

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14352

研究課題名（和文）磁性体模型における新規なトポロジカル励起と量子液体相

研究課題名（英文）Novel topological excitations and quantum liquid phases in magnets

研究代表者

赤城 裕 (Akagi, Yutaka)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：20739437

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ホモトピー論と場の理論だけでは予測ができない、格子上におけるトポロジカル励起やその微視的構造を、大規模な数値計算手法の開発と適用により明らかにした。具体的には、量子スピン液晶相における非可換なトポロジカル点欠陥のコア領域の拡大や、トポロジカル点欠陥のダイナミクスに由来した動的構造因子の非自明な構造の解明などである。また、量子液体相の典型であるトポロジカル絶縁体の概念を磁性体へと拡張することで、対称性に保護されたトポロジカルマグノン系の構築と開拓も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子スピン液晶相は時間反転を破らない非自明な秩序相であるため観測が困難である。しかし本研究で明らかにしたように、トポロジカル励起によって時間反転を破る磁気双極子が誘起され、動的構造因子などにも非自明な構造が生じるため、量子スピン液晶相の観測へとつながることが期待される。また、本研究は学際的なテーマであるため、物性物理学の枠を超えた分野への波及効果を与えた。実際、素粒子分野の研究者らとの国際共同研究に発展し、古くから議論されてきたCP2スキルミオンの安定解を構成することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Developing and applying large-scale numerical methods for S=1 quantum magnets, we have clarified novel topological excitations and their microscopic structures on the lattice beyond the frameworks of homotopy and field theories. In particular, we have found the expansion of the core region of non-Abelian topological excitations in antiferroquadrupolar order (antiferromagnetic spin nematic phase). We have also found a novel intensity of correlations in momentum space in the low-energy region due to the dynamics of Z2 topological point defects (Z2 vortices) in ferroquadrupolar order (spin nematic phase). In addition, we have constructed symmetry-protected topological magnon systems categorized as quantum liquid phases by extending the concept of topological insulators to magnets.

研究分野：数理物理・物性基礎

キーワード：トポロジカル励起 ソリトン ホモトピー論 磁性体 量子液晶 ダイナミクス トポロジカル相 トポロジカル不変量

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

素粒子・物性にまたがる普遍的な概念の一つが自発的対称性の破れであり、多くの現象が対称性の破れにより理解できる。また、連続的対称性の破れた相の低温での性質は、南部-Goldstoneモードとトポロジカル励起により支配される。トポロジカル励起とは、秩序変数の空間的变化が、連続変形により一様なものに変形できない励起であり、2次元系で普遍的に現れる準長距離秩序やBerezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移において重要な役割を果たす。

Landau-Ginzburg理論では記述不可能な、対称性の破れを伴わない量子液体相が大きな注目を集めているが、これもトポロジカル励起の量子揺らぎにより理解される。その代表例が、スピンの整数の場合の反強磁性Heisenberg鎖で実現するHaldane状態であり、有限の励起ギャップを有するエキゾチックな量子状態である。

また近年では、スキルミオンと呼ばれるトポロジカル励起を基本単位としたスキルミオン結晶が実験と理論の両面から精力的に研究されている。発展が著しいスピントロニクス分野では、複合自由度を用いた集積化を図る試みがなされている。たとえば、伝導電子を介したスキルミオンの制御が高密度・低消費電力デバイスへの応用につながると期待されている。以上のようなトポロジカル励起の普遍性と重要性からこれまで数多くの研究がなされてきた。

最近、我々はスピン1のHeisenberg模型に双二次相互作用項を付加した模型である三角格子上bilinear-biquadratic (BBQ) 模型について調べ、新規トポロジカル励起(ソリトン)を見出した。この模型はNiGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>などで実現していると予想されている量子スピン液晶相(スピンネマティック相)を内在する最も基本的な模型である。我々の見出した新種ソリトンは、量子スピン液晶相が実現するSU(3)点で現れ、トポロジカル電荷が異なるソリトン同士には反発的相互作用が生じる。通常このようなソリトン同士は相互作用することは無い。この解は解析的には求まらず、数値解として見出した。ここで用いた手法は研究代表者が開発した、トポロジカル励起を格子系でシミュレーションするアニーリング法である。先に述べた現象は、我々の研究によりその存在が明らかになったものであり、通常ホモトピー論や場の理論の古典解によって記述されるトポロジカル励起と異なるものである。これは、トポロジカル励起の解明・探索がまだまだ不十分であることを意味する。

## 2. 研究の目的

本研究では、上記の新種ソリトンのように、ホモトピー論と場の理論だけでは予測ができない、格子系におけるトポロジカル励起やその微視的構造を、研究代表者が開発した数値計算法を(さらに改良して)用いることで明らかにすることを目的とする。また、トポロジカル励起に関連したHaldane状態などのような量子液体相を発見することも目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 格子系におけるトポロジカル励起のシミュレーション(アニーリング法)の改良

新種ソリトンを得ることに成功したアニーリング法を改良し、より高速な計算が可能なプログラムの開発を行う。このコード開発は新規トポロジカル励起の微視的構造をより詳細に調べ

るためのものであり、素粒子を詳細に調べるためにより大きな加速器を建設することに似ている。

高効率アップデートの具体的実装方法は、物理的描像に基づいた円錐近似アップデートを応用する。この方法は、低温領域では各スピンは温度程度のエネルギースケールで揺らぐという物理的描像に基づく状態更新法である。

#### (2) 格子系におけるトポロジカル励起の分子動力学法

トポロジカル励起は粒子のように振る舞う。そのダイナミクスを調べるためのコード開発を行う。具体的には、Heisenberg方程式を立て、それを4次のRunge-Kutta法を用いて数値的に解くことで行う(分子動力学法)。

スピン1のBBQ模型においては、 $u(3)$ 代数に基づき、量子スピン液晶相などのダイナミクスを記述するHeisenberg方程式を導いた。この整備により、磁気双極子と磁気四重極子を等価に取り扱うことが可能となり、数値的な実装が行いやすくなった。

### 4. 研究成果

#### (1) non-Abelian なトポロジカル点欠陥の微視的構造の解明

スピン1の三角格子上BBQ模型において、ホモトピー論に基づいた解析的な計算と3. 研究の方法(1)で開発・改良したアニーリング法を用いることで、どのようなトポロジカル励起が現れるかを網羅的に明らかにした。その結果、 $SU(2)$ 対称性を有する反強磁性ネマティック相(反強磁性量子スピン液晶相)で現れるnon-Abelianなトポロジカル点欠陥のうちの一つは、二つに分裂しコア領域を拡大するという非自明な構造を有することが明らかとなった。これはホモトピー論と場の理論だけでは予測ができない、格子上におけるトポロジカル励起の微視的構造であり、数値計算をして初めて分かる構造である。

#### (2) トポロジカル点欠陥のダイナミクスと創発現象

スピン1の三角格子上BBQ模型において、3. 研究の方法(2)で開発した分子動力学法を用いることで動的構造因子を計算したところ、flavor-wave理論に基づく動的構造因子と整合的な結果を得た。また、この模型における量子スピン液晶相の第1ホモトピー群は $Z_2$ であることから、有限温度で $Z_2$ ボルテックスとそれに由来した物性が現れることが期待される。実際に、モンテカルロ法を用いることでBKT転移を示唆する結果が得られた。さらに、相転移近傍の動的構造因子を調べたところ、

$Z_2$ ボルテックスとそれに誘起された磁気双極子に由来して、低エネルギー領域において、南部-Goldstoneモード以外に、対称点及びその近傍に非自明な構造が現れることが明らかとなった。これも場の理論のみからは導けず、我々の開発した手法によって初めて捉えた構造である。

#### (3) Dzyaloshinskii-守谷型相互作用によって安定化した $CP^2$ スキルミオン

スピン1のBBQ模型の特別な点では対称性が $SU(3)$ に拡大し、その連続極限は $CP^2$ 非線型シグマ模型に帰着される。この模型における2次元スキルミオン解は古くから知られているが、この解は模型のスケール不変性に起因する不安定性をもつ。

そこで、 $CP^2$ 非線型シグマ模型のスケール不変性を、Dzyaloshinskii-守谷型の相互作用項を加えることによって破り、安定な2次元スキルミオン解を解析的・数値的に構成した。この解

は、無限遠方では磁気秩序が存在しないにも関わらず、スピン空間の回転対称性が破れており、量子スピン液晶状態となっている。一方で、スキルミオンの周りには磁気双極子が現れている。また、得られた孤立スキルミオン解のエネルギーが、一様な真空解(量子スピン液晶状態)のエネルギーよりも低いパラメータ領域を見出した。これは、得られたスキルミオン(または、それらで構成されたスキルミオン格子)が系の基底状態として現れうることを示唆している。

#### (4) トポロジカルマグノン系の開拓

電子系において様々な成果をもたらしたトポロジカル絶縁体の研究は、ボゾン系にも波及している。トポロジカル絶縁体とは、物質内部はエネルギーギャップを有する絶縁体でありながら、その表面/端にはギャップレスの“金属”状態が現れる量子液体相の典型例である。ボゾン系トポロジカル相の一例として、磁性体におけるボゾンの素励起であるマグノンによる熱Hall効果が理論・実験両面から盛んに研究されている。一方、ボゾン系における時間反転対称性がKramers対の存在を保証しないことから、この系の相をトポロジカル不変量によって特徴づけるという研究はなされてこなかった。

そこで、ボゾン系においてもKramers対の存在を議論できるような擬時間反転演算子を導入し、その対称性に基づきマグノンスピンホール系の $Z_2$ トポロジカル不変量を定義した。また、2つのマグノンスピンホール系の模型を具体的に構築し、トポロジカル不変量とマグノン励起スペクトルを計算したところ、トポロジカルに保護されたヘリカルエッジ状態の有無とトポロジカル不変量が一対一に対応した結果が得られた。この模型のうちの1つは、これまでのマグノンspin Nernst系の文脈では議論されてこなかった、スピン非保存項を伴う模型である。

上記の拡張により、さらに3次元トポロジカル絶縁体に対応するマグノン系の模型を構築した。その一例は、電子系におけるFu-Kane-Mele模型の、マグノン系における自然な対応物とみなせる。我々は擬時間反転対称性に基づいて系を特徴づけるトポロジカル数を定義し、その表面状態の数の偶奇との対応関係を確認した。また、表面に磁場を印加することにより誘起される熱ホール効果についても議論した。

#### (5) 乱れのあるBosonic Bogoliubov-de Gennes (BdG)系における非可換指数

大きな成功を収めたフェルミオン自由度に起因したトポロジカル物性の研究はボゾン系にも波及している。特に最近、磁性体におけるボーズ準粒子であるマグノンに関するトポロジカル物性の研究が急激に増加している。一方、ペアリング項を持つようなBdG型のボゾン系には、その統計性に由来した非エルミート性があるため、エルミート系におけるトポロジカル相の分類/特徴付けを直接適用することは出来ない。また、トポロジカル相は乱れに強いとされているが、系に乱れがあると波数が定義できないため、相を特徴付けるトポロジカル不変量を定めることは自明ではない。

そこで、非可換幾何の手法を用いて、量子液体相であるマグノンホール系や $Z_2$ マグノントポロジカル系において、乱れがあっても適用可能なトポロジカル不変量を定義した。ここでは、ボゾン系における“フェルミ”射影演算子を導入することで上記の手法を拡張した。定義の妥当性を確かめるため、乱れのあるマグノンホール系を記述する人工的スピンアイス模型に適用したところ、clean limitでのChern数と整合的な結果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Akagi Yutaka	4. 巻 89
2. 論文標題 Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123601-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.123601	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 Hiroki Kondo, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 2020
2. 論文標題 Non-Hermiticity and topological invariants of magnon Bogoliubov-de Gennes systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 12A104-1~36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa151	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 Yutaka Akagi, Yuki Amari, Nobuyuki Sawado, Yakov Shnir	4. 巻 103
2. 論文標題 Isolated Skyrmions in the CP2 nonlinear sigma model with a Dzyaloshinskii-Moriya type interaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 065008-1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.065008	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 Hiroki Kondo, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 100
2. 論文標題 Three-dimensional topological magnon systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 144401-1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.144401	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 Yoshioka Nobuyuki, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 97
2. 論文標題 Learning disordered topological phases by statistical recovery of symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B	6. 最初と最後の頁 205110-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.205110	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 Kondo Hiroki, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 99
2. 論文標題 Z(2) topological invariant for magnon spin Hall systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW B RAPID COMMUNICATIONS	6. 最初と最後の頁 041110-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.041110	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 Yoshioka Nobuyuki, Akagi Yutaka, Katsura Hosho	4. 巻 99
2. 論文標題 Transforming generalized Ising models into Boltzmann machines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW E	6. 最初と最後の頁 032113-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.032113	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 Yutaka Akagi, Hosho Katsura, and Tohru Koma	4. 巻 86
2. 論文標題 A New Numerical Method for Z2 Topological Insulators with Strong Disorder	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 123710-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.123710	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 -

[学会発表] 計51件(うち招待講演 4件/うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Noncommutative indices for disordered topological phases
3. 学会等名 Localisation 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Invariant for Bosonic Bogoliubov-de Gennes Systems with Disorder
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kondo and Yutaka Akagi
2. 発表標題 Dirac surface states in topological crystalline magnon insulators
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Equations of motions for spin-1 magnets - a $u(3)$ formalism, suitable to investigate dynamical and thermodynamical properties
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起と創発現象
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 C01班公募研究キックオフミーティング
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analytical Derivation of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rico Pohle, Yutaka Akagi, Kimberly Remund, and Nic Shannon
2. 発表標題 Numerical Integration of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪田祥一, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 Thue-Morse格子上の電子系のZ2 Berry phaseを用いたトポロジカルな特徴付け
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 量子スピン液晶におけるトポロジカル励起とダイナミクス
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野淳, 赤城裕
2. 発表標題 三角格子遍歴磁性体における光誘起スピンスカラーカイラル状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machine
3. 学会等名 StatPhys 27 -- International Conference on Statistical Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Topological Invariants and Surface States in Magnon Systems
3. 学会等名 Progress in the Mathematics of Topological States of Matter (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Three-dimensional topological magnon systems
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Invariants for Magnon Systems with Disorder
3. 学会等名 International workshop "Variety and universality of Bulk-edge correspondence in topological phases: From solid state physics to transdisciplinary concepts" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Three-dimensional topological magnon systems
3. 学会等名 International workshop "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 2020年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Three-dimensional topological magnon systems
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 時間反転×並進対称性に保護されたマグノンディラック表面状態と電場応答
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 実空間表現によるボゾン系のZ2トポロジカル不変量
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimberly Remund, Rico Pohle, Yutaka Akagi, Judit Romha_nyi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Analytical Derivation of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rico Pohle, Kimberly Remund, Yutaka Akagi, and Nic Shannon
2. 発表標題 Numerical Integration of Equations of Motion for Spin-1 Magnets
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Akagi
2. 発表標題 Topological Invariant for Magnon Hall Systems with Disorder
3. 学会等名 International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Z2 Topological Invariant for Magnon Spin Hall Systems
3. 学会等名 International Workshop on Symmetry and Topology in Condensed-Matter Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry
3. 学会等名 Machine Learning for Quantum Many-body Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Cluster updating classical spin systems by equivalent Boltzmann machines
3. 学会等名 Machine Learning for Quantum Many-body Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称
2. 発表標題 教師無し学習による量子スピン鎖の相判定
3. 学会等名 量子情報・物性の新潮流 -量子技術が生み出す多様な物性と情報処理技術-
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量
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 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 マグノンスピンホール系におけるZ <sub>2</sub> トポロジカル不変量
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 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 フラストレート・スピン系と等価なボルツマン機械による大域的更新法
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 Yutaka Akagi, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Detection of Phase Transition in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning
3. 学会等名 Mini-workshop on “Machine Learning in Physics” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量
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 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 乱れのあるマグノンホール系におけるトポロジカル不変量
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 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称
2. 発表標題 マグノンスピンホール系におけるZ <sub>2</sub> トポロジカル不変量
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 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Z2 Topological Invariant for Magnon Spin Hall Systems
3. 学会等名 International Workshop "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

1. 発表者名 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称
2. 発表標題 教師なし学習による量子スピン鎖の相転移検出
3. 学会等名 第4回「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」領域研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 マグノン系トポロジカル相とその不変量
3. 学会等名 第8回強相関電子系理論の最前線 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuyuki Yoshioka, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Transforming Generalized Ising Model into Boltzmann Machines
3. 学会等名 At the Crossroad of Physics and Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Akagi, Nobuyuki Yoshioka, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Detection of Phase Transitions in Quantum Spin Chains via Unsupervised Machine Learning
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 Hiroki Kondo, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Z2 Topological Invariant for Magnon Spin Hall Systems
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 赤城裕, 吉岡信行, 桂法称
2. 発表標題 教師なし学習による量子スピン鎖の相転移検出
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤寛記, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 3次元Z2トポロジカルマグノン系とその表面ディラック状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Akagi, Hosho Katsura, and Tohru Koma,
2. 発表標題 Noncommutative Z2 index of 3D topological insulators with disorder
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2017 (TopoMat2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshioka Nobuyuki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Machine Learning Phases of Disordered Topological Superconductors
3. 学会等名 Machine Learning and Many-Body Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshioka Nobuyuki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Machine Learning Phases of Disordered Topological Superconductors
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2017 (NQS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshioka Nobuyuki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry
3. 学会等名 Winter School on Numerical Methods for Strongly Correlated Quantum Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshioka Nobuyuki, Yutaka Akagi, and Hosho Katsura
2. 発表標題 Machine Learning Disordered Topological Phases by Statistical Recovery of Symmetry
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 乱れたトポロジカル超伝導体の非可換指数と量子相図
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 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 機械学習による乱れたトポロジカル超伝導体の相判定
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 赤城裕, 桂法称, 高麗徹
2. 発表標題 Z2指数の新しい計算法: 乱れたトポロジカル絶縁体
3. 学会等名 第11回 物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉岡信行, 赤城裕, 桂法称
2. 発表標題 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類
3. 学会等名 第11回 物性科学領域横断研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤城裕
2. 発表標題 対称性の統計的回復による乱れたトポロジカル相の学習と分類
3. 学会等名 第7回 強相関電子系理論の最前線
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤城裕, 植田浩明, Nic Shannon
2. 発表標題 トポロジカル励起のシミュレーションのための効率的なスピントリップ
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/yutakaakagiacademician/>

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			
ロシア連邦	Joint Institute for Nuclear Research			