

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17748

研究課題名（和文）高性能で安定な大規模並列反復法アルゴリズムの研究開発

研究課題名（英文）Research and development of high performance and stable large scale parallel iterative solver

研究代表者

榊井 晃基（Masui, Koki）

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：70897793

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、がんの温熱療法や携帯電話などにより発せられる電磁場の高性能かつ高速な解析を目指して、その過程で現れる大規模な連立一次方程式を高速に求解するためのソルバを開発した。特に、演算精度を適切に設定したり、電磁場解析問題の特性を生かした前処理手法を実装したりすることで、安定的に解を収束させるようなソルバを開発した。提案手法は従来手法に比べて計算時間を半分以下に削減することに成功した。また、開発したソルバをオープンソースソフトウェアであるADVENTUREシステムなどに組み込んで性能評価することで、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波電磁場解析の特性と複素数演算の仕組みを生かして、大規模な複素対称線形方程式に向けた効率的なソルバを開発した。手法そのものは汎用的であるため、他の分野の問題へ適用可能であり、あらゆるシミュレーションの高速化が期待される。

また、このシステムの開発により、電磁界シミュレーションを高速に完了させることができ、ひいては高性能ながん治療システムが確立されることで、日本の医療技術を発展することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a fast solver for large-scale simultaneous linear equations arised from hyperthermia or mobile phones.

In particular, we developed a stable solver by using mixed precision calculation and implementing a preconditioning method that is for the electromagnetic field analysis problem.

We also demonstrated the effectiveness by embedding in open source software.

研究分野：高性能計算

キーワード：反復法 大規模電磁場解析 複素対称線形方程式 前処理

1. 研究開始当初の背景

シミュレーションは身の回りのあらゆる製品開発の前段階において行われ、正確なシミュレーションの実行がより複雑で高性能な製品の実現につながっている。その中でも電磁界シミュレーションは例えばがん治療の一種であるハイパーサーミアのための機器の開発に用いられており、熱痛問題などの課題があるため、高性能な機器が求められている。

しかし、より正確な解析を行う場合、扱う問題が大規模になり、モデルの形状も複雑になるため、シミュレーション完了まで膨大な計算時間が必要となり、実用時間内に終わらない可能性がある。

そのため、高速化が必要となり、このようなシミュレーションでは大規模な複素数の連立一次方程式の計算が必要となるが、この計算がシミュレーション時間の大部分を占めることが多い。そこで、この方程式の求解を高速に行うためのソルバが必要となる。

2. 研究の目的

この研究の目的は主に2つあり、まず1つ目は、高速な複素数の計算基盤の構築およびライブラリ化である。これまで、反復法では4倍精度などの高精度演算から半精度などの低精度演算まで幅広く用いられ、演算精度は高速化において重要な要素となっている。これまで、高精度演算を実現したライブラリ等はあるものの、計算精度を重視したものが多く、計算速度について着目したものは少ない。複素数演算に関してはさらに少なく、混合精度演算など全ての種類の演算を実装してあるライブラリが存在しない。そのため、混合精度演算の有効性を示すとともに、高精度演算が専門でない研究者が特別な実装無しで高速な高精度演算を使用できることを目指す。

2つ目はこれまでの研究対象であった電磁場解析について、数億自由度を超える問題を高速に完了させることである。具体的には1つ目で記述した高速な高精度演算の適用や、電磁場問題向けの反復法を実装することで高速化を目指す。

3. 研究の方法

まず、高速な高精度演算の計算基盤の構築に関して、具体的には、現在高精度ライブラリとして広く使われているものに QD library などがあげられるが、これを元にした高性能な高精度ライブラリの開発を行う。例えばこのライブラリは高精度複素数と倍精度複素数の混合計算があるが、高精度複素数と倍精度実数の混合計算など、すべての種類の混合精度には対応しておらず、最適化の余地もある。

大規模電磁場解析においては、これまで有効であった混合精度反復法を実際に適用する。自由度数億を超える超大規模問題に対しては、領域分割法を組み込んだうえでの性能評価を行っていく。また、高速な高精度演算システムを用いた反復法を提案・実装することで、高速かつ高安定な求解システムを開発し、大規模電磁場解析向けに最適化を行う。このシステムを実行・性能評価するためには100GB以上のメモリが必要になる場合がある。そのため、追加のGPUやPCを含め、メモリ量が大きい計算機を導入していく。

4. 研究成果

(2021年度)

これまで、大規模電磁解析問題における反復法について、最適な前処理手法やそれに含まれるパラメータの最適値は不明であり、最適な手法は確立されていなかった。これに対し、今年度は係数行列の一部を用いて少ないコストで最適な加速係数を推定する手法を開発した。さらに、反復法の前処理である IC(p) 分解前処理の効率的な実装方法についても示し、計算時間を短縮した(図1)。

さらに、実際の電磁場解析ソフトウェアにも組み込んで性能評価をしたところ、有効であるということが示された。

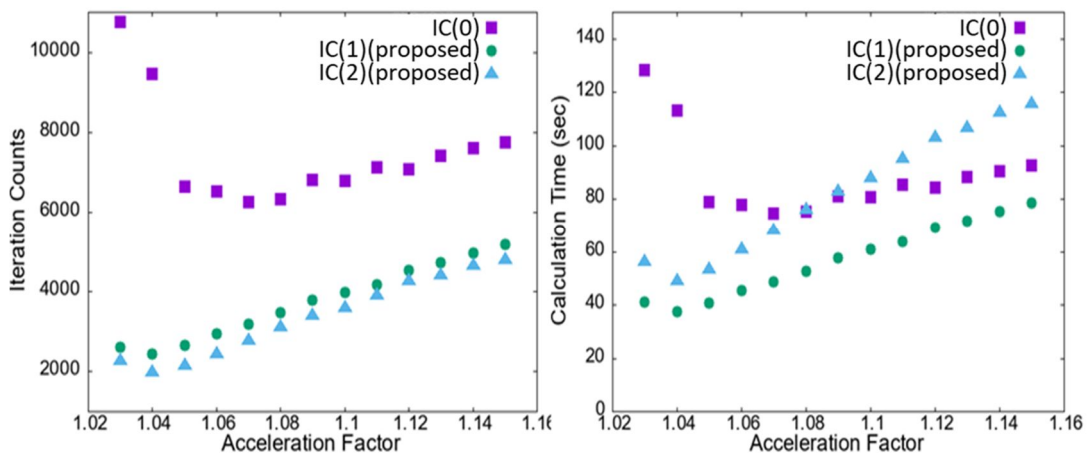


図1 フィルイン手法による反復法の計算時間削減

(2022年度)

複素数の倍精度と倍々精度による混合精度演算を実装し、反復法の途中で精度を切り替える反復法を開発した。倍精度演算に比べ最大 8.7%、倍々精度演算に比べて最大 62%計算時間を短縮し、倍精度では収束しない問題においても安定的に解を求めることに成功した。

さらに、自由度 1,000 万を超える超大規模問題に向けた実装により、より正確なシミュレーション時間を短縮することに成功した。

(2023年度)

特に電磁場問題向けに特化した並列化手法を開発した。

反復法として広く使われている ICCG 法における前進後退代入の並列化には、ブロック ICCG 法などといった要素の棄却によるデータ依存の除去が有効であるが、過度な棄却は反復法の収束性を悪化させることが知られている。そこで、少ない棄却で高い並列性を引き出すために、係数行列をいくつかの小行列に分割し、それぞれの行列に対して異なる並列化手法を適用した。

提案手法は同じブロック数のブロック ICCG 法と比較して最大で 59.8%反復回数を削減し、計算時間を 56.5%削減した。

また、反復法の収束性を高めるために、フィルインを考慮した IC 前処理が使われることがある。しかし、このフィルインのレベルは非負整数であり、レベルを 1 上げただけでも前処理行列の非ゼロ要素数が数倍以上になるため、収束性は良くなるものの、1 反復あたりの計算コストや使用メモリ量が過剰に増大する可能性がある。そこで、フィルインを制御するために、新たなフィルイン手法を開発し、電磁場解析問題に対して適用した。その結果、フィルインのレベルを従来よりも細かく制御することができ、収束性を改善しつつ非ゼロ要素数の増加を抑えることに成功した。また、問題によっては従来のフィルイン手法と比べ計算時間を削減することにも成功している(図2)。

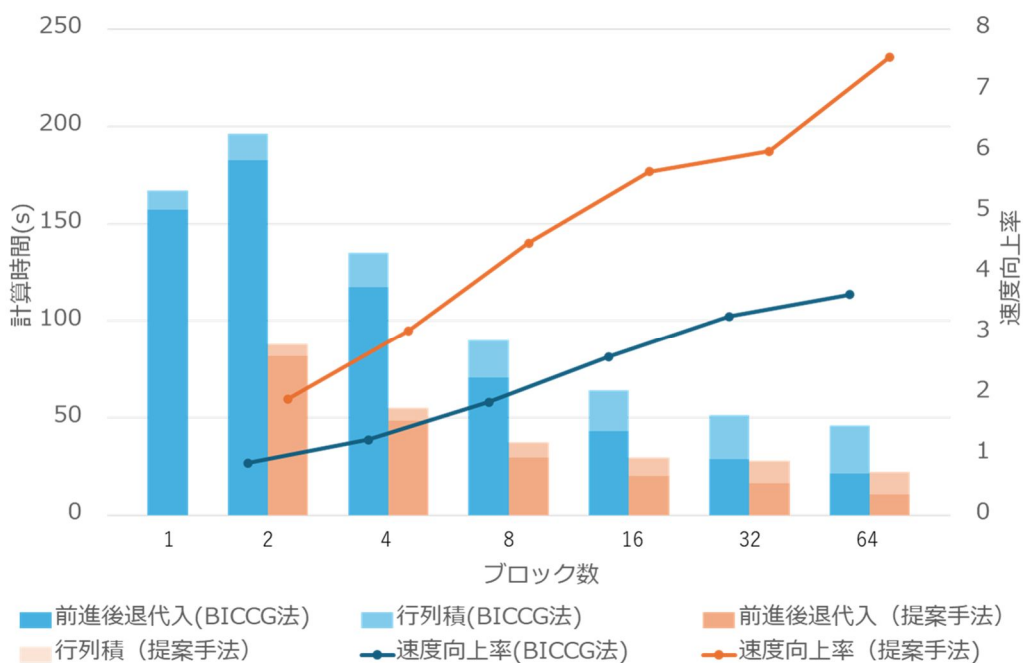


図2 提案手法による計算時間と速度向上率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 榎井晃基, 伊野文彦
2. 発表標題 高周波電磁場解析における 反復法の計算精度の切り替えについて
3. 学会等名 第187回HPC研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎井晃基
2. 発表標題 大規模電磁場解析向け反復法における前処理の並列化手法に関する検討
3. 学会等名 第6回 大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム (LSCEM2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koki Masui, Masao Ogino, Takahiro Katagiri, Fumihiko Ino
2. 発表標題 IC(p) Preconditioning with Acceleration Factor for High-Frequency Electromagnetic Field Analysis
3. 学会等名 HPC Asia2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎井晃基
2. 発表標題 大規模電磁場解析向け反復法の前処理における最適な加速係数の決定方法
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎井晃基
2. 発表標題 電磁場解析システムADVENTURE_Magneticにおける反復法の前処理について
3. 学会等名 第5回 大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム (LSCEM2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榎井晃基
2. 発表標題 複素対称行列の非ゼロ要素位置に着目した反復法の並列化手法について
3. 学会等名 第7回 大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム (LSCEM2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koki Masui
2. 発表標題 Parallelization of ICCG method with high precision calculation in electromagnetic field analysis
3. 学会等名 2024 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koki Masui, Fumihiko Ino
2. 発表標題 IC(p) preconditioning for large symmetric linear equations
3. 学会等名 HPC Asia 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 榎井晃基
2. 発表標題 大規模電磁場解析ソフトウェアにおける反復法へのIC(1)前処理の組み込み及び性能評価
3. 学会等名 MEPA第35回研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山雄世, 榎井晃基, 伊野文彦
2. 発表標題 高周波電磁界シミュレーションにおける ICCG 法の並列化
3. 学会等名 第191回HPC研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

倍々精度演算ライブラリ https://kmasui.github.io/masui.github.io/dd.html
--

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