

令和 4 年 9 月 20 日現在

機関番号：34437

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02858

研究課題名（和文）可積分アルゴリズム：正值性をもつ高精度計算基盤

研究課題名（英文）Integrable Algorithms: Basis of Higher Accurate Computations with Positivity

研究代表者

中村 佳正（Nakamura, Yoshimasa）

大阪成蹊大学・その他部局等・教授

研究者番号：50172458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：可積分アルゴリズムについて様々な観点から研究した。密行列の特異値分解法として知られるヤコビ法は、ハウスホルダ変換とQR法を組み合わせた標準解法より高精度であるものの低速である。ヤコビ法には片側と両側があり、片側ヤコビ法のみが米国のLAPACKに実装されている。両側ヤコビ法を実装し、LAPACK版の片側ヤコビ法よりも高速かつ高精度であることを確かめた。一方、LAPACK版の片側ヤコビ法では、中小規模の行列の計算時間はそれほど大きくはないものの、固有ベクトルの直交性が十分ではないという欠点があった。高精度ギブンス回転と混合積和演算の利用によって片側ヤコビ法の高精度な実装が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

米国の標準数値計算ソフトウェアライブラリのLAPACKでは、特異値分解のための片側ヤコビ法の実装コードが公開され、高精度な特異値分解に資するものとなっているが、両側ヤコビ法の実装コードは見当たらない。本研究では、可積分アルゴリズムとみなすことのできる様々なアルゴリズムの高精度な実装を研究してきたが、最終年度は連続極限が可積分系となることが知られているヤコビ法を取り上げ、両側ヤコビ法の実装コードを開発してLAPACK版の片側ヤコビ法よりも高速かつ高精度であることを確かめている。また、高精度ギブンス回転と積和演算(FMA)の利用によって片側ヤコビ法の高精度な実装を実現している。

研究成果の概要（英文）：We studied integrable algorithms from various points of view. The Jacobi method, which is known as the singular value decomposition method for dense matrices, is more accurate but slower than the standard solution method that combines the Householder transformation and the QR method. The Jacobi method has one side and both sides, and only the one-sided Jacobi method is implemented in LAPACK in the United States. We implemented the two-sided Jacobi method and confirmed that it is faster and more accurate than the LAPACK version of the one-sided Jacobi method. On the other hand, the LAPACK version of the one-sided Jacobi method has the disadvantage that the eigenvectors are not sufficiently orthogonal, although the calculation time for small and medium-sized matrices is not so large. It was shown that high-precision implementation of the one-sided Jacobi method is possible by using high-precision Givens rotation and fused multiply-add (FMA) operation.

研究分野：計算数学、応用可積分系

キーワード：特異値分解 高精度線形計算 可積分アルゴリズム 片側ヤコビ法 両側ヤコビ法 直交QR法 ランチヨス法

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本研究の数学的基盤である可積分系とは解を閉じた形に書き下すことが可能な非線形力学系の総称である。研究代表者は1990年代から可積分系に基づく応用数学である応用可積分系を提唱し、離散可積分系の行列特異値計算への応用を軸に研究を展開してきた。離散可積分系に基づく算法「可積分アルゴリズム」は、平方根計算を多用する直交変換型アルゴリズムとは異なり四則演算を用いる。戸田格子に対応するqdアルゴリズムを例にとれば、変数は正值性をもち、桁落ちは起きず、高い相対精度を保った固有値計算が可能である。正值性を保つ原点シフトによる収束加速を経て、qdアルゴリズムは米国のライブラリLAPACKに実装され、QR法をはるかに上回る高速性と分割統治法にない高い相対精度を実現している。漸化式の一般項が書き下されることも可積分アルゴリズムの特長である。しかし、帯行列の固有値計算の陽的シフトつき高速・高精度計算や、固有ベクトル計算や特異値分解のための可積分アルゴリズムは未開発である。このため最終目標としている高い相対精度をもつ可積分アルゴリズムを広く線形数値計算に展開し、それを新たな高精度計算基盤とするには至っていない。

2. 研究の目的

以下の[A]、[B]、[C]の研究を通じて変数の正值性を保証しつつ高い相対精度で数値計算する可積分アルゴリズムによる線形数値計算の基盤を構築する。

[A] TN(全非負定値)帯行列の固有値計算のためのdhToda型アルゴリズムに陽的な原点シフト法を導入して高速・高精度な新しい可積分アルゴリズムを開発する。

[B] 独自の原点シフト法を導入することで、微小な特異値や零空間と列空間の高精度な分離を必要とする科学技術計算向きの特異値分解法である直交QD法を大きく発展させ、実装コードを開発して公開する。直交QD法に関連する計算手法である、片側ヤコビ法、両側ヤコビ法による高速高精度な特異値分解法を開発する。

[C] 行列の固有値・特異値計算以外の可積分アルゴリズムとして、ランチョスパラメータを計算する連立一次方程式の反復解法の研究に着手し、CG法、CR法、BiCG法とその高次拡張を定式化するとともに、ブレークダウンを確実に回避する手法等を開発する。さらに、ランチョス・フィリップスアルゴリズムの拡張による種々の行列分解と連分数展開の高精度計算を進展させる。

3. 研究の方法

3つの研究テーマ[A]、[B]、[C]に対して、研究代表者（中村佳正）と研究分担者4名（木村欣司、關戸啓人、前田一貴、高田雅美）を加えた研究体制で、正值性が保証され相対精度が高い可積分アルゴリズムによる高精度計算基盤の整備に挑む。研究テーマごとの進捗について常時情報共有することで研究の展開に応じた自在なフォーメーションをとって研究を推進する。研究代表者と研究分担者はその持ち味や得意分野が異なる応用可積分系のスペシャリストであるが、これまで密行列の特異値分解に関わる共同研究の実績があり、本研究

目的達成のための適切なチームといえよう。

4. 研究成果

4-1 研究目的[A]に関する成果

dhToda 型アルゴリズムによる数値計算の挙動は、対応するセルオートマトンである番号付き玉と容量付き箱からなる箱玉系と関わりが深い。成果論文[A1]において、非自励の場合の dToda(離散戸田格子)のリダクションと超離散化を行ってセルオートマトンの2種類の時間発展方程式と、超離散方程式の特殊解を導き出した。同時期に研究代表者が参加する別の研究チームが以下の成果[A2][A3]を得たため、本研究課題では目的[B], [C]に専念することとした。

[A1] Maeda Kazuki, Another generalization of the box ball system with many kinds of balls, Journal of Integrable Systems 3(2018), 5033954, DOI: 10.1093/integr/xyy007

[A2] You Takahashi, Masashi Iwasaki, Akiko Fukuda, Emiko Ishiwata and Yoshimasa Nakamura, Periodic convergence in the discrete hungry Toda equation, J. Phys. A: Math. Theor. 51(2018), 344001, DOI: 10.1088/1751-8121/aaccb5

[A3] Masato Shinjo, Yoshimasa Nakamura, Masashi Iwasaki and Koichi Kondo, Asymptotic analysis of non-autonomous discrete hungry integrable systems, J. Integrable Systems, 3(2018), xyy001, DOI: 10.1093/integr/xyy001

4-2 研究目的[B]に関する成果

行列の固有値・特異値計算の標準解法の QR 法は汎用的であるものの大量の平方根演算を必要とし、収束する場合も絶対精度しか保証していない。一方、可積分アルゴリズムは高い相対精度と高速性をもつが、正值性を前提とするため、特異値計算では汎用的であるものの固有値計算では適用できる行列は正定値行列に限られていた。四則演算のみで計算が進行し、可積分系離散戸田格子と代数的に等価な dqds 法が可積分アルゴリズムの典型である。平方根演算や融合積和演算(FMA)演算による $a*b \pm c$ の高速化に関する計算機アーキテクチャの進展のもとで、アルゴリズムの性能評価の基準が変わりうるため、ギブンス変換にともなう平方根計算を必要とする直交 qd 法や、ギブンス変換の繰り返しによる片側ヤコビ法、両側ヤコビ法もあらたな可積分アルゴリズムの研究対象となる。目的[B]について研究期間延長中に以下の進展があった。

ハウスホルダー変換を使用して一般の長方形行列を2つの直交行列と下二重対角行列の積に分解し、下二重対角行列に対するdqds法によってすべての特異値を計算してランクを決定した上で、直交qd法によって下二重対角行列の行空間を計算する方法を提案した。行空間の直交性とすべての右特異ベクトルの計算時間について数値実験を行った。

[B1] Sho Araki, Hiroki Tanaka, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura, Fast computation method of column space by using the DQDS method and the OQDS method, in: Proceedings of 2018 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA2018), 2018, pp.333-339

大規模密行列の部分特異値分解のためのAIRLB(augmented implicitly restarted Lanczos bidiagonalization)法の高精度化について考察し、精度のよいシフト付き直交qd法を小さな特異値の計算に利用することで高精度化をはかるとともに、リスタートの導入によってメモリと計算時間を減らすことができた。この結果、クリロフ部分空間法のひとつと位置づけられるGKL(Golub–Kahan–Lanczos)法が改善できた。

[B2] Hiroki Tanaka, Taiki Kimura, Tetsuaki Matsunawa, Shoji Mimotogi, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura, Application of the orthogonal QD algorithm with shift to singular value decomposition for large sparse matrices, in: Advances in Parallel & Distributed Processing, and Applications, Springer Nature Switzerland AG 2021, pp, 697-712, DOI: 10.1007/978-3-030-69984-0 50

これまで、直交 qd 法を扱った成書は存在しなかった。そこで、以下の図書の第7章において dqds 法との関係など可積分アルゴリズムとしての直交 qd 法の位置づけを解説した。

[B3] 計算力学レクチャーコース「固有値計算と特異値計算」、丸善出版、2019、長谷川秀彦、今村俊幸、山田進む、櫻井鉄也、荻田武史、相島健助、木村欣司、中村佳正共著(第7章高精度特異値分解/執筆分担) pp. 157–187、ISBN978-4-621-30473-0

特異値分解のヤコビ法によってすべての特異値と特異ベクトルを高精度で計算でき、標準解法のQR法よりも高精度とされている。しかし、ヤコビ法の計算コストは、ハウスホルダー変換による2重対角化の前処理とQR法とを組み合わせた計算方法よりも大きい。ヤコビ法には片側ヤコビ法、両側ヤコビ法があるが、米国のライブラリLAPACKに実装されているのは片側ヤコビ法のみである。この論文では、両側ヤコビ法を実装し、ヤコビ法が優位性をもつような規模の行列では、両側ヤコビ法はLAPACKの片側ヤコビ法よりも高速かつ高精度であることを数値実験で確認した。

[B4] Sho Araki, Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura, On an implementation of the two-sided Jacobi method, IPSJ Trans. Math. Modeling Appl. 14(2021), 12-20

米国のライブラリLAPACKに実装されているのは片側ヤコビ法の実装コードでは十分な直交性を持つ特異ベクトルを計算できない場合がある。この問題を回避するために、高精度のギブンス回転と融合積和演算を用いた片側ヤコビ法の新しい実装を提案した。

[B5] Masami Takata, Sho Araki, Takahiro Miyamae, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura, On an implementation of the one-sided Jacobi method with high accuracy, IPSJ Trans. Math. Modeling Appl. 14(2021), 68-75

以上の研究の成果物である実装コードは、研究分担者の木村欣司氏が管理するライブラリLAPROGNC(Linear Algebra PROGrams in Numerical Computation)として福井大学サーバにおいて公開している。

<http://syskiso.fuee.u-fukui.ac.jp/~kkimur/LAPROGNC/LAPROGNC-j.html>

4-3 研究目的[C]に関する成果

行列の固有値・特異値計算以外の目的の可積分アルゴリズムの研究では以下の成果が得られ

た。

まず、ハンケル行列のコレスキー分解を計算するランチョス・フィリップスアルゴリズムは、実軸上の直交多項式と関わりが深い可積分アルゴリズムであり、モーメント列のなすチェビシェフ連分数の計算において qd 法よりも高速であることを示した。さらに、単位円周上の直交多項式の観点からテープリッツ行列のコレスキー分解を計算するランチョス・フィリップス型アルゴリズムを定式化してペロン連分数を計算する新しいアルゴリズムに到達した。

[C1] Kaoru Sawa and Yoshimasa Nakamura, Application of the Lanczos-Phillips algorithm to continued fractions and its extension with orthogonal polynomials, JSIAM Letters, 10(2018), 57-60, DOI: /10.14495/jsiaml.10.57

さらに、ローラン双直交多項式の観点から、非エルミートなテープリッツ行列の LDU 分解を計算するランチョス・フィリップス型アルゴリズムを定式化することができた。これは、2点パデ近似に関連するソロン連分数の計算に適用でき、従来法の FG アルゴリズムよりも高速かつ安定してソロン連分数を計算できることがわかった。

[C2] Kaoru Sawa and Yoshimasa Nakamura, Extension of the Lanczos-Phillips algorithm with Laurent biorthogonal polynomials and its application to the Thron continued fraction, JSIAM Letters, 12(2020), 1-4, DOI: 10.14495/jsiaml.12.1

以上、本研究課題による研究成果のうち論文[A1][B1][B2][B4][B5][C1][C2]、著書[B3]を紹介することで研究成果の報告とする。本研究課題に関わっていただいたすべての研究分担者、研究協力者に感謝したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 11件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Yuko Takae, Masami Takata, Kinji Kimura, and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 A discrete three-wave system of Kahan-Hirota-Kimura type and the QRT mapping | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications | 6. 最初と最後の頁 142-148 |
| 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 Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura, and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Improvement of the thick-restart Lanczos method in single precision floating point arithmetic using Givens rotations | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications | 6. 最初と最後の頁 149-155 |
| 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 Sho Araki, Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 On an implementation of the two-sided Jacobi method | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications | 6. 最初と最後の頁 156 162 |
| 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 Maeda Kazuki | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Another generalization of the box ball system with many kinds of balls | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Integrable Systems | 6. 最初と最後の頁 5033954 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/integr/xyy007 | 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 Masami Takata, Sho Araki, Kinji Kimura, Yuki Fujii, Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 11-1 |
| 2. 論文標題 Implementation of computing partial singular value decomposition for principal component analysis using ARPACK | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IP SJ Trans. Math. Modeling Appl. | 6. 最初と最後の頁 37-44 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Yuya Ishida, Masami Takata, Kinji Kimura, Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 11-3 |
| 2. 論文標題 Improvement of the augmented implicitly restarted Lanczos bidiagonalization method in single precision floating point arithmetic | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IP SJ Trans. Math. Modeling Appl. | 6. 最初と最後の頁 19-25 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Kaoru Sawa and Yoshimasa Nakamura, | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Application of the Lanczos-Phillips algorithm to continued fractions and its extension with orthogonal polynomials | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 JSIAM letters | 6. 最初と最後の頁 57-60 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14495/jsiaml.10.57 | 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 Masami Takata, Takuto Akiyama, Sho Araki, Hiroyuki Ishigami, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Accelerating the numerical computation of positive roots of polynomials using suitable combination of lower bounds | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IP SJ Trans. Math. Modeling Appl. | 6. 最初と最後の頁 18-30 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Masami Takata, Sho Araki, Takahiro Miyamae, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 On an implementation of the one-sided Jacobi method with high accuracy | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IP SJ Trans. Math. Modeling Appl. | 6. 最初と最後の頁 68-75 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Sho Araki, Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 On an implementation of the two-sided Jacobi method | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IP SJ Trans. Math. Modeling Appl. | 6. 最初と最後の頁 12-20 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Kaoru Sawa and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Extension of the Lanczos-Phillips algorithm with Laurent biorthogonal polynomials and its application to the Thron continued fraction | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 JSIAM Letters, | 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) 10.14495/jsiaml.12.1 | 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 Masami Takata, Sho Araki, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 On an implementation of the one-sided Jacobi method with high accuracy | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Parallel & Distributed Processing, and Applications, Springer Nature Switzerland AG 2021 | 6. 最初と最後の頁 713-724 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-69984-0_51 | 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 Hiroki Tanaka, Taiki Kimura, Tetsuaki Matsunawa, Shoji Mimotogi, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Application of the orthogonal QD algorithm with shift to singular value decomposition for large sparse matrices | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Parallel & Distributed Processing, and Applications, Springer Nature Switzerland AG 2021 | 6. 最初と最後の頁 697-712 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-69984-0_50 | 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 Sho Araki, Hiroki Tanaka, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Fast computation method of column space by using the DQDS method and the OQDS method | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of 2018 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA2018) | 6. 最初と最後の頁 333-339 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 荒木翔, 高田雅美, 木村欣司, 中村佳正 |
| 2. 発表標題 融合積和演算を利用した特異値分解のための両側ヤコビ法の実装について |
| 3. 学会等名 令和元年度応用数理学会年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 荒木翔, 高田雅美, 木村欣司, 中村佳正 |
| 2. 発表標題 割線法を利用した特異値分解のための両側ヤコビ法の実装について |
| 3. 学会等名 第48 回数値解析シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高江宥光, 木村欣司, 中村佳正 |
| 2. 発表標題 Kahan-廣田-木村型離散three wave system とQRT写像 |
| 3. 学会等名 平成30 年度応用数理学会年会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sho Araki, Hiroki Tanaka, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura |
| 2. 発表標題 Fast computation method of column space by using the DQDS method and the OQDS method |
| 3. 学会等名 The 2018 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masana Aoki, Masami Takata, Kinji Kimura and Yoshimasa Nakamura |
| 2. 発表標題 Improvement of computing partial singular value decomposition for dense matrix using thick-restart-Lanczos method |
| 3. 学会等名 The 2018 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 澤薫, 中村佳正 |
| 2. 発表標題 ランチョス・フィリップスアルゴリズムの可積分性とその直交多項式への応用 |
| 3. 学会等名 第14 回応用数理学会研究部会連合発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石田遊也, 高田雅美, 木村欣司, 中村佳正 |
| 2. 発表標題 単精度浮動小数点数環境にも有効なAugmented Implicitly Restarted Lanczos Bidiagonalization 法の改良 |
| 3. 学会等名 第14 回応用数理学会研究部会連合発表会, |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kinji Kimura, Masayuki Osawa, Sho Araki, Hiroyuki Ishigami, Yoshimasa Nakamura |
| 2. 発表標題 Parallel symmetric tridiagonal eigensolver based on bisection and inverse iteration algorithms with the blocked classical Gram-Schmidt reorthogonalization and the shifted Cholesky QR decomposition |
| 3. 学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Osawa, Sho Araki, Hiroyuki Ishigami, Kinji Kimura, Yoshimasa Nakamura |
| 2. 発表標題 Acceleration of inverse iteration method using Cholesky QR decomposition with shifts |
| 3. 学会等名 International Workshop on Eigenvalue Problems: Algorithms; Software and Applications, in Petascale Computing (EPASA2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 中村佳正 |
| 2. 発表標題 応用可積分系分野の基礎方程式としての戸田格子方程式, |
| 3. 学会等名 平成29 年度応用数理学会年会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計3件

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 長谷川, 今村, 山田, 櫻井, 荻田, 相島, 木村, 中村共著 | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 丸善出版, | 5. 総ページ数 201 |
| 3. 書名 計算力学レクチャーコース 固有値計算と特異値計算 | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 中村, 高崎, 辻本, 尾角, 井ノ口 (第5章応用可積分系/執筆分担) | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 朝倉書店 | 5. 総ページ数 432 |
| 3. 書名 解析学百科: 可積分系の数理 | |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 櫻井, 松尾, 片桐編 (2.2.2 mdLVs法/執筆分担) | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 共立出版 | 5. 総ページ数 314 |
| 3. 書名 数値線形代数の数理とHPC | |

〔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 | 木村 欣司 (Kimura Kinji) (10447899) | 福井大学・学術研究院工学系部門・准教授 (13401) | |

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 | 高田 雅美 (Takata Masami) (20397574) | 奈良女子大学・生活環境科学系・講師 (14602) | |
| 研究分担者 | 關戸 啓人 (Sekido Hiroto) (40718235) | 京都大学・国際高等教育院・特定講師 (14301) | |
| 研究分担者 | 前田 一貴 (Maeda Kazuki) (80732982) | 福知山公立大学・情報学部・講師 (24304) | |

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 |
|---------|---------|
| | |