

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02931

研究課題名（和文）量子多体系のエネルギースケール制御機構とエンタングルメントくりこみ群

研究課題名（英文）Energy-scale controlling of quantum many-body systems and entanglement renormalization

研究代表者

奥西 巧一 (Okunishi, Kouichi)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：30332646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：量子多体系のエンタングルメントハミルトニアンには特徴的な実空間のエネルギースケール変調が現れることが多い。本課題ではその背後の数理構造に着目することで、量子重力におけるUnruh効果の量子スピン系版—格子Unruh効果—を明らかにした。また、共形場理論によるエンタングルメントハミルトニアンの構成法の知見をテンソルネットワーク法の解析に援用することで、6状態クロック模型の臨界現象の高精度の検証や正多面体模型の新奇相転移の発見を実現した。さらに、高次元ランダム系に対応したテンソルネットワーク法アルゴリズムも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまであまり注目されてこなかった量子多体系のエンタングルメントハミルトニアンの空間非一様性の背後にある数理構造の解析を通じて、格子Unruh効果という、理論的にも実験的にも大変興味深い現象を提案できた。これにより、現実的な物性系で疑似的量子重力現象の検証が可能になり、物性にとどまらない大きな波及効果が期待される。また、テンソルネットワーク法の背景の理解が深まったことで、臨界現象解析の信頼性が大きく向上しただけなく、ランダム系に対するアルゴリズムの性能向上も達成できた。今後の物性系の定量的解析にも大いに役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：Analyzing the mathematical structure of the entanglement Hamiltonian for the quantum spin systems, we proposed the lattice Unruh effect, which is a quantum spin system version of the Unruh effect for the quantum gravity. We also clarified phase transitions of regular polygon models and 6-state clock models, using high precision corner-transfer-matrix renormalization groups combined with the CFT analysis of the entanglement Hamiltonian. In addition, we have formulated new tensor network algorithms for random quantum spin systems.

研究分野：物性理論

キーワード：テンソルネットワーク エンタングルメント くりこみ群 角転送行列 量子多体系

1. 研究開始当初の背景

量子多体系の定量解析を行う上で、量子エンタングルメントの構造を理解することは非常に重要である。とくに、系のエネルギースケールに対する積極的な変調により、量子エンタングルメントがどのように変化するかを詳しく追跡し、低エネルギーの振る舞いの精密な解析を実現することは、量子多体系の物理学において最も基本的な課題である。そのような状況のもと、近藤不純物問題に対する Wilson の数値くりこみ群のような、指数関数的な実空間エネルギースケール変調により低エネルギー状態を系統的に抽出する機構や、サイン 2 乗変形のような、一様系の基底状態を厳密に保ちながら励起状態の構造を制御する新しい手法などが矢継ぎ早に提案され、大いに注目を集めていた。一方で、テンソルネットワーク法に代表される高精度数値くりこみ群法では、テンソルをネットワーク状に連結して表現した状態に対する変分最適化を行うが、その変分状態に内包されるエンタングルメントハミルトニアンを解析することが計算精度の向上にとって鍵となる重要なステップと考えられていた。そこで本研究課題で着目したのは、このエンタングルメントハミルトニアン自体も特徴的な実空間のエネルギースケール変調を持つ量子多体系とみなせる点である。すなわち、実空間のエネルギースケール変調とテンソルネットワーク法におけるエンタングルメントハミルトニアンの構造制御の背後には、実は、互いに共通する物理的な背景があるのではないかと。そして、その物理的背景を解明することこそが、次世代のテンソルネットワーク法の基礎として重要になるのではないかと。本研究課題の開始当初は、このような問題意識が量子情報と物性基礎論の境界にまたがる形で提起された。

2. 研究の目的

そこで本研究では、実空間のエネルギースケール変調をともなう量子多体系とテンソルネットワーク法におけるエンタングルメントハミルトニアンの構造の両方に焦点を当てた研究を行った。

- (I) 一次元量子系（および対応する 2 次元古典系）におけるエネルギースケール変調とテンソルネットワーク型数値くりこみ群との関係の解明し、共形場理論や量子重力におけるエンタングルメント構造も含めた統一的な理解を構築すること。
- (II) その基礎的研究を足場にして、エネルギースケール変調メカニズムを組み入れたテンソルネットワーク型数値くりこみ群アルゴリズムの構成し、高次元へ拡張すること。

の 2 点を主な研究目的とした。

具体的には、(I)-1 指数変形やサイン 2 乗変形に代表されるエネルギースケール変調を加えた格子模型と共形場理論より予想されるエンタングルメントスペクトルなどとの関係を解明すること、(I)-2 特徴的な実空間変調を持つエンタングルメントハミルトニアンの構成とそれに関連する量子重力的現象との関係を明らかにすることを目指した。さらに、それらの基礎的研究の知見を組み入れながら、(II)-1 実空間変調を持つ量子系に対するテンソルネットワーク法アルゴリズムの開発を効率化すること、および、(II)-2 開発したテンソルネットワーク法のアルゴリズムや、その背後にある量子エンタングルメントの制御法を、現実的な物性を念頭に置いた量子スピン模型や統計力学模型に応用し、それらの模型の基礎物性を解明することを行った。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するためには、それぞれの問題設定のレベルに応じた適切な研究手法を選択する必要がある。

(I)-1 臨界系の格子模型に対するエネルギースケールの変調を、共形場理論に現れるエネルギースケール変調と対応付けて解析した。例えば、角転送行列くりこみ群(CTMRG)におけるエンタングルメントハミルトニアンは、エネルギースケールが格子点の位置に比例して増える構造を持っている。一方で、サイン 2 乗変形の発展より、臨界系の様々な空間変調をもつハミルトニアンは、適切な共形変換により生成可能なことが分かってきていた。そこで、境界のある共形場理論に対して共形変換(メビウス変換等)を組み合わせることで、角転送行列法やサイン 2 乗変形などの状況に対応した(共形場理論に基づく)エンタングルメントハミルトニアンを構成した。さらに、そのスペクトル構造を格子系の数値解析により詳細に検証し、実践的な数値解析にも利用できるように整備した。

(I)-2 では、(I)-1 と同様に角転送行列に関連したエンタングルメントハミルトニアンの数理的な構造に着目した。しかし、(I)-1 の臨界系の共形場理論とは異なり、励起ギャップのある可積分 XXZ 模型の縮約密度行列に着目した研究を行った。とくに重要な点は、この可積分 XXZ 模型のエンタングルメントハミルトニアンが格子版のローレンツ加速演算子としての性質を持つために、量子スピン鎖の基底状態をローレンツ加速演算子に対する熱平衡状態として厳密に解釈することができる点にある。これは、量子重力理論分野の真空の熱化を表す Unruh 効果と全く同様の数理的構造が、量子スピン系にも表れることを意味する。そこで、代表者の奥西と本科研費で雇用した特任助教の関が、量子モンテカルロ法とテンソルネットワーク法を組み合わせた解析を行い、XXZ 模型における熱化されたエンタングルメントハミルトニアンとエンタングルメントエントロピーの振る舞いを精密に検証した。さらに、量子重力における熱化された真空の輻射スペクトルの Unruh-Dewitt 型検出器のアナロジーから、量子スピン系に対する角度時間相関関数を導入し、エンタングルメントスペクトルの新しい検出機構を提案した。また、密度行列くり

こみ群法により角度時間相関関数を計算し、その特性を検証することも行った。

(II)-1 これまであまり手が付けられてこなかったランダム量子スピン模型に対するテンソルネットワーク型数値繰り込み群の定式化を行なった。ランダム系ではエネルギースケールの空間分布も不均一になるため、テンソルネットワーク法におけるくりこみ手続きの順番、すなわち樹状ネットワークの形状を効率よく構成することが非常に重要になる。しかし、既存の強ランダム系くりこみ群 (SDRG) は、摂動論に基づく解析計算を前提にしていたため、その一般化のためには非自明な点が多く残されていた。そこで、従来型の SDRG において、くりこみ順を決めるためのエネルギーギャップの設定法に関する問題点を洗い出し、その問題点を改善することで計算精度を向上させるアルゴリズム (tSDRG) の構築を行った。さらに、基底状態の波動関数のエンタングルメント構造に着目した新しいアルゴリズム (E-tSDRG) の開発も行った。まず、くりこみのターゲットとなるブロックの隣接ブロックまでを含めた波動関数を構成し、そのターゲットとなるブロックについての混合状態エンタングルメントエントロピーを利用してくりこみ順を決定するアルゴリズムを構成した。さらに、そのくりこみ順決定アルゴリズムを E-tSDRG 法として実装し、2次元ランダム量子スピン系に対して計算精度の検証を行った。なお、アルゴリズム開発と計算の実践は、分担者の引原と特任研究員の関および代表者の奥西が連携しておこなった。

(II)-2 では、大規模角転送行列くりこみ群法により、既存の数値的手法では精密な解析が難しかった、正 20 面体模型、正 12 面体模型の相転移・臨界現象の解析を行った。角転送行列くりこみ群による大規模並列化計算を実現し、有限 m スケーリング法を組み合わせた解析をおこなった。通常の物理量のスケール解析に加えて、エンタングルメントエントロピーについてのスケール解析も行うことで、高精度の解析を可能にした。また、6 状態クロック模型の Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移についても同様に大規模角転送行列くりこみ群と有限 m スケーリングを組み合わせた解析を行った。BKT 転移の臨界現象には対数補正があるため、通常とは異なるスケール関数を仮定した解析をおこなった。さらに、(I)-1 で得られた、端のある共形場理論にもとづくエンタングルメントスペクトル解析手法を援用し、有効相互作用のラッティンジャーパラメーターの温度依存性の抽出も試みた。これらの計算と解析は連携研究者の上田と代表者の奥西が中心となり行った。

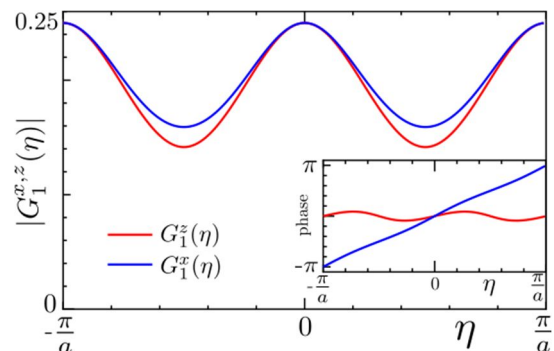
4. 研究成果

上記の 4 つの課題それぞれに対して、主要な研究成果は、以下ようになる。

(I)-1 境界のある共形場理論に共形変換やモジュラー変換を組み合わせることで、角転送行列法に対応した量子臨界系のエンタングルメントスペクトルの有限サイズスペクトルを導出した。これは、E.Tonni らにより同時期に類似の手法により導出されたスペクトルの式 [J. Stat. Mech. (2016) 123103] と等価なものである。さらに、メビウス変換により、有限の長さ領域に対するエンタングルメントの幾何学的配置状況を取り入れたスペクトルの補正項を導いた。量子スピン系に対する数値計算と比較の結果、スペクトルの一部については数値計算との一致が大きく改善されることが示された。なお、角転送行列法に対するスペクトルの解析法は、(II)-2 の 6 状態クロック模型のラッティンジャーパラメーターの計算に援用された。

(I)-2 量子 XXZ 鎖模型に対する格子ウンルー効果の定式化を行った。これにより格子模型における基底状態の量子エンタングルメントを、スピンの古典的世界線の絡み合いとして表現することに成功した。また、格子系での Unruh 温度が $T=a/2\pi$ で記述されることが明らかになった。ここで、 a は重力系における有効加速度に相当し、XXZ スピン系の異方性パラメーター Δ と $a = \pi/\cosh^{-1}\Delta$ の関係がある。さらに、エンタングルメントハミルトニアンに相当する corner Hamiltonian に対する有限温度の量子モンテカルロシミュレーションを行い、熱化された corner Hamiltonian に対する相関関数を計算した。さらに、密度行列くりこみ群法により求めた一様系の基底状態の相関関数と比較した結果、両者が完全に同一視できることが確認された。これらにより、重力理論における Unruh 効果と等価な現象が量子スピン系でも実現可能であることが確認された。

また、Unruh-DeWitt 型検出器との類推により、角度時間相関関数を經由して量子スピン系における熱化されたエンタングルメントスペクトルを検出する機構を提案した。右図は、量子スピン系に導入された仮想的な角度時間 η に対する自己相関関数である。古典的な値の 0.25 からのずれが非自明な量子エンタングルメントの効果を表している。これにより通常は直接的な実験が難しい量子重力現象における Unruh 効果を、量子スピン系における疑似的な量子重力現象として検証する道が開けた。



(II)-1 ボンドランダム量子スピン系に対するテンソルネットワーク型数値くりこみ群法 (tSDRG) の定式化とそのアルゴリズムの系統的な性能評価 (有限サイズクラスターでの対角化や量子モンテカルロ法による計算精度の比較・検証) を行った。その結果、ブロックスピン間の最大励起ギャップにもとづく樹状テンソルネットワークの構成法が、計算精度および簡便性において最も性能が良いことが明らかになった。まず、1次元系では既存の数値繰り込み群型のアル

ゴリズムから、大幅な精度の向上を果たすことができた(エネルギーで2桁程度)。正方格子や三角格子のボンドランダム系においても、実用上十分な計算精度が出ていることが確認されたが、とくに、ランダムネスが強い領域で、最大励起ギャップにもとづく tSDRG の性能が高いことが明らかとなった。今後の応用展開が期待される。

一方、波動関数のエンタングルメント構造に基づいた E-tSDRG の定式化では、1次元系では構成されたネットワークに長距離シングレットによるエンタングルメントの取りこぼしが生じるため、最大エネルギーギャップ型の tSDRG と比較して計算精度の向上が芳しくないことが分かった。しかし、正方格子や三角格子のむしろランダムネスが弱い領域では、エンタングルメント型の E-tSDRG が有利となることが明らかとなった。このため、問題に応じて適切な tSDRG 法を組み合わせることが重要であるとの結論を得た。

(II)-2 大規模並列化角転送行列くりこみ群法による2次元正20面体面体模型の臨界現象の解析の結果として、臨界指数 $\nu=1.62(2)$ 、 $\beta=0.12(1)$ および有効中心電荷 $c=1.90(2)$ を得た。さらに頂点数の多い2次元正12面体面体模型に対しては、 $\nu=2.88(8)$ 、 $\beta=0.21(1)$ 、および $c=1.99(6)$ を得た。これらは、既存の既存の普遍性クラスには属さない臨界指数の組であり、正多面体の頂点数の増加に応じて、中心電荷 c が系統的に増大する新しい普遍クラスのシリーズが出現することが強く示唆される結果となった。今後は有効理論等との比較検証により、その普遍性クラスの同定が重要となる。

一方、2次元6状態クロック模型の BKT 型相転移の有限 m スケーリング解析により、相転移が BKT 転移であることや、中間領域における臨界相は $c=1$ の共形場理論による予想と合致していることが高精度で検証された。とくに、(I)-1 の理論を、CTMRG 法におけるエンタングルメントスペクトルの解析に応用し、ラッティンジャーパラメーターを推定することに初めて成功した。その結果、KT 相の内部でのラッティンジャーパラメーターの温度依存性が、サインゴルドン模型による有効場理論と合致することを数値的に高い精度で検証することができた。中国のグループとほぼ同時ではあったが、これは、テンソルネットワーク法によりクロック模型の BKT 転移が検証された世界初の結果である。

上記の4つの主要結果以外にも、イベント連鎖モンテカルロ法を用いた積層カゴメ三角型格子系における立体磁気秩序への相転移の解析を行い、その転移が弱い一次転移であることを初めて定量的に明らかにした。また、世界線型量子モンテカルロ法におけるスナップショットエントロピーの概念も提案し、その詳細な性質を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4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 62111
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 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 32130
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 Seki Kouichi, Hikihara Toshiya, Okunishi Kouichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Tensor-network strong-disorder renormalization groups for random quantum spin systems in two dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.144439	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 Han Yibo, Kimura Shojiro, Okunishi Kouichi, Hagiwara Masayuki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Unconventional magnetic excitations and spin dynamics of exotic quantum spin systems BaCo ₂ V ₂ O ₈ and Ba ₃ CuSb ₂ O ₉	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Magnetic Resonance	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00723-020-01296-w	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 Miyata A., Hikihara T., Furukawa S., Kremer R. K., Zherlitsyn S., Wosnitza J.	4. 巻 103
2. 論文標題 Magnetoelastic study on the frustrated quasi-one-dimensional spin-12 magnet LiCuVO4	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.014411	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 Okunishi Kouichi, Seki Kouichi	4. 巻 88
2. 論文標題 Lattice Unruh Effect and World-line Entanglement for the XXZ Chain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114002 ~ 114002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.114002	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 Hagiwara Masayuki, Kida Takanori, Matsuda Kazuyuki, Kyakuno Haruka, Maniwa Yutaka, Honda Zentaro, Sakaguchi Yuya, Tashiro Makoto, Sakai Masamichi, Fukuda Takeshi, Kamata Norihiko, Okunishi Kouichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Magnetic Properties of One- and Two-Dimensional Functional Materials: Oxygen Molecules Encapsulated in Single-Walled Carbon Nanotubes and Copper Ions Embedded into Phthalocyanine Sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Open Chemistry Journal	6. 最初と最後の頁 27 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2174/1874842201906010027	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 Mudry Christopher, Furusaki Akira, Morimoto Takahiro, Hikihara Toshiya	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantum phase transitions beyond Landau-Ginzburg theory in one-dimensional space revisited	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.205153	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 Hikihara Toshiya, Misawa Takahiro, Momoi Tsutomu	4. 巻 100
2. 論文標題 Spin nematics in frustrated spin-dimer systems with bilayer structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.214414	査読の有無 無
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 Seki Kouichi, Okunishi Kouichi	4. 巻 88
2. 論文標題 Snapshot Spectra in the World-Line Quantum Monte Carlo for One-Dimensional Quantum Spin Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024003 ~ 024003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.024003	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 Okunishi Kouichi, Onozato Yoshitaka, Seki Kouichi	4. 巻 8
2. 論文標題 A low-energy effective model for the S=1/2 Kagome-triangular-strip Heisenberg model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 101401 ~ 101401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5042702	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 Tonegawa Takashi, Hikihara Toshiya, Okamoto Kiyomi, Furuya Shunsuke C., Sakai Toru	4. 巻 87
2. 論文標題 Ground-State Phase Diagram of an Anisotropic S = 1/2 Ladder with Different Leg Interactions	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 104002 ~ 104002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.104002	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 Seki Kouichi, Okunishi Kouichi	4. 巻 87
2. 論文標題 Phase Transitions for Cuboc Orders in Stacked Kagome Heisenberg Systems	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 023001 ~ 023001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.023001	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 Ochiai Masahiro, Seki Kouichi, Okunishi Kouichi	4. 巻 86
2. 論文標題 Spin-Wave Analysis for Kagome-Triangular Spin System and Coupled Spin Tubes: Low-Energy Excitation for the Cuboc Order	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114701 ~ 114701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.114701	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 Ueda Hiroshi, Okunishi Kouichi, Kr?m?r Roman, Gendiar Andrej, Yunoki Seiji, Nishino Tomotoshi	4. 巻 96
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 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35件(うち招待講演 2件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 XXZ鎖における格子Unruh効果と世界線のエンタングルメント
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関孝一
2. 発表標題 カゴメ-三角格子における磁場下でのスキルミオン相
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島康太郎
2. 発表標題 AKLT鎖における角度時間相関関数
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本龍人
2. 発表標題 穴空き2次元イジング模型のエンタングルメントのCTMRG法による解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西野友年
2. 発表標題 Tree Tensor Network を用いた量子系の最適表現!
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kouichi Okunishi
2. 発表標題 "Lattice Unruh effect and world-line entanglement for the XXZ chain"
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 上松和樹
2. 発表標題 ランダムJ1-J2スピン鎖の基底状態相図と低温特性
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 ランダムJ1-J2スピン鎖におけるフラストレート・ランダムシングレット状態
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 擬一次元S=1/2フラストレート強磁性体LiCuVO4の磁場中磁歪測定
3. 学会等名 第15回量子スピン系研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥西巧一、上田宏、西野友年
2. 発表標題 エンタングルメント分割と樹状テンソルネットワークの相互情報量最適化原理
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関孝一、引原俊哉、奥西巧一
2. 発表標題 実空間繰り込み群法の改良と二次元ランダム量子スピン系への適用
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 XXZ鎖における格子Unruh効果と世界線エンタングルメント
3. 学会等名 サイン2乗変形 (SSD) とその周辺2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 Corner transfer matrix and lattice Unruh effect for the XXZ chain
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications 2019-2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関孝一、引原俊哉、奥西巧一
2. 発表標題 Numerical strong-disorder renormalization group for two-dimensional random quantum spin systems
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications 2019-2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 引原俊哉, Christopher Mudry, 古崎昭, 森本高裕
2. 発表標題 spin-1/2 J1-J2 XYZ鎖における非GL的量子臨界相転移
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三澤貴宏, 引原俊哉, 桃井勉
2. 発表標題 フラストレート・スピンドイマー系におけるスピンネマティック秩序状態の多変数変分モンテカルロ法による解析
3. 学会等名 日本物理学会秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouichi Okunishi
2. 発表標題 A low-energy effective model for the S=1/2 Kagome-triangular-strip Heisenberg model
3. 学会等名 International Conference of Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiya Hikiyara
2. 発表標題 Ground States in an Anisotropic S=1/2 Ladder with Different Leg Interactions
3. 学会等名 International Conference on Magnetism 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouichi Seki
2. 発表標題 Scaling analysis of snapshot spectra in the world-line quantum MonteCarlo for one-dimensional quantum spin systems
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouichi Seki
2. 発表標題 MonteCarlo studies of phase transitions for cuboc orders in stacked kagome Heisenberg systems
3. 学会等名 3rd international symposium on research and education of computational science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 引原俊哉
2. 発表標題 二次元ランダム量子スピン系解析のための実空間繰り込み群法の改良
3. 学会等名 京都大学基礎物理研究所研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関孝一
2. 発表標題 積層カゴメ格子における立体秩序Cubocの研究
3. 学会等名 京都大学基礎物理研究所研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関孝一
2. 発表標題 二次元ランダム量子スピン系に対する実空間くりこみ群法の改良と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会年次大会（九州大学）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 1次元量子系のエンタングルメントスペクトルとCFTのメビウス量子化
3. 学会等名 日本物理学会年次大会（九州大学）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関孝一
2. 発表標題 連続スピン系における弱い一時相転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（同志社大学）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関孝一
2. 発表標題 量子モンテカルロ法を用いたランダム量子スピン系の実空間くりこみ群法の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（同志社大学）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 共形場理論のメビウス量子化とエンタングルメント
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（同志社大学）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥西巧一
2. 発表標題 サイン2乗変形と運動量
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野里佳孝, 奥西巧一, 関孝一
2. 発表標題 カゴメ 三角ストリップ模型の有効模型
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野里佳孝, 奥西巧一, 関孝一
2. 発表標題 カゴメ 三角格子ストリップ上のスピン模型の磁化過程
3. 学会等名 日本物理学会第2017年秋期大会
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 日本物理学会第2017年秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiya Hikiyama
2. 発表標題 SSD and other energy deformations
3. 学会等名 Workshop on Sine square deformation and related topics
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kouichi Okunishi
2. 発表標題 Sine-square deformation and Mobius quantization of 2D CFTs
3. 学会等名 Workshop on Sine square deformation and related topics
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 引原俊哉, 古崎昭, Sergei Lukyanov
2. 発表標題 S=1/2反強磁性ハイゼンベルグ鎖におけるダイマー-相関振幅とボンド交替による励起ギャップ
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 Toshiya Hikihara, Tsutomu Momoi
2. 発表標題 Spin-nematic ordering in two- and three-dimensional frustrated quantum magnets composed of spin dimers
3. 学会等名 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究 分担者	引原 俊哉 (Hikihara Toshiya) (00373358)	群馬大学・大学院理工学府・准教授 (12301)	

	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	上田宏 (Ueda Hiroshi) (40632758)	大阪大学・量子情報・量子生命研究センター・特任准教授 (14401)	

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			
スロバキア	スロバキア科学アカデミー			