

JH160027-NAJ

階層分割型数値計算フレームワークを用いた 3 次元電磁界解析の高速化研究

杉本振一郎（諏訪東京理科大学工学部機械工学科）

概要 本研究では、演算カーネルに係数が複素数となる疎行列ベクトル積を持つ並列電磁界解析ソルバ ADVENTURE_Magnetic の高速化を行うため、問題規模・並列台数を変えた数値実験を通して大規模電磁界解析の性能向上に向けた問題点の洗い出しを行い、それらを改善することで最終的にピーク性能比 10%程度を目指している。計画に沿って、これまでにウィークスケーリングによる性能評価を行い、複素数演算のチューニングを進めている。様々な検討の結果、FX10 の全ノードを用いて 300 億自由度の高周波電磁界解析を 19 分で行うことに成功した。今後はさらにチューニングを進めていき、ピーク性能比 10%を目指していく。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学

名古屋大学

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

杉本振一郎（諏訪東京理科大学工学部機械工学科）：全体統括，並列化コーディング，物理モデル開発

荻野正雄（名古屋大学情報基盤センター大型計算支援環境研究部門）：階層領域分割型ソルバーライブラリの開発，並列化性能評価

塩谷隆二（東洋大学総合情報学部総合情報学科）：階層領域分割型ソルバーライブラリの開発，連続体力学向け DSL の開発

金山寛（日本女子大学理学部数物科学科）：物理モデルの開発

河合浩志（諏訪東京理科大学工学部コンピュータメディア工学科）：連続体力学向け DSL の開発，高速化

武居周（宮崎大学工学教育研究部電気システム工学科）：物理モデルの開発，並列化性能評価

片桐孝洋（名古屋大学情報基盤センター大型計算支援環境研究部門）：高速化

2. 研究の目的と意義

(ア) 研究の目的

近年、変圧器や回転機などの各種産業用機器、電車内などの環境中における電磁界解析を効率的に行うために有限要素法が広く用いられるようになってきた。しかし、電磁界解析分野はその問題の複雑さから、構造解析分野などに比べて分散並列化や高速化の研究が十分ではなく、インフラとして整備されつつあるスーパーコンピュータを活用しきれていないのが現状である。よって、有限要素法による 3 次元電磁界解析の HPC 利用技術が確立されることは、特に産業界において高く期待されている。そこで我々は大规模数値計算システムの基盤技術として、塩谷・荻野らによって有限要素法による構造解析分野向けに開発されてきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層分割型数値計算フレームワークの研究開発を行っている。階層型領域分割法は Glowinski らが提案した領域分割法を分散メモリ型並列計算機環境に効率よく実装する手法であり、大規模問題を高い並列効率で数値計算できる手法として知られている。本研究では、主に通常の節点要素や実数向けに開発されてきた階層分割型数値計算フレームワークを、電磁界解析などに出てくる辺要素や複素数を用いた数値計算にも対応させ、3 次元電磁界解析向けの並列有限要素解析ソルバとして整備し、ソルバ全体での演算効率・並列効率を向上させることを目標とする。

我々は階層分割型数値計算フレームワークを

用いた並列電磁界解析ソルバ **ADVENTURE_Magnetic** (以下, **AdvMag**)の研究開発を行っている。これまでに東京大学情報基盤センター **Fujitsu PRIMEHPC FX10** (以下, **FX10**)にて 35 億複素自由度の時間調和渦電流解析, 2.6 億複素自由度の高周波電磁波解析に成功しているが, ソルバ全体のピーク性能比は **FX10** 上で 4~5% 程度, 名古屋大学情報基盤センター **Fujitsu PRIMEHPC FX100** (以下, **FX100**)で 1~3% 程度と計算資源を有効活用できていない状況である。これらの解析では本来非定常である問題を, 商用電源および電磁波が正弦波的に規則正しく変化することを利用して, 複素数での求解を一度だけ行う準定常問題としている。最終的に得られる連立一次方程式は共役直交共役勾配法などの反復解法で解くことができるため, 数値計算における演算カーネルは係数が複素数となる疎行列ベクトル積となる。節点要素を用いた有限要素法における疎行列ベクトル積の高速化に関する研究は行われているが, 辺要素を用いた場合の性能評価や高速化技術の開発は行われていない。また, **AdvMag** は C 言語における複素数演算のコーディングとして関数, マクロ, **C99** の複素数ライブラリにもとづく実装を持っているが, 事前の数値実験でその演算性能は計算機環境に大きく依存することが分かっており, 最適化ならびに効率的なコーディング方法の確立が必要である。さらに, 並列化効率は階層分割型数値計算フレームワークによって十分な性能が得られることが期待されるが, **Tofu** などネットワークトポロジに対する性能評価と最適化は行われていない。本研究では, 問題規模・並列台数を変えた数値実験を通して大規模電磁界解析の性能向上に向けた問題点の洗い出しを行い, それらを改善することで, 最終的にピーク性能比 10%程度を目指す。

(イ) 研究の意義

電磁界解析では電場, 磁場に空間的な広がりがあるため, 解析したい機器だけでなくその周

辺の空間も解析対象としなければならない, 解析領域が大きくなりやすい。また電磁波を対象とする場合には要素の辺長を電磁波の波長の 10 分の 1 以下にする必要があり, 大きく広がる空間を大きな要素で埋めることができない。さらに電磁場の様子を詳細に知りたい箇所は機器の中でも特に薄い構造をしているうえ, 電磁界解析で用いる反復法の収束性はアスペクト比に非常に敏感であるため扁平な要素でそれらをモデル化することができない。そのため電磁界解析のためのメッシュは大自由度になりやすく, 機器の丸ごと解析では簡単に数千万~数億自由度のモデルになってしまう。しかし, 計算時間や大規模問題における収束解を得ることの難しさから電磁界解析での並列化研究はなかなか浸透せず, 企業における設計・開発の現場ではいまでも数千~数十万自由度での解析が主流である。そのような自由度に抑えるためにモデルの簡略化や扱う物理現象の単純化が行われ, 十分とは言いがたい解析精度で工夫を凝らして設計・開発が行われているのが現状である。

本研究によって **AdvMag** の演算効率, 並列効率を向上させることにより, 数億自由度の機器の丸ごと解析をモデルの簡略化や物理現象の単純化をせずに行うことがより容易になり, 大規模電磁界解析を浸透させる一助になると考える。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

物理モデル開発研究が進行中とも言える電磁界解析分野が日々進化する計算機アーキテクチャに対応するためには, 工学・応用数学者らと計算科学者らの学際的共同研究体制が必要不可欠である。本研究体制では, 物理モデル開発と並列プログラム実装に強い研究代表者(杉本)を筆頭に, 基盤とする階層分割型数値計算フレームワークの開発者であり並列計算に強い研究者(荻野・塩谷), 物理モデル開発の研究者(金山・武居), 高速化の研究者(河合)が参加している。さらに, 複素数演算を高性能かつ効率的に実装するために自動チューニング技術の研究者(片

桐)も参加している。これにより、モデリングと数値計算アルゴリズムの両方を改善しながらシミュレーション全体を高速化できつつあり、年度末に向けてさらなる高速化が期待できる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

AdvMag が持つ複素数演算の 3 つの実装

Str.&Func. : 構造体による複素数表現+関数による複素数演算

Str.&Macros : 構造体による複素数表現+マクロによる関数の置き換え

C99&Macros : double complex 型+マクロ

についてそれぞれ FX10 45~1,440 ノードを用いてウィークスケーリングによる性能評価を行った。

その結果、**Str.&Func.**では 1,440 ノードまで良好なスケール結果が得られたが、関数をマクロでインライン展開した **Str.&Macros** と **C99&Macros** は 360 ノード以上で性能が大きく低下した。これは単体性能が低く全体の計算時間に占める通信関連部分の割合が低かった **Str.&Func.** に対して、インライン展開によって単体性能が向上したため、通信関連部分が全体に占める割合が向上したことにより性能低下が顕在化したためと思われる。

この結果を受けて、**C99&Macros** の単体性能を向上させるためのチューニングを 2 グループでそれぞれ実施した。

一つ目のグループでは以下の検討を行った。

- a) コンパイラによる SIMD 化促進のため指示行を挿入
- b) a)+高コストな多重ループで最内側ループ長が長くなるようにループ入れ替え
- c) b)+realloc 呼び出し回数の削減
- d) c)+スレッド内でのメモリ確保/解放コストを削減するために実行時に以下を指定

`XOS_MMM_L_ARENA_LOCK_TYPE=0`

FX10 上では c) までで約 1.42 倍の高速化、FX100 上では d) までで約 1.87 倍の高速化を達成した。

二つ目のグループでは、ループの入れ替え、ル

ープアンローリング、メモリアロケーション回数の削減などを行った。その結果、FX10 上で約 1.75 倍の高速化、FX100 上で 2.41 倍の高速化を達成した。

5. 今年度の研究成果の詳細

(ア) 性能評価

まず FX10 で最大 1,440 ノード、FX100 で最大 720 ノードのウィークスケーリングを行った。

モデルとして無限長ソレノイドコイルを用いた渦電流解析の精度検証問題を用いる。導体部の半径は 0.1[m]であるとする。磁気抵抗率 ν は解析領域全体で $(1/(4\pi)) \times 10^7$ [m/H]、導体部の導電率 σ は 7.7×10^6 [S/m]、角周波数 ω は $2\pi \times 60$ [rad/s]とする。コイルに流れる強制電流密度 J の実部、虚部の大きさは 50, 0 [A/m²]とする。問題の対称性を考慮し、中心角 20°, 高さ 0.1 [m]の領域を解析対象のモデルとする(図 1 参照)。

表 1 に本報告で用いるメッシュの要素数、節点数を示す。FX10 では 1 ノードに 1 プロセス立ち上げ、それぞれのプロセスが 16 スレッド立ち上げる。また FX100 では 1 ノードに 2 プロセス立ち上げ、それぞれのプロセスが 16 スレッド立ち上げる。部分領域あたりの要素数が約 100 となるように領域分割を行い、FX10 ではプロセスあたり 2,000、FX100 ではプロセスあたり 1,000 の部分領域を割り当てることでノードごとの負荷を均一にしている(表 2)。

インターフェース問題には共役直交共役勾配法(Conjugate Orthogonal Conjugate Gradient: COCG)法に基づく階層型領域分割法を適用し、近似対角スケール前処理を用いる。収束判定値は与えず、反復を 10,000 回繰り返すこととする。部分領域解法には不完全 Cholesky 分解を前処理とする COCG 法(ICCOG 法)を用い、収束判定値を 10^9 、前処理の加速係数を 1.2 とする。使用する AdvMag のバージョンは 1.8.0b であり、モジュールはハイブリッド並列版を用いる。また、部分領域間の自由度のばらつきを抑えるため、不導体領域にも導電率 0 [S/m]を与える。

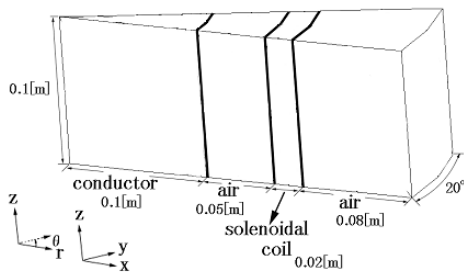


図 1. ケーキモデル.

表 1. 要素数, 節点数.

Comp. nodes	Elements	Nodes
45	8,739,045	11,733,539
90	17,532,512	23,453,016
180	34,665,506	46,232,824
360	69,310,254	92,212,658
720	140,260,096	187,852,707
1,440	277,324,048	370,872,163

表 2. 部分領域数.

Comp. nodes	Subdomains (FX10)	Subdomains (FX100)
45	45×2,000	90×1,000
90	90×2,000	180×1,000
180	180×2,000	360×1,000
360	360×2,000	720×1,000
720	720×2,000	1,440×1,000

```
struct Complex {
    double re; /* real part */
    double im; /* imaginary part */
};
```

図 2. 構造体“Complex”.

C 言語には C99 規格(ISO/IEC 9899:1999)で標準化された複素数型, 例えば倍精度複素数型として `double complex` 型があり, 複素数を実装するにはこの型を用いることが考えられる. しかし, AdvMag の開発が開始されたのは 1990 年代であり, その当時はまだ C99 規格は存在しなかった. そのため, AdvMag では倍精度の浮動小数点型 `double` を 2 つもつ構造体 “Complex” を用いて複素数を表現した(図 2). この構造体ではメンバ “re” が複素数の実部, “im” が複素数の虚部を表す. また, 構造体を用いるために AdvMag では四則演算を関数で表していたが, マクロで表してインライン展開する実装に変更した (Str.&Macros, 図 3). さらに構造体を

`double complex` 型に置き換えた実装も行っている(C99&Macros, 図 4). これらの実装と計測は FX10 上で 2014 年度までに行い, ピーク性能比はインライン展開によって 4 倍, `double complex` 型の使用によりさらに 1.15 倍となった. 本報告では Str.&Macros, C99&Macros それぞれについてウィークスケーリングを行う.

```
#define ComplexPlus(__x, __a, __b) { ¥
    (*__x).re = __a.re + __b.re; ¥
    (*__x).im = __a.im + __b.im; ¥
}

#define ComplexMulti(__x, __a, __b) { ¥
    double __re = ¥
        __a.re*__b.re - __a.im*__b.im; ¥
    (*__x).im = ¥
        __a.im*__b.re + __a.re*__b.im; ¥
    (*__x).re = __re; ¥
}
```

図 3. 構造体とマクロ(Str.&Macros).

```
typedef double complex Complex;

#define ComplexPlus(__x, __a, __b) { ¥
    *__x = __a + __b; ¥
}

#define ComplexMulti(__x, __a, __b) { ¥
    *__x = __a * __b; ¥
}
```

図 4. `double complex` 型とマクロ(C99&Macros).

図 5, 図 6 にウィークスケーリングの結果を示す. FX10 では昨年度の計測では比較的良好なスケール結果が得られていた. しかし今回の計測では, 高ノード数での性能が大きく落ち込んでいるだけでなく, 性能が一様に落ちていかなないなど, 昨年度と大きく異なる結果となった. 一方 FX100 では 720 ノードでも 0.869 と良好な結果が得られている. またノード数が増えると性能が一様に落ちていく傾向が見られた. FX10 の結果については今後さらに検証していく.

また 2014 年度の FX10 上での計測では C99&Macros が Str.&Macros よりも計算時間が

短くピーク性能比が高かった。しかし FX100 上での計測では計算時間は Str.&Macors が短一方、ピーク性能比は C99&Macros が高い(表 3)という逆転現象が起こっている。現状、この原因は不明である。

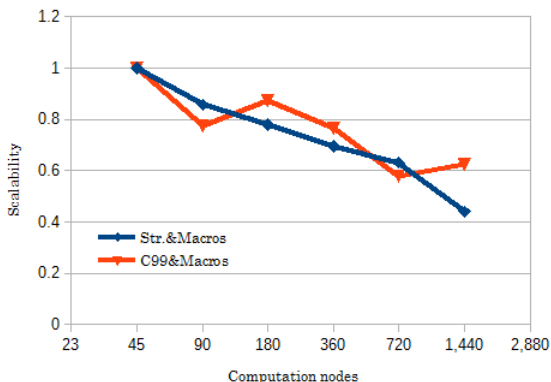


図 5. ウィークスケーリングの結果(FX10).

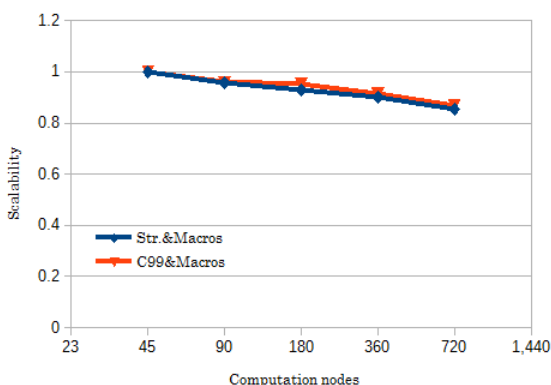


図 6. ウィークスケーリングの結果(FX100).

表 3. 計算時間とピーク性能比(FX100).

Comp. nodes	Str.&Macors		C99&Macros	
	Time [s]	Peak [%]	Time [s]	Peak [%]
45	505	2.89	542	2.92
90	528	2.77	564	2.82
180	543	2.64	568	2.75
360	560	2.55	592	2.62
720	591	2.48	623	2.57

(イ) 反復解法の再検討

AdvMag ではインターフェース問題の解法に COCG 法を採用している。しかし収束性が悪く反復回数が増えた結果、計算時間が長くなる傾向がある。そこで COCG 法と 1 反復あたりの計算コストが近い共役直交共役残差(Conjugate Gradient Conjugate Gradient: COCR)法、準最小残差(Quasi Minimal Residual: QMR)法、最小

残差法(Minimal Residual: MINRES)法を複素対称行列に拡張した MINRES-like_CS 法の導入を試みた。その結果、反復回数が半分程度になる場合もあり、計算時間を大幅に削減できることが確認できた。

AdvMag の高周波電磁界解析に COCR 法を適用した例を紹介する。東京大学情報基盤センターの FX10 スーパーコンピュータシステム「大規模 HPC チャレンジ」にて FX10 の全 4,800 ノードを使用する機会が得られたので、本プロジェクトでチューニングを施した AdvMag を用いて 160 億自由度の数値人体モデル(図 7)と最大 300 億自由度の簡易温熱治療器モデル(図 8)の解析を行った。

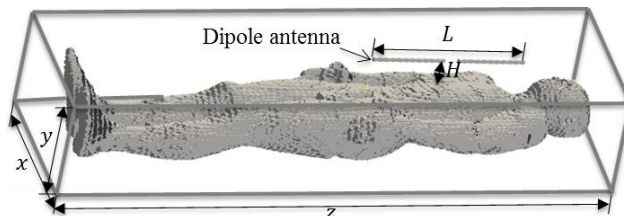


図 7. 数値人体モデル.

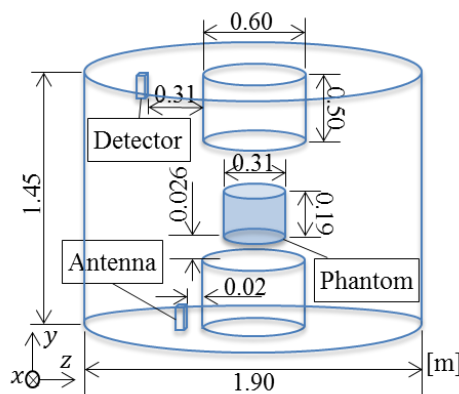


図 8. 簡易温熱治療器モデル.

表 4. 数値人体モデルの計算結果.

Frequency [MHz]	Iterative method of interface	Iterations	Elapsed time [s]	To peak [%]
1	COCG	(over 5,000)	-	-
	COCR	2,641	3,565	3.14
8	COCG	(over 5,000)	-	-
	COCR	1,076	1,651	2.76
70	COCG	(over 5,000)	-	-
	COCR	340	773	1.87
300	COCG	1,021	1,480	2.90
	COCR	206	601	1.47

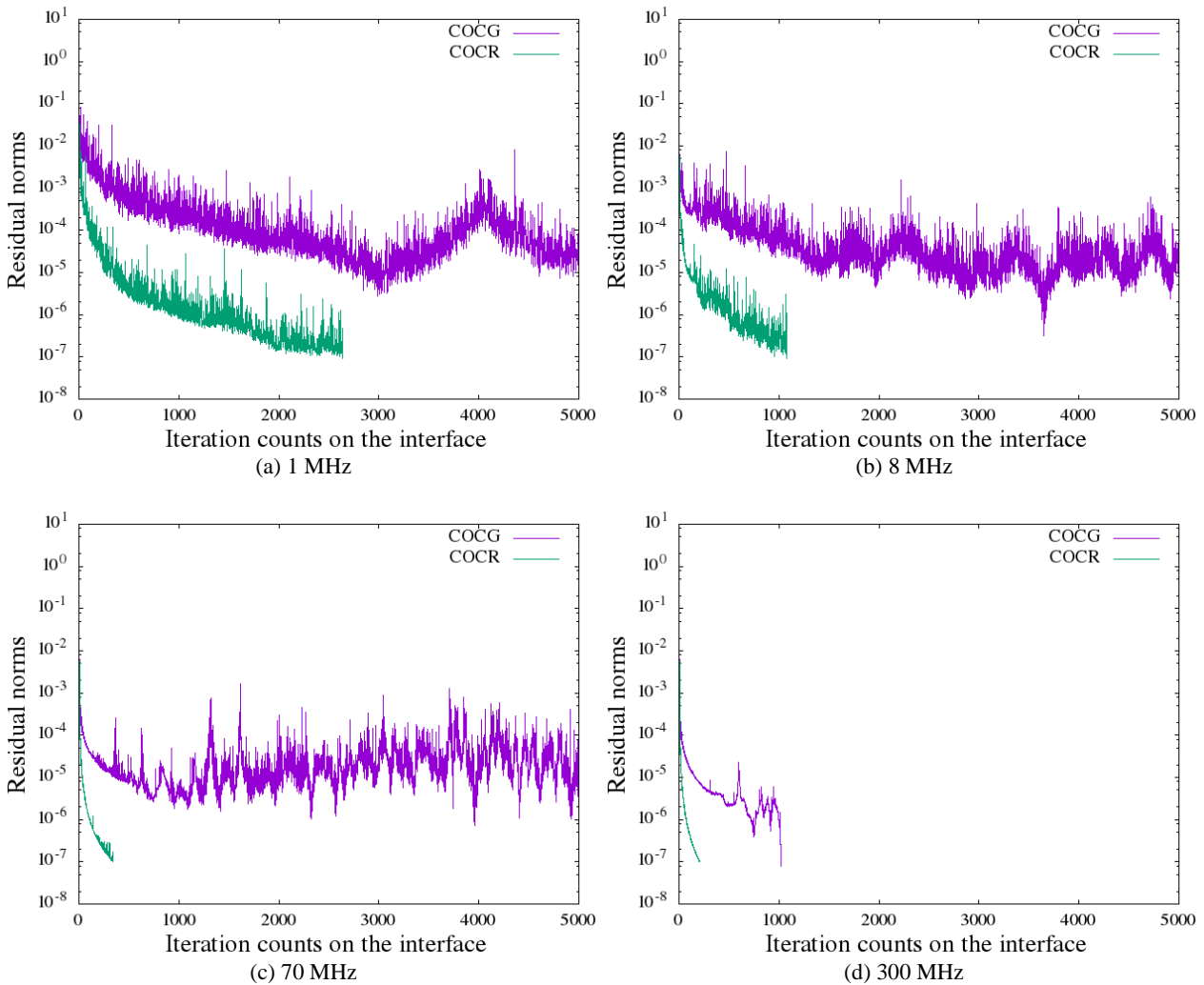


図 9. 収束履歴.

数値人体モデルの解析では COCG 法は 300 MHz の場合を除いて 5,000 反復までには収束しなかったが、COCR 法は周波数が低くなるにつれて反復回数が増えるもののすべてのケースで安定して求解できた(表 4, 図 9).

また 100 億自由度(10B), 200 億自由度(20B), 300 億自由度(30B)の 3 種類のメッシュで簡易温熱治療器モデルを COCR 法で解析した. いずれの自由度でもスムーズに収束(図 10)したが, ノードあたりのメモリ使用量は 300 億自由度の解析で 24.4 GB となり, FX10 で AdvMag によって解析できるのは約 300 億自由度であることがわかった. また約 19 分で 300 億自由度のメッシュを解析できており, COCR 法がこの問題を効率よく解けることがわかった.

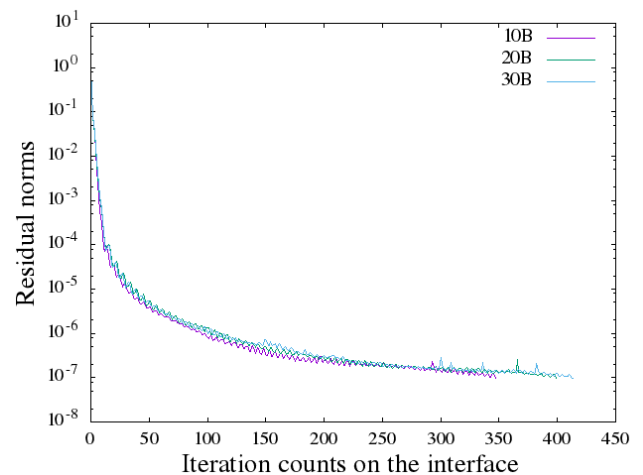


図 10. 簡易温熱治療器モデルの収束履歴.

(ウ) ノード間通信の最適化

AdvMag で採用している階層型領域分割法は他の有限要素法の並列手法に比べて通信量が少ないという特徴がある. しかしノード数が増えると, ノードによっては通信時間が計算時間全

体の 2 割, アイドル時間が 4 割に達する場合もあり, 通信の見直しが課題である. そこで MPI_Allreduce の呼び出し回数の削減, 非同期通信の導入を行い, FX100 上で検証した. その結果, 計算時間を 432 ノードの時に最大 28%削減することに成功した(表 5).

表 5. 最適化結果.

nodes	1	27	54	108	216	432	864
original [s]	74.9	138	138	147	160	175	164
optimized [s]	75.0	135	128	132	141	136	142
speedup	0.999	1.02	1.07	1.11	1.14	1.28	1.15

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

ほぼ計画通りに進めることができた. しかし FX10 に比べて FX100 でピーク性能比が大きく落ち込んでしまう点はまだ解決できておらず課題が残った. これは SIMD 化が不十分で, FX10 から 2 倍になった SIMD 演算の幅に対応できていないためと思われる. 今後はさらに SIMD 化を進める検討を行うとともに, より高並列な環境での性能向上を検討していく.

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- [1] Masao OGINO, Amane TAKEI, Shin-ichiro SUGIMOTO and Shinobu YOSHIMURA, A Numerical Study of Iterative Substructuring Method for Finite Element Analysis of High Frequency Electromagnetic Fields, Computers and Mathematics with Applications, Vol.72, Issue 8, pp.2020-2027, 2016.
- [2] Shin-ichiro SUGIMOTO, Amane TAKEI and Masao OGINO, Finite element analysis with tens of billions of degrees of freedom in a high-frequency electromagnetic field, Mechanical Engineering Letters, Vol.3, p.16-0067, 2017.

- [3] Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Kaworu YODO and Hongjie ZHENG, On the Coarse Matrix Solver of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.3, pp.179-185, 2017.
- [4] 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 階層型領域分割法による回転機の解析, 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.3, pp.195-201, 2017.
- [5] Shin-ichiro SUGIMOTO, Masao OGINO, Hiroshi KANAYAMA and Amane TAKEI, Hierarchical Domain Decomposition Method for Devices including Moving Bodies, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, submitted.

(2) 国際会議プロシーディングス

- [1] Shin-ichiro SUGIMOTO, Analysis of Rotary Machines with Hierarchical Domain Decomposition Method, The 35th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology, 2016.

(3) 会議発表(口頭, ポスター等)

- [1] Shin-ichiro SUGIMOTO, Hierarchical Domain Decomposition Method with the Moving Bodies, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), 2016. (口頭)
- [2] Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG and Kaworu YODO, Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational

- Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), 2016. (口頭)
- [3] Masao OGINO, Amane TAKEI and Shin-ichiro SUGIMOTO, A Domain Decomposition Method Based on an Algorithm of the MINRES method for High-Frequency Electromagnetic Field Analysis, The Seventeenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2016), 2016. (口頭)
- [4] Amane TAKEI, Shin-ichiro SUGIMOTO and Masao OGINO, High-frequency Electromagnetic Field Analysis using Anatomical Human Body Models, The Seventeenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2016), 2016. (ポスター)
- [5] 武居周, 杉本振一郎, ボクセルメッシュモデルを用いる並列高周波電磁界解析, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD28), pp.458-461, 2016. (口頭)
- [6] 杉本振一郎, 荻野正雄, 電磁場解析向け階層分割型数値計算フレームワークの高速化検討, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD28), pp.462-464, 2016. (口頭)
- [7] 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, 静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD28), pp.522-523, 2016. (口頭)
- [8] 杉本振一郎, 階層型領域分割法での移動体の効率的な解析, 第 21 回計算工学講演会論文集, CD-ROM, 2016. (口頭)
- [9] 武居周, 杉本振一郎, 荻野正雄, 反復型領域分割法に基づく高周波電磁界解析のインターフェイス問題の収束性改善, 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-68, RM-16-114, pp.63-68, 2016. (口頭)
- [10] 杉本振一郎, 階層型領域分割法を用いた回転機の解析, 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-69, RM-16-115, pp.69-74, 2016. (口頭)
- [11] 荻野正雄, 武居周, 杉本振一郎, MINRES-like_CS 法を用いた高周波電磁界有限要素解析の収束性評価, 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-70, RM-16-116, pp.133-136, 2016. (口頭)
- [12] 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, 鄭宏杰, 静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について, 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-16-67, RM-16-113, pp.143-148, 2016. (口頭)
- [13] 田上大助, 杉本振一郎, 静磁場問題に対するマルチグリッド BDD 法の数値解析, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 2016. (口頭)
- [14] 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, 部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 2016. (口頭)
- [15] 杉本振一郎, 階層型領域分割法での移動体の考慮, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会 (CMD2016), 2016. (口頭)
- [16] 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, On the Coarse Matrix Solver of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis (The 2nd Report), 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-17-20, RM-17-20, pp.23-28, 2017. (口頭)
- [17] 杉本振一郎, 階層型領域分割法を用いた回転機の解析(第 2 報), 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料 SA-17-31, RM-17-31, pp.85-87, 2017. (口頭)
- (4) その他 (特許, プレス発表, 著書等)
なし