

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01749

研究課題名(和文) H行列法ライブラリの機能拡張と次世代スパコン向け最適化

研究課題名(英文) Enhancement of H-matrix library and optimization for next generation supercomputers

研究代表者

伊田 明弘 (Ida, Akihiro)

東京大学・情報基盤センター・特任准教授

研究者番号：80742121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：H行列法ライブラリHACApKの高機能化に関する研究を行った。H行列生成に動的負荷分散を導入し、H行列・ベクトル積計算に対してGPU向けアルゴリズムの開発・実装し、混合精度演算を導入した計算法を確立した。これらの新手法を用いた実装は、既存実装の数倍～十数倍の高速化を実現した。従来H行列に比べて効率的な演算・通信パターンを構築可能な新しい低ランク構造行列法である格子H行列法を提案した。数千プロセスを用いた実験では格子H行列・ベクトル積計算は既存実装の数十倍高速化を達成した。格子H行列に基づくLU分解法を開発し、BLR行列(単純な格子H行列)のQR分解法を開発した。これら分解手法の並列化も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で高機能化を行ったH行列法ライブラリHACApKは、多くの科学技術シミュレーション(超電導解析、地震波動解析、マイクロマグネティクス計算など)で利用されている。本研究の成果として、HACApKを利用している科学技術計算を、GPUなど最新アーキテクチャを搭載したスパコンにおいても効率よく行うことができるようになる。また、従来のマルチコアCPUクラスタにおいても、さらなる解析の大規模化・高速化を達成できる。HACApKはソースのWeb公開や講習会開催を通して広く普及を図っており、本研究の成果は科学技術計算の発展に大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：In this study, we enhanced the HACApK, which is a library for H-matrices: the dynamic load balancing technique is introduced for H-matrix generation, and algorithms of H-matrix-vector multiplication for GPU computing and mixed-precision computing are developed and implemented. These new implementations are several to ten times faster than existing HACApK. We proposed a novel variant of low-rank structured matrices, called "lattice H-matrices", which allow the construction of efficient operation and communication patterns compared to the conventional H-matrices. In numerical experiments for performing H-matrix-vector multiplications, the lattice H-matrices is several tens of times faster than the normal H-matrices when several thousand processes are used. Moreover, we developed an LU decomposition method based on the lattice H-matrices, and a QR decomposition method for the BLR matrices which is a simple version of lattice H-matrices. We also proposed their parallelization algorithms.

研究分野：高性能計算

キーワード：近似計算 低ランク H行列法 ライブラリ アルゴリズム 並列計算 高性能計算 ハイパフォーマンス スコンピューティング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

H行列法は、積分方程式法(境界要素法)やN体問題に現れる密行列に対する近似手法の一種である。密行列を扱わなければならないことは、大規模計算を行う上では大きな制約となるが、H行列法を採用することにより、その制約を外すことができる。2014年以降、H行列法の適用範囲拡大に関連した研究論文が欧米を中心に急増しており、応用数学およびHPCの分野で最も注目されている研究領域の一つである。しかし、国内からの関連論文は、申請者らが発表した論文を除くとほとんどなく、当該研究領域の国際水準に遅れをとっていた。

伊田(代表)らは、2012年にH行列法ライブラリ「HACApK」を開発・公開した。国外にはH行列法ライブラリは幾つか存在したが、当時MPI/OpenMPハイブリッド実装を採用しているものはHACApKのみであった。これにより、マルチコアCPUを搭載した分散メモリ並列計算機の性能を十分に引き出すことができるようになった。地震サイクル解析、量子化学計算など、幅広い分野の実用アプリケーションにHACApKは適用され、分散メモリ並列計算機とH行列法の併用による超大規模解析を実現した。

研究開始当初、HACApKの更なる機能拡張・性能向上に関する重点課題として次の2つがあった。一つ目は、H行列法の適用範囲拡大である。当時のHACApKの機能は、H行列生成およびH行列・ベクトル積に限定されていた。LU分解など他の線形演算法を開発・実装する必要性に迫られていた。二つ目は、次世代スパコンへの対応である。上述の通り、HACApKはマルチコアCPUを搭載したクラスタ型計算システムを想定して設計されており、メニーコアCPUやGPUでも動作はするが、十分な性能を引き出すためにはハードウェア特性に合わせて並列化アルゴリズムを見直しやコードの最適化を行う必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、電磁場解析・地震サイクル解析・量子化学計算などの大規模計算に利用されるH行列法ライブラリHACApKの高機能化を研究目的とする。行列・ベクトル積計算の高速化に限定されていた機能を、行列の近似LU分解や近似逆行列計算に拡張する研究を行う。これらを反復法線形ソルバの前処理に適用し、反復法の高速度性を保ちつつ堅牢化を実現する。更に、既存のACA法以外の低ランク行列近似手法をH行列の部分行列近似に適用し、安定化を実現する研究を行う。また、従来のH行列法ライブラリではメニーコアCPUやGPUなどへの高性能実装がなされておらず、他の手法に対する定量的な優位性が示されてこなかった。本研究では、メニーコア・GPUクラスタ向けの高性能実装や動的負荷分散を導入し、大規模密行列解法の最速なオープンソースコードとして公開することを目指した。

3. 研究の方法

最新のスパコン上で、積分方程式法に基づく科学技術計算の効率的な実施に向け、H行列法の適用範囲拡大とメニーコア・クラスタ向けH行列法コード開発を課題として、下記の項目について研究を行った。

・研究課題(1) HACApKを用いた近似行列分解計算

分散メモリ並列計算環境におけるH行列計算の改善に取り組む。最大の課題である通信パターンの効率化を検討する。その上で、H行列の行列分解に取り組み、近似LU分解および近似QR分解を行う計算手法を開発する。これらの分解手法を実装し、数値実験を行う。近似精度および計算コストについて調査し、開発手法の有効性を確かめる。

・研究課題(2) HACApKへのFMM技術の導入およびFMMコードの結合

計算核不依存型FMM(KIFMM)をHACApKで扱うカーネルに対応させる。KIFMMでは擬似チャージをFMMセルに外接する球殻上に分布させる必要がある。高精度を達成しにくい欠点の改良をめざす。多重極展開・局所展開の変換行列を保存しインタラクションの対称性を利用してGEMMに落とし込む手法を開発し、GPU実装に取り組む。

・研究課題(3) GPUを用いたH行列法計算コードの開発

SMPクラスタ向けに開発してきたHACApKコードを元に、GPU向けのコードの開発を行う。特に、GPUを用いたH行列ベクトル積に注目し、従来より高速な実装の実現に向けたコード開発に取り組む。さらに、開発したGPU向けH行列ベクトル積を活用し、H行列を用いた連立一次方程式の解法の高速度化を目指す。

・研究課題(4) CPU向けH行列・ベクトル積計算の最適化

H行列ベクトル積のスレッド並列処理について、その改善に取り組む。HACApKライブラリに含まれる従来の実装の他に、動的負荷分散利用を含む様々な方式を実装し、それぞれ性能評価を行う。また、H行列ベクトル積の高速度化について、混合精度演算を用いる方法について研究を行う。H行列内の部分行列の一部を単精度化し、計算の高速度化、精度の悪化の程度について調べる。

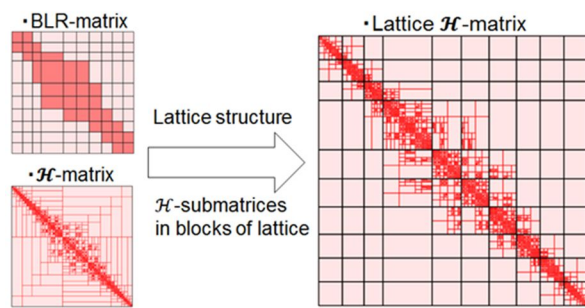
・研究課題(5) 動的負荷分散によるH行列計算の高速度化

H行列生成処理のうち、行列の区分けを表現する木の構築処理の並列化に取り組む。生成すべき木は不規則な構造を持つため、ループ並列等での単純な並列化では良好な性能は得られにくい。そこで、タスク並列言語(Tascell、Cilk Plus)による動的負荷分散機能を用いた並列化を行う。静的負荷分散場合との計算速度比較を行い、有効性を検証する。

4. 研究成果

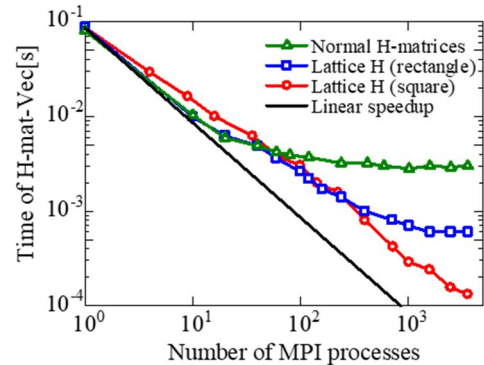
(1) 格子H行列法

分散メモリ並列計算環境におけるH行列計算の改善に取り組んだ。効率的な通信パターンを構築することが最大の課題であったが、BLR行列の持つ規則性をH行列に導入することにより解決した(図(1)-1)。この新手法(格子H行列法)は、H行列法の高圧縮性とBLR行列の利便性を併せ持つ画期的な手法と言える。



図(1)-1: 格子H行列法で用いられる行列分割

図(1)-2に、従来のH行列法と格子H行列法を用いて行列・ベクトル積計算をした際の並列計算性能を比較した結果例を示す。従来H行列法については、公開版HACApKを使用した。従来H行列法では、約100MPIプロセスあたりで速度向上の限界に達している。この原因は計算負荷の不均衡と考えられる。それに対して、格子H行列法では少なくとも3、600MPIプロセスまで速度向上が観測された。使用MPIプロセス数が少ない時(約80MPIプロセス以下)には、従来の階層型行列法の方が速かった。この原因は、格子構造の導入によるメモリ使用量の増加の影響と考えられる。使用MPIプロセス数が増えると、格子階層型行列法は従来法より優位に速く、3600MPIプロセス使用時の計算時間は、従来法の1/20程度であった。



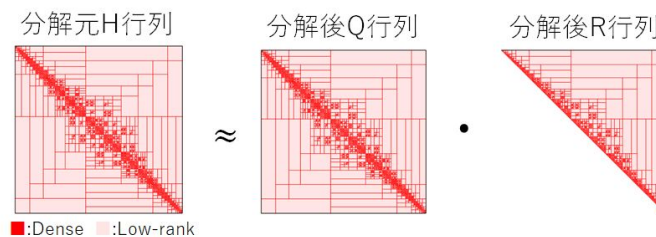
図(1)-2: 格子H行列法の並列計算性能

(2) 低ランク構造行列の近似行列分解法の開発

研究開始当初、HACApKライブラリが有する機能は、H行列生成および行列・ベクトル積計算に限定されていた。科学技術計算に必要な様々な演算に対応すべく、HACApKの機能を拡張する研究を行った。

H行列を含む低ランク構造行列に対し、厳密な行列分解を行うと分解結果行列は密行列となり、低ランク構造行列を用いる利点が失われる。そこで本研究では、行列分解を近似的に行い、分解結果行列を低ランク行列として計算する方針を取った。その際、分解結果行列に対して、次の2つの条件を課した:

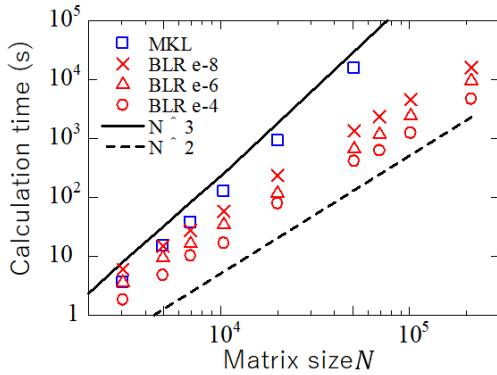
- C1: 分解結果行列は分解元行列と同じ行列分割構造を有する(図(2)-1)
- C2: 分解結果行列の低ランク部分行列のランクは、対応する分解元低ランク部分行列のランクと同じランクである



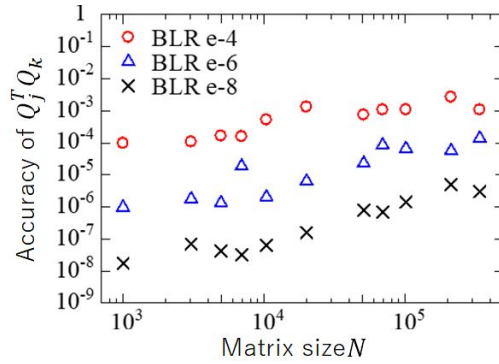
図(2)-1 H行列の行列分解の概念図(QR分解の場合)

上記の方針に基づき、格子H行列に対する近似LU分解法およびBLR行列に対する近似LU分解・近似QR分解のアルゴリズムを開発した。密行列の場合、LU分解およびQR分解の計算コストは $O(N^3)$ であるが、開発した格子H行列の近似LU分解は $O(N \log^2 N)$ 、BLR行列の近似LU分解・近似QR分解は $O(N^2)$ の計算コストであると見積もられる。

開発したアルゴリズムについて、分散メモリCPUクラスタ上で実装し、数値実験を行った。実験の結果、計算コストは見積もり通りであることが確かめられた。図(2)-2にBLR行列を近似QR分解した際の計算時間を示す。BLR行列の密行列に対する近似精度(図中では $e-4, e-6, e-8$)に応じて、精度が高いほど計算時間が多くかかるが、いずれの精度でも行列サイズを大きくして行った際に計算時間の増加は $O(N^2)$ に収まっていることが分かる。また、近似分解の精度は、近似元低ランク構造行列の密行列に対する近似精度程度であることが分かった。図(2)-3にBLR行列の近似QR分解結果行列の直交性を調べた結果を示す。



図(2)-2 BLRの近似QR分解の計算時間

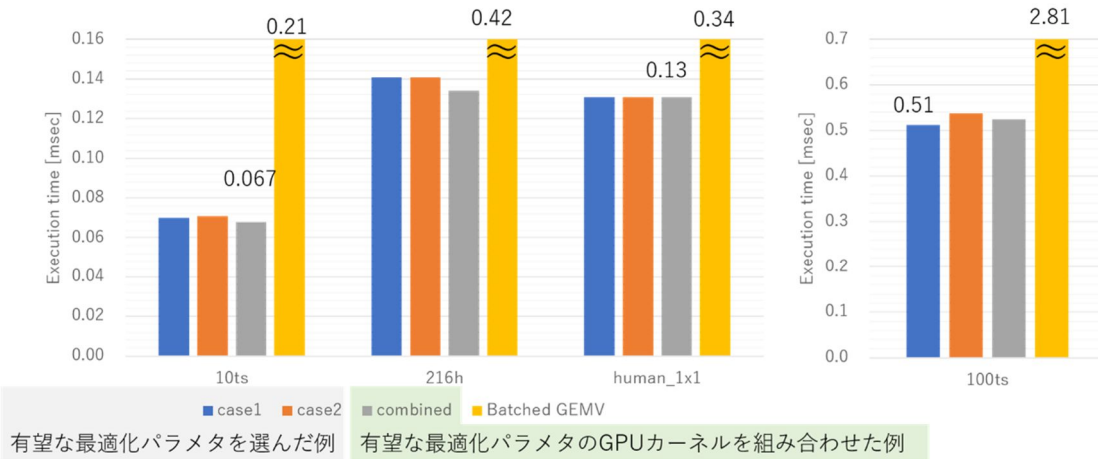


図(2)-3 BLRの近似QR分解結果行列の直交性

(3) GPUを用いたH行列・ベクトル積の高速化

H行列を用いた連立一次方程式の解法の実行時間に大きな影響を及ぼすH行列・ベクトル積について、GPUを用いて高速に行う手法の開発に取り組んだ。H行列・ベクトル積は多数の小さな行列・ベクトル積によって構成されており、従来から BLAS Level1、2 計算ライブラリが提供している行列・ベクトル積関数によって正しい結果を得ることができる。しかし、従来の計算法では1つの行列・ベクトル積を1つのGPUカーネルが担当するため、GPU上の多数の計算コアを使い切れなかったり、GPUカーネルを起動する回数が多いことがオーバーヘッドになるため、高い性能を得ることができない。

そこで本研究では、多数の行列・ベクトル積計算を一括して計算する方法を実装した。これは Batched BLAS と呼ばれる近年注目されている計算手法と同様のアイデアであるが、我々はGPU上の計算コアが多数の行列・ベクトル積をどのように担当するかについて様々なパターンを検討し、我々が用いるH行列・ベクトル積計算に適したGPUカーネル構成を求めた。NVIDIA Tesla P100にて性能評価を行った結果、H行列の構成によって最適なGPUカーネル構成は異なる(実験に用いた全H行列にて常に最速であるGPUカーネル構成はなかった)ことを確認し、さらに複数のGPUカーネルを組み合わせ合わせた合成カーネルを実装することで常にほぼ最速の性能が得られることを示した。また、一般公開されている Batched BLAS 実装のひとつである MAGMA BLAS と比較し、最大で約82%の実行時間削減を達成した。



図(3)-1 H行列・ベクトル積におけるGPUカーネルの最適化効果

(4) 混合精度演算を用いたH行列・ベクトル積の高速化

従来、様々な計算科学や解析において、物理量は倍精度の変数を用いて表現されることが多く、HACApKライブラリも倍精度演算を基本に実装されている。本研究では、H行列・ベクトル積演算において、低精度演算、具体的には単精度演算を取り入れることにより、解析の高速化を行うことを試みた。

H行列は、多数の部分行列により表現され、それらの部分行列は密行列と低ランク行列の二つのクラスに分けられる。この内、全体のデータ量としては低ランク行列が支配的であることが多く、またどれだけ多くの部分行列が低ランク化されているかが、H行列の有効性の指標であるとも言える。即ち、より多くの部分行列がより低いランクを持つ行列で近似表現された場合、元の密行列(H行列による近似の対象となっている行列)に対するデータ圧縮効果や演算低減効果が大きくなる。そこで、本研究では、低ランク部分行列に対して単精度演算を導入することで、さ

らなるデータ圧縮や高速化を図ることとした。

H行列において、低ランク部分行列 A_m は部分行列のサイズが $s \times t$ であるとき、以下のような $s \times k$ 、 $k \times t$ ($k < s$ 、 t)の二つの長方形行列 V_m 、 W_m の積により表される。

$$A_m = V_m \cdot W_m$$

ここで、我々は部分行列への単精度演算の導入手法として以下の3つの方式を提案した。1番目の方式では、単純にすべての低ランク行列のデータを単精度化する。しかしながら、本方式では、H行列の近似度が大きく低下することが懸念される。特に、低ランク行列内の要素の値が単精度で表現可能な範囲を超えた場合、その精度劣化は顕著なものとなると予想される。そこで、本研究では、新たに混合精度演算向けのデータ構造を提案し、それに基づいた混合精度演算H行列・ベクトル積手法を開発した。これが本研究における2番目の方式である。本方式では、まず低ランク行列を構成する V_m 、 W_m をスケーリングし、そのスケーリングファクタを対角行列として表現することで、部分行列を以下の様に表す。

$$A_m = V_m' \cdot D_m \cdot W_m'$$

ここで、 D_m は $k \times k$ の対角行列である。本方式を取り入れることにより、単精度表現導入に伴う精度劣化を軽減することができる。すべての低ランク部分行列に対して、上記のデータ構造の変換と単精度化を行うのが第2方式である。

本研究ではさらに高度な単精度データ・演算導入手法として、 D_m の要素の値に着目した方式を3番目の方式として提案した。本方式では、 D_m において要素の絶対値が相対的に小さいものを取り出し、これらの要素に対応する V_m' 、 W_m' の行および列のみを単精度化する。このことにより、全体の計算に対して与える影響が大きい要素データを倍精度のデータとして維持し、計算精度の劣化の度合いを低減させる。

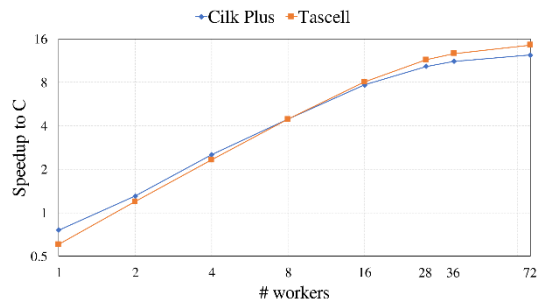
本研究では、提案した方式に基づくH行列・ベクトル積手法を電磁場境界要素解析上で評価した。同解析で用いる反復線形ソルバであるBiCGSTAB法において、単精度化による1反復当たりの高速化と計算精度の劣化に伴う反復回数増大のトレードオフについて評価した。単精度化を行った場合、BiCGSTAB法の主要計算核である行列ベクトル積におけるメモリ、CPU間のデータ転送量を削減することができる。一方で、H行列の近似度が下がるため、一般に反復法の収束性が低下し、収束までに必要な反復回数が増大する。本研究では、数値実験により本トレードオフについて評価したが、従来の倍精度データ・演算に基づくH行列を利用した場合と比べて約1.5倍の高速化を達成し、H行列ベクトル積の混合精度演算化の有効性、及び提案手法の有用性を示した。

(5) 動的負荷分散を用いたH行列分割構造生成の高速化

H行列の生成処理は、行列を部分行列に分割する分割構造生成処理とその各部分行列の要素を求めるフィル処理の2ステップにより行われる。フィル処理については効率良い並列実装が複数提案されているが分割構造生成処理については例がないため、本研究ではこの並列化に取り組んだ。

分割構造生成は、N体問題で扱う粒子間の距離などに基づいて木構造を生成することにより達成されるが、ここで扱う木構造が不規則であるため、生成を担当する部分木を事前に各コアに割り当てるような古典的な並列化手法では負荷不均衡が起こり十分な並列性能が得られない。そこで本研究では、担当部分木を動的に割り当てる動的負荷分散手法を採用し、またそのような動的負荷分散を効率的かつ比較的小さいプログラミングコストにより実現可能なタスク並列言語により実装を行った。本実装の特徴は、再帰呼び出し間と再帰呼び出し内の両方に並列化を適用するハイブリッド並列を採用した点にある。これにより、各再帰ステップ内の処理量が比較的大きい今回の木構築処理においても高い並列性能を得ることができる。

具体的には公開版HACApKのH行列生成部分を、比較のためTascellとCilk Plusの2種類のタスク並列化言語を用いて実装した。境界要素法の係数行列(密行列で約1億×1億要素)のためのH行列分割構造生成を、2つの18コアXeonプロセッサを持つ計算ノードを用いて並列実行した場合で、C言語による逐次実装に対して約14.5倍の性能向上を達成した。



図(5)-1 分割構造生成処理の並列性能

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ida Akihiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Lattice H-Matrices on Distributed-Memory Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 32nd IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS 2018)	6. 最初と最後の頁 389 ~ 898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IPDPS.2018.00049	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 Yamazaki Ichitaro, Abdelfattah Ahmad, Ida Akihiro, Ohshima Satoshi, Tomov Stanimire, Yokota Rio, Dongarra Jack	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance of Hierarchical-matrix BiCGStab Solver on GPU Clusters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 32nd IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS 2018)	6. 最初と最後の頁 930 ~ 939
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IPDPS.2018.00102	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 該当する
1. 著者名 Tominaga Naoki, Mifune Takeshi, Ida Akihiro, Sogabe Yusuke, Iwashita Takeshi, Amemiya Naoyuki	4. 巻 28
2. 論文標題 Application of Hierarchical Matrices to Large-Scale Electromagnetic Field Analyses of Coils Wound With Coated Conductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2017.2780821	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 Hoshino Tetsuya, Ida Akihiro, Hanawa Toshihiro, Nakajima Kengo	4. 巻 10860
2. 論文標題 Design of Parallel BEM Analyses Framework for SIMD Processors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 601 ~ 613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-93698-7_46	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 Hoshino Tetsuya, Ida Akihiro, Hanawa Toshihiro, Nakajima Kengo	4. 巻 -
2. 論文標題 Load-Balancing-Aware Parallel Algorithms of H-Matrices with Adaptive Cross Approximation for GPUs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER 2018)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CLUSTER.2018.00016	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 Mifune Takeshi, Tominaga Naoki, Sogabe Yusuke, Mizobata Yudai, Yasunaga Masahiro, Ida Akihiro, Iwashita Takeshi, Amemiya Naoyuki	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Large-scale electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors using a current-vector-potential formulation with a thin-strip approximation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Mustafa Abduljabbar, Mohammed Al Farhan, Noha Al-Harathi, Rui Chen, Rio Yokota, Hakan Bagci, David Keyes	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Extreme Scale FMM-Accelerated Boundary Integral Equation Solver for Wave Scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Scientific Computing	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Akihiro Ida	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Lattice H-Matrices on Distributed-Memory Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 32nd IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS 2018)	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Ida Akihiro, Nakashima Hiroshi, Kawai Masatoshi	4. 巻 なし
2. 論文標題 Parallel Hierarchical Matrices with Block Low-rank Representation on Distributed Memory Computer Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region	6. 最初と最後の頁 232-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3149457.3149477	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 該当する

1. 著者名 Tetsuya Hoshino, Akihiro Ida, Toshihiro Hanawa, Kengo Nakajima	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Design of Parallel BEM Analyses Framework for SIMD Processors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The International Conference on Computational Science 2018 (ICCS 2018)	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Ichitaro Yamazaki, Ahmad Abdelfattah, Akihiro Ida, Satoshi Ohshima, Stanimire Tomov, Rio Yokota, Jack Dongarra	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Analyzing Performance of BiCGStab with Hierarchical Matrix on GPU clusters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 32nd IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS 2018)	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Tominaga Naoki, Mifune Takeshi, Ida Akihiro, Sogabe Yusuke, Iwashita Takeshi, Amemiya Naoyuki	4. 巻 28
2. 論文標題 Application of Hierarchical Matrices to Large-Scale Electromagnetic Field Analyses of Coils Wound With Coated Conductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2017.2780821	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 該当する

1. 著者名 Ohshima Satoshi, Yamazaki Ichitaro, Ida Akihiro, Yokota Rio	4. 巻 なし
2. 論文標題 Optimization of Hierarchical Matrix Computation on GPU	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Asian Conference on Supercomputing Frontiers	6. 最初と最後の頁 274 ~ 292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/978-3-319-69953-0_16	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 該当する

1. 著者名 Ida Akihiro, Ataka Tadashi, Takahashi Yasuhito, Mifune Takeshi, Iwashita Takeshi, Furuya Atsushi	4. 巻 54
2. 論文標題 Application of Improved H-Matrices in Micromagnetic Simulations of Spin Torque Oscillator	5. 発行年 2018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.2017.2763611	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 該当する

1. 著者名 Iwashita Takeshi, Ida Akihiro, Mifune Takeshi, Takahashi Yasuhito	4. 巻 108
2. 論文標題 Software Framework for Parallel BEM Analyses with H-matrices Using MPI and OpenMP	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 2200 ~ 2209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.263	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 該当する

1. 著者名 Akihiro Ida, Tadashi Ataka, Atsushi Furuya	4. 巻 56(4)
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 Rise Ooi, Takeshi Fukaya, Takeshi Iwashita, Akihiro Ida, Rio Yokota	4. 巻 なし
2. 論文標題 Effect of Mixed Precision Computing on H-Matrix Vector Multiplication in BEM Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region	6. 最初と最後の頁 92-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3368474.3368479	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 Yu Pei, George Bosilca, Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Jack Dongarra	4. 巻 なし
2. 論文標題 Evaluation of Programming Models to Address Load Imbalance on Distributed Multi-Core CPUs: A Case Study with Block Low-Rank Factorization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE/ACM Parallel Applications Workshop, Alternatives To MPI (PAW-ATM)	6. 最初と最後の頁 25-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PAW-ATM49560.2019.00008	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 該当する

1. 著者名 Zhengyang Bai, Tasuku Hiraishi, Hiroshi Nakashima, Akihiro Ida, Masahiro Yasugi	4. 巻 27
2. 論文標題 Parallelization of Matrix Partitioning in Construction of Hierarchical Matrices using Task Parallel Languages	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 840-851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjip.27.840	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 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/ipsjip.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 -

1. 著者名 Satoshi Ohshima, Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Rio Yokota	4. 巻 なし
2. 論文標題 Optimization of Numerous Small Dense-Matrix-Vector Multiplications in H-matrix Arithmetic on GPU	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Auto-Tuning for Multicore and GPU (ATMG) In conjunction with the IEEE MCSoc-19	6. 最初と最後の頁 9-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MCSoc.2019.00009	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 Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Rio Yokota, Jack Dongarra	4. 巻 33(5)
2. 論文標題 Distributed Memory Lattice H-matrix Factorization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The International Journal of High Performance Computing Applications	6. 最初と最後の頁 1046-1063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1094342019861139	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 該当する

1. 著者名 Takeshi Mifune, Naoki Tominaga, Yusuke Sogabe, Yudai Mizobata, Masahiro Yasunaga, Akihiro Ida, Takeshi Iwashita, Naoyuki Amemiya	4. 巻 32(9)
2. 論文標題 Large-scale electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors using a current-vector-potential formulation with a thin-strip approximation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 94002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab1d35	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 Mustafa AbdulJabbar, Mohammed Al Farhan, Noha Al-Harathi, Rui Chen, Rio Yokota, Hakan Bagci, David Keyes	4. 巻 4(3)
2. 論文標題 Extreme Scale FMM-Accelerated Boundary Integral Equation Solver for Wave Scattering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Scientific Computing	6. 最初と最後の頁 C245-C268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/18M1173599	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 該当する

〔学会発表〕 計36件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 白 正陽, 平石 拓, 中島 浩, 伊田 明弘, 八杉 昌宏
2. 発表標題 Parallelization of Matrix Partitioning in Construction of Hierarchical Matrices using Task Parallel Languages
3. 学会等名 The 3rd cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (xSIG 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhengyang Bai, Tasuku Hiraishi, Hiroshi Nakashima, Akihiro Ida, Masahiro Yasugi
2. 発表標題 Implementation of Partitioning of Hierarchical Matrices using Task Parallel Languages
3. 学会等名 48th International Conference on Parallel Processing (ICPP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Hoshino, Toshihiro Hanawa, Akihiro Ida
2. 発表標題 An Optimization of H-matrix-vector Multiplication by Using Un-used Cores
3. 学会等名 International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Redion (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, 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 Redion (HPC Asia 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Akihiro Ida
2 . 発表標題 Improvement of HACApK Library Using Lattice H-matrices
3 . 学会等名 France-Japan-Germany trilateral workshop : Convergence of HPC and Data Science for Future Extreme Scale Intelligent Applications
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tadashi Ataka, Akihiro Ida, Atsushi Furuya, Koichi Shimizu, Jun Fujisaki, Tomohiro Tanaka, Hirotaka Oshima
2 . 発表標題 Application of the Fast Micromagnetic Simulation to Thin Spintronic devices
3 . 学会等名 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019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 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Tadashi Ataka, Akihiro Ida, Atsushi Furuya, Koichi Shimizu, Jun Fujisaki, Tomohiro Tanaka and Hirotaka Oshima
2 . 発表標題 Application of the Fast Micromagnetic Simulation to Thin Spintronic devices
3 . 学会等名 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoyuki Amemiya, Naoki Tominaga, Takeshi Mifune, Yusuke Sogabe, Yudai Yasunaga, Akihiro Ida and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Progress of Large-Scale and Fast Electromagnetic Field Analyses of Coils Wound with Coated Conductors for Ac Loss and Shielding Current Calculations
3. 学会等名 6th International Workshop on Numerical Modelling of High Temperature Superconductors (HTS Modelling 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Ida
2. 発表標題 Matrix Arithmetic Using Lattice H-matrix Representations
3. 学会等名 ATAT in HPC 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊田明弘
2. 発表標題 大規模数値解析向け低ランク行列近似手法
3. 学会等名 第52回FrontISTR研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊田明弘
2. 発表標題 格子H行列を用いた並列行列計算
3. 学会等名 2018年並列 / 分散 / 協調処理に関する『熊本』サマー・ワークショップ (SWoPP熊本2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊田明弘
2. 発表標題 格子階層型行列法：分散メモリ並列計算機向け階層型低ランク近似手法
3. 学会等名 第23回計算工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Ida, Ichitaro Yamazaki, Rio Yokota, Satoshi Ohshima, Tetsuya Hoshino, Tasuku Hiraishi and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 More Efficient Structures of H-matrices
3. 学会等名 The HPC symposium Computational Science at Scale (CoSaS18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Rio Yokota, and Jack Dongarra
2. 発表標題 Distributed Memory Lattice H-Matrix Factorization
3. 学会等名 SIAM Conference on Computational Science and Engineering 2019(SIAM CSE 19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Hoshino and Akihiro Ida
2. 発表標題 H-Matrix Framework for Many-core Processors
3. 学会等名 SIAM Conference on Computational Science and Engineering 2019(SIAM CSE 19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白 正陽, 平石 拓, 中島 浩, 伊田 明弘, 八杉 昌宏
2. 発表標題 Parallelization of Matrix Partitioning in Construction of Hierarchical Matrices using Task Parallel Languages
3. 学会等名 情報処理学会第122回プログラミング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩下 武史, 川村 卓人, 深谷 猛, 伊田 明弘
2. 発表標題 H行列ベクトル積のスレッド並列化における負荷均衡に関する検討
3. 学会等名 2018年並列 / 分散 / 協調処理に関する『熊本』サマー・ワークショップ (SWoPP熊本2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大島 聡史, 山崎 市太郎, 伊田 明弘, 横田 理央
2. 発表標題 階層型行列計算におけるソフトウェア自動チューニング
3. 学会等名 第23回計算工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rise Ooi Kok Thong, Takeshi Fukaya and Takeshi Iwashita
2. 発表標題 Accelerating Multithreaded Linear Solver with Mixed Precision Hierarchical Matrix Computation and Data Structure
3. 学会等名 日本応用数理学会 応用数理 学生・若手研究者 のための研究交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Ohshima, Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Rio Yokota
2. 発表標題 Optimization of hierarchical matrix computation on GPU - accelerating many small matrix calculation
3. 学会等名 Sapporo Summer HPC Seminar 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Ida
2. 発表標題 Lattice H-matrices : A new efficient variant on distributed memory systems
3. 学会等名 ATAT in HPC 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akihiro Ida
2. 発表標題 Efficient Low-rank Solver for Integral Equations on Distributed Memory Systems
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018(SIAM PP 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ida Akihiro, Ataka Tadashi, Takahashi Yasuhito, Mifune Takeshi, Iwashita Takeshi, Furuya Atsushi
2. 発表標題 Application of Improved H-matrices in Micromagnetic Simulations
3. 学会等名 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊田明弘, 河合直聡
2. 発表標題 階層型行列における行列分割法
3. 学会等名 2017年並列 / 分散 / 協調処理に関する『秋田』サマー・ワークショップ (SWoPP秋田2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tetsuya Hoshino, Akihiro Ida, Toshihiro Hanawa
2. 発表標題 Performance Evaluations and Optimizations of H-Matrices for Many-Core Processors
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018(SIAM PP 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ichitaro Yamazaki, Satoshi Ohshima, Akihiro Ida, Rio Yokota, Jack Dongarra
2. 発表標題 Accelerating Hierarchical-Matrix Based Linear Solver on a GPU Cluster
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018(SIAM PP 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 埴 敏博, 伊田 明弘, 星野 哲也
2. 発表標題 OpenCLを用いたFPGAによる階層型行列計算
3. 学会等名 第163回 HPC研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 埴 敏博, 伊田 明弘, 星野 哲也
2. 発表標題 階層型行列計算のFPGAへの適用
3. 学会等名 第161回HPC研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大島 聡史, 山崎 市太郎, 伊田 明弘, 横田 理央
2. 発表標題 階層型行列計算のGPU向け最適化
3. 学会等名 日本応用数学会 2017年度 年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 星野 哲也, 伊田 明弘, 埴 敏博, 中島 研吾
2. 発表標題 階層型行列法ライブラリHACApkを用いたアプリケーションのメニーコア向け最適化
3. 学会等名 SWoPP秋田2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大島聡史, 山崎市太郎, 伊田明弘, 横田理央
2. 発表標題 GPUクラスタ上における階層型行列計算の最適化
3. 学会等名 SWoPP秋田2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Ohshima, Ichitaro Yamazaki, Akihiro Ida, Rio Yokota
2. 発表標題 Performance Evaluation of Hierarchical Matrix Computation on Various Modern Architectures
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018(SIAM PP 18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 白正陽, 平石拓, 伊田明弘, 中島浩
2. 発表標題 階層型行列の区分け決定処理のCilk Plusによる並列化
3. 学会等名 第20回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ (PPL2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村卓人, 深谷猛, 岩下武史, 伊田明弘
2. 発表標題 H行列ベクトル積のスレッド並列化手法に関する性能評価
3. 学会等名 2017年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tasuku Hiraishi
2. 発表標題 Dynamic Load Balancing for Construction and Arithmetic of Hierarchical Matrices
3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018(SIAM PP 18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

・HACApKリポジトリ
<https://github.com/Post-Peta-Crest/ppOpenHPC/tree/MATH/HACApK>
・HACApK_hmvm for GPU
https://github.com/exthnet/hacapk_hmvm
・ppOpenHPCプロジェクト
<http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/ppopenhpc>

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	横田 理央 (Yokota Rio) (20760573)	東京工業大学・学術国際情報センター・准教授 (12608)	
研究分担者	岩下 武史 (Iwashita Takeshi) (30324685)	北海道大学・情報基盤センター・教授 (10101)	
研究分担者	大島 聡史 (Ohshima Satoshi) (40570081)	名古屋大学・情報基盤センター・准教授 (13901)	
研究分担者	平石 拓 (Hiraishi Tasuku) (60528222)	京都大学・学術情報メディアセンター・助教 (14301)	
研究協力者	Yamazaki Ichitaro (Yamazaki Ichitaro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	星野 哲也 (Hoshino Tetsuya)		
研究協力者	埴 敏博 (Hanawa Toshihiro)		
連携研究者	青木 尊之 (Aoki Takayuki) (00184036)	東京工業大学・学術国際情報センター・教授 (12608)	
連携研究者	中島 研吾 (Nakajima Kengo) (20376528)	東京大学・情報基盤センター・教授 (12601)	