

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17678

研究課題名（和文）空間群の対称性や電子数に基づいたトポロジカル半金属や量子スピン液体の一般的理解

研究課題名（英文）Unified understanding of topological semimetals and quantum spin liquids based on spatial symmetries and electronic filling

研究代表者

渡辺 悠樹 (Watanabe, Haruki)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：20785323

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）：本研究課題の目標は「相互作用する量子多体系の性質を空間群などの系の対称性や電子のフィリングなどの情報に基づいて、非摂動的に予言する一般論を発展させること」「その結果を物質探索に応用すること」であった。この研究目標を達成するべく研究を進め、実際に「トポロジカル絶縁体や半金属に対する対称性指標の理論構築」を始めとし、その「磁性物質や超伝導体への拡張」、「高次トポロジカル絶縁体との関連の研究」、そして「フラジャイルトポロジーをもつ新しい絶縁体の理論提案」など複数の重要な成果を発表することができた。これらの成果についてはそれぞれプレスリリースによる広報活動も行った。研究目標は十分に達成できたと考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶の持つ対称性や物質に含まれている電子数という容易に測定可能な情報に基づいて、その物質が持つトポロジカルな性質を部分的に制限する研究を行った。工学的応用が期待される各種トポロジカル物質（トポロジカル絶縁体、半金属、磁性物質、超伝導体）の物質候補探索への応用が期待できる。またこの方法論についても日本語の雑誌に解説記事を執筆したり、研究成果を積極的にプレスリリースするなどの広報活動も努めた。

研究成果の概要（英文）：The goal of this project was to develop a framework that helps us understand the topological property of materials based on their spatial symmetry and the electronic filling. We achieved this goal by developing the theory of symmetry indicators for topological insulators, semimetals, and higher-order topological insulators. We also extended the theory to magnetic materials and superconductors. Furthermore, we theoretically proposed the possibility of "fragile" topology. We also did press-release four times to advertise these achievement.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル物性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル相が盛んに研究されるようになって既に 10 年以上が経過し、それぞれの対称性ごとに可能なトポロジカル絶縁体や **Symmetry-Protected Topological** 相、トポロジカル秩序はどれくらいの種類があるのか、それらをどのように分類すればよいのか、という数学的な問題はおよそ解決されつつあった。特に、内部対称性のみならず空間群の対称性をも分類に取り入れる研究、さらにそれらのトポロジカル相を低次元の線や面の重ね合わせとして構成しようという理論研究が盛んになされていた。このような分類学が終わりに向かいつつある一方で、これと並行して、トポロジカル半金属や高次トポロジカル絶縁体などの新しいクラスのトポロジカル相の可能性も依然として発見されているという状況であった。

これらの理論の急速な発展にもかかわらず、各種のトポロジカル相を実現する候補物質を探す手法は特に確立されておらず、主に経験的・網羅的な探索に限定されていた。物質探索の指導原理となるような枠組みやアプローチが切望されていた。

2. 研究の目的

この背景を踏まえ今回の研究課題では、物質の対称性と物質内の電子数密度に基づいて、その物質のトポロジーに制限をかける理論を進展させることにより、物質探索の指針となる手法を開発することを目的とした。また当初は理論を進展させた後は実際にこの理論を用いて物質探索までを実行する計画であった。

これに関連する先行研究としては **Lieb-Schultz-Mattis** 定理という電子数密度に基づいて「基底状態の縮退」または「ギャップレス励起の存在」を预言するものがあった。トポロジカル相の研究では通常励起ギャップの存在と基底状態が対称性を破らないことを仮定するため、この **Lieb-Schultz-Mattis** 定理はトポロジカル縮退を预言することになる。当初はこの **Lieb-Schultz-Mattis** 定理を拡張することを目指していた。

3. 研究の方法

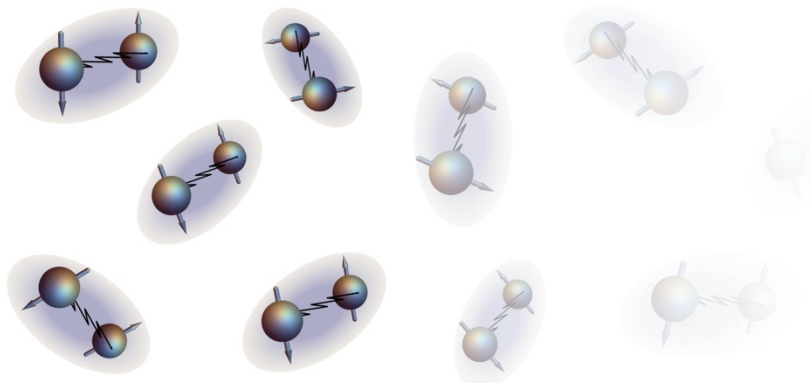
Lieb-Schultz-Mattis 定理や **Fu-Kane** 公式など、既存の関連する定理を調べ、これを拡張する理論を構築する方針で研究を進めた。

スカイプや電子メールによるやり取りのほか、海外の共同研究者と直接会って議論するために出張に赴き、逆に海外からこちらに招聘し議論した。また各国で行われてる研究会に積極的に参加し、情報交換・情報収集を行った。

4. 研究成果

今回の研究課題では様々なトピックに関して計 18 編もの論文を国際誌に発表することができた。

その中でも、トポロジカル絶縁体や半金属に対する「対称性指標」と呼ばれる方法論を提案した論文はすでに 260 回以上引用され、世界中で様々な形で応用されるに至った。私自身もこの方法論をトポロジカル磁性物質やトポロジカル超伝導体の探索へ使えるように拡張する研究も行った。さらに高次トポロジカル絶縁体との関連に関しても進展があった。



相互作用系に関しても、回転対称性の固有値を用いてチャーン数を決定する式を構築した。

また、研究を進める中で、フラジャイルトポロジという新しいクラスのトポロジカル絶縁体が存在する可能性を見出し、さらにその相互作用系への研究した。

これら一連の業績は以下のプレスリリース

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_201707031105008939464317.html

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201809181155577801703090.html

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_201809181208352594919775.html

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_202005020612173257065463.html

や、雑誌「固体物理」に5回に渡って連載した記事に詳述した。

当初の研究計画では物質探索まで行う予定ではあったが、理論の拡張だけで当初期待していなかった以上の発展があったこと、さらに上記の「対称性指標」の方法を用いて海外の複数の研究グループにより網羅的な物質探索が行われたことから、今回は研究計画を変更し理論の構築に集中したが、結果的には当初の想定以上の成果を出すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Haruki Watanabe, Masaki Oshikawa, Tohru Koma	4. 巻 178
2. 論文標題 Proof of the Absence of Long-Range Temporal Orders in Gibbs States	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-019-02471-5	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 Trifunovic Luka, Ono Seishiro, Watanabe Haruki	4. 巻 100
2. 論文標題 Geometric orbital magnetization in adiabatic processes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.054408	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 Ono Seishiro, Trifunovic Luka, Watanabe Haruki	4. 巻 100
2. 論文標題 Difficulties in operator-based formulation of the bulk quadrupole moment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.245133	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 Ono Seishiro, Yanase Youichi, Watanabe Haruki	4. 巻 1
2. 論文標題 Symmetry indicators for topological superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.1.013012	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 Kudo Koji, Watanabe Haruki, Kariyado Toshikaze, Hatsugai Yasuhiro	4. 巻 122
2. 論文標題 Many-Body Chern Number without Integration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 146601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.146601	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 Ono Seishiro, Po Hoi Chun, Watanabe Haruki	4. 巻 6
2. 論文標題 Refined symmetry indicators for topological superconductors in all space groups	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaaz8367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aaz8367	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 Watanabe Haruki, Oshikawa Masaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Inequivalent Berry Phases for the Bulk Polarization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 21065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.8.021065	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 Khalaf Eslam, Po Hoi Chun, Vishwanath Ashvin, Watanabe Haruki	4. 巻 8
2. 論文標題 Symmetry Indicators and Anomalous Surface States of Topological Crystalline Insulators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 31070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.8.031070	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 Po Hoi Chun, Watanabe Haruki, Vishwanath Ashvin	4. 巻 121
2. 論文標題 Fragile Topology and Wannier Obstructions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 126402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.126402	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 Watanabe Haruki, Po Hoi Chun, Vishwanath Ashvin	4. 巻 4
2. 論文標題 Structure and topology of band structures in the 1651 magnetic space groups	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaat8685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aat8685	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 Matsugatani Akishi, Watanabe Haruki	4. 巻 98
2. 論文標題 Connecting higher-order topological insulators to lower-dimensional topological insulators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.205129	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 Watanabe Haruki, Lu Ling	4. 巻 121
2. 論文標題 Space Group Theory of Photonic Bands	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 263903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.263903	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 Ono Seishiro, Watanabe Haruki	4. 巻 98
2. 論文標題 Unified understanding of symmetry indicators for all internal symmetry classes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.115150	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 Else Dominic V., Po Hoi Chun, Watanabe Haruki	4. 巻 99
2. 論文標題 Fragile topological phases in interacting systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.125122	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 Po Hoi Chun, Vishwanath Ashvin, Watanabe Haruki	4. 巻 8
2. 論文標題 Symmetry-based indicators of band topology in the 230 space groups	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-00133-2	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 Hoi Chun Po, Haruki Watanabe, Chao-Ming Jian, and Michael P. Zaletel	4. 巻 119
2. 論文標題 Lattice Homotopy Constraints on Phases of Quantum Magnets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 127202-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.119.127202	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 Akishi Matsugatani, Yuri Ishiguro, Ken Shiozaki, and Haruki Watanabe	4. 巻 120
2. 論文標題 Universal Relation among the Many-Body Chern Number, Rotation Symmetry, and Filling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 096601-1,5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.096601	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 Watanabe Haruki	4. 巻 97
2. 論文標題 Lieb-Schultz-Mattis-type filling constraints in the 1651 magnetic space groups	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.165117	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17件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry indicators of band topology I,II,III.
3. 学会等名 Theoretical studies of topological phases of matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry-Based Indicator and Fragile Topology with/without Interactions
3. 学会等名 Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry-Based Indicator and Fragile Topology with/without Interactions
3. 学会等名 Topological Phases and Excitations of Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry-based Indicators for higher-order topological insulators
3. 学会等名 Topological Phases with Higher-Order Boundary States (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Many-body polarization and Thouless pump via twisted boundary condition
3. 学会等名 Topological Phases of Matter: from the Quantum Hall Effect to Spin Liquids (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry-based Indicators of Topology
3. 学会等名 New Paradigms in Quantum Matter 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Watanabe
2. 発表標題 Symmetry-based Indicators of Topology
3. 学会等名 Topology and Correlation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 空間の対称性とフィリングに基づくトポロジカルに非自明な絶縁体の研究
3. 学会等名 統計物理学懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 Complete Theory of Symmetry-based Indicators of Band Topology
3. 学会等名 強相関電子系理論の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 Complete Theory of Symmetry-based Indicators of Band Topology
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 渡邊悠樹
2. 発表標題 Complete Theory of Symmetry-based Indicators of Band Topology
3. 学会等名 Topological States and Phase Transitions in Strongly Correlated Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 Complete Theory of Symmetry-based Indicators of Band Topology
3. 学会等名 SPICE workshop: Spin Dynamics in the Dirac Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 3次元トポロジカル結晶絶縁体表面の1次元エッジ状態の分類
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 空間群に基づいたスピン模型の分類と許される基底状態についての制限
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 空間群の表現に基づいた非自明なバンドトポロジーの分類
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 Symmetry-Based Indicators of Band Topology II: Applications
3. 学会等名 APS march meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊悠樹
2. 発表標題 Complete Theory of Symmetry-based Indicators of Band Topology
3. 学会等名 BEC2018 (Variety and universality of bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----