

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02922

研究課題名(和文) 対称性と相関によって生じる多様な量子秩序相の研究

研究課題名(英文) Quantum orders caused by symmetry and correlation

研究代表者

佐藤 昌利 (Sato, Masatoshi)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：30313117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：結晶対称性によって守られたトポロジカル結晶絶縁体およびトポロジカル結晶超伝導体の完全な分類を与えるために、数学の理論であるK理論を物質に応用する一般的な枠組みを構築した。また、トポロジカル超伝導体の研究を行い、高次スピンをもつ電子による新しいトポロジカル超伝導体やマヨラナ励起の特異な磁気応答を明らかにした。さらに、エルミート性を失うことで初めて可能となる対称性と、複素エネルギーによって初めて可能となるエネルギーギャップ構造に基づき、非エルミート・トポロジカル相の包括的な分類理論を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体と呼ばれる物質群を系統的に理論的に取り扱う枠組みを与えることに成功しており、これは将来の量子デバイス応用への基礎となる。また、トポロジカル超伝導体やマヨラナ励起に関する研究は、トポロジカル量子計算の量子ビットとしての応用が期待される。さらに、非エルミート・トポロジカル相の研究は、現実存在する散逸により量子秩序相を制御できる可能性を示唆しており、実際にそれを応用したデバイスも提案され始めている。

研究成果の概要(英文)：Applying the mathematics of the K-theory to materials, we have constructed a general framework of topological crystalline insulators and superconductors. We also have studied topological superconductors, discovering new topological superconductivity of higher spin electrons and revealing peculiar magnetic responses of Majorana excitations. Furthermore, we have proposed a comprehensive classification theory of non-Hermitian topological phases based on symmetry and energy gap structures intrinsic to non-Hermitian Hamiltonians.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル相 マヨラナ励起

1. 研究開始当初の背景

近年の理論的および実験的進展により、波動関数のトポロジーによって特徴づけられる物質群「トポロジカル絶縁体・超伝導体」の存在は、広く認知されるに至った。これらの物質群の特徴の一つは、対称性を変えることなしで、通常の絶縁体・超伝導体から、トポロジカル絶縁体・超伝導体へと相転移できることである。たとえば、トポロジカル絶縁体発見当初から、系の対称性を保ったまま、物質の組成を変えることで、通常の絶縁体からトポロジカル絶縁体に相転移することが知られていた。また、研究代表者の佐藤が提案した、クーパー対の対称性の变化なしで従来型超伝導体からトポロジカル超伝導体を作り出す理論は、今やトポロジカル超伝導体実現の標準手法となっている。これらの事象から、トポロジカル絶縁体・超伝導体が、秩序変数と自発的対称性の破れの概念では捉えきれない、波動関数自体の性質で特徴づけられる相(=量子秩序相)であることは、理論はもとより、実験の上でも証拠が揃いつつある。

上でのべたように、量子秩序相は対称性の变化なしで実現できるが、複雑なのは、逆に対称性を变化させると、可能な量子秩序相が変わってしまうことである。たとえば、1980年代にはすでに、系の対称性を全く仮定しない場合、波動関数のトポロジーで特徴づけられる相は、2次元量子ホール状態に限られることが知られていた。2008年、新しい量子秩序相であるトポロジカル絶縁体が発見されたのは、時間反転対称性のトポロジーに果たす重要性が認識されたからであった。また、トポロジカル超伝導体がマヨラナフェルミオンとよばれる新奇な励起状態をもつのも、超伝導体特有の対称性である電子・正孔対称性による。更に、2012年に鏡映対称性のような結晶対称性によってはじめて安定な表面ギャップレス励起をもつトポロジカル物質、いわゆる「トポロジカル結晶絶縁体」の存在が実験で確認されるに至り、多様な量子秩序相を理解するには、波動関数のトポロジーだけでなく、現実の物質が持ちうる様々な対称性も同時に考慮することが不可欠であるとの認識が広がっている。さらに問題を複雑にしているのは、バルクにギャップレスモードをもち、なおかつ波動関数のトポロジーで特徴づけられるような新しい半金属(あるいは金属)であるワイル金属やディラック金属が多数発見されたことである。このような金属は通常の金属とトポロジーが異なるバンド構造をもち、そのため低温で奇パリティ超伝導など非従来型の秩序構造が自然に現れ得る。また、それに伴い、特徴的なトポロジカル表面状態が現れることが知られている。電子相関の影響も加味して、どの物質がどの対称性にもとづいてどのような量子秩序相になるかを明らかにすることは、相構造という物性物理の基礎的問題を理解する上でも、実際の物質をつかいてトポロジカル相などの新奇量子秩序相の原理に基づいた新たなデバイスを設計する上でも、この分野における最先端の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、1)必ずしも物質の構造に依存しない波動関数のトポロジー、2)現実の物質がもつ結晶対称性、3)電子相関によって生じる超伝導などの秩序構造、という3要素の絡み合いで生じる新奇な量子秩序相を解明することである。とりわけ、トポロジカル絶縁体・ワイル金属・ディラック金属などのもつトポロジカルなバンド構造が、電子相関によって生じる量子秩序相に与える影響を明らかにする。また、対称性によって守られた量子秩序相において、不純物、有限温度、バルクギャップレスモードの果たす役割を、トポロジカル不変量を用いて解明する。

3. 研究の方法

以下の問題を中心に研究を進める。(1)トポロジカル絶縁体・ワイル半金属・ディラック半金属などバンド構造が非自明なトポロジーをもつ物質の異方的超伝導体を研究する。(2)対称性、とくに結晶対称性によって守られたトポロジカル絶縁体・超伝導体を位相幾何学の理論であるK理論に基づき系統的に研究する。(3)トポロジカル分類理論を用いながら、新奇物質のトポロジカル相の開拓とトポロジカル量子現象の解明を行う。(4)不純物、有限温度、バルクノードのある場合のトポロジカル相の理論を構築する。(5)微視的理論に基づき、相関のあるトポロジカル絶縁体・超伝導体の理論を展開する。

4. 研究成果

2017年度

結晶対称性は空間群だけでも230あり、さらには磁気構造から生じる磁気結晶対称性、あるいは異方性超伝導性を生み出す超伝導ギャップの対称性の違いも加えると考慮すべき対称性は膨大なものとなる。したがって、結晶対称性から生じる新奇な量子秩序相の系統的な研究には、まずそれらの複雑な対称性を見通しよく取り扱える理論を構築する必要がある。とりわけ、トポロジカル量子秩序相の構造の解明には、K群と結晶対称性の融合を可能とする同変K理論を物性理論の立場から整備する必要がある。そこで、まず数学理論である同変K理論を物性理論の立場

から構成し直し、結晶対称性によって守られたトポロジカル結晶絶縁体およびトポロジカル結晶超伝導体の完全な分類を与える一般的な枠組みを構築した(Phys. Rev. B 95, 235425 (2017))。その一方、研究を効果的に進めるには、具体的な現象に即した研究も行う必要がある。この目的を果たすため、異方的超伝導体におけるラインノードの安定性に関する研究を行い、付随するトポロジカル量子現象を明らかにした。まず、非共型結晶構造や磁気秩序を考慮し、結晶の対称性により保護されるラインノードを包括的に分類した。さらに、バルク・エッジ対応と有効模型を用いることで、反強磁性秩序を持つ超伝導体-UPd₂A₁₃-において新奇トポロジカル表面状態が存在することを明らかにした(Phys. Rev. B 97, 180504 (2018))。並行してアンチペロブスカイト型ディラック半金属の研究も行い、高次スピンにともなう特異な光学特性を明らかにするために、その系における磁気円二色性の計算手法を構築した。また、トポロジカル超伝導体に関するレビュー論文を執筆、発表した(Rep. Prog. Phys. 076501 (2017))。

2018 年度

時間反転対称なトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ励起の磁場応答の一般論を構築した(Phys. Rev. Lett. 123, 097002 (2019))。素粒子論で議論されるマヨラナ粒子とは異なり、超伝導体表面に現れるマヨラナ励起は結晶対称性からの制約を受けており、異方的磁場応答を実現する。我々は一般的な磁気点群を考慮し、磁気多極子の観点からマヨラナ励起の磁場応答を分類した。その結果、ギャップ関数の表現と磁気応答の表現の一致を見つけるとともに、磁気双極子応答や磁気八極子応答が出現することを明らかにした。さらには、磁気八極子応答はハーフホイスラー合金のような高スピンを持つトポロジカル超伝導体で実現されることも明らかにした。また $J=3/2$ の電子からなるトポロジカル物質を起源とする超伝導体のトポロジカルな性質を調べ、通常の電子によるトポロジカル超伝導体とは異なり、高次の巻きつき数をもつトポロジカル超伝導体となることを明らかにした(Phys. Rev. X 8, 041026 (2018))。また、実験家に協力して、鉄系超伝導体におけるトポロジカル超伝導体の理論を構築した(Nat. Phys. 15, 41 (2019))。さらには、昨年度の手法を通してアンチペロブスカイト型ディラック電子系における磁気円二色性の性質を明らかにし、光吸収係数・フォトルミネッセンスの解析を行った。また、前年度に発展させたトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の理論的枠組みを発展させ、Atiyah-Hizebruch の完全系列とよばれるホモロジーの手法を用いて系統的にトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類が可能であることを示した(Phys. Rev. B 99, 085127 (2019))。

2019 年度

昨年度に続き、時間反転なトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ励起の量子応答理論を発展させた。特に、K 理論によるトポロジカルな分類と結晶群に対する表現論を組み合わせることで、磁場応答だけでなく、電気的な応答も取扱可能な形に理論を発展させた。さらに、超伝導に関しては、実験家に協力して新しい超伝導体である CaSb₂ のトポロジカルな性質を理論的に検討し(Phys. Rev. Mat. 4, 041801 (2020))、また、鉄系超伝導体におけるトポロジカル超伝導体の理論の詳細を論文として発表した(Phys. Rev. B 100, 094520 (2019))。また、ディラック半金属におけるスピンホール効果の計算を行った (Phys. Rev. B 101, 235201 (2020))。また、同時に新しい方向の研究として、散逸などによりハミルトニアンがエルミート性を失った場合のトポロジカル相(=非エルミート・トポロジカル相)の理論を構築した。特に、エルミート性を失うことで初めて可能となる対称性と、複素エネルギーによって初めて可能となるエネルギーギャップ構造に基づき、非エルミート・トポロジカル相の包括的な分類理論を完成させた(Phys. Rev. X 9, 041015 (2019))。また、その理論を応用して、ディラック半金属にバルクフェルミアークと呼ばれるギャップレス構造と量子状態の消失を伴う例外点と呼ばれる非エルミート系特有の縮退点が生じる一般的なメカニズムを解明し、それらの分類理論を作り上げた(Phys. Rev. Lett. 123, 066405 (2019))。さらに境界条件によって系のスペクトルと状態の分布が大きく変化する非エルミート系特有の表皮効果が、トポロジーによって引き起こされることを明らかにし、また、従来知られていなかった新しい形の表皮効果を理論的に発見した(Phys. Rev. Lett. 124, 086801 (2020))。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kobayashi Shingo, Yamakage Ai, Tanaka Yukio, Sato Masatoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Majorana Multipole Response of Topological Superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097002-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.097002	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 Kawabata Kohei, Shiozaki Ken, Ueda Masahito, Sato Masatoshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Symmetry and Topology in Non-Hermitian Physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 041015-1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.9.041015	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 Kawabata Kohei, Bessho Takumi, Sato Masatoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Classification of Exceptional Points and Non-Hermitian Topological Semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 066405-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.066405	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 Okuma Nobuyuki, Sato Masatoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Topological Phase Transition Driven by Infinitesimal Instability: Majorana Fermions in Non-Hermitian Spintronics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097701-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.097701	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 Kawakami Takuto, Sato Masatoshi	4. 巻 100
2. 論文標題 Topological crystalline superconductivity in Dirac semimetal phase of iron-based superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094520-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.094520	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 Kashiwaya Satoshi, Saitoh Kohta, Kashiwaya Hiromi, Koyanagi Masao, Sato Masatoshi, Yada Keiji, Tanaka Yukio, Maeno Yoshiteru	4. 巻 100
2. 論文標題 Time-reversal invariant superconductivity of Sr ₂ RuO ₄ revealed by Josephson effects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094530-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.094530	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 Okuma Nobuyuki, Kawabata Kohei, Shiozaki Ken, Sato Masatoshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Topological Origin of Non-Hermitian Skin Effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 086801-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.086801	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 Bessho Takumi, Kawabata Kohei, Sato Masatoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Topological Classification of Non-Hermitian Gapless Phases: Exceptional Points and Bulk Fermi Arcs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 011098-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011098	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 Suzuki Shu-Ichiro, Sato Masatoshi, Tanaka Yukio	4. 巻 101
2. 論文標題 Identifying possible pairing states in Sr ₂ RuO ₄ by tunneling spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054505-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.054505	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 Taguchi Katsuhisa, Oshima Daisuke, Yamaguchi Yusuke, Hashimoto Tatsuki, Tanaka Yukio, Sato Masatoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Spin Hall conductivity in topological Dirac semimetals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235201-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.235201	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 Kawabata Kohei, Okuma Nobuyuki, Sato Masatoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Non-Bloch band theory of non-Hermitian Hamiltonians in the symplectic class	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195147-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.195147	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 Ikeda Atsutoshi, Kawaguchi Mayo, Koibuchi Shun, Hashimoto Tatsuki, Kawakami Takuto, Yonezawa Shingo, Sato Masatoshi, Maeno Yoshiteru	4. 巻 4
2. 論文標題 Superconductivity in the nonsymmorphic line-nodal compound CaSb ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 041801-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.041801	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 Ogura Masahiro, Imamura Yukihiisa, Kameyama Naruhiko, Minami Kazuhiko, Sato Masatoshi	4. 巻 102
2. 論文標題 Geometric criterion for solvability of lattice spin systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245118-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.245118	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 Kawabata Kohei, Sato Masatoshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Real spectra in non-Hermitian topological insulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033391-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033391	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 Mochizuki Ken, Bessho Takumi, Sato Masatoshi, Obuse Hideaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Topological quantum walk with discrete time-glide symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 035418-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.035418	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 Ohashi Terumichi, Kobayashi Shingo, Kawaguchi Yuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Generalized Berry phase for a bosonic Bogoliubov system with exceptional points	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013625-1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.013625	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 Satoshi Ikegaya, Shingo Kobayashi, Yasuhiro Asano	4. 巻 97
2. 論文標題 Symmetry conditions of a nodal superconductor for generating robust flat-band Andreev bound states at its dirty surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174501-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.174501	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 Shingo Kobayashi, Shuntaro Sumita, Youichi Yanase, Masatoshi Sato	4. 巻 97
2. 論文標題 Symmetry-protected line nodes and Majorana flat bands in nodal crystalline superconductors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180504-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.180504	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 Takuto Kawakami, Tetsuya Okamura, Shingo Kobayashi, Masatoshi Sato	4. 巻 8
2. 論文標題 Topological Crystalline Materials of $J=3/2$ Electrons: Antiperovskites, Dirac Points, and High Winding Topological Superconductivity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 041026-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.8.041026	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 Nobuyuki Okuma, Masatoshi Sato, Ken Shiozaki	4. 巻 99
2. 論文標題 Topological classification under nonmagnetic and magnetic point group symmetry: Application of real-space Atiyah-Hirzebruch spectral sequence to higher-order topology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085127-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.085127	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 P. Zhang, Z. Wang, X. Wu, K.Yaji, Y. Ishida, Y. Kohama, G. Dai, Y. Sun, C. Bareille, K. Kuroda, T. Kondo, K. Okazaki, K. Kindo, X. Wang, C. Jin, J. Hu, R. Thomale, K. Sumida, S. Wu, K. Miyamoto, T. Okuda, H. Ding, G. D. Gu, T. Tamegai, T. Kawakami, M. Sato, S. Shin	4. 巻 15
2. 論文標題 Multiple topological states in iron-based superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 41-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-018-0280-z	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 Tatsushi Imaeda, Yuki Kawaguchi, Yukio Tanaka, Masatoshi Sato	4. 巻 88
2. 論文標題 Axion Instability and Nonlinear Electromagnetic Effect	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 024402-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.024402	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 Igor Kuzmenko, Tetyana Kuzmenko, Yshai Avishai, Masatoshi Sato	4. 巻 98
2. 論文標題 Spin-orbit coupling and topological states in an F=3/2 cold Fermi gas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165139-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.165139	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 Ken Shiozaki, Masatoshi Sato, Kiyonori Gomi,	4. 巻 95
2. 論文標題 Topological crystalline materials: General formulation, module structure, and wallpaper groups	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235425-1-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.235425	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 Sato Masatoshi、Ando Yoichi	4. 巻 80
2. 論文標題 Topological superconductors: a review	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Reports on Progress in Physics	6. 最初と最後の頁 076501 ~ 076501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6633/aa6ac7	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

[学会発表] 計59件 (うち招待講演 45件 / うち国際学会 40件)

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (Tokyo, Japan, 2019/May/22-24) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana Multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 KIAS Workshop on topology and correlation in quantum materials (Hotel Shilla Stay at Hueundae, Pusan, Korea, 2019/May/29-31) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 International Workshop Topology (NIMS, Tsukuba, Japan, 2019/Jun/12-13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana Multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 Superstripes 2019 Quantum physics in Complex Matter: Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (Ischia, Italy, 2019/Jun/23-29) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 Topological Quantum Matter: From Low-Temperature Physics to Non-Equilibrium Dynamics (NORDITA, Stockholm, Sweden, 2019/Jul/29-2019/Aug/23) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana fermions in high-spin superconductors
3. 学会等名 The second workshop on spin-orbit coupled topological states (POSCO International Center, Pohang, 2019/Sep/19-21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana fermions in high-spin superconductors
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES2019) (Okayama Convention Center, Okayama, Japan, 2019/Sep/23-28) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Quatum responses of Majorana fermions in topological crystalline superconductors
3. 学会等名 Electron correlation in superconductors and nanostrucutres (Odessa, Ukraine, 2019/Oct/6-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 A unified view of non-Hermitian topological physics
3. 学会等名 3rd EPIQS-TMS alliance workshop on Topological Phenomena in Quantum Materials (TPQM2019) (KITP, Santa Barbara, USA, 2019/Oct/21-25) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 Fractional quantum Hall beyond Chern-Simons theory (Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai, China, 2019/Oct/26-2019/Nov/1) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 Highlights of Condensed matter physics: APW 2019& Tsinghua-RIKEN-KITS joint work shop (Tsinghua University, Beijin, China, 2019/Dec/6-8) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 Majorana Fermion and pairing symmetry
3. 学会等名 第27回渦糸物理ワークショップ (Kyoto university, Kyoto, Japan, 2019/Dec/17-19) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 Topological superconductors: theory and application
3. 学会等名 つくば-柏-本郷 超伝導かけはしプロジェクト ワークショップ (NIMS, Tsukuba, Japan, 2020/Jan/16-1/17) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuhisa Taguchi
2. 発表標題 Photovoltaic chiral magnetic effect in topological materials
3. 学会等名 Int'l Conf. on Solar Photovoltaic Technology (CSPT 2019), Dec. 6-8, 2019 in Sanya, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhisa Taguchi
2. 発表標題 Light-induced chiral magnetic effect in a Weyl semimetal
3. 学会等名 Advanced Material Congress 30, Nov. 2, 2019 in Singapore (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Taguchi, T. Kawakami, and M. Sato
2. 発表標題 Chirircularly Dichroism in Antiperovskite Dirac Semimetals
3. 学会等名 NTTI 2019 and BEC 2019, July. 14-19, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 Oxide Superspin workshop 2019 (OSS2019), Seoul Korea (June 25, 2019) ポスター発表
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 Swiss Japan bilateral workshop: Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2019), Kyoto (Oct. 8, 2019) ポスター発表 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019(TopoMat2019), Kyoto University, Kyoto (Dec. 5, 2019) ポスター発表 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口勝久, 川上拓人, 佐藤昌利
2. 発表標題 アンチペロブスカイト系ディラック半金属における磁気円二色性
3. 学会等名 2019年秋季大会、日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾, 山崎勇樹, 山影相, 佐藤昌利
2. 発表標題 結晶対称性に保護されたマヨラナ準粒子の多極子応答
3. 学会等名 第75回年次大会 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 (若手奨励賞) マヨラナフラットバンドを有するトポロジカル超伝導体の理論研究
3. 学会等名 第75回年次大会 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 ディラック半金属におけるトポロジカル超伝導
3. 学会等名 第11回トポロジー連携研究会「トポロジカル半金属」、名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー、2019年8月3日 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準粒子の多極子理論
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」2019年10月29日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口勝久, 川上拓人, 佐藤昌利
2. 発表標題 アンチペロブスカイト系ディラック半金属の光応答
3. 学会等名 2018年秋季大会, 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口勝久, 川上拓人, 佐藤昌利
2. 発表標題 Optical circular dichroism in an antiperovskite Dirac semimetal
3. 学会等名 America Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi
2. 発表標題 Topologically stable gapless phases in semimetals and superconductors
3. 学会等名 Workshop: Mathematical approach for topological physics (I) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林伸吾、山影相、田仲由喜夫、佐藤昌利
2. 発表標題 ヘリカルマヨラナ準粒子における多極子理論
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 Shingo Kobayashi, Sumita Sumita, Youichi Yanase, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 ymmetry-protected line node and Majorana flat bands in nodal crystalline superconductors
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 トポロジーに保護された超伝導ギャップノード
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会シンポジウム講演 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会シンポジウム講演 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 High Spin Topological Superconductivity
3. 学会等名 第4回TMS領域研究会(TMS2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Superconductivity in Topologicla Materials
3. 学会等名 Plasma 2019 Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 結晶対称性とトポロジー
3. 学会等名 KEK連携コロキウム・研究会エディション「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Multiple Topological Superconductivity in Iron-based Superconductors
3. 学会等名 Majorana workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 Non-Hermitian Topological Phases
3. 学会等名 物質のトポロジカル相の理論的探究 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.Sato
2. 発表標題 Quantum Response of Majorana Fermions in Topological Crystalline Superconductors
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 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials of $J=3/2$ Electrons
3. 学会等名 The Kavli-APW-Tsinghua-Riken workshop on "highlights of condensed matter physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Superconductivity in Topological Materials
3. 学会等名 Korea Physical Society Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Majorana fermions in topological crystalline superconductors
3. 学会等名 The 2nd TMS-PKU Alliance Workshop on Topological Materials and Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 トポロジカル物質入門
3. 学会等名 第46回北陸信越地区 素粒子論グループ 合宿研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Majorana fermions in topological crystalline superconductors
3. 学会等名 Erice Workshop 2018 "Majorana Fermions and Topological Materials Science" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials
3. 学会等名 International Workshop in New Paradigms in Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials
3. 学会等名 International Workshop on Symmetry and Topology in condensed-matter physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Non-Hermitian Topologicla Phases
3. 学会等名 NON-HERMITIAN PHYSICS -PHHQP XVIII (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials of $J=3/2$ Electrons: Antiperovskite, Dirac points, and High Winding Topological Superconductivity
3. 学会等名 RCQM Spring Workshop "Topological superconductors: Materials, topological order, and quenched disorder" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological crystalline materials
3. 学会等名 Workshop: Mathematical approach for topological physics (I) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi
2. 発表標題 Topological superconductivity in Dirac semimetals
3. 学会等名 TOP-SPIN3: Spin and Topological Phenomena in Nanostructures- Towards Topological Materials Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Shuntaro Sumita, Youichi Yanase, Masatoshi Sato
2. 発表標題 A hidden topological surface state in nodal superconductors coexisting with anti-ferromagnetic order
3. 学会等名 Trend in Theory of Correlated Materials (TTCM2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林伸吾、角田峻太郎、柳瀬陽一、佐藤昌利
2. 発表標題 超伝導ギャップ中のラインノードとマヨラナフラットバンドの分類
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会シンポジウム講演
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 トポロジカル結晶物質:理論的アプローチ
3. 学会等名 第73回日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Superconducting Topological Crystalline Materials
3. 学会等名 Croucher and IAS Conference on Topological Phases and Topological Quantum Computation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials and Superconductors
3. 学会等名 Oxide Superspin 2017 (OSS2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Superconducting Topological Materials
3. 学会等名 CEMS Symposium on Trends in Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤昌利
2. 発表標題 トポロジカル物質のトポロジカル超伝導
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会シンポジウム講演 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M.Sato
2. 発表標題 Nodal Topological Superconductors
3. 学会等名 International Conference on Topological Matter and Flat Bands (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Nodeless and Nodal Topological Crystalline Superconductors
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials
3. 学会等名 Superstripes 2017, International Conference in Complex Matter, Superconductivity, Magnetism and Ferroelectricity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sato
2. 発表標題 Topological Crystalline Materials
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2017 (招待講演) (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	小林 伸吾 (Kobayashi Shingo) (40779675)	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究セン ター・研究員 (82401)	

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			
イスラエル	ネゲヴ・ベン＝グリオン大学			
イスラエル	ベングリオン大学			
中国	Chinese Academy of Science			
ドイツ	ヴュルツブルク大学			
ドイツ	ケルン大学			