

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03380

研究課題名（和文）エンタングルメントおよびホログラフィー原理に基づく量子特徴抽出法の研究

研究課題名（英文）Research on quantum feature-extraction methods based on entanglement and holography principle

研究代表者

松枝 宏明 (Hiroaki, Matsueda)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20396518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子多体問題においては、異なる時空間スケールの量子相関がどのように絡んで実際の複雑な量子状態を実現しているかを理解することが重要である。それを分析可能な数理の構築を行った。特異値分解、量子相関行列、エンタングルメント・ハミルトニアン、MERAの幾何学、複合励起演算子法などを整備し、これらの関わりあいについても研究した。またその成果を量子ビット系の緩和ダイナミクスや多体局在などの問題に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子情報理論的な観点あるいは幾何学的観点から量子多体問題の数理構造を分析をすることで、平均場近似や摂動法に代表される伝統手法とは大きく異なる非局所量子もつれを精密に取り扱う方法を複数得ることができた。またこれらは一見すると大きく異なる表現であるものの、非常に深い関わりがある事も見いだされた。これらにより、従来の物理学的記述・思考を革新する近年の関連研究展開に一定の寄与をすることができた。

研究成果の概要（英文）：In quantum many-body problems, it is important to understand how quantum correlations at different spatiotemporal scales are intertwined to realize actual complex quantum states. We have developed singular value decomposition, quantum correlation-matrix approaches, entanglement Hamiltonian theories, geometrical study of multiscale entanglement renormalization, and composite operator approaches, and studied the relationships between them. We also applied the results to problems such as relaxation dynamics of qubit systems and many-body localization.

研究分野：量子情報物理学

キーワード：エンタングルメント、ホログラフィー原理、特異値分解、エンタングルメント・ハミルトニアン、エンタングルメントくりこみ群、複合励起演算子法、情報幾何学

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

量子情報理論と理論物理学の接近は、理論物理学の世界的な潮流としてこの20年で大きく進展している。それは「エンタングルメント(量子もつれ)」の概念が量子コンピュータや量子情報通信などの応用面だけでなく、物理学諸領域の進展に必要な不可欠なものであることが広く研究者間の共通認識となったためである。量子もつれの指標であるエンタングルメント・エントロピーは量子系の相関関数に対応する量であり、その時空間スケール特性は、例えば古典的秩序変数が定義できない量子相転移や波動関数の構造を前提知識なしに教えてくれる便利な機能を持ち合わせている。更にそれはブラックホールの熱力学的エントロピーのスケール特性とも類似しており、時空の量子化の根幹に関わる大変重要な特性であると考えられている。

素粒子・物性両分野から現れた「ホログラフィー原理(バルク・境界対応)」もまた重要な概念であり、特にエンタングルメントと相補的なものであることが分かっている。これは時空の境界にバルク上の理論とは全く異なる理論が出現すること意味しており、この原理によって量子論と古典的一般相対論の等価性(ゲージ重力対応)という驚くべき理論も生み出されている。物性・統計基礎論における「エンタングルメントくりこみ変分波動関数」もこれと同等の性質を備えていると考えられている。これらの概念により、量子力学の変分法や一般相対論は量子情報を適切なフォーマットでそれに適した幾何学を持つ時空にメモリする方法を与える場合があると非常に斬新な情報論的解釈が与えられつつある。

いずれの研究も量子的なくりこみ群の完成という統計物理学・量子物理学における深遠なテーマの一端を担っていると考えられる。端的に言えば量子系における主成分解析や特徴抽出を意味している。これらの概念を活用して伝統手法では取り扱いが難しい量子系の諸問題を効果的に解決したいというニーズが多い。その一方、エンタングルメントやホログラフィー原理は単独で機能する量ではなく、非自明な物理現象を見出すプローブとはなり得るものの、その背景となる物理の詳細を自動的に抽出することは難しい。そのため、多くの研究者に興味を持たれているにも関わらず、限られた専門家内の理論に留まっている傾向にある。真に適用範囲の広い普遍的な方法を目指すための工夫が求められている。

量子物理系に限らず、一般に大規模データから本質的な情報を取り出すための手法は、昨今のフィジカル・サイバー融合社会の推進やデータ駆動科学の進展において根幹となる技術である。したがって古典データに対する情報処理技術は、深層学習の流行とも相まって様々に展開されている。その一方で量子多体系の場合には非局所的な量子もつれが必然的に存在するため、実空間ベースのデータの粗視化がうまく機能しない。したがって、複数の自由度が量子的に同時に揺らいでいるような複雑な状態をどのような物理的概念・数学的手段で認識・記述すればよいかということが問題の核心的な問いとなる。量子多体系は一般に異なる時空間スケールの量子揺らぎが混在することがその複雑さの根幹にあるので、それらを分解して高次元的に俯瞰することがポイントとなる。そのために上述の時空の問題が自然にエンタングルメントと関係してくるわけである。本問題解決のためには、量子系のエンタングルメントをこれまで集中的に調べられてきたエンタングルメント・エントロピーだけではなく、伝統手法に現れる物理量や新たに定義した量で表現するなどの包括的な見方で捉え直す必要がある。またホログラフィー原理においては量子情報がエンコード可能な古典時空の幾何学を解析することで元の量子系の特徴把握を行うが、よりストレートに量子相関の情報がどのようなフォーマットで時空のどこにエンコードされたのかを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

上述の課題を解決するために、具体的な物性の量子多体問題(量子スピン系や強相関電子系)を用いて、量子的に揺らいだ状態からダイレクトに主成分解析を行う新たな特異値分解法や複合励起演算子法を開発する。また量子情報幾何学に基づいて、量子多体論と一般相対論の変換における量子相関の最適表現・幾何学対応を松枝の専門である量子物性の問題の視点から解析する。過去6年間で実施してきた科研費基盤研究(18K03474,15K05222)が本研究を推進するための基盤となっているが、これらは非常に数理物理的な基礎研究であった。そのため、本基盤研究の当初計画は最終的な成果よりも基礎研究的な性格を帯びていた。その一方、科研費申請書作成時から比べてその後の関連研究者との情報交換も進んだことにより、この3年間でより物性や統計物理に関係した研究を進めるべきと感じ、まさに多彩な系での量子特徴抽出を行う必要性があると認識した。そこで最終的には下記の研究テーマを設定し、課題解決に向けた研究を推進した(各テーマの詳細項目については「4. 研究成果」で述べる)。

- (1) 量子的特異値分解の開発と応用
- (2) 物性における量子多体問題の視点からのホログラフィー原理の解析と量子系の特徴表現
- (3) 量子多体系の複合励起描像による量子特徴抽出の研究
- (4) エンタングルメントに関わる諸量の物性諸問題における活用法

3. 研究の方法

解析的方法および数値的方法を駆使して各課題に取り組んだ。解析的方法については、各課題に応じた方法を考える必要があるが、基本的には量子スピン系の少数系に対するハミルトニアン の厳密対角化から熱力学的極限の性質を類推してその一般構造を探る方法と、複合励起演算子に対するハイゼンベルグの運動方程式による方法を用いた。数値的方法に関しては、厳密対角化や行列積状態の変分最適化による多体波動関数の導出法を用いた。特異値分解や相関関数行列の方法などの情報処理的な手法も適宜活用して、解析的・数値的解析を効果的に進めた。

4. 研究成果

「2. 研究の目的」の欄で掲げた各課題に関しての研究成果と残された今後の展開についてまとめる。

(1) 量子的特異値分解の開発と応用：

松枝独自の先行研究において、2次元古典イジングスピン系のスピン配置に対するモンテカルロ・スナップショットに対する特異値解析が行われている[1,2,3,4]。これにより、分配関数の莫大な自由度を取り扱わなくても、相転移点近傍の1枚のスナップショットから異常臨界指数を抽出することが可能であることが分かっている。このような手法を量子多体系の問題に拡張することが目的である。そのために1次元反強磁性 Heisenberg モデルを用い、そのスピン相関行列(全てのサイト間の2点スピン相関関数を行列に並べた量)に対して特異値解析を適用した。相関行列はエンタングルメント・ハミルトニアンと深い関わりを持っていることが自由フェルミオン系では知られており、その意味でも相関行列の活用は本解析において重要であると思われる。この問題は解析的厳密に実行することができ、実際に各特異値に対応する相関行列の固有状態は、特異値の大きさに特徴づけられる反強磁性ドメインサイズを表現していることが分かった。本成果は論文として公表した。Heisenberg モデルの基底状態波動関数をこのドメイン状態で展開したときに、その比例係数にホログラフィーの幾何学構造に繋がる情報が含まれていると期待されるが、その解析は今後の課題として残された。

(2) 物性における量子多体問題の視点からのホログラフィー原理の解析と量子系の特徴表現：

本課題ではホログラフィー原理に隠れた数学的機構を明らかにするために、エンタングルメントくりこみ変分波動関数 (Multiscale Entanglement Renormalization Ansatz, MERA) の厳密な構成法を検討することにより、量子臨界系の幾何学表現と情報格納の問題について取り組んだ[5]。これまでは自由フェルミオンの問題以外はこの定式化が成功していないため、数学的に明らかな事実の蓄積が少なかった[6]。この変分理論が適切である量子臨界系の例として、1次元反強磁性 Heisenberg モデルの基底状態に着目した。この変分波動関数はテンソルネットワークで表現されるため、各テンソル要素に対象系のどのような量子相関の情報が格納されているかを知ることが重要となる。非局所基底による展開を駆使することにより、少数系では厳密にテンソルネットワーク表現を得ることができた。またその情報圧縮機構についても一定の理解を得た。しかしながら任意のサイズの系に対する数学的一般化ができなかったため、この問題は引き続き研究を推進していきたいと考えている。研究全体としては未完となったが、幾つかの著作(科学雑誌、共著の英語教科書)において、一部の成果を公表した。

上記の解析にあたって、エンタングルメント・ハミルトニアンを演算子レベルで導出することが求められた。またエンタングルメント・ハミルトニアンの普遍構造を得ることは、情報幾何学を通じてゲージ重力対応の物理的・情報論的意味を調べるためにも意義がある事が松枝の先行研究から現象論レベルでは明らかとなっている。エンタングルメント・ハミルトニアンに関しても、自由フェルミオン系以外では数学的導出がなされていないが[7]、量子トモグラフィーを用いた推定法による研究が最近盛んに行われていることから[8,9]、これらの成果も援用しながら研究を進めた。研究結果として、相互作用が当等のかつ周期境界条件を持つ1次元反強磁性 Heisenberg モデルの場合には、全系を2分割したときのエンタングルメント・ハミルトニアンがサイン変形を伴った Heisenberg モデルになることが示された。この結果は連続極限の場の理論と整合的な結果である[10,11]。量子多体系の効果的なシミュレーションのためのサイン2乗変形や量子臨界系の Wilson くりこみ群など、相互作用変形を活用する問題は多くの研究者に興味を持たれているが、そのような内容がエンタングルメント・ハミルトニアンに自然に内包されていることは興味深い。この成果については、何故サイン変形が現れるかという物理的な意味の解析も含めて解析を進め、現在論文執筆中である。

MERA の厳密解へのアプローチと並行して、エンタングルメント蒸留としてのテンソルネットワークの機能性についても研究を進め、論文として成果を公表した。

(3) 量子多体系の複合励起描像による量子特徴抽出の研究：

本テーマの具体的な課題として、散逸のある2量子ビット系の量子もつれダイナミクスを取り扱った。環境自由度がマルコフ的か非マルコフ的かの違いに応じて2量子ビット間エンタングルメントの破壊・復活の様子が異なることは知られている。ここでは運動方程式の方法を用い

て 1 量子ビット状態および 2 量子ビット複合状態の緩和ダイナミクスを解析的に導出することで、それらの安定性や緩和時間の違いについて議論した。後者の複合励起がエンタングルメントの特徴を備えた量である。ダイナミクスを記述する方程式はスピントロニクスの LLG 方程式 (Landau-Lifshits-Gilbert equation) 類似の形をとるが、複合状態の緩和項は通常の LLG 方程式とは異なる形をとる。そのことを反映して、1 量子ビット状態が緩和した後でも 2 量子ビット複合状態は緩和しないという結果を得た。ここでは環境をオーミックなスペクトルで表現し、マルコフ近似を用いたが、2 量子ビット間の相関は長時間持続するという非自明な結果を得た。2 量子ビットが環境と同位相で結合している場合にはマルコフ過程であっても相関を乱さないということが背景にあると考えられる。研究成果は国際会議で発表し、論文として公表された。

本課題に関連する話題として、物理系としては全く異なるが、物質中の励起子分子の量子もつれ状態を量子もつれ光子対によって検出する問題についても取り扱っている。ここでも励起の寿命に比べて励起子分子の寿命が長いという非自明な結果が指摘されている。この問題については引き続き解析中である。

(4) エンタングルメントに関わる諸量の物性諸問題における活用法

統計力学の基礎的問題として固有状態熱化仮説 (Eigenstate Thermalization Hypothesis, ETH) や多体局在 (Many Body Localization, MBL) に注目が集まっており、これらの緩和ダイナミクスの特徴抽出にエンタングルメント・エントロピーや相関関数のスケール特性が活用されている。ここでは多体局在の理解を深めるために、時間的に 2 値的に揺らいだ横磁場のある準周期イジング模型の準粒子ダイナミクスを調べた。これにより、時空間ランダムネスが準粒子の伝搬にどのような影響を及ぼすかを明らかにした。ここでは空間 1 次元系の中心に時刻 0 で生成した準粒子の時空間伝播に関わる相関関数を定義し、それを特徴づける指数の振る舞いから、局在・非局在について議論した。準粒子のダイナミクスは、時間スケールに応じて 2 種類に分類される。短時間のダイナミクスに関しては、通常は拡散的なダイナミクスを示すが、2 値的に揺らぐ磁場の時間間隔が特別の値を取るときに、拡散的と弾道的な中間的な値を取ることで緩和が抑制されるという結果を得た。また長時間のダイナミクスに関しては、準周期性の効果が少しでも入ると拡散的なダイナミクスを示す結果を得た。これらの機構は波動関数のオーバーラップの視点に基づく解析から理解することができた。本成果は論文として公表した。

多体局在が空間 2 次元以上で起こるかどうかの解明は重要な問題である。この点についても研究を進め、色々なエンタングルメント指標を総合的に解析することにより、多体局在は起きない傾向にある事が数値的なエビデンスとして得られた。本件については国際的な連携研究を進めている段階である。

光誘起相転移の中間過程における量子状態の特徴把握のためにも特異値分解を活用した解析を行って成果を得た。また、励起子絶縁体の問題においては、エンタングルメントの性質を精密に取り扱える手法である密度行列くりこみ群法に基づいた数値解析を行って、様々なスピン状態を分類する相図を作成し、その電子状態を解析した。

引用文献：

- [1] H. Matsueda, Physical Review E85, 031101 (2012).
- [2] C. H. Lee, Y. Yamada, T. Kumamoto, and H. Matsueda, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 013001 (2015)
- [3] H. Matsueda and D. Ozaki, Phys. Rev. E92, 042167 (2015).
- [4] H. Matsueda, C. H. Lee, and Y. Hashizume, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 086001 (2016).
- [5] G. Vidal, Phys. Rev. Lett. 99, 220405 (2007).
- [6] G. Evenbly and S. R. White, Phys. Rev. Lett. 116, 140403 (2016).
- [7] V. Eisler and I. Peschel, J. Stat. Mech. 104001 (2018).
- [8] W. Zhu, Z. Huang, and Y.-C. He, Phys. Rev. B99, 235109 (2019).
- [9] C. Kokail, R. van Bijnen, A. Elben, B. Vermersh, and P. Zoller, Nature Phys. 17, 936 (2021).
- [10] J. Cardy and E. Tonni, J. Stat. Mech. 123103 (2016).
- [11] V. Eisler, E. Tonni, and I. Peschel, J. Stat. Mech. 073101 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroaki Matsueda, Yukiya Ide, Sadamichi Maekawa	4. 巻 38
2. 論文標題 Derivation of Interacting Two-Qubit Dynamics from Spin-Boson Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011184(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.38.011184	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 Kohei Ohgane, Yusuke Masaki, Hiroaki Matsueda	4. 巻 107
2. 論文標題 Quasiparticle dynamics in a quasiperiodic Ising model with temporally fluctuating transverse fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134201(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.134201	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 Kunio Ishida, Hiroaki Matsueda, Akira Kamada	4. 巻 237
2. 論文標題 Quantum entanglement control of electron-phonon systems by light irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Faraday Discussions	6. 最初と最後の頁 108-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2fd00007e	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 Koya Kitagawa, Hiroaki Matsueda	4. 巻 91
2. 論文標題 Excitonic Correlations, Spin-State Ordering, and Magnetic-Field Effects in One-Dimensional Two-Orbital Hubbard Model for Spin-Crossover Region	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 104705(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.104705	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 Takato Mori, Hidetaka Manabe, Hiroaki Matsueda	4. 巻 106
2. 論文標題 Entanglement distillation toward minimal bond cut surface in tensor networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 086008(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.086008	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 松枝宏明	4. 巻 57
2. 論文標題 物性物理における情報理論的視点ー特異値分解を中心にー	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 559-569
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 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 松枝宏明	4. 巻 714
2. 論文標題 量子多体系と量子情報, 量子もつれ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 51-57
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 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 Kohei Ohgane, Tatsuya Kumamoto, Hiroaki Matsueda	4. 巻 90
2. 論文標題 Quantum Singular Value Decomposition of Spin Correlation Matrix in One-Dimensional Heisenberg Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054001(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.054001	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 Kunio Ishida, Hiroaki Matsueda	4. 巻 90
2. 論文標題 Two-step Dynamics of Photoinduced Phonon Entanglement Generation between Remote Electron-Phonon Systems	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 104714(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.104714	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 Kunio Ishida, Hiroaki Matsueda	4. 巻 2207
2. 論文標題 Dynamics of photoinduced entanglement generation between remote electron-phonon systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012401(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2207/1/012041	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 松枝宏明	4. 巻 第60巻1号
2. 論文標題 エンタングルメントと普遍性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学 (サイエンス社) 特集: 普遍的概念から広がる物理の世界	6. 最初と最後の頁 39-45
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 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大金幸平, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 揺らく横磁場下の準周期イジング模型における磁壁ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東寛滋, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元Heisenberg模型の量子エネルギーテレポーテーションにおけるフィードバック操作の役割
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大瀧貴史, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 共振器内の励起子分子系における量子もつれの理論解析
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Matsueda, Kanji Itoh, Yusuke Masaki
2. 発表標題 Entanglement-Thermodynamical Study of Quantum Energy Teleportation in One-Dimensional Heisenberg Model
3. 学会等名 APS March Meeting, Minneapolis 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大瀧貴史, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 励起子分子に内在する量子もつれと光共振器内での量子もつれ光子対生成
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊東寛滋, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 量子エネルギーテレポーテーションの情報熱力学的研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中村正明, 益田奨平, 松枝宏明
2. 発表標題 偏極演算子とらせん型境界条件を用いた非エルミート表皮効果の解析
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 青柳範幸, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 局在振動モードと結合した擬スピントライアングルの光励起ダイナミクス
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 須永楓大, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 二段階特異値分解を用いた光励起ダイナミクスの計算法
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 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元2軌道Hubbard模型における励起子絶縁体の相関
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 伊東寛滋, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 4スピンHeisenberg模型における量子エネルギーテレポーテーション
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 松枝宏明, 正木祐輔, 兼平修
2. 発表標題 1次元ハイゼンベルグ模型のMERA表現のための縮約密度行列の解析
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 Hiroaki Matsueda, Yukiya Ide, Sadamichi Maekawa
2. 発表標題 Derivation of Interacting Two-Qubit Dynamics from Spin-Boson Model
3. 学会等名 International Conference on Low Temperature Physics 29 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松枝宏明, 井出恕也, 前川禎通, 正木祐輔
2. 発表標題 スピン・ボソン模型からの2量子ビットダイナミクスの導出
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松枝宏明
2. 発表標題 1次元ハイゼンベルグ模型のMERA表現と量子的くりこみフロー
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松枝宏明, 森知生, 兼平修, 正木祐輔
2. 発表標題 1次元量子スピン系におけるエンタングルメント・ハミルトニアン境界条件と相互作用変形
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 須永楓大, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 二段階特異値分解を用いた光励起ダイナミクスの計算法と特異ベクトルの解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青柳範幸, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 擬スピン・フォノン・トライアングルの光励起ダイナミクスと波動関数の挙動
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松林幸宏, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 ディラック電子系の超流動密度と量子幾何効果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊本達也, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元スピン系における量子相関行列に着目した座標変換の数理解析
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 北川皓也, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元2軌道Hubbard模型のスピンクロスオーバー領域における磁気構造と磁場効果
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 松枝宏明, 北川皓也
2. 発表標題 拡張Falicov-Kimball模型の複合励起状態
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 石田邦夫, 松枝宏明
2. 発表標題 電子・格子系に光誘起される量子もつれ状態の生成機構
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 鎌田陽, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 量子もつれ光によって励起された遠隔スピン鎖のダイナミクス
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 北川皓也, 松枝宏明
2. 発表標題 1次元2軌道Hubbard模型におけるスピクロスオーバー現象に対するエンタングルメント解析
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 大金幸平, 松枝宏明, 正木祐輔
2. 発表標題 時間依存の横磁場下の準周期Isingモデルにおける準粒子ダイナミクス
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 松林幸弘, 正木祐輔, 松枝宏明
2. 発表標題 非一様な電荷密度波系における光駆動された超伝導界面からの集団励起の放射
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 森崇人, 真鍋秀隆, 松枝宏明
2. 発表標題 Holographic entanglement distillation in tensor networks
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 鎌田陽, 松枝宏明, 石田邦夫
2. 発表標題 遠隔スピン鎖間の光誘起量子もつれダイナミクスにおける鎖長の影響
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学応用物理学専攻 松枝研究室
<http://web.tohoku.ac.jp/matsueda/>

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