

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04429

研究課題名（和文）実規模電気機器設計のための空間分割・時間分割併用型並列電磁界解析技術の実用化研究

研究課題名（英文）Enhancement of Parallel-in-space-time Electromagnetic Field Analysis for Practical Electric Machine Design

研究代表者

高橋 康人（Takahashi, Yasuhito）

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：90434290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：空間分割・時間分割併用型並列有限要素法（PinSTFEM）の高度化を目的として、新たな時間分割型並列計算法の創出による速度向上率の改善、PinSTFEMへの磁気ヒステリシスモデル化法の導入による鉄損算定精度の改善、プロセス数増加時に劣化する空間分割型並列有限要素法の並列性能改善に関する検討を行った。その結果、時刻区間をオーバーラップさせた並列TP-EEC法の提案とPinSTFEMへの適用、磁化履歴更新処理を導入したPinSTFEMの開発とヒステリシス磁界解析への適用、大規模電気機器解析における前処理付き反復法の並列性能比較などを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間分割型並列計算法、時間分割型並列計算法およびヒステリシスモデル化法を用いた鉄損算定に関連した個々の技術を高度化した上でPinSTFEMとして統合し、実規模電気機器の損失評価への使用に耐え得る高速化と高精度化を両立した新規解析技術の開発を達成しており、電気機器工学、パワーマグネティクスおよび計算科学的な観点から有意義な知見が得られている。複数の研究分野にまたがる独創性の高い本研究課題の成果の統合により、PinSTFEMに基づく高速・高精度な損失評価技術の実用性が前進し、高効率電気機器設計・開発のさらなる高度化が期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aims to the enhancement of a parallel-in-space-and-time finite-element method (PinSTFEM). The main themes include developing a new parallel-in-time method with better parallel performance, an accurate iron loss evaluation by introducing a hysteresis modeling method into the PinSTFEM, and improving parallel performance of the preconditioning in the context of a parallel-in-space method. First, we proposed the novel PinSTFEM by overlapping time interval in a parallel time-periodic explicit-error-correction (TP-EEC) method for steady-state analyses of electric machines. Then, we developed a new PinSTFEM combined with the hysteresis modeling method in which the magnetization histories are updated appropriately. Finally, we clarified the features of two parallel preconditioning methods in the analysis of a practical rotating machine. As a result, synthesizing achievements of this research finally leads to the further high-efficiency of electric machines.

研究分野：パワーマグネティクス

キーワード：電気機器 並列計算 有限要素法 ヒステリシス 高効率 鉄損

1. 研究開始当初の背景

社会基盤を支える電気機器の効率をさらに改善するためには、コイルエンドなど機器端部の複雑形状や積層鉄心などの微細構造、周囲構造物も含めた詳細モデルを用いて、有限要素法 (FEM) などを用いた磁界解析に基づく機器内損失の正確な評価と詳細な要因分析を行う必要がある。近年、大規模モデルの求解のための有用な手段として、領域分割法 (DDM) に基づく空間分割型並列 FEM (PinSFEM) が商用ソフトウェアでも活用されている。一方、例えば高速域では全損失に占める鉄損の割合が急増するため、磁界解析においてキャリア高調波やスロット高調波の影響を適切に考慮することが不可欠となる。高調波損失を精度良く算出するためには、キャリア高調波を表現可能な十分小さい時間刻み幅を用いる必要があり、時間的大規模問題の高速化は喫緊の課題である。また、機器内の損失、とりわけ鉄損を高精度に評価するためには、鉄心を構成する電磁鋼板の磁気特性を適切にモデル化する必要がある。例えば、磁気ヒステリシスを磁界解析中で直接考慮することで、キャリア高調波に起因したマイナーヒステリシスループの表現精度が格段に改善するのみならず、増分比透磁率の正確な評価により渦電流損の算定精度改善にも寄与することが報告されている。

すなわち、電気機器のさらなる高効率化を目指すには、詳細な3次元モデルによる大規模磁界解析が必須であり、また高調波損失の評価には膨大な時間ステップ数を伴う過渡解析が避けられず、結果として未知変数のみならず時間ステップ数も膨大となる。さらに、鉄損算定精度改善のためには、磁界解析で磁気ヒステリシスを直接的に考慮することが望ましい。したがって、計算精度の要求レベルが高く、かつ空間的にも時間的にも大規模問題である実規模電気機器において、磁気ヒステリシスを考慮した損失評価を実用に耐え得る計算コストで実行するための解析技術の開発が切望されていた。

2. 研究の目的

本研究では、空間的にも時間的にも大規模問題である実規模電気機器の磁気ヒステリシスを考慮した損失評価を実用に耐え得る計算コストで実行するための方策として、高並列計算環境の性能を最大限に活用可能な空間分割・時間分割併用型並列 FEM (parallel-in-space-and-time FEM: PinSTFEM) に着目する。これまでに申請者は、時間分割型並列 FEM (PinTFEM) として並列 TP-EEC 法を先進的に提案し、当該分野において国際的にも先行している。さらに、DDM に基づく PinSFEM と並列 TP-EEC 法を組み合わせた PinSTFEM を開発し、従来の並列計算技術と比較して高並列計算環境における速度向上率を大幅に改善可能であることを定量的に明らかにした。しかしながら、実規模電気機器の損失評価においてさらなる高速化と高精度化を図るためには、PinSFEM、PinTFEM それぞれの課題を解決するとともに、磁気ヒステリシスの適切な考慮法を開発し、PinSTFEM の実用性をさらに高める必要がある。そこで本研究では、(A) PinTFEM の高並列計算時における速度向上率の改善、(B) 磁気ヒステリシスを考慮した PinSTFEM の開発、(C) プロセス数増加時に劣化する PinSFEM の並列性能改善、について検討を行う。個々の課題を解決し、深化された技術を統合することにより、空間分割・時間分割併用型並列 FEM の有用性を実用レベルに引き上げることを最終目標とする。

空間分割型並列計算法と比較して時間分割型並列計算法に関する研究の歴史は浅く、特に電気機器を対象とした検討例は多くない。また、PinSTFEM は申請者らが独自に開発した新しい並列計算手法であり、電気機器を対象とした数値解析分野では国内外でも報告例はない。一般的な電磁界解析は、「時間反復」→「非線形反復」→「連立一次方程式求解」の三重ループ構造となる。空間分割型並列計算法は連立一次方程式求解部の並列化であるのに対し、時間分割型並列計算法は時間反復部を対象とした並列化であり、それぞれが対象とするループ構造(計算粒度)は大きく異なる。並列化対象が異なる2種類の並列計算法の組み合わせは、計算科学的な観点からも挑戦的な試みである。したがって、PinSTFEM の高度化は電気機器の高速高精度損失評価に寄与するのみならず、新規の並列計算法開発という意味で計算科学的観点からも有意義であり、複数の研究分野にまたがる独創性の高い研究課題だと考えられる。

3. 研究の方法

PinSTFEM は空間分割数または時間分割数を大きくするにつれて速度向上率が鈍化傾向を示し、収束性のさらなる改善が実用性向上に向けた課題である。また、電気機器の特性評価に適用するためには、鉄損算定精度の向上が必須である。これらの状況を踏まえて、本研究の目標達成に向けた問題点の明確化と解決のためのアプローチを個別テーマ毎に以下に示す。

テーマ(A): PinTFEM の高度化による PinSTFEM の速度向上率改善を目的として、並列時間周期有限要素法 (TPFEM) と DDM に基づく PinSFEM の併用、時刻区間の重複による並列 TP-EEC 法の拡張など、空間分割・時間分割併用型並列計算法の新たな定式化を試みる。

テーマ(B): ヒステリシス磁界解析では現在の磁化状態が過去の遷移に依存するため、PinTFEM に適用するためには未知変数のみならず各要素の磁化履歴も更新する必要がある。そこで、並列 TP-EEC 法より算出可能な暫定的定常状態とみなせる磁束密度の1周期波形に基づく

磁化履歴補正を PinSTFEM に適用する。

課題 (C): PinSFEM の主要な並列台数効果の阻害要因である線形反復法 (連立一次方程式の求解法) では, localized 前処理 (LP) または additive Schwarz 前処理 (ASP) が活用されている。両者とも良好な並列性能を達成可能であることが報告されているが, その性能比較に関する検討例はほとんどない。そこで, 電気機器の大規模磁界解析を例題として LP または ASP の性能比較を定量的に行い, 両者の得失を明らかにする。

4. 研究成果

(1) PinTFEM の高並列計算時の速度向上率改善による PinSTFEM の高度化

PinSTFEM の概要

図 1 (a) に, PinSTFEM の概念図を示す。プロセス数を n_P , 空間分割数を n_D , 時間分割数を n_T とし, $n_P = n_D \times n_T$ となるように n_D と n_T を決定する。また, 1 周期もしくは半周期あたりの時刻ステップ数 n_S は, n_T で割り切れるとする。各プロセスのランクを rk とするとき, 担当する時間区間を示す時間領域番号 r_T は $r_T = \lfloor rk/n_D \rfloor$, 担当する空間領域を示す空間領域番号 r_D は $r_D = rk \bmod n_D$ で表す。ここで, $\lfloor x \rfloor$ は x を超えない最大の整数を表し, $x \bmod y$ は x を y で割った余りを表す。したがって, $rk = r_D + r_T \times n_D$ である。1 周期もしくは半周期あたりの時間区間を $[t_0, t_{n_S}]$ とするとき, r_T を有する全プロセス ($0 \leq r_T \leq n_T - 1$) は時刻区間 $[t_{r_T n_S/n_T}, t_{(r_T+1)n_S/n_T}]$ を担当する。ここで, $t_i = t_0 + i\Delta t$ であり, Δt は時間刻み幅を表す。一方, DDM では解析領域を複数の小領域に分割し, 小領域毎に空間領域番号 r_D を割り当てる。

DDM と並列 TP-FEM に基づく PinSTFEM

時間分割型並列計算法として並列 TP-FEM に着目し, DDM と組み合わせた PinSTFEM を新たに開発し, DDM と並列 TP-EEC 法に基づく PinSTFEM との並列性能比較を実施した。図 1 (b) に, $n_P = 6$, $n_D = 2$, $n_T = 3$ の場合における DDM と並列 TP-FEM に基づく PinSTFEM の概念図 (ニュートン・ラフソン法により線形化された連立一次方程式) を示す。図 1 (c) に示す DDM と並列 TP-EEC 法に基づく PinSTFEM とは異なり, すべての時刻ステップにおける未知変数をまとめて連立することで計算規模を拡大し, 並列計算の粒度を大きくしている点が本手法の特徴である。しかしながら, 通信パターンは通常の並列 TP-FEM と比べて複雑化し, 特に DDM を併用した場合にブロック ILU 前処理を適用すると対角ブロック行列でも無視する非零要素が発生するため, n_D の増加に伴って反復法の収束性が劣化する可能性が高い。

図 2 (a) に示す集中巻 IPMSM を対象に, 電気機器の定常特性解析における各種並列 FEM の有効性を検証した。使用計算機は, 京都大学のスーパーコンピュータ Laurel2 である。1 ノードあたり Intel Xeon Broadwell (2.1 GHz, 18 cores) $\times 2$ で, 最大 10 ノード (360 コア) を用いて台数効果を検証した。図 2 (b) に, 各並列計算法を使用した場合の計算時間と, 並列 TP-FEM を基準

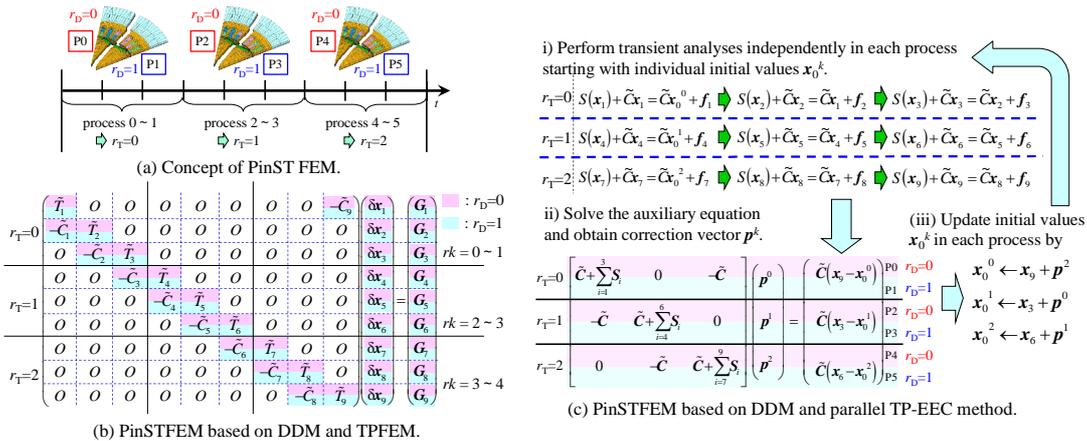


図 1 PinSTFEM の概念図 ($n_S = 9$, $n_T = 3$, $n_D = 2$)

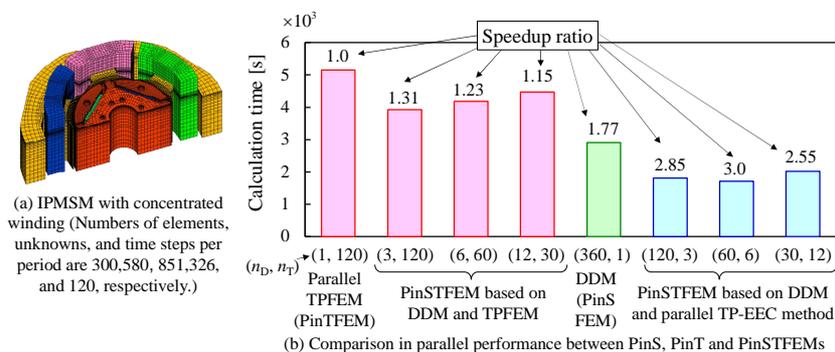


図 2 並列 FEM の性能比較

とした時の速度向上率を示す．並列 TP-FEM の単独利用時と比較して，DDM を併用することでさらなる高速化が達成されているが， n_D の増加に伴う線形反復法の収束性劣化に起因して速度改善効果が限定的であった．結果として，DDM と並列 TP-EEC 法を組み合わせた PinSTFEM の方が，高並列計算環境において優れた並列台数効果を示すことを定量的に明らかにした．

DDM と Overlapping 並列 TP-EEC 法に基づく PinSTFEM の開発

並列 TP-EEC 法において各時間区間の初期値に含まれる誤差成分を極力低減し，定常状態への収束を加速するために，分割時刻区間を重複させる overlapping 並列 TP-EEC 法を新たに開発した．図 3 (a) に，提案法の概念図を示す．並列 TP-EEC 法において独立に実行する過渡解析の時刻区間を， m ステップ分重複して各プロセスに持たせることとする．時刻区間の重複により計算コストが増加するが，過渡解析を実行する時刻ステップ数 n_S/n_T に対して重複時刻ステップ数 m は一般的に十分小さく，本手法による計算コスト増加の影響はほとんどない．

本提案手法を PinSTFEM に適用し，図 2 (a) に示す IPMSM のインバータ駆動時の永久磁石内渦電流損解析を例題として並列台数効果を検証した．使用計算機は，北海道大学のスーパーコンピュータ Grand Chariot (サブシステム A) であり，最大 256 ノード (10,240 コア) を用いて PinSTFEM の台数効果を検証した．図 3 (b) に，初期値補正による影響が顕著に現れる永久磁石渦電流損について，参照解に対する各周期内での最大相対誤差の変化を示す．重複時刻ステップ数が増加するにつれて，永久磁石渦電流損に含まれる相対誤差が減少している様子が確認できる．また，過大な m を用いても収束性改善効果は飽和するため，本研究では経験上導出した最適値として $m=4$ を採用する．図 4 に，PinSFEM および PinSTFEM の並列性能比較を示す．PinS 法の単独利用時では，プロセス数の増加に伴って速度向上率が飽和し，300 プロセス以上を用いても計算の高速化にはほとんど寄与していない．一方，overlapping 並列 TP-EEC 法と併用する場合 n_T が小さい条件でも効果的に計算時間を削減することができ 80 プロセス使用時の PinSFEM と比較して 10,240 プロセス使用時に約 51 倍の高速化を達成した．以上より，新たに開発した PinSTFEM の実機解析時における有効性が確認できる．

(2) PinSTFEM を用いたヒステリシス磁界解析

並列 TP-EEC 法より算出可能な 1 周期または半周期の磁束密度の暫定的な定常解に基づく磁化履歴補正を PinSTFEM に組み込み PinSTFEM の高度化を試みた．図 5 (a) に示す分布巻 IPMSM のインバータ駆動時のヒステリシス磁界解析における開発手法の有効性検証を行った．使用計算機は北海道大学のスーパーコンピュータ Grand Chariot (サブシステム A) であり，最大 256 ノード (10,240 コア) を用いて PinSTFEM の台数効果を検証した．図 5 (b) に，固定子ティース先端の磁束密度および磁界の強さの径方向成分によるヒステリシスループを示す．空間分割数および時間分割数の条件によらず，空間高調波やキャリア高調波に起因したリプル分含めてループ形状は非常によく一致しており，開発手法の妥当性が確認できる．図 5 (c) (d) に，PinSFEM または PinSTFEM を用いて定常解を得るまでに要した計算時間， $(n_D, n_T) = (40, 1)$ 時の計算時間を基準とした速度向上率を示す．DDM を単独利用した PinSFEM では 300 プロセス以上を用いても計算の高速化にはほとんど寄与しておらず，これ以上プロセス数を増加させても速度

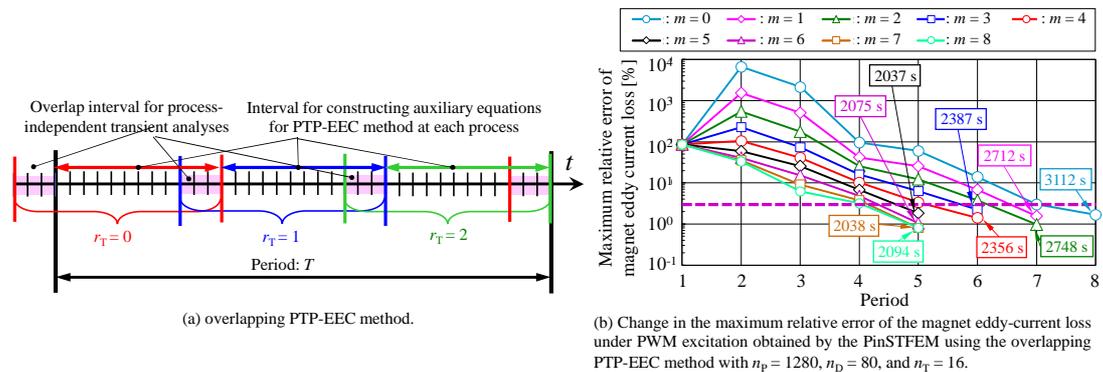


図 3 Overlapping 並列 TP-EEC 法を用いた PinSTFEM の収束性改善効果

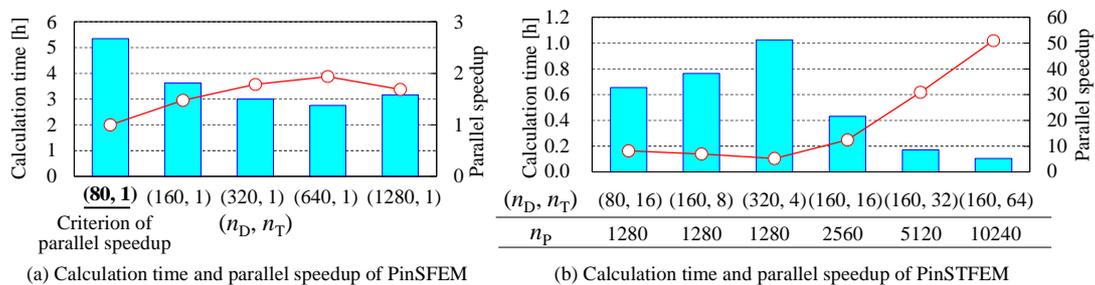


図 4 Overlapping 並列 TP-EEC 法を用いた PinSTFEM の並列性能比較

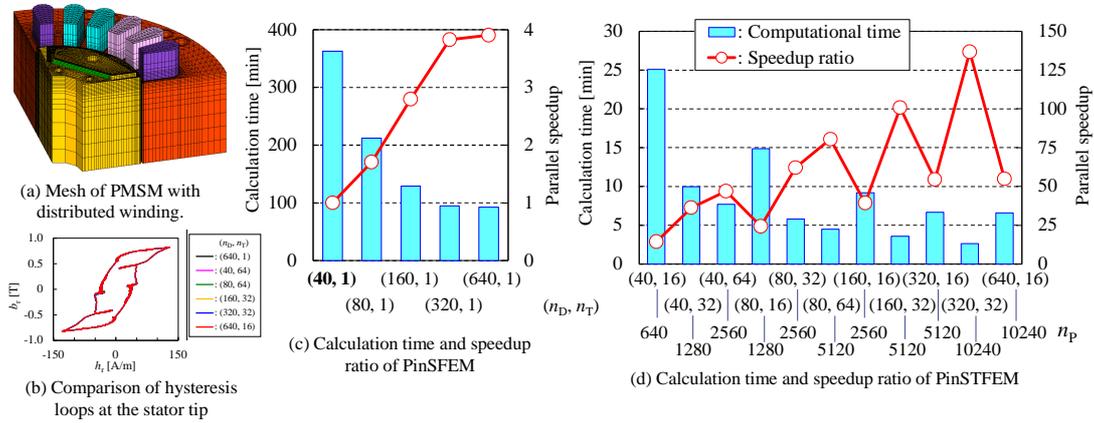


図5 ヒステリシスを考慮した PinSTFEM の有効性

向上率の改善は期待できない。一方、並列 TP-EEC 法と併用し暫定的な定常解に基づく磁化履歴補正を行う PinSTFEM の場合、 n_T が小さい条件でも効果的に計算時間を削減でき、 $(n_D, n_T) = (40, 1)$ と比較して 10,240 プロセス使用時に約 137 倍の高速化を達成した。したがって、実機を対象としたヒステリシス磁界解析においても、PinSTFEM の優れた並列化効果が確認できる。

(3) 領域分割型並列 FEM における localized 前処理と additive Schwarz 前処理の性能比較

LP の前処理行列は、自プロセスが有する対角ブロック行列のみを用いて作成し、前進・後退代入計算も自プロセス内の未知変数に対してのみ実行する。本手法の場合、プロセス数の増加に伴って前処理行列作成時に無視する非零要素が増加するため、1 反復当たりの演算量は低下するが、ICCG 法の収束性は劣化する。ASP では、プロセス間で重複する未知変数を小領域境界の未知変数に限定し、自プロセスの担当未知変数と関わる全ての非零要素を用いて前処理行列を作成する。この場合、前処理行列のサイズは増加するが、前処理行列作成時に無視する非零要素がなくなるメリットを有する。一方で、小領域境界付近の未知変数は前処理行列において複数プロセス間で重複しており、これらの未知変数に対しては前処理を重複して実行することになるため、プロセス数の増加に伴い前処理性能が劣化し、また 1 反復当たりの演算量は増大する。

図 2 (a) に示す IPMSM の非線形静磁界解析を例題として、LP および ASP2 の性能比較を行う。LP の計算には北海道大学のスーパーコンピュータ Grand Chariot (サブシステム A) を、ASP には計算科学振興財団の FOCUS F システムを用いた。なお、LP と ASP では同一のメッシュ分割図を用いているが、使用計算機やオーダリング等の条件が異なっているため、計算時間や反復回数の絶対値には差異が生じる。また、並列 FEM の性能は、一般に使用計算機の実効メモリバンド幅の影響を強く受ける。ここではプロセス数を増加させた場合の前処理性能の比較を目的としているため、主に反復回数の増加率に焦点を当てて議論を行う。図 6 に、プロセス数を変更した時の CG 法の総反復回数および計算時間の比較を示す。ASP を用いた場合、LP と比較して CG 法の総反復回数の増加率は抑制されているが、オーダリングの差異に起因して逐次計算での反復回数に差異がある。結果として LP および ASP の並列性能は優劣付け難く、PinSFEM におけるプロセス数増加時の並列性能改善法として根本的な解決策とはなっていない。今後は、スレッド並列計算を併用したハイブリッド並列化によるさらなる性能改善を検討する予定である。

(4) まとめ

本研究では、個々の課題を解決し、深化された技術を統合することで、実規模電気機器への適用に耐えうる PinSTFEM を開発し、また計算科学的な見地からも興味深い多数の知見が得られた。本研究の成果により PinSTFEM の実用化が達成され、高効率電気機器設計・開発のさらなる高度化が期待される。

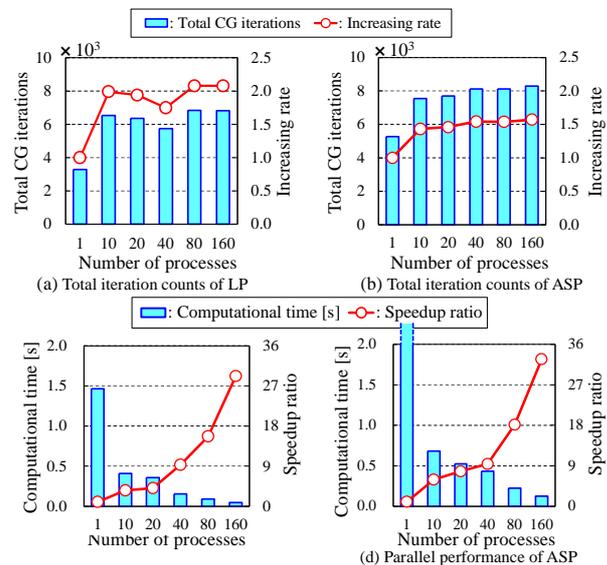


図6 PinSFEM における LP と ASP の並列性能

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 武田真帆, 高橋康人, 藤原耕二, 今盛 聡	4. 巻 141
2. 論文標題 ヒステリシス特性を考慮した変圧器用構造材およびシールド材の鉄損評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 568-575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.141.568	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 -
1. 著者名 Hiroyuki Kaimori, Yasuhito Takahashi, Shinji Wakao	4. 巻 11
2. 論文標題 Steady-State Analysis of Electric Machines Using TP-EEC Method Based on Time-Periodic Condition in Rotational Reference Frame	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 458-466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21008445	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 -
1. 著者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima	4. 巻 57
2. 論文標題 Comparison of Parallel-in-Space-and-Time Finite-Element Methods for Magnetic Field Analysis of Electric Machines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3064320	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 -
1. 著者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, and Takeshi Iwashita	4. 巻 42
2. 論文標題 Parallel-in-space-and-time finite-element analysis of electric machines using time step overlapping in a massively parallel computing environment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 449 ~ 462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/COMPEL-04-2022-0161	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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 井口達馬, 高橋康人, 藤原耕二, 今盛 聡
2. 発表標題 変圧器の漂遊損評価に関する検討 タンクおよびタンクシールドを模擬した簡易モデルの損失評価
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 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Performance Evaluation of Parallel-in-Space-and-Time Finite-Element Analysis of Electric Machines based on Domain Decomposition and Parallel TP-EEC Method in Massively Parallel Computing Environment
3. 学会等名 International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2021) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井口達馬, 高橋康人, 藤原耕二
2. 発表標題 平角線コイルベンチマークモデルの銅損評価に関する検討
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 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima
2. 発表標題 Parallel-in-space-and-time Finite-element Analysis of Electric Machines using Domain Decomposition and Time-periodic Finite-element Method
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Kaimori and Yasuhito Takahashi
2. 発表標題 Steady-state Analysis of Electric Machines Using TP-EEC Method Based on Time-periodic Condition in Rotational Reference Frame
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋康人, 藤原耕, 岩下武史
2. 発表標題 領域分割と並列TP-EEC法に基づく空間分割・時間分割併用型並列有限要素法を用いた大規模磁界解析の高並列計算環境下での性能評価
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 武田真帆, 高橋康人, 藤原耕二, 今盛 聡
2. 発表標題 ヒステリシス特性を考慮した変圧器用構造材およびシールド材の鉄損評価に関する検討
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 梶原千聖, 高橋康人, 藤原耕二
2. 発表標題 LLG方程式を用いた準直流ヒステリシス特性の推定に関する検討
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 リュハクトウ, 高橋康人, 藤原耕二, 今盛 聡
2. 発表標題 変圧器の漂遊損評価に関する検討 (その2) タンクおよびフレームを模擬した空芯コイルモデルの損失評価
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 空間分割・時間分割併用型並列有限要素法を用いた電気機器のヒステリシス磁界解析に関する検討
2. 発表標題 高橋康人, 藤原耕二, 岩下武史
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋康人, 貝森弘行, 藤原耕二, 岩下武史
2. 発表標題 領域分割型並列有限要素磁界解析における localized 前処理と additive Schwarz 前処理の性能比較
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Parallel-in-Space-and-Time Finite-Element Method for Time-Periodic Magnetic Field Problems with Hysteresis
3. 学会等名 International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------