

令和 4 年 5 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14359

研究課題名（和文）密度行列繰り込み群法の高度化 点群対称性への適応

研究課題名（英文）Advancement of density matrix renormalization group - Adaptation to point group symmetry

研究代表者

上田 宏 (Ueda, Hiroshi)

大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・特任准教授（常勤）

研究者番号：40632758

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、格子模型が持つ大局的な点群対称性に適応した行列積状態の構成法ならびに大規模並列化されたテンソルネットワーク（TN）法による状態の最適化手続きの高度化を行うことに加え、TN法と相性の良い解析手法の開発を行うことで、量子・古典多体模型に現れる非自明な相及び相転移の数値的同定を達成することを目的とした。具体的には、TN法のMPI並列化などによる高度化を実施することで、正方格子上の種々の古典統計模型、フラストレートした量子スピン鎖やSU(4)模型に現れる非自明な臨界現象や対称性に守られたトポロジカル相の同定に成功した。あわせて、点群対称性に適応した量子スピンシミュレータを開発&公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、構築する手法のターゲットが従来手法で数値的厳密にアクセス困難な系になっている点である。開発・公開した実空間の点群対称性とスピン空間の対称性に適応した量子スピンシミュレータは、容易にフェルミオン系への適用が可能であることがわかっている。そのため、当該シミュレータが広範囲の物質群の有効模型解析に寄与できる手法となっており、広く物性物理の理論的研究の加速に資している。また、当該シミュレータは近年社会的にも注目を集めている量子回路シミュレータへの転用も可能であり、今後の量子開発実機に資する参照データの提供の役目も担うことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to achieve numerical identification of nontrivial phases and phase transitions appearing in quantum and classical many-body systems by advancement of tensor network (TN) method with MPI parallelizations and point-group symmetry adaptations. Specifically, we have succeeded in identifying nontrivial critical phenomena and symmetry-protected topological phases appearing in various classical statistical models on square lattices, frustrated quantum spin chains, and SU(4) models by using MPI-parallelized TN method and other advanced methods. In addition, we have developed and published a quantum spin simulator adapted to point group symmetry.

研究分野：計算物理

キーワード：テンソルネットワーク 厳密対角化 手法開発 量子スピン系 量子アルゴリズム 相転移 臨界現象
密度行列繰り込み群

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

多体模型に現れる相および相転移を解析する研究は、純粋にその統計模型を理解するためだけでなく、実験的に観測される現実物質の多様な振る舞いを演繹的に説明するための骨組みを提供するため、これまで盛んに行われてきた。一般に多体模型を精密に取り扱うのは困難だが、多くの相は取り扱う模型がもつ対称性が自発的に破れることで発現することから、その対称性の破れを記述する平均場を導入して問題を1体問題へ落とし込むことで定性的な議論を可能にしてきた。しかしながら、相転移の臨界現象、スピン液体、トポロジカル相やその相転移といった物理はこの大胆な近似の下では上手く説明出来ないため、平均場近似を超えた数値計算手法も併せて発展してきた。そして現在この発展の重要性は右肩上がりの様相を呈している。

現在、テンソルネットワーク法、変分モンテカルロ法、厳密対角化法などを駆使して2次元量子スピン系に発現するスピン液体相およびトポロジカル相の数値的研究が国内外で盛んにおこなわれているが、例えばカゴメ格子上の量子スピン1/2ハイゼンベルグ模型においてはその基底状態や励起状態の構造が、取り扱う手法によって異なるといった基本的な問題が残されている。また、スピン液体相の同定には基底状態のみならず励起状態ならびに比熱や磁化率といった熱力学的物理量の振る舞いも加味する必要があるが、現状では厳密対角化法で取り扱えない大規模系において、そのような解析に耐える精度を持つ計算手法は報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、格子模型が持つ大局的な点群対称性および並進対称性に適応した数値シミュレータの開発、ならびに大規模並列化されたテンソルネットワーク法による状態の最適化手続きの高度化を行うことに加えて、テンソルネットワーク法と相性の良い解析手法の開発を行うことで、量子・古典多体模型に現れる非自明な相及び相転移の数値的同定を達成する。

3. 研究の方法

任意の格子系がもつ点群対称性および並進対称性に適合した数値シミュレータをFortran90で独自に開発&公開する。また代表的なテンソルネットワーク法の一つである密度行列繰り込み群や角転送行列繰り込み群のMPIによる大規模並列化を実施し、日本最大級規模のスーパーコンピュータも活用して、古典統計模型および量子多体系に現れる相転移の臨界現象、スピン液体、(対称性に保護された)トポロジカル相やその相転移の同定に資する環境を構築する。計算の開発および実行は、本研究課題の研究費で調達したワークステーションに加えて、必要に応じて所属機関・部署が所有する計算機資源を活用する。

4. 研究成果

(1) 1次元量子/2次元古典系多体模型の連続相転移近傍にあらわれる臨界性を同定するための新たな解析手法として、臨界点上にある多体模型において最適化された行列積状態に表れるエンタングルメントスケールリング解析と従来からよく知られている有限サイズスケールリング解析を組み合わせることを行った。これによりエンタングルメントスケールリング解析を転移点直上から近傍領域まで拡張できることが分かった。このスケールリング解析の特徴として、有限サイズの効果は考慮する必要がないため境界条件の詳細に寄らない議論が行えることが挙げられる。

実際に、本解析手法と、テンソルネットワーク法の一つでその計算の固定点が密度行列繰り込み群と等価になる角転送行列繰り込み群を利用して2次元正方格子上的離散化されたハイゼンベルグ模型(多面体模型)の統計力学的性質を数値的に解析し、相転移の次数及び臨界指数を調査した。解析の結果、秩序・無秩序の連続相転移が1つだけ存在するという先行研究と矛盾のない結果が得られることを確認し、その相転移が2次元共形場理論のミニマル模型で説明できない(中心電荷が1よりも大きくなる)ことを明らかにした。[1]

(2) 大規模シリンダー形状の量子多体系に対する無限系密度行列繰り込み群法を、量子一次元のランダムスピン系に対する密度行列繰り込み群のアルゴリズムと無限系密度行列繰り込み群における波動関数予測アルゴリズムを組み合わせることで、並列計算機上で高効率に稼働させることに成功した。実際に、典型的なフラストレート量子多体系であるカゴメシリンダー上の反強磁性的ハイゼンベルグ模型の基底状態解析に本アルゴリズムを適用した結果、既知の有限

系密度行列繰り込み群によって得られた基底状態エネルギー、相関関数、相関長のクラスター外挿結果と一致する結果が得られた。[2]

(3) 一次元冷却原子系で発現しうる対称性に守られたトポロジカル相としてSU(4)スピン模型の基底状態解析を、無限系密度行列繰り込み群法を用いて行った。様々な相互作用を検証し、3種類の対称性に守られたトポロジカル相と1種類の自明相が全て現れる条件を提示した。また対称性に守られたトポロジカル相に関してはトポロジカル的観点から同相に属する行列積状態を解析的に示すことに成功した。[3]

(4) テンソルネットワーク法の一つである iTEBD 法並びに密度行列繰り込み群法を活用して、近年、擬一次元系のマルチフェロイクス物質との関連性から現在も非常に関心を集めている強磁性的最近接相互作用 (J1) と反強磁性的次近接相互作用 (J2) を持つフラストレート量子スピン 1/2 鎖はに関して、容易軸、容易面の XXZ 異方性、並びに、J1 のボンド交替の自由度に対してスピギャップと磁氣的性質を広いパラメータ領域で調査した。容易軸側では既知の完全強磁性状態、部分強磁性状態、up-up-down-down 反強磁性状態に加えて、2種類のトポロジカルに異なるダイマー相があることが分かり、その一方はSU(2)極限で現れる非常に小さなスピギャップを持つハルデンダイマー状態と繋がっていることを示した。また弱い J1 のボンド交替はスピン相関のピッチを容易に4倍周期にシフトさせることも明らかにした。本模型の解析から、スピギャップを持つ非磁性基底状態を持つ磁場誘起マルチフェロイクス物質 $\text{Rb}_2\text{Cu}_2\text{Mo}_4\text{O}_{12}$ の様々な実験的性質を理解するためには、フラストレートスピン鎖の間の反強磁性相互作用が重要であることを改めて示唆した。[4, 5]

(5) 当該課題を通じて開発した大規模並列化された角転送行列繰り込み群 (テンソルネットワーク法の一つ) を用いて、二次元正方格子上的各格子点上に正多角形あるいは正多面体の頂点上にのみ向きを持つことが可能な強磁性的古典スピン模型に現れる非自明な臨界現象の数値的解析を実施した。正六角形の場合、トポロジカル相転移の一種である BKT 転移が発現することはよく知られている。本課題では、角転送行列繰り込み群法の固定点角転送行列に現れるスペクトルを数値的に求めて解析することで、当該転移点で挟まれた臨界相が Effective Z_6 Dual-sine-Gordon 模型と関連する中心電荷が1の境界を持った共形場理論で特徴づけられることを示した。また、正12面体(20頂点)の場合、先行するモンテカルロ計算と同様に温度軸に対して単一の2次相転移が確認でき、その臨界性がおよそ中心電荷2と非自明な臨界指数のセットでもって特徴づけられることを数値的に明らかにした。これにより2次元正方格子上の正多面体模型に現れる臨界性をテンソルネットワーク法で全て解析することに成功し、それらの特徴づける中心電荷の値は内部自由度の大きさに対して単調に増加することを明らかにした。[6, 7]

(6) 当該課題を通じて開発している飽和磁化近傍の量子スピン系の計算に特化した並進対称性および点群対称性に適合した数値計算シミュレータ (QS³: キューエスキューブ) の公開と高度化、ならびに、現在テンソルネットワークとの絡みで急激に成長を遂げている量子計算機実機の自由度を活用したアルゴリズムの検証用のデータ提供を行った。あわせて、QS³の量子回路シミュレーションへの転用可能性の調査も行った。具体的には、高度化の面では、単純格子の並進対称性しか考慮できなかった従来のQS³を、任意の超格子がもつ並進対称性および点群対称性に適合できるようにし、またスピン1/2の系に限定していた自由度を任意のスピン系に拡張した。この高度化されたQS³を用いて、混合スピン鎖に現れる磁化プラトー幅に関して既存のDMRGの結果と非線形スピン波の解析とをシームレスに繋ぐことに成功した。[8]

データ提供の面では、量子多体系の解析に資する分割統治法の量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの有用性を検証するために、様々な格子上的反強磁性的量子ハイゼンベルグ模型の基底状態エネルギーの厳密数値計算結果を提供した。[9]

引用文献一覧

[1] H. Ueda, K. Okunishi, R. Krčmár, A. Gendiar, S. Yunoki, and T. Nishino, “Critical behavior of the two-dimensional icosahedron model”, *Phys. Rev. E* **96**, 062112 (2017) [5 Pages].

[2] H. Ueda, “Infinite-size density matrix renormalization group with parallel Hida’s algorithm”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 074005 (2018) [8 Pages].

[3] H. Ueda, T. Morimoto, and T. Momoi, “Symmetry protected topological phases in two-orbital SU(4) fermionic atoms”, *Phys. Rev. B* **98**, 045128 (2018) [11 pages].

[4] H. Ueda, S. Onoda, Y. Yamaguchi, T. Kimura, D. Yoshizawa, T. Morioka, M. Hagiwara,

- M. Hagihala, M. Soda, T. Masuda, T. Sakakibara, K. Tomiyasu, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima, R. Kajimoto, M. Nakamura, Y. Inamura, N. Reynolds, M. Frontzek, J. S. White, M. Hase, Y. Yasui, “Emergent spin-1 Haldane gap and ferroelectricity in a frustrated spin-1/2 ladder”, *Phys. Rev. B* **101**, 140408(R) (2020) [6 pages].
- [5] H. Ueda, and S. Onoda, “Roles of easy-plane and easy-axis XXZ anisotropy and bond alternation in a frustrated ferromagnetic spin-1/2 chain”, *Phys. Rev. B* **101**, 224439 (2020) [13 pages].
- [6] H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, R. Kr m r, A. Gendiar, S. Yunoki, and T. Nishino, “Finite-m scaling analysis of Berezinskii-Kosterlitz-Thouless phase transitions and entanglement spectrum for the six-state clock model”, *Phys. Rev. E* **101**, 062111 (2020) [7 pages].
- [7] H. Ueda, K. Okunishi, S. Yunoki, and T. Nishino, “Corner transfer matrix renormalization group analysis of the two-dimensional dodecahedron model”, *Phys. Rev. E* **102**, 032130 (2020) [8 pages].
- [8] H. Ueda, S. Yunoki, and T. Shimokawa, “Quantum spin solver near saturation: QS3”, *Comput. Phys. Commun.* **277**, 108369 (2022) [12 pages].
- [9] K. Fujii, K. Mizuta, H. Ueda, K. Mitarai, W. Mizukami, Y. O. Nakagawa, “Deep Variational Quantum Eigensolver: A Divide-And-Conquer Method for Solving a Larger Problem with Smaller Size Quantum Computers”, *PRX Quantum* **3**, 010346 (2022) [12 pages].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Ueda Hiroshi, Okunishi Kouichi, Harada Kenji, Krcmar Roman, Gendiar Andrej, Yunoki Seiji, Nishino Tomotoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Finite-m scaling analysis of Berezinskii-Kosterlitz-Thouless phase transitions and entanglement spectrum for the six-state clock model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062111/1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreve.101.062111	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 Ueda Hiroshi, Onoda Shigeki	4. 巻 101
2. 論文標題 Roles of easy-plane and easy-axis XXZ anisotropy and bond alternation in a frustrated ferromagnetic spin-1/2 chain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224439/1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevb.101.224439	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 Ueda Hiroshi, Okunishi Kouichi, Yunoki Seiji, Nishino Tomotoshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Corner transfer matrix renormalization group analysis of the two-dimensional dodecahedron model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 032130/1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreve.102.032130	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 Sasagawa Yoshinori, Ueda Hiroshi, Genzor Jozef, Gendiar Andrej, Nishino Tomotoshi	4. 巻 89
2. 論文標題 Entanglement Entropy on the Boundary of the Square-Lattice $\pm J$ Ising Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114005/1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/jpsj.89.114005	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 Ueda H., Onoda S., Yamaguchi Y., Kimura T., Yoshizawa D., Morioka T., Hagiwara M., Hagihala M., Soda M., Masuda T., Sakakibara T., Tomiyasu K., Ohira-Kawamura S., Nakajima K., Kajimoto R., Nakamura M., Inamura Y., Reynolds N., Frontzek M., White J. S., Hase M., Yasui Y.	4. 巻 101
2. 論文標題 Emergent spin-1 Haldane gap and ferroelectricity in a frustrated spin-12 ladder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.140408	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 Hiroshi Ueda	4. 巻 87
2. 論文標題 Infinite-Size Density Matrix Renormalization Group with Parallel Hida's Algorithm	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074005/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.074005	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 Hiroshi Ueda, Takahiro Morimoto, and Tsutomu Momoi	4. 巻 98
2. 論文標題 Symmetry protected topological phases in two-orbital SU(4) fermionic atoms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 045128/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.045128	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 Hiroshi Ueda, Kouichi Okunishi, Roman Krmar, Andrej Gendiar, Seiji Yunoki, and Tomotoshi Nishino	4. 巻 69
2. 論文標題 Critical behavior of the two-dimensional icosahedron model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW E	6. 最初と最後の頁 062112-1--5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.96.062112	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 Ueda Hiroshi, Otsuka Yuichi, Yunoki Seiji	4. 巻 91
2. 論文標題 Quantum-inspired Search Method for Low-energy States of Classical Ising Hamiltonians	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044005/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.91.044005	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 Fujii Keisuke, Mizuta Kaoru, Ueda Hiroshi, Mitarai Kosuke, Mizukami Wataru, Nakagawa Yuya O.	4. 巻 3
2. 論文標題 Deep Variational Quantum Eigensolver: A Divide-And-Conquer Method for Solving a Larger Problem with Smaller Size Quantum Computers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PRX Quantum	6. 最初と最後の頁 010346/1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PRXQuantum.3.010346	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 Ueda Hiroshi, Yunoki Seiji, Shimokawa Tokuro	4. 巻 277
2. 論文標題 Quantum spin solver near saturation: QS3	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 108369/1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2022.108369	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 Okunishi Kouichi, Nishino Tomotoshi, Ueda Hiroshi	4. 巻 91
2. 論文標題 Developments in the Tensor Network - from Statistical Mechanics to Quantum Entanglement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 062001/1-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.91.062001	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26件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 量子計算機に適合したテンソルネットワーク法
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」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田宏, 奥西巧一, 柚木清司, 西野友年
2. 発表標題 正方格子上の正12面体模型に現れる相転移現象の解析
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 上田宏
2. 発表標題 量子コンピュータのためのテンソルネットワーク入門
3. 学会等名 第6回Q-LEAP量子AIセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田宏, 柚木清司, 下川統久朗
2. 発表標題 飽和磁化近傍系の物性解析に特化した量子スピソルバー QS3
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会（2021年）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 量子多体計算 × 量子情報処理から眺める量子マテリアルズインフォマティクス
3. 学会等名 兵庫県立大学大学院物質理学研究科「マテリアルズインフォマティクス研究会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Ueda
2. 発表標題 Critical behavior of the two-dimensional dodecahedron model
3. 学会等名 CAQMP 2019 (Computational Approaches to Quantum Many-body Problems) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 大規模並列化角転送行列繰り込み群を用いた古典スピン系の臨界現象解析
3. 学会等名 第4回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田宏, 奥西巧一, 柚木清司, 西野友年
2. 発表標題 角転送行列繰り込み群の有限相関長スケーリングによるエンタングルメントスペクトル解析
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 上田宏, 小野田繁樹
2. 発表標題 フラストレートした強磁性的スピン1/2鎖におけるXXZ容易軸 / 面異方性とボンド交替の役割
3. 学会等名 第14回量子スピン系研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田宏, 大塚雄一, 中田真秀
2. 発表標題 行列積ユニタリ状態を利用した変分法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田宏, 柚木清司
2. 発表標題 iDMRGによるスナップショット生成とニューラルネットワークを利用した量子相転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 EigenExaを利用したCTMRG の大規模並列化とその応用
3. 学会等名 萌芽的課題「基礎科学の挑戦」サブ課題Dワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ueda
2. 発表標題 Massively parallelized CTMRG with EigenExa
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2018-2019 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 飽和磁化近傍にある $S=1/2XXZ$ 模型の解析に特化した厳密対角化法
3. 学会等名 第13回量子スピン系研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田宏, 奥西巧一, 原田健自, Roman Krčmar, Andrej Gendiar, 柚木清司, 西野友年
2. 発表標題 角転送行列繰り込み群の有限状態数スケーリングを用いたBKT転移の評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田 宏
2. 発表標題 Phase diagram and critical property in two-dimensional regular polyhedral model
3. 学会等名 研究集会「テンソルネットワーク(TN)スキームとテンソル計算ソフトウェアの周辺」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上田宏, 奥西巧一, Roman Krčmar, Andrej Gendiar, 柚木清司, 西野友年
2. 発表標題 離散化された古典ハイゼンベルグ模型に現れる相転移
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Ueda
2. 発表標題 Classical analogue of finite entanglement scaling around the criticality
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上田 宏
2. 発表標題 異方的多面体模型に現れる相転移
3. 学会等名 CBSM2サブ課題D「量子力学と情報」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Ueda
2. 発表標題 Tensor network algorithms and finite entanglement scaling around the criticality
3. 学会等名 International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田宏, 下川統久朗
2. 発表標題 量子スピンソルバー-QS3を用いた量子回路シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Ueda
2. 発表標題 Development of quantum spin solver QS3 and its application
3. 学会等名 近畿大学総合理工学研究科学際セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田宏
2. 発表標題 量子スピンシミュレータQS3の高度化
3. 学会等名 第16回量子スピン系研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田宏, 山本大輔, 下川統久朗
2. 発表標題 量子スピンソルバー-QS3の高度化：混合スピン・超格子系への応用
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会（2022年）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

research map の個人HP
https://researchmap.jp/hiroshi_ueda/

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
研究協力者	西野 友年 (Nishino Tomotoshi) (00241563)		
研究協力者	奥西 巧一 (Okunishi Kouichi) (30332646)		
研究協力者	柚木 清司 (Yunoki Seiji) (70532141)		

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1件

国際研究集会 Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2018-2019	開催年 2018年～2018年
--	--------------------

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