

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：33603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17499

研究課題名(和文)スパコン上で効率よく大規模連成解析を行うためのフレームワークの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of a framework for large-scale coupled analysis that is efficiently performed on supercomputers

研究代表者

杉本 振一郎 (SUGIMOTO, Shin-ichiro)

諏訪東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：40451794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：汎用階層型領域分割法ライブラリの研究開発では、目標であった10億自由度規模を大きく超える300億自由度の電磁界解析に成功した。高周波誘電加熱により癌を治療する温熱治療器の簡易モデルを東京大学情報基盤センターOakleaf-FXスーパーコンピュータ上で約19分で解析した。またメッシュの接続関係の変化を通信テーブルの変化に置き換えることで回転機のような移動体を含む対象を並列計算機環境で効率的に扱うことに成功した。さらに数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析に取り組み、160億自由度数値人体モデルの大規模可視化にも成功している。

研究成果の概要(英文)： In the research and development of the general-purpose hierarchical domain decomposition method library, the electromagnetic field of 30 billion degrees of freedom (DOFs) which is far beyond the target of 1 billion degrees of freedom has been succeeded to analyze. A simple model of hyperthermia for treating cancer has been analyzed in about 19 minutes on the Oakleaf-FX supercomputer of Information Technology Center, the University of Tokyo. Moreover, devices include moving bodies such as rotating machines have been succeeded to handled efficiently on massively parallel computers by replacing changes in the connection relations of meshes with changes in the communication tables. Furthermore, the electromagnetic field - heat conduction coupled analysis of the numerical human body model is performing, and the visualization of the 16 billion DOFs numerical human body model has been succeeded.

研究分野：計算科学

キーワード：並列計算 連成解析 階層型領域分割法

1. 研究開始当初の背景

実現象の多くは構造、流体、熱伝導、電磁界などが相互関連する複合現象である。そのため、機器を設計・開発するにあたり複合現象を考慮した連成解析が重要になる。また、より高精度な解析を行うため大自由度モデルを用いたシミュレーションに対する需要が高まっていた。

しかし、すでに開発されている計算力学システムの中には数億自由度を超える解析を行えるものが存在し、京コンピュータなどで実績をあげているものの、それらのシステムのほとんどは非常に限られた現象の解析しかできない。一方、多機能な連成解析が可能なソフトウェアが市販されているが、これらは数千万自由度を超える解析ができないか実用的な時間で解が得られない、または導入に多大なコストを要するなど、高精度な連成解析を行うにはまだ問題があった。

2. 研究の目的

本研究計画では、数千万～数十億自由度規模の連成解析を高い実行効率で行える連成解析フレームワークの研究開発を行い、連成解析の実証試験を行うことを目的とした。計画を進めていく上で、申請者は研究開始までに以下の予備的な研究成果を得ていた。

(1) 階層型領域分割法による大規模並列磁場解析

階層型領域分割法は並列 CG 法などの並列反復法と異なり、自由度を領域間境界上に静的縮約した方程式を解く手法である。この手法は通常の有限要素法と大きく異なるため導入コストが大きい一方、通信量が少なく高い並列効率を得やすい。申請者はこれまでに数十億自由度の電磁場解析に成功している。

(2) ADVENTURE_Coupler を用いた連成解析

申請者が開発した磁場解析ソルバや ADVENTURE プロジェクトで開発された階層型領域分割法ソルバ、連成カプラ ADVENTURE_Coupler を用いて並列環境下での連成解析の研究を行った。ADVENTURE_Coupler は開発済みの高度なソルバを利用できるという利点がある一方、複数のソルバとカプラにそれぞれリソースを割り当てて同時起動する必要があるため、ソルバが交互にアイドル状態となりリソースの有効利用ができないという欠点がある。この欠点を補うため、ソルバとカプラ機能をひとつのソフトウェアに集約する必要がある。

前述の予備的な研究成果をもとに、スーパーコンピュータ上で数千万～数十億自由度規模の連成解析を高い実行効率で行える連成解析フレームワークの研究開発を行い、連成解析の実証試験を行うこととした。

3. 研究の方法

本研究計画では、複数の物理現象をひとつの方程式で解く強連成ではなく、物理現象ごとに方程式を交互に解く弱連成および分離反復型の強連成を対象とした。そのために、以下の3つの項目を実施した。

(1) 単一物理現象を高効率で解析できる高性能汎用階層型領域分割法ライブラリの研究開発

ソルバとカプラ機能をひとつのソフトウェアに集約するため、これまでの階層型領域分割法ソルバの開発経験をもとにして汎用階層型領域分割法ライブラリの研究開発を行った。

(2) 単一物理現象を効率よくつなげて連成解析を行うカプラ機能の研究開発

ソルバとカプラ機能をひとつのソフトウェアに集約するため、階層型領域分割法ソルバをつなぐためのカプラ機能の研究開発を行った。前項で研究開発した階層型領域分割法ソルバとともに連成解析システムを実装した。

(3) 開発したフレームワークを用いた実証試験

前項で研究開発したシステムを用いて実証試験を行った。実証試験は数億自由度規模のモデルで行うものとし、スーパーコンピュータ上での解析全体で高い効率を目指した。

4. 研究成果

本研究計画の遂行によって、汎用階層型領域分割法ライブラリの研究開発で特に顕著な成果が得られた。

汎用階層型領域分割法ライブラリを適用した電磁界解析ソルバにおいて、本研究計画で目標としていた10億自由度規模を大きく超える300億自由度の電磁界解析に成功した。高周波誘電加熱により癌を治療する温熱治療器の簡易モデルで、高周波電磁界解析の標準問題の一つとして知られるリエントラント型空洞共振器モデル：Testing Electromagnetic field Analysis Method Workshop Problem 29 (TEAM29)(図1)を対象として、高周波電磁界解析を行った。モデルの中心には円盤状の誘電体ファントム(比誘電率80、導電率0.52 S/m)が置かれており、放射源の周波数は8 MHzとした。解析には東京大学情報基盤センターのOakleaf-FXスーパーコンピュータ全4,800ノードを用いた。Oakleaf-FXでは1ノードあたり28 GBのメモリを使用でき、全ノードでは134,400 GBが使用できるので、300億自由度強の解析が可能であると考えられる。よって、100, 200, 300億自由度のメッシュを解析した(表1)。インターフェース問題の求解には簡易対角スケールリングを前処理とする共役直交共役残差法を用い、収束判定値を 10^{-7} とした。部

分領域問題の求解には不完全 Cholesky 分解による直接法を用いた。

表 2 に計算結果, 図 2 に収束履歴を示す。共役直交共役残差法はすべての自由度でもスムーズに収束した。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, Oakleaf-FX 上で解析できるのは約 300 億自由度であることがわかる。また約 19 分で 300 億自由度のメッシュを解析できており, 共役直交共役残差法がこの問題を効率よく解けることがわかる。

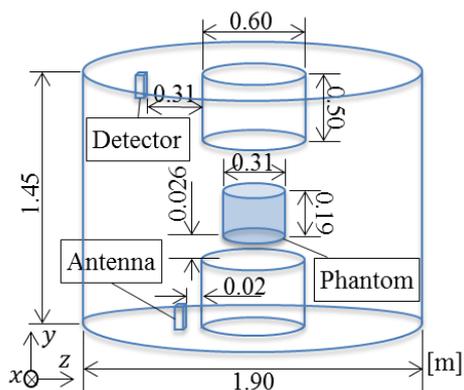


図 1. TEAM29.

表 1. 緒言.

Mesh	DOF	Subdomains	MPI processes
10B	10,389,479,028	86,400,000	4,800
20B	21,442,700,080	172,800,000	9,600
30B	31,190,789,496	230,400,000	19,200

表 2. 計算結果.

Mesh	Iterations	Elapsed time [s]	Memory per node [GB]
10B	347	549	7.84
20B	399	956	16.2
30B	413	1,138	24.4

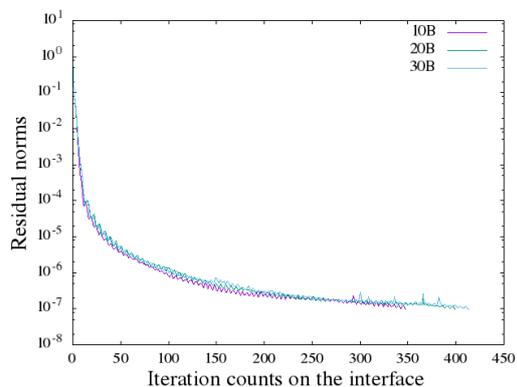


図 2. 収束履歴.

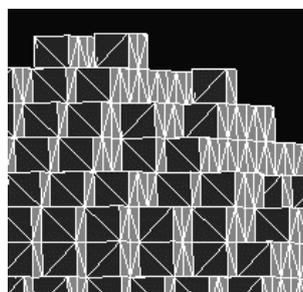
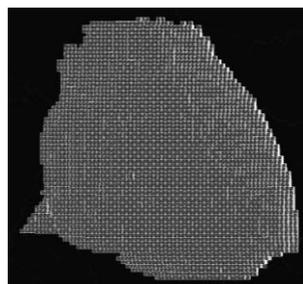


図 3. 解像度 2 mm のメッシュ.
(上) 心臓全景, (下) 左心房周辺

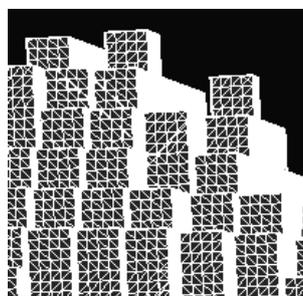
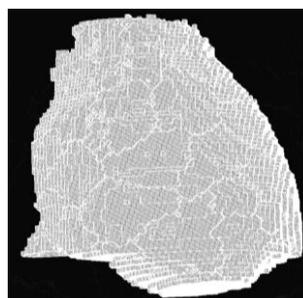


図 4. 解像度 0.5 mm のメッシュ.
(上) 心臓全景, (下) 左心房周辺

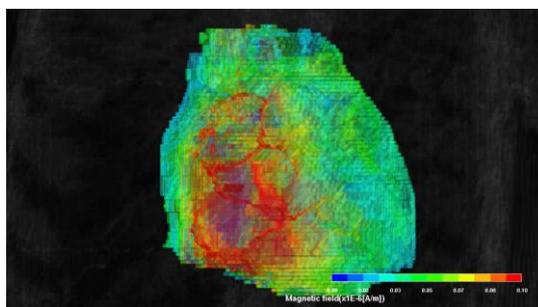


図 5. 心臓表面の磁場.

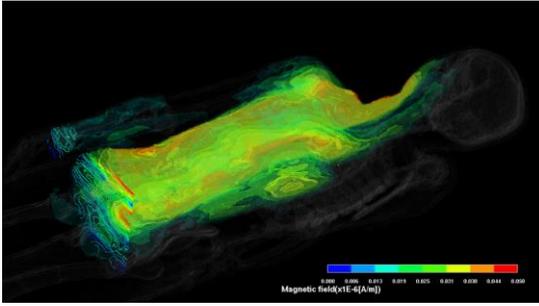


図 6. 右上半身の磁場の等値面.

本研究計画で研究開発したフレームワークを用いて、数値人体モデルの電磁界-熱伝導連成解析に取り組んでいる。X線CTから作成された1辺2mmのボクセルモデルを四面体で分割した2.2億自由度のモデルを中心に遂行している。さらに、解像度を0.5mmに向上させた160億自由度数値人体モデルの解析を実施した。さらに高周波誘電加温による癌の温熱療法の治療効果を高精度かつ定量的に評価するため、その可視化にも取り組んだ。160億自由度モデルの解析によって得られる膨大な解析データから治療効果の検討という観点で可視化に必要な情報を選別して適切なファイル形式に変換することで、100億自由度を超える規模の解析結果でも適切に可視化して活用できることを示した。

図3、図4はそれぞれ解像度2mm、0.5mmの心臓のメッシュである。2mmのメッシュを2回細分割して0.5mmのメッシュを生成しているため、解像度2mmのメッシュ表面の三角形は解像度0.5mmでは16個の三角形に分割されている。

図5は心臓表面の磁場、図6は右上半身の磁場の等値面である。100億自由度を超える大規模な可視化を行ったことが評価され、この成果に対して一般社団法人日本計算工学会 第23回計算工学講演会 グラフィクスアワード 特別賞(MicroAVS賞)を2018年6月に受賞した。

汎用階層型領域分割法ライブラリの研究開発では、回転機など移動体を含む対象を並列計算機環境で効率的に扱う機能も導入した。

有限要素法では解析対象の形状を表すメッシュは動かないことを前提としている。しかし回転機は回転子という移動体を内包しメッシュが動いてしまうため、数値解析では扱いづらい対象の一つである。特に並列解析の分野ではなかなか研究が進展せず、わずか10並列で解析時間が短縮できなくなっていた。そのため設計の現場では数千~数万もの時間ステップの解析を数日程度で終わらせるために自由度を数万程度に抑え、不十分な精度で工夫しながら設計が行われている。

申請者は回転機の数値解析の時間短縮を電機会社から相談されたことをきっかけに、回転機の並列解析への取り組みを開始した。回転機の解析では移動体である回転子が移

動することで、回転子側のメッシュと固定子側のメッシュの接続関係が変化する。この接続関係の変化が回転機の並列解析を困難にしていたが、これを通信テーブルの変化に置き換えることで並列環境下での回転機の効率的な解析を可能とした。これにより、従来手法で1ヶ月以上かかっていた約740万自由度回転機モデルの約1.25回転分(1,200時間ステップ)の数値解析を、6,144並列のスーパーコンピュータを用いて約1時間半で行うことに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 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, 査読有り, Vol.4, Issue 1, 2018, pp.99-116.
- ② Amane TAKEI, Masao OGINO and Shin-ichiro SUGIMOTO, High-Frequency Electromagnetic Field Analysis by COCR Method using Anatomical Human Body Models, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有り, Vol.54, Issue 3, 2018, online, 7204204, 4p.
- ③ 武居周, 水間健仁, 杉本振一郎, 榊井晃基, 荻野正雄, 部分領域反復解法に擬似4倍精度を用いた full-wave 電磁界解析, 電子情報通信学会論文誌 C, 査読有り, Vol. J100-C, No. 5, 2017, pp.182-191.
- ④ 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, 査読有り, Vol.137, No. 3, 2017, pp.179-185.
- ⑤ 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, 査読有り, Vol.137, No. 3, 2017, pp.195-201.
- ⑥ 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, 査読有り, Vol.3, p.16-0067, 2017, online, 10p.
- ⑦ 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, 査読有り, Vol.72, Issue 8, 2016, pp.2020-2027.

- ⑧ Amane TAKEI, Kohei MUROTANI, Shin-ichiro SUGIMOTO, Masao OGINO and Hiroshi KAWAI, High-Accuracy Electromagnetic Field Simulation using Numerical Human Body Models, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有り, Vol.52, Issue 3, 2015, online, 7402704, 4p.

[学会発表] (計 25 件)

- ① Shin-ichiro SUGIMOTO, Analysis of Rotating Machines by Hierarchical Domain Decomposition Method, 18th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, 2018.
- ② Shin-ichiro SUGIMOTO, Analysis of Rotating Machines using Hierarchical Domain Decomposition Method, The 36th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology, 2017.
- ③ Shin-ichiro SUGIMOTO, Masao OGINO, Hiroshi KANAYAMA and Amane TAKEI, Efficient Parallel Numerical Analysis of Rotating Bodies based on Hierarchical Domain Decomposition Method, The 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2017.
- ④ Shin-ichiro SUGIMOTO, Analysis of Rotary Machines with Hierarchical Domain Decomposition Method, The 35th JSST Annual Conference, International Conference on Simulation Technology, 2016.
- ⑤ 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, 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 振一郎 (SUGIMOTO, Shin-ichiro)
諏訪東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 40451794

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者