

令和 2 年 5 月 6 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06323

研究課題名(和文) 電気機器高精度損失評価への応用へ向けた領域分割・時間分割併用型並列電磁界解析法

研究課題名(英文) Parallel-in-Space-Time Electromagnetic Field Analysis of Electric Machines for Accurate Loss Estimation

研究代表者

高橋 康人 (Takahashi, Yasuhito)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：90434290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、包含される物理現象が複雑で、要求される計算精度も厳しい実規模電気機器を対象とした実用的な損失評価法として、空間分割型並列計算法と時間分割型並列計算法を融合し両者の特長を活かした新しい並列有限要素法の構築を行った。開発手法を、三相三脚変圧器の漂遊負荷損評価、インバータ駆動永久磁石モータの鉄損評価、かご形誘導電動機の始動特性評価などの電気機器解析に適用し、従来法と比較して格段に高速化が達成可能であることを定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発された領域分割・時間分割併用型並列有限要素法は、従来から用いられていた空間的並列計算と、本質的に並列処理に不向きとされていた時間方向の並列計算を組み合わせ構築しており、計算科学的にも画期的な数値計算法である。また、実規模電気機器への使用に耐えうる実用性の観点から、定常特性評価と過渡特性評価それぞれに適用可能な領域分割・時間分割併用型並列有限要素法を開発した。本手法により、並列磁界解析に基づく電気機器の特性評価の信頼性や実用性がさらに一歩前進し、高効率電気機器設計に大きく寄与すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The goal of this project is to develop a parallel-in-space-time finite-element method (FEM) for analyzing practical electric machines. Although the domain decomposition method (DDM) is suitable for solving large-scale problems and the parallel-in-time (PinT) integration method such as a parallel time-periodic explicit-error-correction (TP-EEC) method and Parareal is effective for problems with a large number of time steps, their parallel performances get saturated as the number of processes increases. To overcome the difficulty, the hybrid approach in which both the DDM and PinT integration methods are used was investigated. The effectiveness of the developed methods was demonstrated in magnetic field analyses of practical electric machines. As a result, the developed method can achieve further parallel speedup compared with solely using the DDM or PinT integration method even in highly parallel computing environment.

研究分野：電気機器工学

キーワード：電気機器 並列計算 有限要素法 磁気特性 鉄損 高効率化 ヒステリシス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 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、国内外で高効率規制が進むなど、高性能化・省エネルギー化への要求が一段と厳しくなりつつある。このような状況下において、電気機器のさらなる高効率化を達成するためには、機器内における複雑な物理現象を適切に把握し、損失の発生場所と原因を精度よく評価することが必要不可欠である。そのための手段として、磁界解析に基づく機器特性評価が広く行なわれている。

例えば変圧器設計においては、鉄心接合部のような微細構造、鉄心当て板や鉄心支え、タンクやタンクシールドなど周辺構造材を含めた損失の詳細な要因分析が行なわれている。また、準直流電流である地磁気誘導電流を原因とする励磁電流の増加や漏れ磁束増大による周囲構造物の損失増加を検討するためには、直流偏磁下での磁界解析が必要となる。しかしながら、積層鉄心や周囲構造物といった微細構造のモデル化は、計算コストの観点から容易ではない。また、変圧器の時定数は大きいため数値誤差成分の減衰が遅く、特に直流偏磁下では定常解を得るまでに多くの時間ステップ数が必要となる。一方、回転機の機器特性を精確に評価するためには、固定子・回転子端部を適切に考慮した三次元磁界解析が望ましい。特に、スキュー構造を有する回転機では軸方向に磁束分布が変化するため、本質的に三次元解析が不可欠となる。また、回転子・固定子のスロット高調波やインバータのキャリア高調波により機内に発生する損失を評価するためには、細かい時間分割幅で非線形過渡磁界解析を行う必要がある。しかし、時間軸方向に多大なステップ数を要する回転機の三次元解析は、膨大な計算時間が必要となる。すなわち、電気機器のさらなる高効率化・高性能化を目指すためには、機器の端部形状、積層鉄心の微細構造、周囲構造物の三次元モデル化が必須であり、また直流偏磁下特性や機内高調波損失の評価のため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、空間的・時間的大規模問題を実用に耐えうる計算コストで求解できる磁界解析技術の確立が求められていた。

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、複雑かつ大規模な実規模問題の求解のためには、並列計算技術の導入は不可欠と考えられる。当該分野においても、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大規模磁界解析が普及しつつある。さらに、大規模問題においても定常機器特性を効率的に求解するために、定常解高速求解法である TP-EEC 法と領域分割型並列有限要素法 (FEM) の組み合わせが検討され、従来と比較して大幅な高速化が達成されている。しかし、直流偏磁下の大規模変圧器解析やインバータ駆動モータの大規模損失解析などにおいては、定常状態到達に至るまでの時間ステップ数の多さに起因して、実用的な計算時間内での求解には従来の空間的並列計算手法のみでは限界があった。

### 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、空間的・時間的大規模問題である電気機器の高速高精度な損失評価を目的として、領域分割・時間分割併用型並列磁界解析法の開発を目指す。図 1 に、本研究の位置づけと開発目標を示す。膨大な未知変数を有する大規模問題に有効な空間的並列計算法と、定常特性を得るまでに膨大な時間ステップ数を要する問題に有効な時間的並列計算法を融合し、両者の長所を活かした新しい並列磁界解析技術を構築する。

一般的な電磁界解析は、時間反復-非線形反復-連立一次方程式の 3 重ループ構造となる。領域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 FEM は時間反復を対象とした並列化であり、両並列計算手法が対象とするループ構造 (計算粒度) は大きく異なる。電気機器設計分野では、非線形磁気特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 FEM が一般的に用いられているが、非要素位置が不規則でスパースな係数行列を扱うため、計算時間はメモリスループットの影響を大きく受け、また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。しかし、上記 3 重ループ構造での並列化対象が異なる領域分割型と時間分割型の並列計算法を併用することで高並列計算時における並列化効率を改善できる可能性があり、従来法と比較して大幅な計算速度の向上が期待できる。また、時間反復は本質的に逐次的な処理であるため時間分割型並列計算法に関する検討例は少なく、領域分割型並列 FEM との併用例は少なくとも電磁界解析分野では報告がない。したがって、領域分割・時間分割併用型並列 FEM の開発は、電気機器設計の効率化に寄与するのみならず計算科学的観点からも有意義である。最終的に、空間的・時間的大規模問題である実規模電気機器の高精度損失評価に適用し、本開発手法を実用化レベルにまで引き上げることを目標とする。

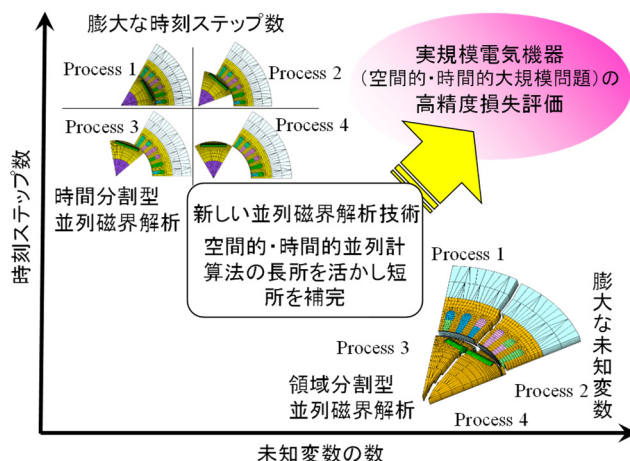


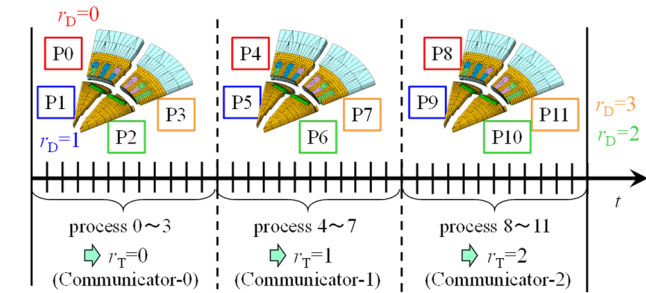
図 1 本研究課題の位置づけと目標

### 3. 研究の方法

#### (1) 定常状態解析に適した領域分割・時間分割併用型並列磁界解析法

本手法では、空間的並列計算法として領域分割法 (DDM), 時間的並列計算法として時間分割数が少ない場合でも大きな速度向上効果が期待できる並列化 TP-EEC 法を採用する. DDM では、解析領域を複数の小領域に分割し、複数のプロセスを用いて連立一次方程式を並列に求解する. 一方、TP-EEC 法は、解析対象が有する空間的周期性や電磁現象の時間的周期性に着目して、減衰の遅い数値的な過渡現象を取り除く方法である. あらゆる時間周期波形は、時間ステップの並替え操作により任意の多相交流時間周期性を有する問題に変換できる. そこで並列化 TP-EEC 法では、各プロセスにそれぞれ初期値を与え、過渡解析を独立に実行する. 上記並び替え操作により多相交流時間周期問題と解釈することで、各プロセスで独立に得られた過渡解に多相交流 TP-EEC 法を適用し、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て補正する. この補正を繰り返し、最終的に定常解を算出する.

図 2 に、DDM と 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 の概念図を示す. 空間分割数を  $n_D$ , 時間分割数を  $n_T$  (したがって、プロセス数  $n_p = n_D \times n_T$ ) とし、1 周期もしくは半周期あたりの時刻ステップ数  $n_s$  は  $n_T$  で割り切れるものとする. また、 $l = n_s / n_T$  は各プロセスに割り当てられる時刻ステップ数である. 各プロセスのランクを  $rk$  とするとき、担当時間区間  $r_T$  は  $r_T = \lfloor rk / n_D \rfloor$  で表し、担当する領域  $r_D$  は  $r_D = rk \bmod n_T$  で表すものとする. 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ものとする. したがって、 $rk = r_D + r_T \times n_T$  である. 各ランクが担当する時間区間での過渡解析を領域分割型 FEM で実行し、多相交流 TP-EEC 法による補正量算出時には大次元の連立一次方程式を  $n_p$  プロセスで求解することになる.



(a) 領域分割型 FEM による過渡解析

$r_T=0$	$\tilde{C}_3 + \sum_{i=1}^3 S_i$	0	$-\tilde{C}_3$	$\begin{pmatrix} p^0 \\ \vdots \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tilde{C}(x_6) - \tilde{C}(x_0^0) \\ \vdots \end{pmatrix}$	P0 P1 P2 P3	$r_D=0$
$r_T=1$	$-\tilde{C}_6$	$\tilde{C}_6 + \sum_{i=4}^6 S_i$	0	$p^1$	$\begin{pmatrix} \tilde{C}(x_9) - \tilde{C}(x_0^1) \\ \vdots \end{pmatrix}$	P4 P5 P6 P7	$r_D=1$
$r_T=2$	0	$-\tilde{C}_9$	$\tilde{C}_9 + \sum_{i=7}^9 S_i$	$p^2$	$\begin{pmatrix} \tilde{C}(x_{12}) - \tilde{C}(x_0^2) \\ \vdots \end{pmatrix}$	P8 P9 P10 P11	$r_D=2$ $r_D=3$

(b) TP-EEC 法による誤差修正

図 2 DDM と TP-EEC 法に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM の概念図

#### (2) 過渡現象解析に適した領域分割・時間分割併用型並列磁界解析法

本手法では、空間的並列計算法として領域分割法 (DDM), 時間的並列計算法として過渡現象を対象とした並列時間積分法として様々な分野で用いられている Parareal を採用する. Parareal では、細かい時間刻み幅  $\delta t$  を有する時間積分を並列に実行し、逐次的に実行する粗い時間刻み幅  $\Delta t$  を有する時間積分と組み合わせることで、効率的に過渡現象解析を実行することができる.

図 3 に、Parareal と領域分割法に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM の概念図を示す. 各ランクが担当する時間区間での過渡解析を領域分割型並列 FEM で実行し、各時刻区間の初期値を Parareal のアルゴリズムに基づいて更新する.

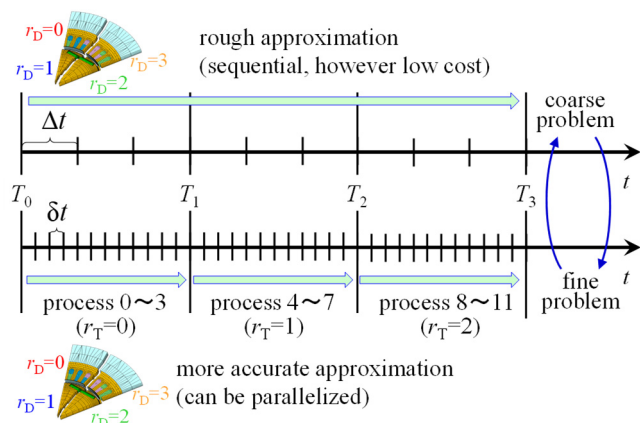


図 3 DDM と Parareal に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM の概念図

#### (3) かご形誘導電動機のための多相交流時間周期条件を考慮した時間分割併用型並列計算法

領域分割・時間分割併用型並列磁界解析法を構成する並列化 TP-EEC 法について、その適用範囲を拡大するため、定式化に多相交流時間周期条件を導入し、インバータ駆動かご形誘導電動機の磁界解析における実用性を検証する. また、非線形磁気特性を考慮した時間調和渦電流解析法 (非線形  $j\omega$  法) から求めた解を時間分割型並列有限要素法の初期値として採用し、収束性改善効果を検証する.

#### 4. 研究成果

##### (1) DDM と TP-EEC 法に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM の性能評価

実規模レベルの電気機器として、図 4 に示すインバータ駆動埋込磁石同期モータを例題とし、高並列計算環境下における空間分割・時間分割併用型並列有限要素法の性能評価を実施した。基本波周波数は 50 Hz、インバータの直流電圧は 200 V、キャリア周波数は 4.95 kHz とし、変調方式として空間ベクトル法を用いた。要素数は 302,516、未知変数は回路方程式も含めて 956,695 である。1 周期あたりの時間分割数は、キャリア高調波を考慮するために 1024 ステップとした。本モデルでは、並列化 TP-EEC 法の補正（数値的過渡現象の除去）が 1 周期ごとに実行される。使用計算機は、北海道大学のスーパーコンピュータ Grand Chariot であり、最大 256 ノード（10240 コア）を用いて台数効果を検証した。 $(n_D, n_T) = (1280, 1)$  の条件下で最終的に得られた定常解を参照解とし、1 周期すべての時刻ステップにおいてトルク、磁石中の渦電流損および相電流の誤差が参照解に対して 3% 以内になった時点で定常解が得られたと判断した。

表 1 に、定常解を得るまでに要した周期数、定常解を得るまでに要した計算時間、領域分割法の単独利用で 80 プロセス使用時  $((n_D, n_T) = (80, 1))$  の計算時間を基準とした速度向上率を示す。また、図 5 に、各  $(n_D, n_T)$  の組み合わせにおける U 相電流の参照解に対する誤差率の変化を示す。いずれの条件においても、TP-EEC 法の補正を繰り返す度に参照解に漸近していき、表 1 に示す通り、5、6 回の補正で定常状態が得られている。領域分割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ており、300 プロセス以上を用いてもほとんど計算の高速化には寄与していない。一方、時間分割型並列有限要素法と併用する開発法の場合、 $n_T$  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、特に高並列計算環境時における開発手法の有効性が確認できる。

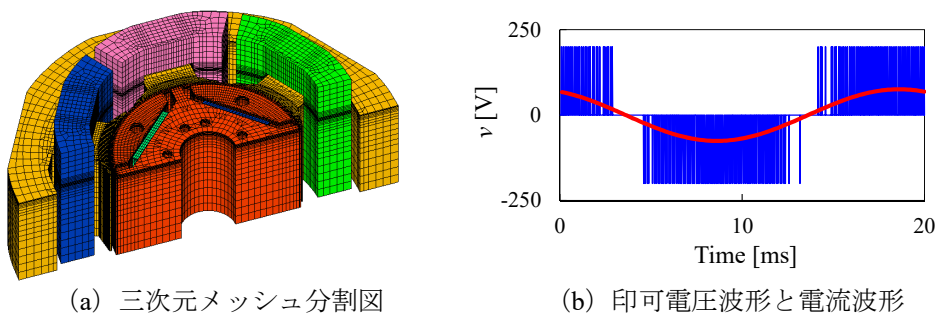


図 4 インバータ駆動 IPM モータ

表 1 計算時間と速度向上率

$n_P$	$(n_D, n_T)$	Elapsed time [s]	Speedup ratio
80	(80, 1)*	39856.5	1.0
160	(160, 1)*	23346.8	1.71
320	(320, 1)*	17167.9	2.32
640	(640, 1)*	15222.9	2.62
1280	(1280, 1)*	17868.8	2.23
1280	(320, 4)	5765.4	6.91
1280	(160, 8)	4777.5	8.34
1280	(80, 16)	4291.0	9.29
2560	(160, 16)	2402.8	16.59
5120	(160, 32)	1101.2	36.19
10240	(160, 64)	540.0	73.81

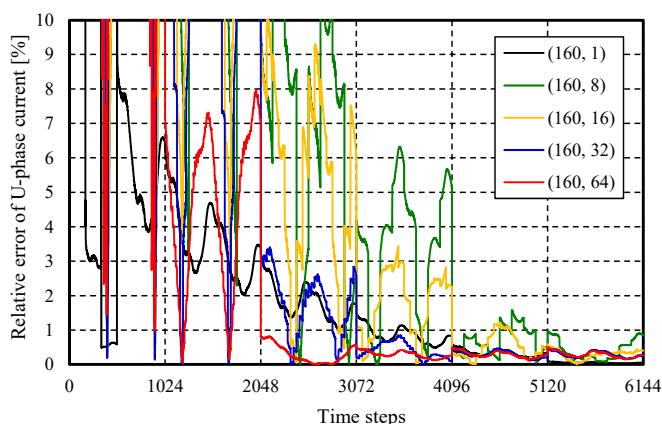


図 5 相電流の時間変化

\* Simplified polyphase TP-EEC method is used.

##### (2) DDM と Parareal に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM の性能評価

図 6 に示すかご形誘導電動機モデルの全電圧始動時の過渡特性解析を対象として、各種並列計算法の並列台数効果を検証する。要素数は 13,198、未知変数の個数は回路方程式も含めて 12,705 である。印加電圧は、実効値 100 V、周波数 50 Hz の正弦波電圧とした。Parareal の設定として、細かい時間刻み幅は  $\delta t = 5.55 \times 10^{-5}$  (1 周期を 360 分割)、 $\Delta t = 108 \delta t$  とした。また、すべての計算で、80 ms 間 (1,440 ステップ (4 周期)) の過渡解析を行った。解析には、京都大学のスーパーコンピュータ Laurel 2 を使用した。1 ノードあたり Intel Xeon Broadwell (2.1 GHz, 18 cores)  $\times 2$  で、最大 12 ノード (432 コア) を用いて台数効果を検証した。通常の過渡解析により得られ

た解を参照解として、Parareal 使用時には全時刻ステップで渦電流損瞬時値の参照解との差異が 5% 以下となった時点で収束解が得られたと判断した。

表 2 に、Parareal および領域分割型 FEM の単独利用時において収束解が得られるまでに要した計算時間 (4 反復分) および逐次計算に対する速度向上率を示す。Parareal ではプロセス数を増加させるにつれて速度向上率は向上しているが、その計算時間削減効果は使用プロセス数と比較して大きくない。本例題においては領域分割型並列 FEM の方が Parareal と比べて良好な速度向上率を達成しているが、小規模問題であるため 72 並列程度で飽和しており、領域分割型 FEM の単独利用によるこれ以上の高速化は困難である。表 3 に、Parareal と領域分割法を組み合わせた時間分割・空間分割併用型並列 FEM において、収束解が得られるまでに要した計算時間 (4 反復分) および逐次計算に対する速度向上率を示す。Parareal または領域分割型並列 FEM の単独利用時には高速化が困難であったプロセス数においても、両者を組み合わせることでさらなる高速化が達成されており、開発手法の有効性が確認できる。図 7 に、DDM と Parareal に基づく空間分割・時間分割併用型並列 FEM により求めたトルクの時間変化を示す。同図凡例の括弧内の数値は、空間分割数および時間分割数 ( $n_D, n_T$ ) を表す。プロセス数によらず通常の過渡解析より求めた参照解と一致する解が得られており、開発手法の妥当性が確認できる。また、表 3 に、Parareal と領域分割法を組み合わせた時間分割・空間分割併用型並列 FEM を三次元解析 (要素数は 355,124, 未知変数の個数は回路方程式も含めて 1,066,676) に適用した結果を示す。三次元解析では未知変数の個数が多いため、本検討で使用したプロセス数の範囲では領域分割法による高速化効果が大きく、Parareal と領域分割法の併用法は必ずしも効果的ではない。

表 2 Parareal および領域分割型 FEM の計算時間

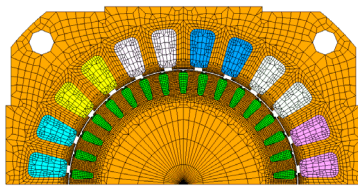


図 6 かご形誘導電動機モデル

Parareal			DDM		
$n_p$ (= $n_T$ )	Computational time [sec]	Parallel speedup	$n_p$ (= $n_D$ )	Computational time [sec]	Parallel speedup
1	3672.5	1.0	1	3672.5	1.0
18	1722.4	2.13	18	499.4	7.35
36	1263.4	2.91	36	394.5	9.31
72	1081.5	3.40	72	365.2	10.06
144	1046.4	3.51	144	430.3	8.54

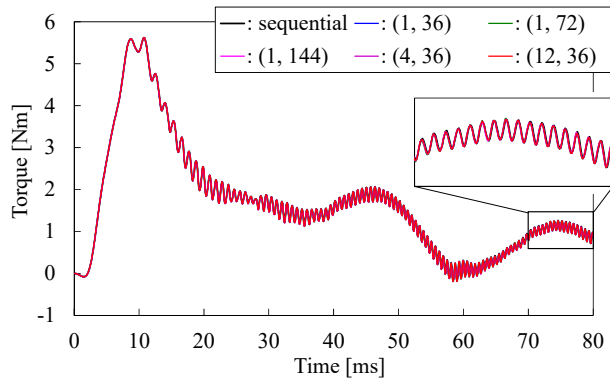


図 7 トルクの時間変化

表 3 DDM と Parareal の併用法の計算時間

		$(n_D, n_T)$	Computational time [sec]	Parallel speedup
2-D		(8, 18)	423.6	8.67
		(4, 36)	512.9	7.16
		(8, 36)	322.8	11.38
		(12, 36)	247.3	14.85
3-D		(432, 1)	9140.6	1.0
		(72, 6)	25280.0	0.36

(3) かご形誘導電動機のための多相交流時間周期条件を考慮した並列化 TP-EEC 法の性能評価

図 6 に示す解析モデルを対象として、多相交流時間周期条件を導入した並列化 TP-EEC 法の有効性検証を行う。表 4 に、トルク、二次導体における渦電流損および相電流の参照解との差異が半周期内のすべての時刻ステップにおいて 1% 以下の解が得られるまでに要した計算時間と簡易 TP-EEC 法を用いた逐次計算に対する速度向上率を示す。並列化 TP-EEC 法は、各プロセスにより独立に実行する過渡解析と多相交流 TP-EEC 法による誤差修正の 2 段階で構成されるが、プロセス数が増加するにつれて前者の計算コストは減少し、後者の計算コストが増加する。これらのトレードオフ関係から、逐次計算と比べて最も高速な計算が実施可能なプロセス数は 128 プロセスであり、簡易 TP-EEC 法により高速化されている逐次計算と比べて、さらに約 23 倍の高速化が実現できていることから、その有効性が確認できる。

表 4 並列化 TP-EEC 法の計算時間

$n_p$	Calculation time [sec]	Parallel speedup
16	1294.4	4.78
32	452.7	13.68
64	304.0	20.37
128	267.5	23.14
256	304.5	20.33
Simplified TP-EEC (sequential)	6190.8	1.0

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima	4. 巻 56
2. 論文標題 Parallel TP-EEC Method Based on Polyphase Time-Periodic Condition for Magnetic Field Analysis of Induction Motors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2019.2950100	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 38
2. 論文標題 Parallel Finite-element Method Using Domain Decomposition and Parareal for Transient Motor Starting Analysis	5. 発行年 2019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 1507-1520
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/COMPEL-12-2018-0516	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 55
2. 論文標題 Parallel Finite-element Method Based on Space-time Domain Decomposition for Magnetic Field Analysis of Electric Machines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2019.2895590	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 Naoki Minowa, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Akira Ahagon, and Tetsuji Matsuo	4. 巻 59
2. 論文標題 Dynamic Hysteresis Modeling of Silicon Steel Sheet Considering Excess Eddy-current Loss	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 217-226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/JAE-171008	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 Naoki Minowa, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara	4. 巻 55
2. 論文標題 Iron Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Dynamic Hysteresis Model Represented by Cauer Circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2902428	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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima
2. 発表標題 Parallel TP-EEC Method Based on Polyphase Time-Periodic Condition for Magnetic Field Analysis of Induction Motors
3. 学会等名 International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋康人, 藤原耕二, 岩下武史, 中島 浩
2. 発表標題 領域分割法と時間周期有限要素法に基づく空間分割・時間分割併用型並列有限要素法
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳増 正, 松下真琴, 高橋康人, 藤原耕二, 若尾真治
2. 発表標題 電磁界解析の先進技術応用に残された課題 TP-EEC法に関するいくつかのアイデア
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 貝森弘行, 高橋康人
2. 発表標題 同期回転座標系での時間周期条件に基づくTP-EEC法を用いた周期定常解析の高速化
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 高橋康人, 藤原耕二, 徳増 正, 岩下武史, 中島 浩
2. 発表標題 領域分割法とParareal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電気機器の大規模磁界解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima
2. 発表標題 Parallel Finite-element Method Using Domain Decomposition and Parareal for Transient Motor Starting Analysis
3. 学会等名 International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoya Watanabe, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara
2. 発表標題 Finite-element Analysis of Reactor Using Dynamic Hysteresis Modeling of Soft Magnetic Composites Based on Cauer Ladder Network
3. 学会等名 International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Naoki Minowa, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara
2. 発表標題 Iron Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Dynamic Hysteresis Model Represented by Cauer Circuit
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Takeshi Iwashita, and Hiroshi Nakashima
2. 発表標題 Parallel Finite-element Method Based on Space-time Domain Decomposition for Magnetic Field Analysis of Electric Machines
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊直也, 高橋康人, 藤原耕二
2. 発表標題 等価回路を用いた磁気特性モデリングに基づく圧粉磁芯の有限要素解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Minowa, Yasuhito Takahashi, and Koji Fujiwara
2. 発表標題 Magnetic Field Analysis of Window-shaped Core for Verifying Accuracy of Isotropic Vector Hysteresis Model
3. 学会等名 International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoki Minowa, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Akira Ahagon and Tetsuji Matsuo
2. 発表標題 Dynamic Hysteresis Modeling of Silicon Steel Sheet Considering Excess Eddy Current Loss
3. 学会等名 International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋康人, 藤原耕二, 徳増 正, 岩下武史, 中島 浩
2. 発表標題 多相交流時間周期条件を導入した並列化TP-EEC法によるかご形誘導電動機の時間分割型並列有限要素磁界解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊直也, 高橋康人, 藤原耕二, 堺 香代, 島津英一郎
2. 発表標題 Cauer回路を用いた圧粉磁芯の磁気特性モデリングに関する基礎的検討
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北尾純士, 高橋康人, 藤原耕二, 阿波根明, 松尾哲司, 大穀晃裕
2. 発表標題 ヒステリシス特性を考慮した埋込磁石同期モータの有限要素磁界解析 (その2)
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋康人, 藤原耕二, 岩下武史, 中島 浩
2. 発表標題 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大規模磁界解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Takahashi
2. 発表標題 Parallel-in-Time Magnetic Field Analysis of Electric Machines Based on Time-Periodic Finite-Element Method and Time-Periodic Explicit Error Correction Method
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 袁輪直紀, 高橋康人, 藤原耕二
2. 発表標題 Cauer回路に基づく後処理鉄損評価法の埋込磁石同期モータへの適用
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----