

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04122

研究課題名（和文）計算電磁気学の深化を導く高性能線形ソルバ

研究課題名（英文）High performance linear solver for advanced computational electromagnetics

研究代表者

岩下 武史（IWASHITA, TAKESHI）

北海道大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：30324685

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、有限要素法や境界要素法に基づく電磁場解析の高速化を目的に、線形ソルバの高性能化について研究を行った。計算機科学的アプローチと数理・解法的アプローチの両面から研究を行い、前者では、時間並列処理の高度化、SIMD演算に適合する前処理手法の開発、アクセラレータ向けの解法研究、混合精度演算導入による高速化について、多くの研究成果を得た。また、後者については、同一の係数行列を持つ連立一次方程式を複数回解く場合に着目した高速化に関する研究を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代社会では、社会のあらゆる場面で電気機器や電子デバイスが重要な役割を果たしている。このような機器・デバイスの設計には、電磁場解析が用いられ、それを高速化することは、機器設計の効率化に寄与する。本研究では、SIMD演算や混合精度演算の利用といった計算機科学的アプローチと誤差修正法や減次法といった数理・解法的アプローチの両面から研究を行い、電磁場解析の高速化に貢献する線形ソルバの高速化技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we studied the acceleration of the linear solver to make the electromagnetic field analysis based on the finite element and the boundary element methods more efficiently. Research was conducted from both the computer science and the mathematical approaches. From the computer science side, we studied the parallel in time technique, the preconditioning techniques in which SIMD instructions or accelerators are effectively used. We also studied the mixed precision computing in the context of iterative linear solvers. From the mathematical side, we focused on the situation in which a sequence of linear systems was solved. We proposed a technique based on error vector sampling and confirmed its effectiveness. In these studies, we attained many research results which were reported in journals and conferences.

研究分野：高性能計算

キーワード：高性能計算 計算電磁気学 線形反復法 混合精度演算 時間並列処理 H行列

## 1. 研究開始当初の背景

計算電磁気学(電磁場解析)は、様々な電気機器や電子デバイスの設計や評価に広く用いられ、電磁場が関係するあらゆる学術・工学領域で活用されてきた。これらの応用領域では、イノベーション創出や技術発展のために、電磁場解析の高速化が強く求められており、特に電気・電子機器設計の分野では、高性能な機器開発や設計期間の短縮のために、大きな社会的要請となっていた。電磁場解析では、基礎方程式であるマクスウェル方程式を有限要素法等の離散化解法を用いて解くことが一般的である。この場合、解析時間の大半は離散化解法により生ずる大規模な連立一次方程式の求解に費やされるため、電磁場解析の高速化を実現するためには、高性能な線形(反復)ソルバが必要であった。

線形ソルバの高速化のためには、まず、計算機の性能をフルに活用する技術の確立が必要となる。当時のプロセッサ事情を俯瞰した場合、CPU 内のコア数の拡大に加えて、複数のデータを一度に扱う SIMD 命令の SIMD 幅(同時に並列処理するデータ量)の拡大により、演算性能を向上させる方式が一般化していた。また、特定の演算に特化した演算装置(GPU や量子アニーラ)や計算のハードウェア化を可能とする FPGA をアクセラレータとして利用する方式も普及していた。特に、アクセラレータに関する技術動向では、深層学習の発展から、機械学習の応用では十分な精度となる低精度演算(16bit 演算など)に注力し、演算性能を拡大する方向性があった。しかしながら、電磁場解析、特に実応用電磁場解析で用いられる線形ソルバでは、SIMD 命令やアクセラレータをまだ十分に活用できていない状況があった。従って、これらの技術要素を活用できる新しい線形ソルバ技術を確立することが今後の計算電磁気学の発展に必要であった。

また、線形ソルバを高速化する別の方策として、解析手法の改善による計算量の削減があげられる。例えば、密行列計算を伴う解析では階層型行列(H 行列)法の利用が有効である。その他にも、岩下(代表)が 2008 年に考案した陽的/陰的誤差修正法を利用した線形反復法の収束性改善が電磁場解析分野で行われてきた。これらの技術をさらに発展させ、次世代の計算電磁気学の確立につなげることが求められている状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代の計算電磁気学を担う高性能な線形ソルバ技術を研究開発し、その深化を実現することにある。本目的を実現するために、I 計算機の性能を最大限に活用するソルバ技術の開発 II 電磁場解析における線形反復ソルバの収束性の改善 を行う。

## 3. 研究の方法

上記の研究目的 I 「計算機の性能を最大限に活用するソルバ技術の開発」に対して、以下の研究課題を実施する。

- (1) 時空間並列処理技術の高度化
- (2) 線形反復ソルバの前処理における SIMD 命令活用技術の開発
- (3) 電磁場解析向け線形ソルバのアクセラレータ実装方式の開発
- (4) 低精度(混合精度)演算の活用による線形ソルバ、H 行列法の高性能化

また、上記の研究目的 II 「電磁場解析における線形反復ソルバの収束性の改善」に対しては、岩下らが考案した、誤差修正法のフレームワークをさらに発展させることにより、研究目的の達成を図る。

## 4. 研究成果

- (1) 時空間並列処理技術の高度化  
並列 TP-EEC 法の誘導機解析への応用

高橋(分担)、岩下らが考案した時空間並列処理手法である並列 TP-EEC 法を 3 相交流による誘導機の解析に応用した。商用機の多くが動作する 3 相交流下での時間並列手法の確立は重要な課題である。並列 TP-EEC 法を用いることにより、空間方向での並列処理だけでは効果が得られにくい中・小規模モデルにおいても解析の高速化が可能となることが示された。本成果を国際学術論文誌において発表した。

### 並列 TP-EEC 法の改良

並列 TP-EEC 法のさらなる改善策として、時間方向のプロセス分割時に一部のステップをプロセス間でオーバーラップさせる方式を考案し、電気機器解析上でその有効性を確認した。本成果を国際会議で発表した。

- (2) SIMD 命令活用技術の開発

### 階層ブロック多色順序付け法

電磁場解析における最も主要な線形ソルバは ICCG 法(不完全コレスキー分解前処理付き共役

勾配法)である。ICCG法の並列化は、有限要素法による電磁場解析の高速化にとって、重要な課題であり、国内外で多くの研究がなされてきた。ICCG法の構成要素の内、CG法は並列化が容易であるのに対し、IC分解前処理はその並列化が簡単ではない。IC分解前処理の並列化手法として、岩下が考案したブロック多色順序付け法があり、電磁場解析のみならず、他分野の解析でも活用されてきた。同手法は、ICCG法の収束性を大きく劣化させずに、並列化を可能とし、またキャッシュメモリの効果的な利用にも寄与する。しかしながら、同手法では、IC分解前処理の最内ループの処理に依存関係があり、SIMD命令を効果的に利用することができない課題があった。通常の解析では、IC分解前処理はメモリバウンドであり、本課題はこれまで大きな問題となることはなかったが、近年のプロセッサのSIMD幅向上やアクセラレータの普及を踏まえ、IC分解前処理の最内ループをSIMD化することに取り組んだ。本研究の結果として、階層ブロック多色順序付け法と呼ぶ新しい手法を考案した。本手法では、ブロック多色順序付け法で並べた未知変数に対して、もう一度特別な再順序付けを行う。この方法により、ブロック多色順序付け法で得られる高い収束性を維持することができ、かつ前処理(代入計算)のSIMD化も可能とする。階層ブロック多色順序付け法により得られる係数行列は図1のような形となる。空白部分には非零要素は存在しない。このとき、同一のレベル1ブロック間は並列性があり、スレッド並列処理で活用される。次に、レベル2ブロックは対角行列となっており、このことにより対応する未知変数のSIMD化が可能となる。本手法をインターネット上で公開されている行列を利用して性能評価した結果、従来法と比べて性能改善が可能であることが示され、特にSIMD幅の大きいIntel Xeon Skylakeプロセッサ、Intel Xeon Phiプロセッサでは、性能の改善が大きかった。本研究の成果は、国際学術論文誌に学術論文として掲載された。

#### ILUB 前処理

非対称行列を係数とする連立一次方程式の主要な前処理手法である ILU 分解前処理の新しい方式として、ILUB 前処理を提案した。非対称係数行列は、電磁場解析においても、モデル内の物体の移動を考慮する場合などに現れる。ILUB 前処理では、係数行列を小行列(SIMD幅を考慮した行数とする)に分割し、各小行列内に一つでも非零要素がある場合には、小行列内の ILU 分解中のフィルインを全て許可する。この操作により、従来法と比べて、計算量は増加するが、より高い前処理効果が期待できる。加えて、本操作の特徴により、反復における ILU 前処理の過程(代入計算)が効率的に SIMD 化でき、計算量の増加の影響を軽減することができる。ILUB 前処理の効果をインターネット上で公開されている行列を利用して性能評価した結果、従来法である ILU 前処理と比べて、70%以上のテスト行列で性能改善を確認した。また、数値実験では、8倍以上の速度向上を得た例もあった。これらの研究成果について、口頭発表を行った。(学術論文投稿中)

#### (3) アクセラレータの活用

##### AINV 法の改良

アクセラレータの代表である GPU は、機械学習等で広く利用され、計算科学でも利用されている。しかしながら、有限要素解析に基づく電磁場解析では、従来の CPU と比べた場合の速度向上率が低く、普及が進んでいない問題があった。研究グループでは、まず、いくつかの GPU 向け前処理と CPU 向けのスレッド並列化 IC 前処理を数値実験により評価した。その結果、前処理過程が疎行列ベクトル積の形で与えられる AINV 前処理の GPU 上での有効性が高いことが分かった。一方、AINV 法は前処理行列の生成過程が複雑で、その計算コストのために、ソルバ全体としての有効性が低くなっていることが明らかとなった。そこで、岩下、深谷(分担)らは、AINV 法の前処理行列生成過程において、元の係数行列の非零要素位置に基づく近似を入れることで、生成過程の効率化を図るとともに、前処理生成部の多色順序付け法によるマルチスレッド並列化を可能とする新しい AINV 前処理を提案した。インターネット上で公開されているテスト行列 8 種を用いた数値実験において、提案手法は全てのケースで性能改善を達成した。本研究成果について、口頭発表を行った。(学術論文投稿中)

#### (4) 混合精度演算の活用

##### 混合精度 GMRES(m)法の評価

代表的な線形ソルバである GMRES(m)法に混合精度演算を導入した場合のソルバ性能について評価を行った。条件数が異なる計 11 種の行列データを使用して、系統的にソルバを評価した。その結果、倍精度演算のみを用いる従来の GMRES(m)法で求解可能な問題については、単精度演算を導入した混合精度 GMRES(m)法でも求解可能であることが示された。また、リスタート周期の影響についても評価を行った。本成果は学術論文として採択が決定した。

##### H 行列における混合精度演算の導入

H 行列は、密行列の一部を低ランク表現した行列である。本研究では、H 行列に混合精度演算を導入することを行った。低ランク表現されている部分行列に対して、3 種類の低精度演算導入法を提案し、それぞれについて性能評価を行った。性能評価は境界要素法に基づく電磁場解析上で行った。具体的には、解析上で用いる BiCGSTAB ソルバの H 行列ベクトル積に提案手法を適用し、その効果を検証した。数値実験の結果、低精度演算を導入した場合にも BiCGSTAB ソルバの

収束性の劣化は軽微で，H行列ベクトル積の時間短縮により，解析全体の効率化が図れることが明らかとなった．本成果を国際会議論文として発表した．

(5) 誤差修正のフレームワークを用いた収束性の改善

電磁場解析では，非定常解析や非線形解析が行われることが多いが，この場合，同一または類似の係数行列を持つ連立一次方程式を複数回解くこととなる．岩下は，これまでに過去の求解過程において誤差ベクトルをサンプリングし，サンプリングしたベクトルを使ったレイリーリッツ法により，小さい固有値に対応する固有ベクトルを抽出，これを後続の求解過程における誤差修正，減次法で用いる手法を提案した．本手法を，電磁場解析や他の行列データで評価し，反復法の収束性の改善に大きな効果があること，また計算時間の点でも多くのデータでその短縮を実現できることを示した．本成果をプレプリントサーバで公開した．( 学術論文投稿予定 )

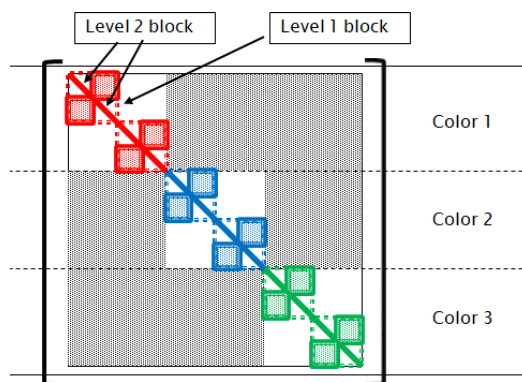


図 1. 階層ブロック多色順序付け法により生ずる係数行列

## 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 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji, Iwashita Takeshi, Nakashima Hiroshi	4. 巻 57
2. 論文標題 Comparison of Parallel-in-Space-and-Time Finite-Element Methods for Magnetic Field Analysis of Electric Machines	5. 発行年 2021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.2021.3064320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iwashita Takeshi, Li Senxi, Fukaya Takeshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Hierarchical block multi-color ordering: a new parallel ordering method for vectorization and parallelization of the sparse triangular solver in the ICCG method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CCF Transactions on High Performance Computing	6. 最初と最後の頁 84~97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42514-020-00030-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ida Akihiro, Ataka Tadashi, Furuya Atsushi	4. 巻 56
2. 論文標題 Lattice H-Matrices for Massively Parallel Micromagnetic Simulations of Current-Induced Domain Wall Motion	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.2019.2959349	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, Tadashi Tokumasu, 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 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7511305
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 Akihiro Ida, Hiroshi Nakashima, Tasuku Hiraishi, Ichitaro Yamazaki, Rio Yokota, Takeshi Iwashita	4. 巻 27
2. 論文標題 QR Factorization of Block Low-rank Matrices with Weak Admissibility Condition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 831-839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.27.831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Y. Takahashi, K. Fujiwara, and T. Iwashita
2. 発表標題 Performance Evaluation of Parallel-in-Space-and-Time Finite-Element Analysis of Electric Machines based on Domain Decomposition and Parallel TP-EEC Method in Massively Parallel Computing Environment
3. 学会等名 the 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2021) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊田明弘
2. 発表標題 ブロック低ランク行列の近似固有値計算
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 Zhengyang Bai, Tasuku Hiraishi, Akihiro Ida, Masahiro Yasugi
2. 発表標題 Parallelization of Matrix Partitioning in Hierarchical Matrix Construction Using Node-aware Work Stealing
3. 学会等名 情報処理学会 第138回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masatoshi Kawai, Akihiro Ida
2. 発表標題 Numerical Evaluation of Dynamic Core Binding Library with H-matrix Application
3. 学会等名 2022 Conference on Advanced Topics and Auto Tuning in High-Performance Scientific Computing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuya Hoshino, Akihiro Ida, Toshihiro Hanawa
2. 発表標題 Optimizations of Lattice H-Matrix-Vector Multiplication for Modern Supercomputers
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (PP22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yijie Yu, Toshihiro Hanawa
2. 発表標題 Offloading Integer GMRES Method to Accelerators
3. 学会等名 HPC Asia 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深谷猛, Yingqi Zhao, 岩下武史
2. 発表標題 低精度演算を活用したGMRES(m)法の研究
3. 学会等名 第13回 自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池原紘太, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 誤差ベクトルのサンプリングに基づくSubspace CorrectionおよびDeflationによる前処理付きCGソルバの収束性改善
3. 学会等名 日本応用数学会 「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 第32回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, 岩下武史
2. 発表標題 気象雷モデルでの数値予報に向けたモデル改良の取り組み
3. 学会等名 日本気象学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木謙吾, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 GPU に適した近似逆行列前処理の簡略化手法
3. 学会等名 日本応用数学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 GMRES(m) 法に対する低精度演算・データの積極的導入の可能性に関する検証
3. 学会等名 日本応用数学会2021年度年会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 深谷猛, 岩下武史, 中島浩
2. 発表標題 最近のマルチコアCPU環境における疎行列ベクトル積の性能に関する一考察
3. 学会等名 2021年並列 / 分散 / 協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP2021) / 日本応用数学会 「行列・固有値問題の解法とその応用」研究部会 (MEPA)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Iwashita, Kota Ikehara and Takeshi Fukaya
2. 発表標題 Algebraic Auxiliary Matrix Construction for Subspace Correction and Deflation based on Error Vector Sampling for a Sequence of Linear Systems
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing and Scientific Computing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Algebraic Auxiliary Matrix Construction for Subspace Correction and Deflation in Solving a Series of Linear Systems
3. 学会等名 1st Advanced Supercomputing Environment (ASE) Seminar: Ode to Numerical Linear Algebra
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Iwashita and Takeshi Fukaya
2. 発表標題 HBMC Ordering for SIMD Vectorization of IC Preconditioning
3. 学会等名 International Workshop on the Integration of (Simulation+Data+Learning); Towards Society 5.0 by h3-Open-BDEC (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Fukaya, Yingqi Zhao and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Exploiting Lower Precision Computing in the GMRES(m) Method
3. 学会等名 SIAM Conference on Applied Linear Algebra (LA21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木謙吾, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 近似逆行列前処理における前処理行列生成部の簡略化とスレッド並列化
3. 学会等名 第182回HPC研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木謙吾, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 SIMD演算に適したブロック構造を有する新しいILU分解前処理手法
3. 学会等名 The 5th cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (xSIG2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋康人, 藤原耕二, 岩下武史
2. 発表標題 領域分割と並列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を用いた大規模磁界解析の高並列計算環境下での性能評価
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Parallel-in-space-and-time Finite-element Analysis of Electric Machines using Domain Decomposition and Time-periodic Finite-element Method
3. 学会等名 19th IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 謙吾, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 ブロックに基づくfill-in選択手法を利用したILU-GMRESソルバ
3. 学会等名 第177回HPC研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池原紘太, 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 Automated Subspace Correction法を前処理とするCGソルバの開発と評価
3. 学会等名 The 4th cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (xSIG2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊田明弘, 安宅正, 古屋篤史
2. 発表標題 格子H行列法を用いた実アプリの分散メモリ並列化
3. 学会等名 2020年並列 / 分散 / 協調処理に関する『福井』サマー・ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深谷猛, 岩下武史
2. 発表標題 GMRES(m)法における行列データの低精度化に関する検討
3. 学会等名 日本応用数理学会 2021年研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深谷猛, グドール聖哉, 張臨傑, 岩下武史
2. 発表標題 倍精度と単精度を用いた混合精度GMRES(m)法の収束性に関する実験的評価
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara, Tadashi Tokumasu, Takeshi Iwashita, 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 The 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rise Ooi, Takeshi Iwashita, Takeshi Fukaya, Akihiro Ida and Rio Yokota
2. 発表標題 Effect of Mixed Precision Computing on H-matrix Vector Multiplication in BEM Analysis
3. 学会等名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiro Ida, Ichitaro Yamazaki, Rio Yokota, Satoshi Ohshima, Tasuku Hiraishi, Takeshi Iwashita, Tetsuya Hoshino and Toshihiro Hanawa
2. 発表標題 Numerical Linear Algebra Based on Lattice H-Matrices
3. 学会等名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiro Ida, Tadashi Ataka and Atsushi Furuya
2. 発表標題 Lattice H-matrices for Massively Parallel Micromagnetic Simulations of Current-induced Domain Wall Motion
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	埴 敏博  (HANAWA TOSHIHIRO)  (30308283)	東京大学・情報基盤センター・教授    (12601)	
研究分担者	伊田 明弘  (IDA AKIHIRO)  (80742121)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報基盤センター)・副主任研究員   (82706)	
研究分担者	美船 健  (MIFUNE TAKESHI)  (20362460)	京都大学・工学研究科・講師   (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	高橋 康人  (TAKAHASHI YASUHITO)  (90434290)	同志社大学・理工学部・教授    (34310)	
研究分担者	深谷 猛  (FUKAYA TAKESHI)  (30633846)	北海道大学・情報基盤センター・助教    (10101)	

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