

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03740

研究課題名（和文）テンソルネットワーク変分法による有限温度フラストレート磁性体の物性解明

研究課題名（英文）Study of finite temperature properties of frustrated spin systems by tensor network approach

研究代表者

大久保 毅 (Okubo, Tsuyoshi)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任准教授

研究者番号：00514051

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二次元のフラストレート磁性体の有限温度物性をテンソルネットワーク表現を用いて解析する手法を開発し、主に、Kitaev相互作用を持つ量子スピン模型に適用してその有限温度物性を明らかにした。有限温度量子状態の密度行列を小さなテンソルのつながり、テンソルネットワーク、で記述し、無限に広がった二次元系には、二次元的にテンソルがつながったテンソル積演算子を、有限サイズの二次元系には、一次的にテンソルがつながった行列積演算子を採用することで、磁場中のKitaevスピン液体に特徴的な熱ホール伝導度の温度依存性や、非対角相互作用の存在による有限温度物性の変化を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまでは高精度な解析が困難であった、二次元フラストレート磁性体の有限温度物性を、テンソルネットワークを用いて解析する手法が確立された。従来から実用化されているテンソルネットワークによる基底状態の計算と、本研究による有限温度物性の計算を組み合わせることで、スピン液体等のフラストレート磁性体で実現する新奇秩序の物性を、基底状態で顕著な量子揺らぎ、有限温度で現れる温度揺らぎの、双方の視点から解析できるようになる。開発した手法により、特に、磁場中のKitaevスピン液体における熱ホール伝導度の温度依存性について、理解が進み、この成果は、今後のKitaev物質の物性理解にもつながると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a method to analyze finite temperature properties of two-dimensional frustrated magnets using tensor network representations, and applied it to Kitaev spin liquid. The density matrix of a finite-temperature quantum state is described by a tensor network. We employed an infinite two-dimensional tensor product operator, iTPO, for an infinite system, and a matrix product operator, MPO, for a finite two-dimensional system. In particular, we showed the temperature dependence of the thermal Hall conductivity in Kitaev spin liquid under a magnetic field, and the effect of off-diagonal interactions to finite temperature properties.

研究分野：統計物理学、計算物理学、フラストレート磁性体

キーワード：テンソルネットワーク 量子スピン液体 Kitaev模型 相転移 フラストレーション

## 1. 研究開始当初の背景

複数の相互作用が競合（フラストレーション）したフラストレート磁性体では、様々な新奇現象が引き起こされる。古典的なスピン自由度を考えただけでも、トポロジカル励起やスカーミオンに代表される多重  $Q$  秩序状態など、フラストレーション由来の様々な新奇秩序が現れるが、フラストレーションが存在する量子スピン模型では、これらに加えて、低温まで磁気的な長距離秩序を持たないスピン液体状態が安定化する場合もある。

フラストレーションは興味深い現象の源となっている一方で、スピン量子数 ( $S$ ) の小さい量子スピン模型では、通常は強力な数値計算手法として働く量子モンテカルロ法が、確率が負の値をとる、いわゆる負符号問題により効率的に働かないため、これまでは、密度行列くり込み群が大きな成功をおさめてきた次元系を除き、厳密対角化等を用いて少数系を計算することしかできていなかった。しかし、近年になって、量子情報理論からの知見の輸入により、二次元量子系の基底状態波動関数をテンソルのつながりで表現するテンソルネットワーク法が開発され、注目を集めている。テンソルネットワーク法は、基底状態の量子的な相関に着目する事で、量子多体状態を少ない変数で表現できる工夫がなされており、また、負符号問題のような不都合も生じない。

本研究が注目する二次元のフラストレート磁性体に対してテンソルネットワーク法を適用する場合、Tensor Product State (TPS) または、Projected Entangled Pair State (PEPS) と呼ばれる、二次元のネットワーク構造が有効であり、研究代表者はこの手法の開発と応用を進めていた。TPS/PEPS の大きな特徴は、無限に大きな系の基底状態を計算できることであり、厳密対角化からの外挿では到達が困難だった熱力学極限の情報を直接得ることができる。研究開始時点までに、研究代表者等によって、強いスピン軌道相互作用の影響で異方的な相互作用が生じている  $\text{Na}_2\text{IrO}_3$  の第一原理ハミルトニアン基底状態やカゴメ格子ハイゼンベルグ模型の磁化過程などへの応用が進んでおり、特に基底状態の計算において、TPS/PEPS の有効性が強く実感されている状況であった。

このような基底状態計算の成功の一方で、テンソルネットワーク法による有限温度の物性計算は、未だ発展途上であった。本質的な困難は、有限温度に対応する典型的な純粋状態の波動関数は、基底状態に比べて量子エンタングルメントが大きいことにある。そのため、基底状態の手法を素朴に適用するだけでは、有限温度物性を高精度には計算できず、過去の研究をさらに発展させて手法開発する必要があった。新規物理現象を理解する上では、基底状態の性質だけでなく、その有限温度の性質を理解し、実験研究と比較することが必要不可欠であり、フラストレート磁性体の理解のために、高精度の計算手法が待ち望まれている状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、テンソルネットワーク法という効率的な情報圧縮のアイデアを密度行列に適用することにより、量子多体系の有限温度での物性を高精度で計算する手法を開発する。さらに、開発した手法を二次元フラストレート磁性体に適用することで、実験と比較可能な物理量の温度依存性を計算し、種々の新規秩序を基底状態・有限温度の振る舞いから数値的に解析する手法を構築することが大きな目的である。すでに確立してきた波動関数を用いた基底状態計算から、密度行列へと一歩進むことで、テンソルネットワーク法による有限温度計算は現実的に実現可能な状況である。近年提唱されている、幾つかのアルゴリズムを適切に取り入れながら、非自明な問題に適用可能な段階にまで有限温度計算手法を精緻化し、テンソルネットワーク法を種々のフラストレート磁性体を解析する基礎的な研究手法として確立させることが、本研究の最終的な目標である。

## 3. 研究の方法

本研究では、基底状態計算のテンソルネットワーク法を基礎として、密度行列のテンソルネットワーク表示を用いた有限温度計算法の開発と高精度化を行う。密度行列のテンソルネットワーク表示として、TPS/PEPS を演算子に拡張した、Tensor Product Operator (TPO) または、Projected Entangled Pair Operator (PEPO) と呼ばれる表現を採用することで、波動関数表示 (TPS/PEPS) では捕らえられなかった有限温度のエンタングルメントの増大を効率的に捉えることが可能になる。また、開発した手法を主に、二次元量子スピン系で実現するスピン液体状態に適用することで、量子スピン液体の物性を、基底状態・有限温度状態の双方の視点から明らか

にする。

#### 4. 研究成果

第一に、無限に広がった二次元量子スピン系を対象として、密度行列をテンソルネットワークで表現する複数の手法の性能比較と検証を行なった。密度行列のテンソルネットワーク表現には、自由度を二倍に拡張したヒルベルト空間の状態ベクトルから、半分の自由度を縮約して密度行列を得る purification と呼ばれる手法と、密度行列そのものを状態ベクトルと考えてテンソルネットワークで表現する手法の2種類が主に用いられている。前者は、密度行列の正定値性を厳密に保てるが、その一方で、一次元系では、後者の表現の方が効率的に情報を圧縮できる例が存在することが知られている。これら二つの手法を、基底状態がスピン液体状態であることが知られているキタエフ模型に適用し、キタエフスピン液体に特徴的な比熱のダブルピーク構造が再現できるかに注目して、上記二つの手法を比較した。その結果、purification に基づくテンソルネットワーク表現では、低温のピークを精度良くは再現できず、後者の直接表現の方が二次元無限系の有限温度物性計算には有効であることが明らかとなった。

第二に、密度行列を TPO/PEPO 型のテンソルネットワークで直接表現する方法について、新しい最適化の開発と、テンソルネットワーク形状の改善を行なった。有限温度の密度行列は、高温極限の単純な、TPO/PEPO に虚時間発展演算子を繰り返し作用することで得られるが、従来法で、Suzuki-Trotter 分解した虚時間発展演算子をかけた後のテンソル最適化が不十分であることが大きな問題であることが明らかとなった。この点を解決するため、従来の2サイトだけに注目した最適化範囲を拡張し、複数サイトで最適化を行うクラスター最適化法を考案した。このクラスター最適化法をキタエフ模型に適用したところ、低温比熱の計算精度が大幅に向上することが明らかとなった。クラスター最適化法は従来法に比べて計算量の増加もそれほど多くないため、無限に大きな二次元量子スピン系の有限温度状態の高精度計算手法の一つが確立できた。

第三に、有限サイズの二次元量子スピン系を対象とした手法開発と、それをを用いた、キタエフスピン液体での熱ホール伝導度の解析を行なった。有限系では、密度行列のテンソルネットワーク表現として、一次元の Matrix Product Operator (MPO) を採用することで、高精度のテンソル最適化が可能であり、キタエフ模型に適用することで、無限系での計算では精度が不足していた比熱のダブルピーク構造も精度良く再現できることが明らかとなった。

この手法を、近年、 $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> などの物質で注目されている磁場中での拡張キタエフ模型に適用することで、熱ホール伝導度の温度依存性が、実験での振る舞いと対応する様に、有限温度で半整数の量子化値を超える程大きくなることを明らかにした。また、実際の物質にも存在していると考えられる、非対角の相互作用の影響も解析し、これらの相互作用の符号、大きさにより、熱ホール伝導度の温度依存性が大きく影響を受けることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Motoyama Yuichi, Okubo Tsuyoshi, Yoshimi Kazuyoshi, Morita Satoshi, Kato Takeo, Kawashima Naoki	4. 巻 279
2. 論文標題 TeNeS: Tensor network solver for quantum lattice systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 1084371 - 08437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2022.108437	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 Yamaguchi H., Iwasaki Y., Kono Y., Okubo T., Miyamoto S., Hosokoshi Y., Matsuo A., Sakakibara T., Kida T., Hagiwara M.	4. 巻 103
2. 論文標題 Quantum critical phenomena in a spin-1/2 frustrated square lattice with spatial anisotropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L220407-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L220407	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 Yamaguchi H., Uemoto N., Okubo T., Kono Y., Kittaka S., Sakakibara T., Yajima T., Shimono S., Iwasaki Y., Hosokoshi Y.	4. 巻 104
2. 論文標題 Gapped ground state in a spin-1/2 frustrated square lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L060411-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L060411	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 Adachi Daiki, Okubo Tsuyoshi, Todo Synge	4. 巻 105
2. 論文標題 Bond-weighted tensor renormalization group	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L060402-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.L060402	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 Hayami Satoru, Okubo Tsuyoshi, Motome Yukitoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Phase shift in skyrmion crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 6927-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-27083-0	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 Hayashida Shohei, Ishikawa Hajime, Okamoto Yoshihiko, Okubo Tsuyoshi, Hiroi Zenji, Nilsen Goeran J., Mutka Hannu, Masuda Takatsugu	4. 巻 101
2. 論文標題 Zero-energy excitation in the classical kagome antiferromagnet NaBa <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> F <sub>11</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214409-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.214409	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 Adachi Daiki, Okubo Tsuyoshi, Todo Synge	4. 巻 102
2. 論文標題 Anisotropic tensor renormalization group	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054432-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.054432	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 Lee Hyun-Yong, Kaneko Ryui, Chern Li Ern, Okubo Tsuyoshi, Yamaji Youhei, Kawashima Naoki, Kim Yong Baek	4. 巻 11
2. 論文標題 Magnetic field induced quantum phases in a tensor network study of Kitaev magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1639-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-15320-x	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

1. 著者名 Lee Hyun-Yong, Kaneko Ryui, Okubo Tsuyoshi, Kawashima Naoki	4. 巻 101
2. 論文標題 Abelian and non-Abelian chiral spin liquids in a compact tensor network representation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035140-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.035140	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 Lee Hyun-Yong, Kaneko Ryui, Okubo Tsuyoshi, Kawashima Naoki	4. 巻 123
2. 論文標題 Gapless Kitaev Spin Liquid to Classical String Gas through Tensor Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 087203-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.087203	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 Shimokawa Tokuro, Okubo Tsuyoshi, Kawamura Hikaru	4. 巻 100
2. 論文標題 Multiple-q states of the J1-J2 classical honeycomb-lattice Heisenberg antiferromagnet under a magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224404-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.224404	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 -

〔学会発表〕 計40件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network representation of Kitaev spin liquid and its application to quantum circuit-based variational calculations
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network approach to two-dimensional frustrated spin system
3. 学会等名 APCTP-IACS-SNBNCBS Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter: From Theoretical Concepts to Experimental Realization (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network approach to Kitaev spin liquid
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による量子古典エンタングルアルゴリズムの提案
3. 学会等名 物性研究のための量子アルゴリズム最前線 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 PESS型テンソルネットワークによる拡張Kitaevモデルの解析
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 テンソルネットワーク法の量子多体問題への適用と量子計算機への展開
3. 学会等名 量子多体計算のフロンティア (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 量子物理とテンソルネットワーク
3. 学会等名 第1回量子ソフトウェアワークショップ: テンソルネットワークと量子計算の展望 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 拡張キタエフ模型における熱ホール伝導度の数値的研究
3. 学会等名 キタエフ量子スピン液体研究の新展開
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network approach to the magnetization of frustrated square lattice Heisenberg systems "
3. 学会等名 XXXII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2021), (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体の量子回路表現とその最適化
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 速水賢, 大久保毅, 求幸年
2. 発表標題 スキルミオン結晶における位相シフト
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 密度行列のテンソルネットワーク表現による 有限温度Kitaev模型の解析
3. 学会等名 物性研究所短期研究会 「量子多体計算と第一原理計算の新展開」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本山裕一, 大久保毅, 森田悟史, 吉見一慶, 加藤岳生, 川島直輝
2. 発表標題 二次元量子格子系テンソルネットワークソルバーパッケージ TeNeS
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による拡張Kitaev模型の有限温度物性の解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 テンソルネットワーク法による量子スピン系の基底状態計算
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の新展開2020」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network study of honeycomb lattice Kitaev model
3. 学会等名 Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保毅, 那須謙治, 三澤貴宏, 求幸年
2. 発表標題 Kitaev量子スピン液体の熱ホール伝導度に対する非対角相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 砂田佳希, 河野信吾, Jesper Ilves, 杉山太香典, 鈴木泰成, 大久保毅, 玉手修平, 田淵豊, 中村泰信
2. 発表標題 伝搬マイクロ波光子列クラスター状態の効率的な量子状態トモグラフィ
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Sunada, Shingo Kono, Jesper Ilves, Takanori Sugiyama, Yasunari Suzuki, Tsuyoshi Okubo, Yasunobu Nakamura
2. 発表標題 Efficient tomography of microwave photonic cluster states
3. 学会等名 APS March Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg magnets
3. 学会等名 The International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryutaro Okuma, Daisuke Nakamura, Tsuyoshi Okubo, Atsushi Miyake, Akira Matsuo, Koichi Kindo, Masashi Tokunaga, Naoki Kawashima, Shojiro Takeyama, Zenji Hiroi
2. 発表標題 A series of magnon crystals appearing under ultrahigh magnetic fields in a kagome antiferromagnet
3. 学会等名 APS March Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network study on extended Kitaev models
3. 学会等名 The 33rd Annual CSP Workshop, Univerisity of Georgica (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Anisotropic tensor renormalization group and BTRG
3. 学会等名 Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA2019-2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Large spin fluctuation in the magnetization process of frustrated square lattice Heisenberg model
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (CAQMP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Okubo
2. 発表標題 Tensor network approach to frustrated spin systems
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (CAQMP2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保毅, 金子隆威, Hyun-Yong Lee, 山地洋平, 川島直輝
2. 発表標題 テンソルネットワーク法の開発とKitaevスピン液体への適用
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題(7) 第5回シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 無限系テンソルネットワーク状態の変分最適化とフラストレート磁性体への適用
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の新展開」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子 隆威、大久保 毅、H.-Y. Lee、山地 洋平、川島 直輝
2. 発表標題 Searching for the Kitaev spin liquid by the tensor network approach
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS合同研究会「計算物質科学の新展開」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kaneko, T. Okubo, H.-Y. Lee, Y. Yamaji, and N. Kawashima
2. 発表標題 Tensor Network Study of the Stability of the Kitaev Spin Liquid
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Okubo and N. Kawashima
2. 発表標題 Study on Z2-vortex ordering by massively parallel Monte Carlo simulation
3. 学会等名 Frontiers of Statistical Physics (FSP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kaneko, T. Okubo, H.-Y. Lee, Y. Yamaji, and N. Kawashima,
2. 発表標題 Tensor network study of the Kitaev spin liquid
3. 学会等名 Frontiers of Statistical Physics (FSP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kaneko, T. Okubo, H.-Y. Lee, Y. Yamaji, and N. Kawashima
2. 発表標題 Tensor network approach to the Kitaev spin liquid
3. 学会等名 International Conference on Frontiers of Correlated Electron Sciences (FCES19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子 隆威、大久保 毅、H.-Y. Lee、山地 洋平、川島 直輝
2. 発表標題 テンソルネットワーク法を用いた拡張Kitaev模型の基底状態探索
3. 学会等名 第13回物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 無限系テンソルネットワークの変分最適化による拡張Kitaev模型の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金子 隆威、大久保 毅、山地 洋平、川島 直輝
2. 発表標題 テンソルネットワーク手法を用いたKitaev- 模型のスピン液体の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.-Y. Lee, R. Kaneko, T. Okubo, and N. Kawashima,
2. 発表標題 Kitaev Spin Liquids in a Compact Tensor Network Representation
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立大樹, 大久保毅, 藤堂眞治
2. 発表標題 非等方的なテンソルくりこみ群
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保毅
2. 発表標題 密度行列のテンソルネットワーク表示による有限温度Kitaエフ模型の解析
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子隆威, 大久保毅, 川島直輝
2. 発表標題 テンソルネットワーク手法を用いたハニカム格子上のHeisenberg- 模型の基底状態探索
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立大樹, 大久保毅, 藤堂眞治
2. 発表標題 ボンド重み付きテンソルくりこみ群
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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			
カナダ	University of Toronto	Perimeter Institute		
韓国	Korea University			