

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05580

研究課題名(和文) 新奇なトポロジカル物理現象の探索とその検出法に関する理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of seeking for novel topological phenomena and methods of their detection

研究代表者

中村 正明 (Nakamura, Masaaki)

愛媛大学・理工学研究科(理学系)・准教授

研究者番号：50339107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：強相関量子系における偏極演算子の基底状態での期待値は、伝導相と絶縁相の区別だけでなく、絶縁相における系のトポロジーに関する情報も含む物理量であるが、これを特定の励起状態での期待値として拡張したとき、様々な1次元量子系において、トポロジカルな情報を増幅して抽出する役割があることを見出した。また、偏極演算子のトポロジカル相転移近傍での挙動の解析について解析し、さらに、トポロジカル状態と関連する頂点共有型の構造を持つ格子上で一般化Hubbard模型の厳密な基底状態の構成を行い、エンタングルメントエントロピーなどトポロジカルな情報に関連する量の厳密な計算を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル絶縁体の提唱(2005)とその実験的検証(2009)に触発されて、固体物理におけるトポロジカルな物理現象の探究が理論・実験の双方で盛んに行われている。また、既存の物理現象に関してもトポロジカルな観点からの再検討が広く行われ、新たな展開が起きている。特にトポロジカルな物理現象についてはその元祖とも言えるKosterlitz-Thouless転移やHaldane予想が2016年のノーベル物理学賞の受賞対象ともなり、この研究分野をさらに発展させようという機運が高まっている。そのような中でトポロジカル相とトポロジカル相転移の特定や検出法に関する基礎付けを行うことは意義深いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The expected value of the polarization operator in the ground state, in strongly correlated quantum systems is a physical quantity that includes not only the distinction between the conducting phase and the insulating phase, but also the topology of the system in the insulating states. We found that it has a role of amplifying and extracting topological information in various one-dimensional quantum systems when expanded as expected values in terms of excited states. In addition, we analyzed the behavior of the polarization operator near the topological phase transition. Furthermore, we constructed the generalized Hubbard model with the exact ground states on corner sharing lattices related to the topological state. We performed rigorous calculations of quantities related to topological information such as entanglement entropy.

研究分野：物性基礎論

キーワード：トポロジカル物質 偏極演算子 量子スピン系 強相関量子系 Hubbard模型

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体の提唱(2005)とその実験的検証(2009)に触発されて、固体物理におけるトポロジカルな物理現象の探究が理論・実験の双方で盛んに行われている。また、既存の物理現象に関してもトポロジカルな観点からの再検討が広く行われ、新たな展開が起きている。特にトポロジカルな物理現象についてはその元祖とも言える Kosterlitz- Thouless 転移や Haldane 予想が 2016 年のノーベル物理学賞の受賞対象ともなり、この研究分野をさらに発展させようという機運が高まっている。

### 2. 研究の目的

トポロジカルな物理現象に関する研究は理論、実験の双方で盛んに行われているが、従来の輸送係数の測定以外に、トポロジカル状態を特定するために効率的な実験手段にどのようなものがあるかという研究はあまりなされておらず、また数理模型の解析手段についてもより効率的なものが求められる。そこで、我々は、特に偏極演算子に注目し、トポロジカル状態を特徴づける新たな物理量に関する研究を行い、トポロジカルな物理現象の包括的な理解を進めていく。また、トポロジカル状態を基底状態に持つ厳密に扱える模型を構成することで、新奇なトポロジカル状態の可能性について検討する。

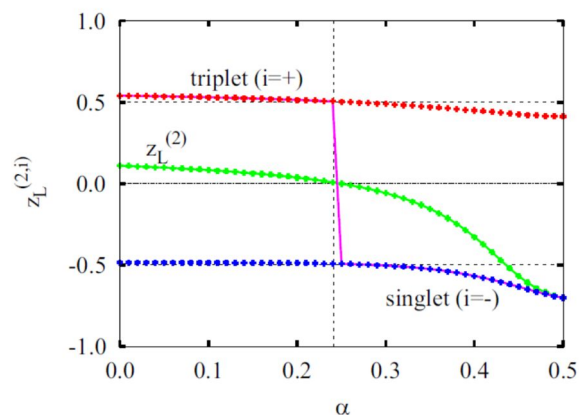
### 3. 研究の方法

特に 1 次元強相関量子系のトポロジカル状態に注目し、それらの特徴づける量として偏極演算子の性質について研究を行う。Resta により導入された偏極演算子の基底状態での期待値は、絶縁状態の判定だけでなく、偏極に関する情報も含む物理量であり、Lieb-Schultz-Mattis 定理における基底状態と変分状態との直交性を表す指標とも解釈することもできる。この偏極演算子の基底状態、あるいは励起状態に対する期待値を、厳密対角化法や変分モンテカルロ法などによる数値計算、および朝永・Luttinger 液体理論などの解析的手法により調べる。このほかに、射影演算子法を他成分系に適用する方法を用いて厳密基底状態をもつ模型を構成し、その状態におけるエンタングルメント・エントロピーや Berry 位相などのトポロジーの指標となる量を厳密に計算する。

### 4. 研究成果

○M. Nakamura<sup>1</sup> and S. C. Furuya, PHYSICAL REVIEW B 99, 075128 (2019)

Resta により導入された偏極演算子の基底状態での期待値は絶縁状態の判定だけでなく、偏極つまりトポロジーに関する情報も含む物理量であり、Lieb-Schultz-Mattis 定理の議論での基底状態と変分状態との直交性を表す指標とも解釈することもできる。また、量子スピン系においても定義することができる。本研究ではこの物理量を基底状態ではなく、励起状態での期待値として評価することを考える。ここで、用いる励起状態とは運動量を持つ状態で、レベルスペクトロスコピー法において用いられる励起エネルギーに対応している。これを J1-J2 スピン鎖、拡張 Hubbard 模型など、様々な 1 次元量子系で計算すると、Gaussian 型の転移点近傍では普遍的な値  $\pm 1/2$  をとり、不連続的に変化することがわかった(図参照)。この符号の変化と普遍的な値は系のトポロジカルな情報を増幅して抽出したものと考えられる。この性質について、自由フェルミオン描像や、朝永・Luttinger 理論に基づいて議論を展開し、そのような挙動を示す理由を説明した。

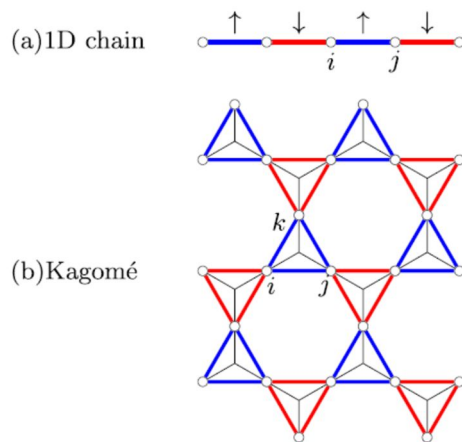


○S. C. Furuya<sup>1</sup> and M. Nakamura, PHYSICAL REVIEW B 99, 144426 (2019)

また、偏極演算子の基底状態での期待値がトポロジカル相転移を起こす際の漸近的振る舞いについて、朝永・Luttinger 理論と摂動論を組み合わせた考察を行い、そのサイズ依存性のべき指数を XXZ 模型、J1-J2 模型、Haldane-Shastry 模型など代表的な模型について解析的に計算を行

い、数値計算で得られる値と一致することを見出した。

○M. Nakamura, and S. Nishimoto, THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B 91, 203 (2018)  
さらに、1次元鎖、カゴメ格子、パイロクロア格子など、頂点共有型の構造を持つ格子上において、電子のスピンが上向きと下向きのもので構成されるプラケットが敷き詰められるような状態を厳密基底状態(図参照)として持つ一般化 Hubbard 模型を構成し、厳密対角化と密度行列繰り込み群による数値計算を行い、パラメーターが厳密基底状態の領域から外れた場合に、与えられた描象がどの範囲まで有効となるかを検証した。またエンタングルメントエントロピーなどトポロジカルな情報に関連する量の厳密な計算を行った。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masaaki Nakamura, Satoshi Nishimoto	4. 巻 91
2. 論文標題 Exact Ground States of the Extended Hubbard Model on the Kagome lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal B	6. 最初と最後の頁 203-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2018-90352-9">http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2018-90352-9</a>	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 Masaaki Nakamura and Shunsuke C. Furuya	4. 巻 99
2. 論文標題 Extraction of topological information in Tomonaga-Luttinger liquids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 075128-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.075128">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.075128</a>	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 Shunsuke C. Furuya and Masaaki Nakamura	4. 巻 99
2. 論文標題 Polarization amplitude near quantum critical points	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 144426-1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.99.144426">https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.99.144426</a>	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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masaaki Nakamura, Satoshi Nishimoto and Naoto Nakatsuji
2. 発表標題 Exact Plaquette-Ordered Ground States with Exact Corner States of the Generalized Hubbard Model in Corner Sharing Lattices
3. 学会等名 FSP2019 (FRONTIERS OF STATISTICAL PHYSICS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 正明, 西本 理, 中辻 直斗
2. 発表標題 一般化ハバード模型における厳密なプラケット秩序状態とコーナー状態
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Nakamura, Satoshi Nishimoto and Naoto Nakatsuji
2. 発表標題 Exact Plaquette-Ordered Ground States with Exact Corner States of the Generalized Hubbard Model in Corner Sharing Lattices
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 正明, 三澤 貴宏
2. 発表標題 ひねり演算子と変分波動関数を用いた電子系のトポロジカル相転移の解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 正明
2. 発表標題 朝永・Luttinger液体における偏極演算子によるトポロジカル情報の増幅と抽出
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 中村 正明
2. 発表標題 量子スピン系における偏極演算子を用いたトポロジカル情報の増幅と抽出
3. 学会等名 物性研研究会「量子情報・物性の新潮流」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 正明
2. 発表標題 量子スピン系における偏極演算子を用いたトポロジカル情報の抽出
3. 学会等名 基研研究会「スピン系物理の最前線」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 正明、古谷 峻介
2. 発表標題 偏極演算子とストリング秩序を用いたトポロジカル情報の抽出とその定式化
3. 学会等名 日本物理学会 2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤村 悠人, 大西 祐介, 三澤 貴宏, 西本 理, 中村 正明
2. 発表標題 ひねり演算子を用いたSU(N)ハバード鎖のモット転移の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西 祐介, 藤村 悠人, 三澤 貴宏, 中村 正明
2. 発表標題 Gutzwiller変分波動関数を用いた1次元電子系のトポロジカル相転移の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中辻 直斗, 藤村 悠人, 西本 理, 中村 正明
2. 発表標題 射影演算子法を用いたカゴメ格子拡張ハバード模型の厳密基底状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 正明, 西本 理
2. 発表標題 カゴメ格子拡張Hubbard模型におけるブラケット厳密基底状態とその数値的検証
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 中村 正明
2. 発表標題 1次元量子系における偏極演算子によるトポロジカル数の検出
3. 学会等名 日本物理学会 2018年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中村研究室ホームページ  
<http://nakamura-lab.phys.sci.ehime-u.ac.jp/>

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