・工学部・特任教授

研究者番号：20144735

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：いくつかの並列計算法を組み合わせ、その特性を比較、検討することにより、回転機の磁界解析のためのハイブリッド並列計算に適した組み合わせを明らかにし、実用的な回転機の磁界解析のための三次元ハイブリッド並列計算システムを構築した。
構築したハイブリッド並列計算システムの計算結果の妥当性、並列台数と高速化率の関係を明らかにした。さらに、本システムを用いて各種電動機の実験を行い、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンピュータの並列化は、大規模な計算モデルを高速・高精度で解を求めるための重要なファクターである。効率よくCPUを利用するため、2通りの並列化技術を搭載したハイブリッド並列計算システムを構築した。本システムの特性を明らかにし、性能を評価できたことは学術的に意義深いものである。
また、実用的な回転機の磁界解析の実現より、電動機の実験開発に欠かせないコンピュータ・シミュレーションにおいて並列計算システムの一例を示すことができ、社会的にも有意義なものとなった。

研究成果の概要（英文）：We constructed a three-dimensional hybrid parallel computing system for practical magnetic field analysis of rotating machines, and clarified the validity of the calculation results of this system, the relationship between the number of parallel machines and speedup rate, and the characteristics of the hybrid computing.
Furthermore, using this system, we analyzed the characteristics of various motors and showed their usefulness.

研究分野：工学

キーワード：三次元有限要素法 PCクラスタ ハイブリッド並列 電動機 磁界解析 並列計算

1. 研究開始当初の背景

回転機の磁界解析のための並列解析システムの研究が盛んに行われるようになっていたが、その主流は多くのCPUを利用したマルチプロセスによる並列化であった。一方、処理能力の向上を目的としたCPUのマルチコア化が進み、16コアを有するCPUが現れた。さらに多いマルチコア化の計画も発表されていた。

マルチプロセスによるそれまでの並列化では、複数のプロセスそれぞれが並列計算に用いるメモリだけでなく、プリ・ポストプロセス等で使用するメモリも確保するため、複数コアをもつCPUを利用する場合、メモリ効率が悪くなるという性質をもつ。

マルチプロセスの他に並列計算の手法のひとつとしてマルチスレッド並列がある。しかしながら、並列計算のための前処理とメモリキャッシュのオーバーフローによりマルチプロセスと比較すると並列化性能が劣ることが多い。

2. 研究の目的

マルチプロセスとマルチスレッドの両方の並列化技術を併用してハイブリッドに進化した三次元並列有限要素法を用いた回転機の磁界解析システムをPCクラスタ上に構築し、一連の回転機の動作特性解析を行う際におけるコアを使用する際のマルチプロセスとマルチスレッドの割合のトレードオフを見極め、より高速化を目指したデータシステムの構築を目的とする。

3. 研究の方法

次のプロセスを通して本研究を進行した。

- (1) マルチスレッド並列の実現に有効な並列コンピューティング環境 OpenMP を使用してマルチカラーオーダリングをベースとした連立方程式の並列計算処理部分を単一PC上に構築し、従来のクラスタPC上に構築された回転機の磁界解析のためのMPIを使用したマルチプロセス型並列計算システムに展開し、導入する。
- (2) 並列計算の有用性(高速化率や並列化率)は、解析モデルの大きさや並列数によって異なるため、様々な解析サイズの回転機の実用解析を通して、並列化性能を比較検討する。また、実用的な回転機の磁界解析を実現するため、前処理についても並列化を進める。
- (3) 各種電動機を解析し、開発したシステムの有用性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ハイブリッド並列有限要素解析システムの構築^①

MPIを利用した領域分割法をベースとしたマルチプロセス型の三次元並列有限要素法にOpenMPを利用したスレッド並列計算手法を組み合わせるハイブリッド並列有限要素解析システムを構築した。

MPIプロセス並列と組み合わせるOpenMPスレッド並列手法として、マルチカラー法(MC)、ブロックマルチカラー法(BMC)ならびにMPI並列と同様の並列化であるブロックIC法(Block-IC)の3通りに関してその効率等を比較し、有効な手法を明らかにした。図1にハイブリッド並列計算システムの構成図を示す。

解析対象の回転機としてIPMモータを採用した。図2に解析モデルを示す。

解析対象の規模がハイブリッド計算の効率に及ぼす影響を明らかにするために、粗密の異なる有限要素メッシュを用意した。要素数は、粗メッシュで417,000要素、密メッシュで1,183,338要素である。

計算時間を図3に示す。MC法を除き、ハイブリッド並列は従来のマルチプロセスのみの並列計算結果(FlatMPI)と同等かそれより高速に磁界解析が実現されていることがわかる。また、FlatMPIでは使用するコア数が3から4に増加すると計算時間が増加する傾向にあるが、ハイブリッド並列では、コア数の増加に対して単調減少しており、ハイブリッド並列の優位性がわかった。

図4にMRTR法(連立方程式の反復解法の一つ)の反復回数を示す。FlatMPIやBlock-ICでは使用するコア数によって反復回数が増加するが、MCやBMCでは、コア数によらず反復回数が一定であった。

以上のことより、MPIによる領域分割法に組み合わせる並列計算手法としてBMC法を用いることの有用性を明らかにした。

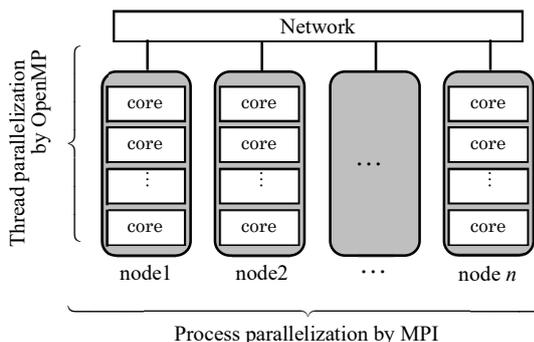


図1 ハイブリッド並列計算システムの構成図

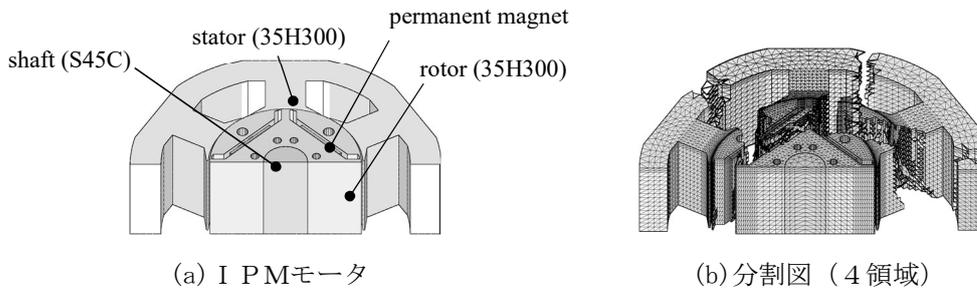


図2 解析モデル

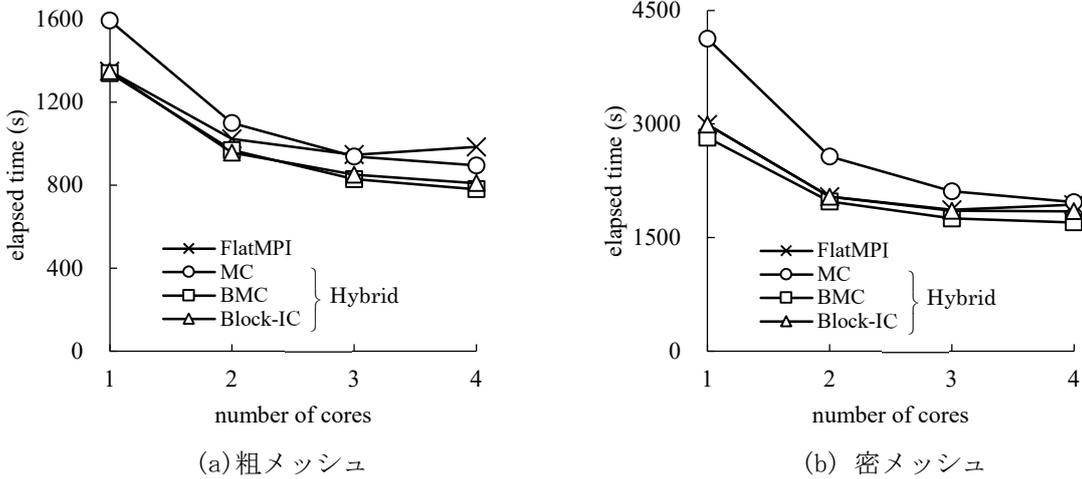


図3 計算時間

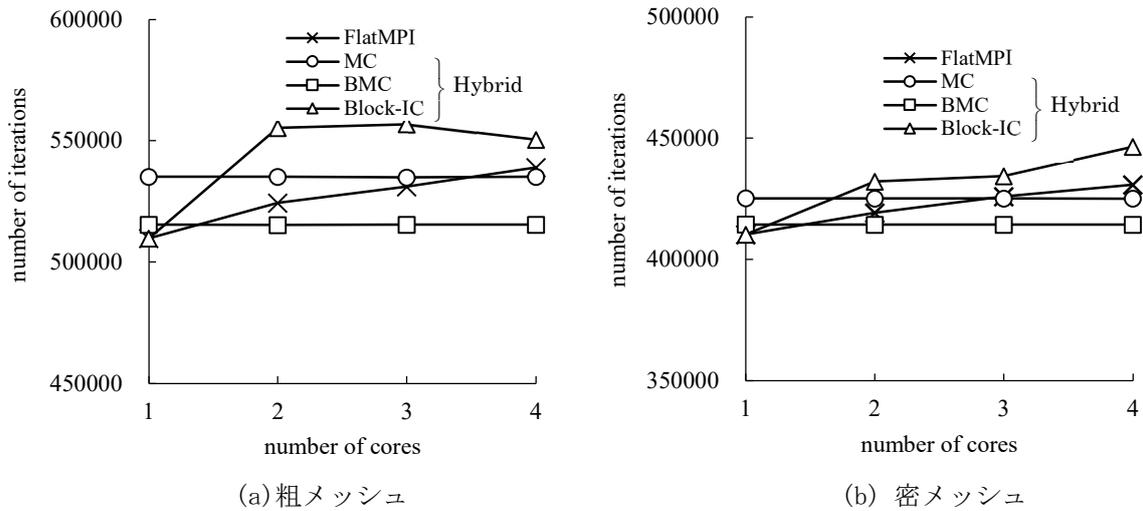


図4 MRTRの反復回数

(2) よりコア数の多い計算機環境におけるハイブリッド並列の性能評価^{②,③}

上記(1)は4コアのCPUを搭載した並列有限要素解析システムの特徴を求めたものである。ここでは、さらにコア数の多い(12コア)のCPUを搭載した6台のPCからなるハイブリッド並列有限要素解析システムを構築し、その並列性能を評価、検討した。なお、ハイブリッド並列は、上記(1)の解析結果より有用性が明らかになったMPIとBMCの組み合わせで構成した。

表1に、要素数として約50万要素～約500万要素の解析モデルに対して並列計算を行った際の高効率率(性能最大時)を示す。FlatMPIでは最大12.9倍、ハイブリッド並列では最大13.3倍の高効率を実現しており、ハイブリッド並列の優位性を見ることができる。とりわけ、要素数の少ないモデルに対しては、ハイブリッド並列はFlatMPIと比較して大きく高効率化している。

表1 並列性能(性能最大時)

要素数	50万	100万	200万	300万	500万
FlatMPI	9.1	9.7	10.8	11.9	12.9
Hybrid	12.5	12.9	12.6	13.2	13.3

(3) 実用的な回転機の磁界解析^{④,⑤}

より実用的な回転機を磁界解析するため、文献^④では電圧入力時の I P Mモータを解析対象とし、ハイブリッド並列計算において P C クラスタを構成する P C の台数が並列性能に及ぼす影響を明らかにするとともに、領域分割数と並列性能の関係を検討し、1 小領域あたりのスレッド数と並列性能の関係を比較、検討した。

この比較検討を通して、ハイブリッド並列では P C 台数が少ない場合でもスレッド数を増やすことで高い並列効果が得られることがわかった (図 5 参照)。

さらに、文献^⑤においてアウターロータ固定型三相かご形誘導電動機の特長解析に三次元並列有限要素解析システムを利用した。解析対象とした誘導電動機は、二次導体中の渦電流の挙動を明らかにするため、従来の回転機とは異なり、ロータを外側に配置して固定し、ステータを内側に配置して回転させるタイプの三相かご型誘導電動機である。解析結果は実測とよく一致し、並列計算の有用性を示した。

誘導電動機の磁界解析では鉄心の非線形性ならびに導体中の渦電流を考慮する必要があるため、計算の規模が大きくなるとともに時間ステップが多くなり、一般に、多大な計算時間を要するが、三次元並列有限要素解析システムを用いることで実用的な計算時間内に求めることができた。(

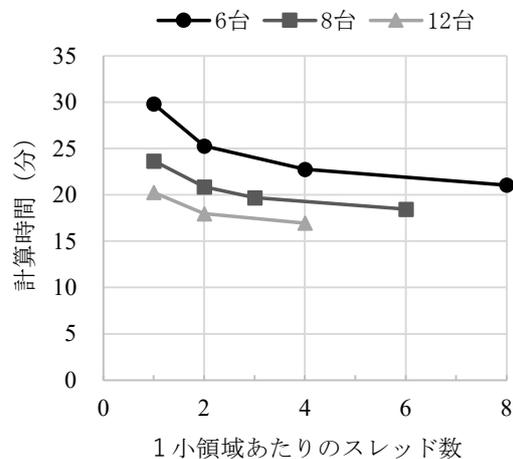


図 5 48 コア並列時の計算時間

<引用文献>

- ① Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Atsuyoshi Nagase: “Comparison of Methods for Thread Parallelization in 3-D Hybrid Finite Element Method”, Proceedings of 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, 2019.
- ② 山口忠・河瀬順洋・長瀬敦義: 「マルチコア PC クラスタによる Hybrid 並列有限要素法の性能評価」, 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-20-023/RM-20-023 (2020)
- ③ Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, and Murase: “Hybrid Parallel FEM on PC Cluster with Multi-core Processor”, Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems, 2020, DG8L-2.
- ④ 山口 忠・河瀬順洋・石原旭人: 「回転機の磁界解析における三次元 Hybrid 並列有限要素法の性能評価」, 電気学会 静止器/回転機合同研究会資料 SA-21-061/RM-21-082, 2021.
- ⑤ 山口 忠・河瀬順洋・魚住啓斗・石原旭人: 「三次元並列有限要素法によるアウターロータ固定型三相かご形誘導電動機の特長解析」, 電気学会 静止器/回転機 合同研究会資料 SA-22-031/RM-22-031, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawae, Wataru Onogi, Tomohiro Ota, Yasuyoshi Asai	4. 巻 10
2. 論文標題 Magnetic Levitation Force and Torque Analysis of a Diamagnetic Material Using Nodal Force Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 694, 699
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21000905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山口忠、河瀬順洋、石原旭人
2. 発表標題 回転機の磁界解析における三次元Hybrid並列有限要素法の性能評価
3. 学会等名 電気学会 静止器/回転機 合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口忠、河瀬順洋、魚住啓斗、石原旭人
2. 発表標題 三次元並列有限要素法によるアウターロータ固定型三相かご形誘導電動機の特異解析
3. 学会等名 電気学会 静止器/回転機 合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河瀬順洋・山口 忠・魚住啓斗・河野 寛・渡邊将史・草留泰三
2. 発表標題 パー切れしたかご形誘導電動機の定常特性解析
3. 学会等名 電気学会 静止器/回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, and Murase
2. 発表標題 Hybrid Parallel FEM on PC Cluster with Multi-core Processor
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Hiroto Uozumi, Hiroshi Kawano, Masashi Watanabe, and Taizo Kusadome
2. 発表標題 Characteristics Analysis of Induction Motor with Broken Rotor Bars at Steady State
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口 忠・河瀬順洋・石原旭人
2. 発表標題 三次元Hybrid並列有限要素法によるIPMモータの磁界解析の性能評価
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Atsuyoshi Nagase
2. 発表標題 Comparison of Methods for Thread Parallelization in 3-D Hybrid Finite Element Method
3. 学会等名 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口忠・河瀬順洋・長瀬敦義
2. 発表標題 マルチコアPCクラスタによるHybrid並列有限要素法の性能評価
3. 学会等名 電気学会 静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山口 忠 (Yamaguchi Tadashi) (30291777)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------