

平成30年度北海道大学情報基盤センター萌芽型共同研究成果報告書

1. 研究類型 A)計算資源利用型
2. 研究課題名 空間分割・時間分割併用型並列有限要素法による電気機器の大規模磁界解析
3. 研究期間 平成30年12月18日 ~ 平成31年 3月31日

4. 研究代表者

氏名	所属機関・部局名	職名	備考
高橋 康人	同志社大学 理工学部 電気工学科	准教授	

5. 研究分担者

氏名	所属機関・部局名	職名	備考
岩下 武史	北海道大学 情報基盤センター	教授	

6. 共同研究の成果

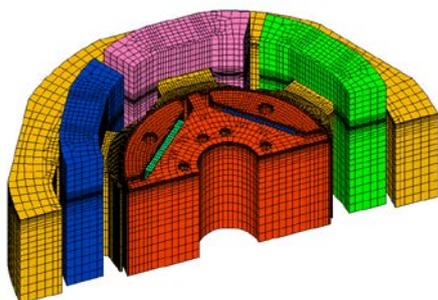
下欄には、当該研究期間内に実施した共同研究の成果について、その具体的内容、意義、重要性等を、共同研究申請書に記載した「研究目的」と「研究計画・方法」に照らし、800字~1,000字で、できるだけ分かりやすく記載願います。文章の他に、研究成果を端的に表す図表を貼り付けても構いません。なお、研究成果の論文・学会発表等を行った実績（発表等の予定を含む。）があれば、あわせて記載して下さい。

電気機器のさらなる高効率化を達成するためには、積層鉄心の端部・微細構造、さらには周囲構造物も含めた詳細モデルを用いて、各種損失の高精度な定量的評価や精確な要因分析をすることが不可欠である。その際、機器内高調波による損失を適切に表現する必要がある、十分小さい時間刻み幅を使用しなければならない。結果として、実規模電気機器の磁界解析では、未知変数のみならず時間ステップ数も膨大となる。このような実規模問題に対して現状では領域分割型並列有限要素法が適用されているが、空間的にも時間的にも大規模な実規模問題に対する速度改善効果には限界があり、さらなる性能向上が求められていた。そこで本研究では、空間的にも時間的にも大規模な電気機器解析への応用に向けて、空間的並列計算法と時間的並列計算法の特長を活かした新しい並列有限要素法の開発・実用化を目指す。

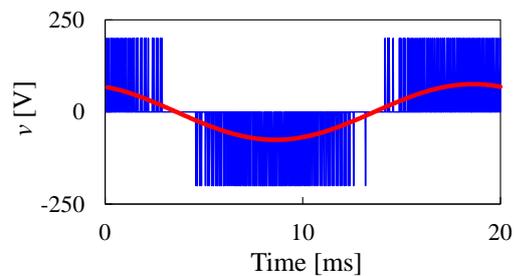
電気機器を対象とした一般的な電磁界解析は、「時間反復」→「非線形反復」→「連立一次方程式求解」の三重ループ構造となる。領域分割型並列計算法は連立一次方程式求解部の並列化であるのに対し、時間分割型並列有限要素法は時間反復（時間積分）部を対象とした並列化であり、両並列計算手法が対象とするループ構造（計算粒度）は大きく異なる。並列化対象が異なる2種類の並列計算法を組み合わせることで、高並列計算環境下における並列化効率が改善され、従来法と比較して大幅な計算速度の向上が期待できる。開発手法では、空間的並列計算法として回転子の移動を考慮した領域分割型並列有限要素法を採用し、時間的並列計算法としては時間周期場を想定して並列化 TP-EEC 法を採用する。実規模レベル電気機器として図1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. 積層構造を模擬するために, 固定子および回転子鉄心には均質化法を適用した, また, 永久磁石と回転子鉄心の間にギャップ要素と二重節点を配置し, 磁石と回転子鉄心間の微小ギャップによる磁気抵抗と電気的な絶縁をモデル化した. 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 (サブシステム A) 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. ここで, n_D, n_T は空間分割数および時間分割数を表し, プロセス数 $n_p = n_D \times n_T$ である.

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 2 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. なお, 本報告書において詳細は割愛するが, 並列化 TP-EEC 法の補助方程式の収束判定には改善の余地があり, 今後詳細に検討していく予定である.



(a) メッシュ分割図 (1/4 モデル, 空気部は除く)



(b) PWM 電圧波形

図 1 インバータ駆動埋込磁石同期モータ

表 1 計算時間と速度向上率

n_p	(n_D, n_T)	Periods	Calculation time [s]	Speedup ratio
80	(80, 1)*	4	39856.5	1.0
160	(160, 1)*	4	23346.8	1.71
320	(320, 1)*	4	17167.9	2.32
640	(640, 1)*	4	15222.9	2.62
1280	(1280, 1)*	4	17868.8	2.23
1280	(320, 4)	5	5765.4	6.91
1280	(160, 8)	6	4777.5	8.34
1280	(80, 16)	5	4291.0	9.29
2560	(160, 16)	5	2402.8	16.59
5120	(160, 32)	4	1101.2	36.19
10240	(160, 64)	3	540.0	73.81

* Simplified polyphase TP-EEC method is used.

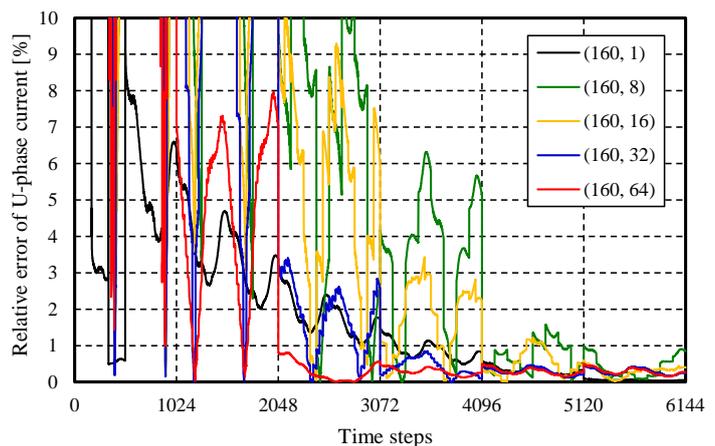


図 2 相電流の時間変化

開発手法により高並列計算時における並列化効率が本質的に改善され, 領域分割型有限要素法の単独利用と比較して大幅な計算速度向上を達成した. 本研究の成果により, 機器内損失の発生個所と要因を高速・高精度に把握できるようになり, 高信頼度の磁界解析技術に基づく高効率電気機器開発に大きく寄与すると考えられる.