

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11322

研究課題名(和文)リアルタイム津波浸水被害推定システムにおける高速化技術の研究開発

研究課題名(英文)Optimization of a real-time tsunami inundation forecast system

研究代表者

撫佐 昭裕 (MUSA, AKIHIRO)

東北大学・サイバーサイエンスセンター・客員教授

研究者番号：40639655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、リアルタイム津波浸水被害推定システムの高速処理を実現するためのシステムアーキテクチャと高速化技術を研究するものである。本研究では、本システムの解析を行い、本システムに適した計算機システムがメモリバンド幅の高いベクトル型プロセッサと汎用プロセッサからなるハイブリッド型システムであることを明らかにした。そして、高速化技術では、多角形格子の階層型格子構造を開発し、地形による並列実行時のロードインバランスを改善する領域分割法を開発した。さらにベクトル演算の効率化も実現した。最新システムSX-Aurora TSUBASAを用いて日本の太平洋沿岸の被害推定を行えることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究対象であるリアルタイム津波浸水被害推定システムは、2017年から内閣府総合防災システムの一機能として運用を行っている。本システムは地震発生後30分以内に津波被害の推定結果を算出し、内閣府はその推定結果を用いて政府としての津波災害の初期対応方針を決定している。現在のシステムは30mの精度で推定を行っている。しかし、きめ細やかな災害対応には10mの精度での推定を行う必要があり、本システムの高速化が求められている。本研究は、本システムに適したコンピュータアーキテクチャを明らかにし、そして津波浸水被害シミュレーションの高速化を実現し、迅速な災害対応に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：This research has two objectives. The first objective is to clarify system architectures for achieving a high performance on our tsunami inundation forecast system. The other is to optimize our tsunami inundation program.

We analyzed performances of the program using four types of processors. Then, it is clarified that the program requires vector processors with a high memory bandwidth in order to achieve high performance, and the forecast system need to execute several control processes. Therefore, the optimal computer systems are vector-scalar hybrid systems such as SX-Aurora TSUBASA. In the program, we have developed a polygonal domain for decreasing the amount of computation and a domain decomposition method for maintaining a load balance of the parallel simulation. Moreover, we have optimized vector operations. Then, the program can simulate tsunami inundations and damage estimates on the whole coastal regions along the Pacific coast of Japan within five minutes.

研究分野：高速化技術

キーワード：高速化 スーパーコンピュータ 津波シミュレーション リアルタイムシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

2011年の東日本大震災は大規模な津波により北海道から千葉県まで広範囲に被害をもたらした。その被害把握には多くの時間を要することになり、救援の開始が遅れることになった。津波などの広域災害では、被害の全貌をいち早く把握し、すばやく対応することが求められる。この全貌を把握する一手段としてコンピュータシミュレーションがある。地震発生直後に浸水範囲や建築物被害の推定をコンピュータシミュレーションで行い、その推定に従った対応計画を練ることができる。そのためには地震発生後数十分以内に、精度の高いシミュレーションを行うことが求められる。当研究グループでは、スーパーコンピュータを活用して20分以内に一都市の市街地を10m格子で津波浸水被害推定を行うことに成功している。そして、2017年に内閣府の総合防災システムの一機能として採用され、南海トラフ地震の被害が想定されている静岡県から鹿児島県の被害推定を行っている。しかし、現在の演算性能では10m格子を用いて広域のシミュレーションを短時間で行うことはできず、30m格子で南海トラフ地震の被害推定を行っている。そのため、日本全国の被害推定をより高精度でより短時間でを行うための高速化技術が求められている。

一方、スーパーコンピュータは数年おきに新しいプロセッサが開発され、理論演算性能が向上している。これはプロセッサの周波数向上の限界から一つのプロセッサに多くの回路を集積させ、演算機構の強化を行っているからである。そして、様々なプロセッサが高速化技術としてベクトル処理(SIMD(Single Instruction Multi Data)処理)を採用し、プロセッサ内の並列性を高めている。しかし、メモリシステムにおいてはメモリウォール問題が存在し、プロセッサの性能とメモリ性能の乖離が拡大し、メモリシステムから十分な演算データを提供できず、シミュレーションプログラムの実行効率が低下するという問題がある。このような中、さらなる津波浸水被害推定シミュレーションの精度向上とシミュレーション対象領域を全国に拡大するため、次世代のスーパーコンピュータにおいて、より高速にシミュレーションが行える高速化技術の研究開発が必要になっているのである。

2. 研究の目的

本研究では、津波浸水被害推定シミュレーションの特性を解析して、平成33年頃に実用化される次世代スーパーコンピュータの技術レベルを想定して、本シミュレーションプログラムに適したコンピュータアーキテクチャを明らかにする。また、津波浸水被害推定シミュレーションは地形データの格子構造やプログラム構造によって、計算の安定性、演算量、演算性能及び並列性能が変化する。そのため、全国規模のシミュレーションを行うための格子構造の研究開発を行う。そして、その格子構造をもとにプログラムの演算性能と並列性能の特性解析を行い、次世代スーパーコンピュータで採用されるシステムアーキテクチャに向けた、演算処理と並列処理におけるプログラムレベルの高速化技術を研究開発する。

本研究ではコンピュータアーキテクチャの研究とシミュレーションモデルの研究を融合させ、全国規模の津波浸水被害推定を行える、リアルタイム津波浸水被害推定システムを開発し、我が国の安全・安心な社会に貢献をしていくものである。

3. 研究の方法

本研究は、産学連携のもと津波シミュレーションの研究者とコンピュータ科学の研究者が連携して研究を進めた。津波浸水被害推定シミュレーションのモデル研究は津波シミュレーションの研究者と国際航業株式会社の技術部隊と連携して実施した。また、スーパーコンピュータのアーキテクチャの調査・検討とプログラムの高速化技術の研究は、コンピュータ科学の研究者と東北大学サイバーサイエンスセンター内に設置された高性能計算技術開発(NEC)共同研究部門の日本電気株式会社の研究員と連携して実施した。

シミュレーションモデルの格子構造の研究開発では、全国規模のシミュレーションを実現するための地形データの格子構造の開発を行った。本津波浸水被害推定シミュレーションは矩形型の階層型格子を用いているため、津波が到達しない陸地や浸水が深い海洋部を計算している。そのためシミュレーション領域を拡大すると不要な演算が増える傾向にあった。その欠点を軽減する格子構造の開発を行った。そして、北海道から鹿児島までの太平洋沿岸の津波浸水被害推定シミュレーションを安定的に行う地形データの作成を実施した。

次に、高速化技術の研究開発では、ターゲットなるコンピュータアーキテクチャを検討するため、NEC SX-Aurora TSUBASA, Intel Xeon Gold, Intel Xeon Phi, NVIDIA P100の異なる4つのアーキテクチャでの高速化を実施する。具体的には、高コストのD0ループの命令レベルの解析を行い、演算処理の効率化を検討した。また、本津波浸水被害推定シミュレーションで採用した階層格子では並列実行時のロードバランスが悪いことが判明し、そのためロードバランスを均一化する領域分割法の開発を行った。

また、本リアルタイム津波浸水被害推定システムに適したコンピュータアーキテクチャを明らかにするために、前記高速化で分析した結果と、本リアルタイム津波浸水被害推定システムの

機能について洗い出しを行い、シミュレーションプログラム的高速実行だけでなくシステムとして実現できるコンピュータアーキテクチャの検討も実施した。

4. 研究成果

シミュレーションモデルの格子構造の研究開発、高速化技術の研究開発、そしてコンピュータアーキテクチャの検討における主な成果を報告する。

(1) 格子構造の研究開発

本津波浸水被害推定シミュレーションは平面 2 次元非線形長波理論に基づく有限差分法の津波コードであり、複数の空間解像度の解析領域を繋いで同時に時間積分を行う階層型格子を採用している。しかし、解析領域は矩形であるため、南北方向や東西方向に直線的でない複雑な海岸線の沿岸域を解析対象とすると、津波が到達しないと考えられる標高の高い地域も解析領域内に含まれ、また、津波の波速が大きくなる水深の深い地域も解析領域内に含まれることになり、CFL 条件も厳しくなる。そのため、図 1 に示したように解析対象を津波が遡上しうる沿岸域のみに限定し、この対象地域を覆うような多角形の解析領域（多角形格子）を開発した。そして、解析領域の形状が多角形へと拡張されているため、領域端に位置する全ての辺において、親領域と情報交換を行うようにシミュレーションプログラムの開発を行った。この結果、図 1 に示した高知県のシミュレーションにおいて演算量を従来の矩形に比べて 1/3 に削減することが可能となった。

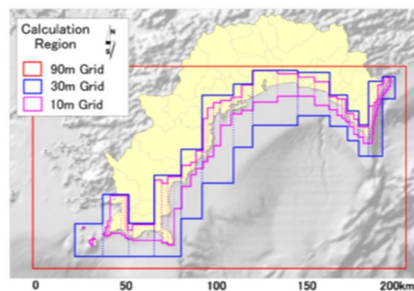


図 1 多角形格子の例

(2) 高速化技術の研究開発

津波浸水被害推定シミュレーションは NEC 製ベクトル型スーパーコンピュータ上で開発されてきた。そのため基本的なベクトル化と MPI による並列化は実施されている。本研究では最適なコンピュータアーキテクチャを検討するため表 1 に示した NEC SX-Aurora TSUBASA, Intel Xeon Gold, Intel Xeon Phi, NVIDIA P100 でのさらなる高速化を実施した。その一例として、高コストになっている D0 ループに対して命令レベルの解析を行い、論理演算がボトルネックになっていることを突き止め、論理演算を削減するプログラム構造を開発した。並列化に対してはプロセスごとの演算数、データ転送の解析を行い、(1)に示した多角形格子では演算のロードバランスに不均一があることが判明し、均一化を実施する領域分割法を開発した。また、Xeon プロセッサに対しては SIMD 化の実施と P100 に対しては OpenACC と CUDA による実装を行い、プロセッサと GPU 間のデータ転送を削減する高速化も実施した。

表 1 評価に用いた CPU の諸元

	SX-Aurora TSUBASA	Xeon Gold	Xeon Phi	P100
CPU型番	10AE	6126	7210	P100
単精度性能 (Gflop/s)	4,866	1,997	5,325	10,600
メモリバンド幅 (GB/s)	1,350	128	115	720

図 2 は SX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi, P100 での津波浸水被害推定シミュレーションの実行時間である。左図は、SX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi の 1 コアでの高速化前と後の実行時間であり、中図はその並列実行での実行時間である。また、左図は P100 における OpenACC と CUDA での実行時間である。ここで、評価に利用したシミュレーションは高知県の 4 階層の多角形格子 (30m, 90m, 270m, 810m) であり、 t が 0.5 秒での 6 時間分の津波現象を再現したものである。左図より、高速化によって 1 コアでの実行時間は SX-Aurora TSUBASA で約 3/4, Xeon Gold で約 2/5, Xeon Phi で約 1/5 に短縮されている。また、SX-Aurora TSUBASA は 1 コアで Xeon Gold の約 1/4, Xeon Phi の約 1/12 の実行時間であり、最も高速に実行できることを明らかにした。また、中図において、実行時間 5 分を見てみると、高速化によって SX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi とともにコア数が半分になっている。そして、SX-Aurora TSUBASA がもっともコア数が少なく、並列実行でも最も高速に実行できることが判明した。右図は P100 における実行時間であり、実装として OpenACC より Cuda の方が実行時間が短くなっていることがわかる。しかし、実行時間が約 20 分であり、SX-Aurora TSUBASA の 1 コアの約 1/2 の実行時間であり、SX-Aurora TSUBASA と P100 のピーク性能から P100 の実行効率は悪いことがわかる。これは本シミュレーションには分岐命令が多数あり、GPU のコアを十分に利用できてい

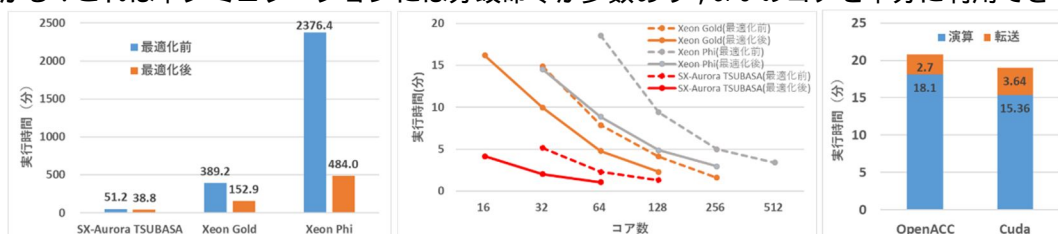


図 2 左図：1 コアでの実行時間 中図：並列での実行時間 右図：P100 での実行時間

ないためである。GPU 向けのさらなる最適化は今後の課題である。

(3) コンピュータアーキテクチャの検討

本津波浸水被害推定シミュレーションにおいて適したシステムの検討を行った。特に近年のスーパーコンピュータはメモリウォール問題に直面しており、本研究ではルーフラインモデルを用いて検討を行った。図3がSX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi, P100のルーフラインモデルである。また、本津波浸水被害推定シミュレーションのB/F値を調査した結果、1.8であった。この図より本津波浸水被害推定シミュレーションは各システムにとってメモリバンド幅ネックのプログラムであることがわかる。そして、図3よりメモリバンド幅が高いSX-Aurora TSUBASAがもっと性能が高くなることがわかる。これは前記の評価結果と一致している。このことから、本津波浸水被害推定シミュレーションにおいて適したCPUはSX-Aurora TSUBASAのようなベクトル型プロセッサであることが明らかになった。

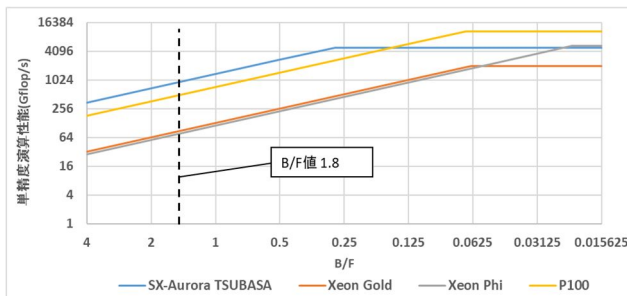


図3 ルーフラインモデル

また、本リアルタイム津波浸水被害推定システムは、津波浸水被害推定シミュレーション以外に気象庁や国土地理院からの地震情報や断層データを受信し初期推移の処理を行い、シミュレーション結果の可視化や配信、そしてシステムとしての制御も行う。そのため、汎用プロセッサの機能も必要になる。前記、シミュレーション性能とシステムの機能を考慮すると図4のような汎用プロセッサとベクトルプロセッサのハイブリッド型のスーパーコンピュータが本リアルタイム津波浸水被害推定システムに適したシステムとなる。

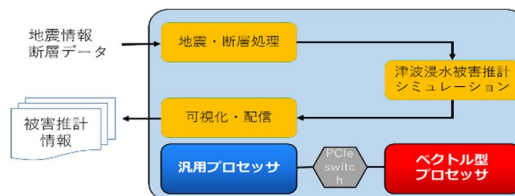


図4 システムイメージ

(4) 全国規模の太平洋沿岸シミュレーション

全国規模の太平洋沿岸を5分以内にシミュレーションするためのコンピュータ資源量(CPUの規模)を算出した。ここでシミュレーション時間を5分以内としたのは、現在の内閣府システムにおいて5分以内にシミュレーションが完了しているからである。

本津波浸水被害推定シミュレーションは、世界測地系平面直角座標系を使用し、また、潮汐現象の計算も行っている。そのため、一つのプログラムで全国規模の太平洋沿岸をシミュレーションすることはできない。そこで、座標系と潮汐現象を考慮して、太平洋沿岸を28分割してそれぞれを独立にシミュレーションすることにした。また、東日本については太平洋プレートによる地震を、西日本はフィリピン海プレートの地震をシミュレーションすることとし、シミュレーション範囲を図5とした。階層格子としては4階層(30m, 90m, 270m, 810m)とし、北海道知床岬から鹿児島県大隅半島までの格子データを作成し、表1のSX-Aurora TSUBASAで実行時間5分以内になるコア数を調査した。その結果、864コア(108CPU)でシミュレーションを行うことができることが明らかになった。

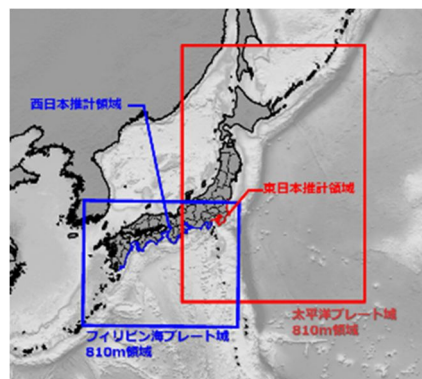


図5 シミュレーションの範囲

次に、本測定結果をもとに10m格子における必要なシステム規模を算出した。格子サイズを1/3にすることによって、シミュレーションの時間積分量が3倍になる。また、階層格子として5階層(10m, 30m, 90m, 270m, 810m)として太平洋沿岸のデータを作成すると、全格子数が4倍になる。このことから、全演算量は12倍となり、必要なコア数は10,368コア(1,296CPU)となる。本結果より、10m格子サイズによる全国規模の太平洋沿岸シミュレーションが実現可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Musa Akihiro, Abe Takashi, Kishitani Takumi, Inoue Takuya, Sato Masayuki, Komatsu Kazuhiko, Murashima Yoichi, Koshimura Shunichi, Kobayashi Hiroaki	4. 巻 11537
2. 論文標題 Performance Evaluation of Tsunami Inundation Simulation on SX-Aurora TSUBASA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 363 ~ 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-22741-8_26	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 Inoue Takuya, Abe Takashi, Koshimura Shunichi, Musa Akihiro, Murashima Yoichi, Kobayashi Hiroaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Development and Validation of a Tsunami Numerical Model with the Polygonally Nested Grid System and its MPI-Parallelization for Real-Time Tsunami Inundation Forecast on a Regional Scale	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 416 ~ 434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2019.p0416	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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 T. Kishitani, K. Komatsu, M. Sato, A. Musa, H. Kobayashi
2. 発表標題 Importance of Selecting Data Layouts in the Tsunami Simulation Code
3. 学会等名 15th International Workshop on Automatic Performance Tuning (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Musa, T. Soga, T. Abe, M. Sato, K. Komatsu, S. Koshimura, H. Kobayashi
2. 発表標題 Evaluation of Tsunami Inundation Simulation using Vector-Scalar Hybrid MPI on SX-Aurora TSUBASA
3. 学会等名 The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 撫佐昭裕
2. 発表標題 大規模津波浸水被害推計シミュレーションのマルチプラットフォーム向け最適化手法の研究
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第12回シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Musa, T. Abe, T. Kishitani, T. Inoue, M. Sato, K. Komatsu, Y. Murashima, S. Koshimura, H. Kobayashi
2. 発表標題 Performance Evaluation of Tsunami Inundation Simulation On SX-Aurora TSUBASA
3. 学会等名 9th International Workshop on Advances in High Performance Computational Earth Science in conjunction with ICCS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kishitani, K. Komatsu, M. Sato, A. Musa, H. Kobayashi
2. 発表標題 Importance of Selecting Data Layouts in the Tsunami Simulation Code
3. 学会等名 14th International Workshop on Automatic Performance Tuning (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kishitani, K. Komatsu, A. Musa, M. Sato, H. Kobayashi
2. 発表標題 An Application Parameter Search Method Based on the Binary Tree Algorithm for Performance Tuning
3. 学会等名 ISC High Performance 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Koshimura, T. Inoue, Y. Ohta, R. Hino, A. Musa, Y. Murashima, M. Kachi, Y. Sato, H. Kobayashi, Y. Murashima
2. 発表標題 Real-time Tsunami Inundation and Damage Forecasting in Japan - Present and Future
3. 学会等名 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 撫佐昭裕
2. 発表標題 SINETの防災利用 リアルタイム津波浸水被害推計システムでの利用
3. 学会等名 学術情報基盤オープンフォーラム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧川 陽平, 渡場 康弘, 伊達 進, 撫佐 昭裕, 佐藤 佳彦
2. 発表標題 ジョブ管理システムSlurmの緊急ジョブスイッチング機能の検証
3. 学会等名 第17回 ディベンダブルシステムワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 撫佐昭裕
2. 発表標題 大規模津波浸水被害推計シミュレーションのマルチプラットフォーム向け最適化手法の研究
3. 学会等名 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第11回シンポジウム
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Musa, T. Kishitani, T. Inoue, H. Hokari, M. Sato, K. Komatsu, Y. Murashima, S. Koshimura, H. Kobayashi
2 . 発表標題 Performance Evaluation of a Real-Time Tsunami Inundation Forecast System on Modern Supercomputers
3 . 学会等名 5th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Komatsu, T. Kishitani, M. Sato, A. Musa, H. Kobayashi
2 . 発表標題 earch Space Reduction for Parameter Tuning of a Tsunami Simulation on the Intel Knights Landing Processor
3 . 学会等名 IEEE 12th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Komatsu, S. Momose, Y. Isobe, M. Yokokawa, O. Watanabe, T. Aoyama, M. Sato, A. Musa, H. Kobayashi
2 . 発表標題 Performance Evaluation of a Brand-New Vector Supercomputer SX-Aurora TSUBASA
3 . 学会等名 The International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 岸谷 拓海, 小松 一彦, 撫佐 昭裕, 佐藤 雅之, 小林 広明
2 . 発表標題 メモリーコアプロセッサのためのパラメータチューニング時間削減手法
3 . 学会等名 2018年並列 / 分散 / 協調処理に関するサマー・ワークショップ
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Musa, T. Abe, T. Kishitani, T. Inoue, M. Sato, K. Komatsu, Y. Murashima, S. Koshimura, H. Kobayashi
2. 発表標題 Performance Evaluation of Tsunami Inundation Simulation On SX-Aurora TSUBASA
3. 学会等名 9th International Workshop on Advances in High Performance Computational Earth Science in conjunction with ICCS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kishitani, K. Komatsu, A. Musa, M. Sato, H. Kobayashi
2. 発表標題 An Application Parameter Search Method Based on the Binary Tree Algorithm for Performance Tuning
3. 学会等名 ISC High Performance 2019 (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
連携研究者	小林 広明 (KOBAYASHI HIROAKI) (40205480)	東北大学・情報科学研究科・教授 (11301)	
連携研究者	越村 俊一 (KOSHIMURA SYUNICHI) (50360847)	東北大学・災害科学国際研究所・教授 (11301)	

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