

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289075

研究課題名(和文) 高度な電気機器設計の基盤となる高性能電磁場解析の実現

研究課題名(英文) Realization of high performance electromagnetic field analyses for sophisticated design of electric machines

研究代表者

岩下 武史 (Iwashita, Takeshi)

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：30324685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：高性能電磁場解析の基盤となる以下の成果を創出した。(1)並列化TP-EEC法を開発し、電気機器解析で必要となる時間周期型の非線形電磁場解析の高速化を達成した。(2)有限要素解析の主要なソルバであるIC分解前処理-CG法に関して、新しい前処理手法を考案し、SIMD命令の活用と収束性の向上による高速化を実現した。(3)スライドメッシュを用いた解析、運動方程式を考慮した解析における並列化手法を考案し、電動モータ解析を高速化した。(4)H行列法と並列処理の併用により、マイクロマグネティクス計算の高速化を実現した。(5)複数の電磁場解析を並列計算機上で効率的に実行するフレームワークの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：We attained following results that can be used as a basis of high performance electromagnetic field analyses. (1) We developed parallel TP-EEC method, and accelerated time periodic non-linear electromagnetic field analyses for electric machines. (2) We proposed a new IC preconditioning technique in which SIMD instructions are efficiently utilized for a linear solver involved in finite element analyses. (3) We developed parallelization methods for the analysis involving the slide mesh and the one considering the motion equation. (4) We succeeded in accelerating micro-magnetics computations by using H-matrices and parallel processing. (5) We developed a software framework to efficiently execute many electromagnetic field simulations on a parallel computer.

研究分野：高性能計算

キーワード：電気機器 電磁場解析 並列処理 高性能計算

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初において、電磁場解析は様々な電気機器、電子デバイスの設計や評価に広く用いられていた。その中で、電気機器の性能に関する要求は高まる一方であり、その設計基盤となる電磁場解析の性能向上に対する要求も極めて高い状況にあった。特に、ハイブリッド車や電気自動車向けの電動モータの設計では、全体の設計期間がそれ以前と比べて大幅に短縮されており、あらゆる手段を使って解析を高速化して欲しいという社会的要請があった。また、解析の精度面の向上に対しても強い要請があり、電気機器の効率に大きな影響を与える鉄心材料の高精度なモデリング手法が求められていた。また、その他にも実用設計では、設計の初期段階で多数の小・中規模モデル(数万～百万自由度程度)をなるべく短時間に解きたいという要望があった。

即ち、現在ならびに将来の高度な電気機器設計の実現のために、電磁場解析分野において、1. 大規模・高速解析、2. 高性能な磁性体モデルに基づく高精度解析、3. 多くのモデルを効率的に解析する手法の実現が求められている状況にあった。

2. 研究の目的

前節で述べた研究背景を踏まえ、本研究では、主に高性能計算(HPC)技術と解法技術の両面から、前節で述べた技術課題の解決を主題として、以下に示す3つの研究課題に取り組むことを目的とした。

研究課題 A 高性能計算を活用した高速電磁場解析の実現

本研究課題では、主要な電気機器である電動モータの解析を中心に電磁場解析全般とその構成要素の高速化について研究を行う。具体的には、非定常・非線形有限要素解析や均質化法を用いた解析、線形反復ソルバの高速化について研究を実施する。

研究課題 B マイクロマグネティクスによる高精度磁場解析に関する研究

第一原理的な計算に基づく最も高精度な磁性モデリング手法であるマイクロマグネティクス計算の高速化について研究を実施する。

研究課題 C 複数の解析モデルを並列計算環境で効率的に解析する手法に関する研究

実用設計の電気機器設計では、解析モデルや解析のパラメータを適宜調整し、多数の解析を実行することが行われる。本研究課題では、複数の並列電磁場解析を並列計算環境で効率的に実行する方式やその支援を行うソフトウェアフレームワークに関する研究を行う。

3. 研究の方法

研究課題 A では、電動モータや変圧器の解

析高速化を目的とし、主に並列処理による高速化を行う。電磁場有限要素解析における並列処理では、従来、並列化の代償として、定常解を得るためのステップ数の増加や線形ソルバの反復回数の増加が課題となっていた。本研究では、高橋(分担)らが開発した TP-EEC 法を並列処理可能な形式に発展させ、電動モータ等で必要となる時間周期非線形電磁場解析の高速化を行った。また、電磁場有限要素解析で標準的なソルバとして用いられている ICCG 法を対象として、前処理行列生成におけるフィルイン選択に着目した新しい解法を開発した。その他に、実用的なモータ解析で必要となるスライドメッシュや運動方程式を考慮した解析に並列処理を導入し、その高速化を行った。さらに、均質化法とマルチグリッド法の併用による解析の高速化や岩下(代表)らが開発した新しい誤差修正法の電磁場解析への導入による解析高速化についても取り組んだ。

研究課題 B では、マイクロマグネティクス計算におけるホットスポットである反磁界計算の高速化に取り組んだ。具体的な方法として、H 行列法と呼ばれる密行列の近似行列を導入し、反磁界計算で必要となる密行列ベクトル積の高速化を行い、さらに並列計算を導入することでマイクロマグネティクス計算の高速化を図った。

研究課題 C では、平石(分担)らが開発した perl ベースの並列ジョブ管理スクリプト言語 Xcrypt を基盤として、並列計算機上の多様なジョブスケジューラと連携可能な並列電磁場解析ソフトウェアフレームワークの構築を試みた。

4. 研究成果

(1) 並列化 TP-EEC 法の開発

電動モータ等の解析で必要とされる時間周期非線形電磁場解析において、並列化 TP-EEC 法と呼ばれる新たな高速化手法を開発した。同手法は、時間周期有限要素法(TPFEM)の定式化と同様に、各タイムステップにおける非線形電磁場解析を周期境界条件により連結する。TPFEM では、本手順で得られた拡大非線形方程式をニュートン法により直接解く。本手法は並列処理が容易である利点を持つが、ニュートン法の内部で用いられる線形反復法やニュートン法の収束性が Step-by-step 法と比べて低下する問題が発生する。そこで、本研究で開発した並列 TP-EEC 法では、拡大非線形方程式をプロセス分割し、各プロセス内で過渡解析を独立に実行すると共に、TP-EEC 法を多相交流問題に発展させた多相交流 TP-EEC 法を援用することで、収束の遅い誤差成分やプロセス間に生じる誤差を抽出し、補正する。過渡解析と補正を繰り返すことで、最終的な定常周期解を算出するが、補正の効果により TPFEM と比べて、線形反復法やニュートン法の収束性が改善されることが期待できる。

図1に示すIPMモータを対象に非線形渦電流解析を行い、並列化TP-EEC法の実機解析における有効性を検証した。図1(c)に、トルク波形を示す。各プロセスで独立に過渡解析を実行しているため初期ステップでは誤差が大きいが、並列化TP-EEC法による補正を繰り返すことで最終的に定常状態が得られていることが確認できる。

表1に、並列化TP-EEC法(提案法)、並列化TPFEM(従来法)を用いた過渡解析において1周期の定常解を得るまでに要した計算時間を示す。使用計算機は北海道大学のHitachi SR16000であり、Flat-MPI方式で1コアに1プロセスを割り当てて数値実験を行った。表1に示す通り、提案手法である並列化TP-EEC法はプロセス数に比して一周期あたりのタイムステップ数が大きい場合に従来法と比べて優位となる。特に、従来法では一周期あたりのタイムステップ数が増加した場合、計算時間が急激に増加するのに対し、提案手法ではその増加率は小さい。その結果、1周期あたり4096ステップの場合、256プロセス使用時において、従来法と比べ2倍以上高速な解析を実現している。近年では、外部回路のスイッチング周波数が高い場合等、短いタイムステップ幅を用いた高精度な解析が求められるケースが増えてきており、こうした解析モデルに対して提案手法は有効性を持つと考えられる。

(2) ICCG法のSIMD化に関する研究

電動モータや変圧器、様々な電気機器を対象とした電磁場有限要素解析において、最も広く用いられている線形ソルバはICCG法(正確にはIC(0)-CG法)である。一方、近年のマルチコアプロセッサやメニーコアプロセッサはSIMDと呼ばれる並列ベクトル命令を有し、その活用が高性能計算において求められている。しかしながら、ICCG法の主な計算核の一つである前進・後退代入計算はデータ間に依存関係を持ち、そのままの形でSIMD化することが困難であった。そこで、岩下(代表)らは前処理行列の生成時に係数行列を

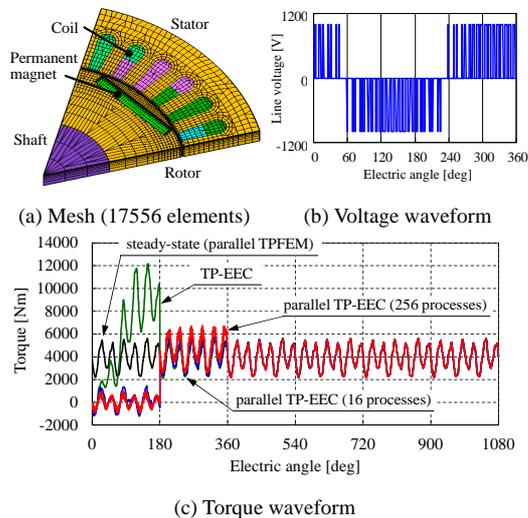


図1 PWMインバータ駆動IPMモータの解析結果

表1 PWMインバータ駆動IPMモータの計算時間

Number of time steps per period	Number of processes	Calculation time [sec]	
		Parallel TP-EEC	Parallel TPFEM
1024	16	2492.3	11736.1
	32	1871.2	5937.7
	64	1523.7	2970.9
	128	1714.2	1500.5
	256	2446.9	753.4
2048	256	2802.9	2484.3
4096	256	2998.3	8273.2

ブロック分割し、不完全コレスキー(IC)分解において、非ゼロ要素を含むブロック内のフィルインを許可する新しいIC分解前処理を提案した。提案手法は、IC(0)前処理と比較して、前処理に係わる演算量は増加するが、小密行列計算を主体とした計算として記述されることから、SIMD命令を活用した高性能実装が可能である。また、許可されるフィルインに伴い、CG反復数の削減も期待できる。本研究では、行列データベースによる取得した様々な行列データに対して提案手法の有効性を実証すると共に電磁場有限要素解析における性能評価を行った。

(3) スライドメッシュを考慮した領域分割型並列有限要素法

回転機の三次元磁界解析においては、スライド要素を活用することで任意の回転位置で固定子・回転子メッシュの接続が可能となるため、スキューや積層鉄心といった複雑形状のモデル化が各段に容易となるが、これまで領域分割型並列計算が適用された例はなかった。そこで、スライドメッシュを考慮した領域分割型並列有限要素法を新たに開発した。

図2(a)に、かご形誘導電動機を対象とした通常の領域分割例を示す。領域分割型並列有限要素法では、解析領域を複数の部分領域に分割し、部分領域毎にプロセスを割り当てる。プロセス間通信量を極力抑制するためには、領域間境界の面積を小さくすることが望ましい。しかし、スライドメッシュ上では固定部要素は時刻ステップに応じて可動部メッシュ内の異なる部分領域と接することになり、図2(a)に示す領域分割では、領域間境界に加えてスライドメッシュ上でもプロセス間通信が発生する。

そこで、領域間境界がスライドメッシュ表面に一致するような領域分割法を提案した。本手法では、可動部メッシュと固定部メッシュで独立に領域分割を実施し、各領域数は可動部と固定部の要素数で按分する。図2(b)に、提案手法による領域分割例を示す。提案法に基づく領域分割を実施することでスライドメッシュの表面が固定部・可動部要素の相対位置関係に依存せず常に領域間境界となるため、過渡解析全体にわたって領域間境界の表面積は常に一定となる。ただし、可動部要素が移動することに起因して、時刻ステップに応じて通信パターンは変化する。

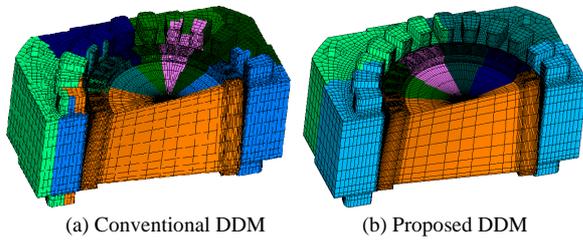


図2 かご形誘導電動機の領域分割例（領域数：8）

表2 非線形過渡磁界解析における速度向上率

Number of processes	Average calculation time per step	Speedup ratio	Average NR iterations	Average ICCG iterations
1	4170.0	1.0	5.93	2,377
16	396.1	10.5	5.64	2,888
32	213.0	19.6	5.62	2,959
64	109.6	38.1	5.61	3,049
128	65.5	63.6	5.59	3,068
256	46.4	89.9	5.60	3,184

図2に示す誘導電動機モデルの横流解析を例題として、並列台数効果を検証する。要素数は1,869,760、未知変数の数は5,089,964である。周波数50 Hz、1周期を256分割とし、定常解が得られるまで解析を行った。使用計算機は、京都大学のAppro GreenBlade 8000である。最大16ノード（256コア）を用いて台数効果を検証した。

表2に、過渡非線形渦電流解析における時刻ステップあたりの平均計算時間、速度向上率、ニュートン・ラフソン（NR）法およびICCG法の平均反復回数を示す。分散並列処理のためにLocalized IC前処理を使用していることから、プロセス数の増加に伴って前処理行列の近似度が低下し、ICCG法の総反復回数も増加傾向にある。しかし、非線形反復においてICCG法の収束判定値を緩和しているため反復回数の増加傾向は緩やかであり、256プロセス使用時に1.34倍程度である。本解析例では、256並列時に約90倍の速度向上率を達成している。

(4) 運動方程式を考慮した時間領域並列有限要素法

時間領域並列有限要素法（TDPFEM）を回転機の始動特性解析に適用する場合、運動方程式の求解に必要な電磁力は位置と磁束密度の関数であり、非線形磁界解析の求解には回転子位置が必要となるため、両者を連成して同時に解かなければならない。そこで本研究では、運動方程式求解ループと非線形磁界解析ループを組み合わせた反復計算をTDPFEMに適用し、回転子位置と磁界解析における未知変数の収束を同時に達成する並列計算法を開発した。また、開発法において一度に求解する時刻ステップ数をプロセス数と一致させることで、特に使用プロセス数が少ない場合に速度向上率の改善が可能であることを明らかにした。

かご形誘導電動機の2次元非線形渦電流解析（要素数は13,198、1ステップあたりの未知変数の個数は12,705）を適用例として、時

表3 誘導機の始動特性解析における並列性能

Number of processes	Calculation time [s]	Speedup	Average NR iterations	Total CG / BiCGstab2 iterations
Sequential	7,072.2	1.0	3.59	1,279,005
16	3160.7	2.24	13.18	224,971
32	2127.4	3.32	16.78	152,589
64	1599.7	4.42	19.58	118,001
128	1368.0	5.17	24.15	99,848
256	839.1	8.43	17.6	57,274

間領域並列有限要素法の有効性検証を行った。送風機やポンプなどの流体負荷のトルクを想定し、機械的トルクは回転速度の2乗に比例すると仮定した。使用計算機は、京都大学のAppro GreenBlade 8000である。

表3に、10周期分の過渡非線形渦電流解析における計算時間、速度向上率、ニュートン・ラフソン（NR）法および線形反復法の反復回数を示す。本例題は非常に小規模のため、空間分割型の並列有限要素法では良好な並列化効果を得ることが難しい。しかし、本手法を用いることで、過渡現象解析においても8倍程度の高速化を達成することが可能であることを示した。

(5) 均質化法とマルチグリッド法の併用

マルチグリッド（MG）法は、電磁界有限要素解析の高速化手法として有効性が高い手法であるが、不規則な有限要素メッシュが用いられている場合、実装のコストは大きい。立方体等の規則的な分割を用いれば実装は容易となるが、実用上多くの場合にそうであるように、解析対象に曲面状の材料形状が含まれていると解析精度が低下する。このため、解析対象の形状とメッシュ分割が整合していない場合に解析精度の低下を抑制する均質化法とマルチグリッド法の親和性は高いと考えられる。本研究では、均質化法と幾何マルチグリッド法の連携による高速電磁界解析手法の開発に取り組み、2次元静磁界解析及び電磁波解析について、開発した手法の有効性を確認した。

図3に示す円形状の磁性体を含むベンチマークモデルを対象とした解析において、有限要素法で導出された線形方程式の共役勾配法による求解に必要な反復回数を表4に示す。本研究で開発した均質化法とマルチグリッド法の連携手法の有効性が高いことが確認できる。

(6) 類似の係数行列をもつ連立一次方程式の求解高速化

渦電流解析の高速化にも有用である誤差修正法に関して、誤差修正用写像行列をRayleigh-Ritz法を使用して構成する方法を提案し、様々なテストモデルについて性能の評価を行った。穴あき導体を含むT-有限要素解析、A法・A-法による有限要素解析、電圧源を含む有限要素解析、透磁率の非線形性を考慮した解析などの例題について、誤差修正法の高い有効性が確認された。

一例として 図 4 に示すモデルを使用して、本研究で開発した誤差修正法の非線形渦電流解析における有効性についての検証結果を示す。非線形解析に要した計算時間及び ICCG 法の総反復回数を図 5 に示す。本研究で開発した誤差修正法を使用することで、この例題では、反復回数を約 60%，計算時間を約 45%削減することができた。

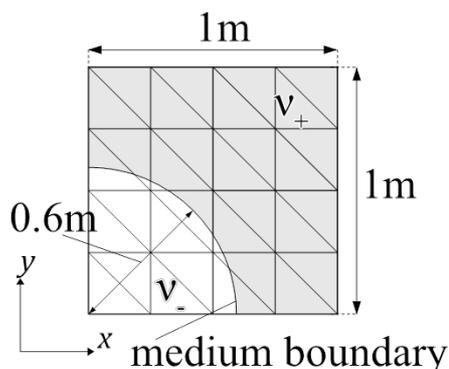


図 3 均質化法のベンチマークモデル

表 4 反復回数の比較

節点数	反復回数	
	標準的 MG 法	均質化 MG 法
16641	発散	24
66049	発散	24

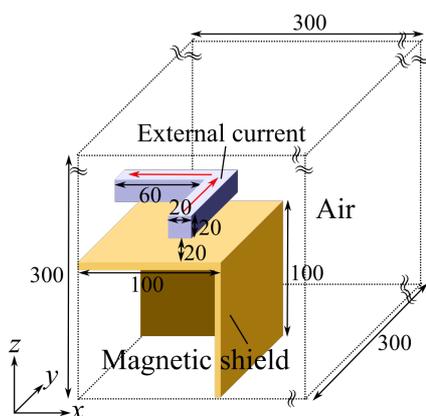


図 4 非線形解析のモデル

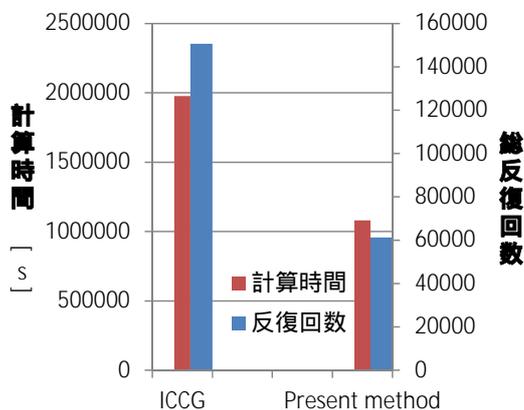


図 5 計算時間および総反復回数

(7) マイクロマグネティクス計算の高速化

マイクロマグネティクス計算は、強磁性体の磁区構造解析手法として、これまで主に磁気記録の分野で物理現象の解釈やデバイスの設計に用いられてきたが、高精度な磁性材料モデリング手法としてもモータ内の鉄損評価等の様々な応用上の展開が期待されている手法である。

マイクロマグネティクスでは、外部磁界によるエネルギー、磁気モーメント同士の相互作用である反磁界によるエネルギー、隣り合うスピン間の相互作用である交換磁気エネルギー、磁気異方性に起因する磁気異方性エネルギーの総和が極小になるよう磁化の分布を決定する。即ち、磁化 M の歳差運動を表す方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を基礎方程式とした過渡解析を行う。

LLG 方程式を対象とした解析において計算時間の大部分を占めるのは反磁界（静磁界相互作用）計算である。本計算では、すべての要素からの寄与を考慮する必要があるため、演算量は要素数 N の 2 乗に比例する。そこで本研究では、反磁界計算に H 行列法を導入し、演算量の削減を試みた。H 行列法は、距離の 2 乗や 3 乗に反比例する相互作用を表現する行列に対して適用可能である。このような場合、互いに遠方にある二つの要素間の相互作用は近接する要素間の相互作用と比べて相対的に小さいため、相互作用の表現行列の一部をよりデータ量の少ない低ランク行列で近似しても、例えば行列ノルムにおいて大きな変化はない。H 行列法では本性質を用いることで、行列の一部を低ランク化し、演算量、メモリ使用量を低減させる。本研究では、反磁界計算に岩下（代表）らが開発した分散 H 行列ライブラリ HACApk を導入し、マイクロマグネティクス計算の分散並列化、高速化に成功した。

(8) 複数電磁場解析の高効率な実行環境に関する研究

並列計算機上における複数電磁場解析の効率的な実行を実現するため、「多数の電磁場解析シミュレーション実行を効率化するフレームワーク」の具体的な要求要件の定義と基本設計およびプロトタイプ実装を行った。また同フレームワークの実装・利用に用いるジョブ並列スクリプト言語 Xcrypt を北海道大学の Hitachi SR16000、東京大学の Oakleaf-FX、Reedbush、京都大学の Camphor2 にそれぞれ移植した。

開発したフレームワークの概念図を図 6 に示す。実行する電磁場解析プログラムは、任意のプロセス数・スレッド数で実行可能なようにハイブリッド並列化されており、また、いくつかのチューニング可能な性能パラメータが存在するものとする。そのようなプログラムをスパコンや並列計算サーバ環境で、それぞれ異なる入力（解析空間サイズや解

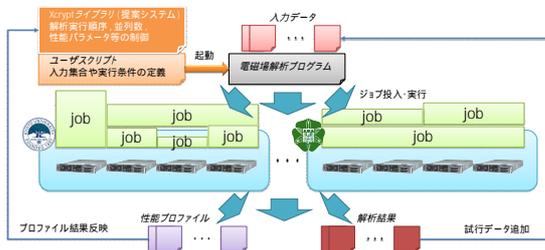


図6 複数電磁場解析実行フレームワーク

析タイムステップ数等)を与えられて多数実行する状況を考え、そのような実行をジョブ並列実行によりなるべく早く終わらせることを要求要件とした。

本要求要件を実現するためには、それぞれのジョブ実行がどれだけの計算資源を割り当てた場合にどの程度の時間で完了するかを予測し、それに基づいて実行順序や各実行の並列数を調整する必要がある。このような調整を適切に行うため、ジョブの実行ごとに性能プロファイルを取得・保存し、その履歴に基づいて後続ジョブの実行時間の予測および実行順序や性能パラメータの調整を行うシステムを、Xcrypt を用いて開発した。

開発したソフトウェアでは、与えられたプログラムを様々な入力サイズ、性能パラメータ値、MPI プロセス数、OpenMP スレッド数で実行し、それぞれの実行で得られた性能値をデータベースに保存する機能を実現した。また、その結果を取り出して利用することでプログラムの性能チューニングを行えるようにした。このプロトタイプシステムを、ハイブリッド並列実行に対応した時空間タイリング付き三次元 FDTD カーネルに適用し、最新の Xeon プロセッサや Xeon Phi メニーコアプロセッサを含む複数の計算機環境において、上記のパラメータ値の最適化に利用できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

T. Iwashita, S. Kawaguchi, T. Mifune, and T. Matsuo, “Automatic mapping operator construction for subspace correction method to solve a series of linear systems,” JSIAM Letters, Vol. 9, (2017) pp. 25-28. [査読有] DOI: 10.14495/jsiaml.9.25

高橋康人, 北尾純士, 藤原耕二, 岩下武史, 中島 浩: 「回転機の始動特性解析のための運動方程式を考慮した時間領域並列有限要素法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, (2017), pp. 230-237. [査読有] DOI: 10.1541/ieejpes.137.230

Y. Takahashi, K. Fujiwara, T. Iwashita, and H. Nakashima, “Parallel Finite-Element Analysis of Rotating Machines Based on Domain Decomposition Considering Nonconforming Mesh Connection,” IEEE Trans. Magn., Vol. 52, (2016), Paper#

7401604. [査読有]

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2477308

Y. Takahashi, T. Tokumasu, K. Fujiwara, T. Iwashita, and H. Nakashima, “Parallel TP-EEC Method Based on Phase Conversion for Time-Periodic Nonlinear Magnetic Field Problems,” IEEE Trans. Magn., Vol. 51, (2015), 7001305. [査読有]

DOI: 10.1109/TMAG.2014.2356193

A. Ida, T. Iwashita, T. Mifune, and Y. Takahashi, “Parallel Hierarchical Matrices with Adaptive Cross Approximation on Symmetric Multiprocessing Clusters”, Journal of Information Processing, Vol. 22, (2014), pp. 642-650. [査読有]

DOI: 10.2197/ipsjip.22.642

〔学会発表〕(計 18 件)

T. Hiraishi, K. Munakata, A. Ida, T. Iwashita, and H. Nakashima, “Dynamic Load Balancing for Parallel Computation of Hierarchical Matrices Application,” ISC2015, 2015 年 7 月 15 日, Frankfurt, Germany.

R. Plasser, Y. Takahashi, G. Koczka, and O. Biro, “Comparison of Various Methods for the Finite Element Analysis of Nonlinear 3D periodic Eddycurrent Problems,” 20th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2015 年 6 月 30 日, Montreal, Canada.

T. Kimura, T. Mifune, and T. Matsuo, “Application of homogenization technique to geometric multigrid method for electromagnetic finite element analysis”, 20th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2015 年 6 月 29 日, Montreal, Canada.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩下 武史 (IWASHITA, Takeshi)
北海道大学・情報基盤センター・教授
研究者番号: 30324685

(2) 研究分担者

美船 健 (MIFUNE, Takeshi)
京都大学・工学研究科・講師
研究者番号: 20362460

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

平石 拓 (HIRAISHI, Tasuku)
京都大学・学術情報メディアセンター・助教
研究者番号: 6052822