

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2019～2022  
課題番号：19H01824  
研究課題名（和文）原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体におけるトポロジカル量子現象  
  
研究課題名（英文）Topological quantum phenomena in atomic Bose-Einstein condensates  
  
研究代表者  
川口 由紀（Kawaguchi, Yuki）  
  
名古屋大学・工学研究科・教授  
  
研究者番号：00456261  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000円

研究成果の概要（和文）：原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を主として、カイラル磁性体や超伝導/常伝導接合系などの量子系を対象として、実空間・運動量空間における物質のトポロジカル構造、およびその駆動外場による制御に関する研究を行った。主要な成果として、ボース粒子系に固有の非エルミートハミルトニアン（ $\text{NH}$ ）の性質について調べ、複素固有値が出現する際のトポロジーや、駆動外場により複素固有値の出現を制御する方法を明らかにした。また、時間周期的なハミルトニアン（ $\text{TPH}$ ）の下での非自明なトポロジカルクラスを実現する実験方法を提案した。さらに、スピンの空間構造により作られる人工ゲージ場により渦生成が起こるダイナミクスを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
ボース対称性に由来した非エルミート系において、複素固有値を含む場合のトポロジカル数を定義したこと、および複素固有値の出現機構を明らかにしたことで、微視的に明確な起源をもつ非エルミート性の性質が明らかになった。フロケ・トポロジカル相のクラスを制御する方法を提案したことで、相変化、クラスの変化を実験的に制御しながら研究する道が開けた。スピンテクスチャにより人工ゲージ場を作ることで、新たな渦生成ダイナミクスが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We have studied the topological structure of matter in real and momentum space and its control by a driving external field, mainly for Bose-Einstein condensates of atomic gases, but also for other quantum systems such as chiral magnets and superconductor/normal conductor junction systems. As major results, we have investigated the properties of non-Hermitian Hamiltonians intrinsic to Bose particle systems, and clarified the topology of the appearance of complex eigenvalues and how the appearance of complex eigenvalues can be controlled by a driving external field. We also proposed an experimental method to realize nontrivial topological classes under the time-periodic Hamiltonian. Furthermore, we elucidated the dynamics of vortex generation by artificial gauge fields created by the spatial structure of spins.

研究分野：物性理論

キーワード：冷却原子気体 トポロジカル構造 トポロジカル相 非エルミート ボース粒子系

## 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル量子現象とは、量子状態のトポロジカル構造に由来して起こる量子現象で、状態のトポロジがかわらない限り、パラメータの詳細によらずに普遍的に現れる。特に固体電子系において、電子の波動関数が波数空間で非自明なトポロジをとる場合には、特異な表面状態が出現するとして精力的に研究されてきた。これらの分類は電子、すなわちフェルミオンを対象としたものであるが、考えるトポロジは一粒ハミルトニアンに対するものであり、量子統計性は本質的ではない。したがって、ボソン系で同様のハミルトニアンを考えることもでき、表面状態も同様に現れる。一方で、多体ボソン系では低温でボース・アインシュタイン凝縮がおり、一つの量子状態を巨視的な数のボース粒子が占有する。このような場合、凝縮体からの励起スペクトルは、ボソンの対称性により非エルミートハミルトニアンにより記述されることが知られている。非エルミートハミルトニアンは一般に固有値が複素数で、対角化できない場合も存在する。このような系に対しては、電子系で確立したトポロジカル相の分類は使えず、特にバンド構造に複素固有値や対角化不可能点(例外点)が出現する場合にどのような物理が出現するか不明であった。

一方、トポロジカル構造は実空間でも作ることができ、トポロジカルに保護された構造は実空間において安定な粒子のようにふるまう。このような例として、近年、磁性体中で生じる磁気スキルミオンや磁気モノポールが盛んに研究されている。同様の構造を内部自由度を持ったボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)でも作ることができ、様々なトポロジカル構造の生成・観測実験が行われている。しかし、このようなトポロジカル構造のダイナミクスや、トポロジカル構造からの励起については未解明の点が多い状況であった。

## 2. 研究の目的

ボース粒子系特有の新奇なトポロジを探索すること、および実空間と波数空間のトポロジをそれぞれ議論し、互いの関わりを明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

(I)波数空間トポロジとして、ボース粒子系特有のトポロジの探索、(II)実空間トポロジとして、実空間トポロジカル構造からの素励起の計算、(III)実空間×波数空間トポロジとして、周期的に配列した実空間トポロジカル構造の励起構造の調査、の3段階に分けて研究を行う予定であった。しかし、研究の途中で、時間周期的に変化する駆動場により、トポロジカル相および量子ダイナミクスが制御可能であることがわかり、(III)に変えて(IV)駆動場下(フロケ系)のトポロジカル相および励起スペクトルの計算を行った。

## 4. 研究成果

上記3.の(I),(II),(IV)に分けて順に述べる。

### (I)波数空間トポロジ

(1)波数空間のトポロジカル量子相の研究として、磁化したトポロジカル絶縁体(TI)上の超伝導接合の研究を行った。TI表面にs波超伝導体を接合すると、トポロジカル常伝導状態が実現し、超伝導体の端にカイラルエッジモードが出現する。このような状況下で2つの超伝導体を接合したときのジョセフソン電流を計算した。化学ポテンシャルを変えると、TI表面は絶縁体から金属へ、超伝導接合部はトポロジカル超伝導から通常超伝導へと変わる。ジョセフソン電流は絶縁体/金属の相転移点で急激に増大するが、その温度依存性はトポロジカル超伝導/通常超伝導の相転移点付近で急激に変化することが明らかになった。[Physical Review B 100, 104518 (2019)]

(2)非エルミート系のトポロジカル現象として、擬エルミート性と粒子正孔対称性を保つボソンのBogoliubovハミルトニアンを調べた。ハミルトニアンが対角化不可能な例外点が存在するときには、一般にトポロジカル数は定義できないが、仮想的に運動量に虚部を導入することにより例外点が回避可能であることを示した。具体的な原子気体のモデルにおいてトポロジカル数を計算し、バルクエッジ対応が成り立つことを示した。[Physical Review A 101, 013625 (2019)]

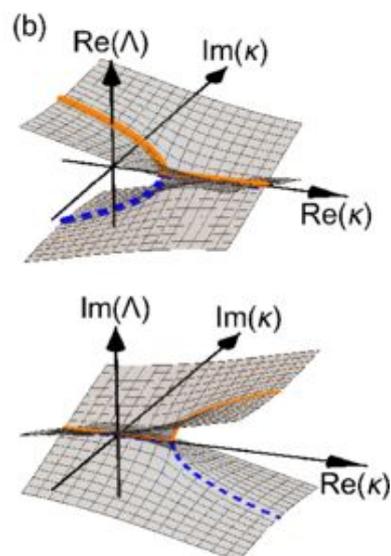


図1: 拡張した波数空間における非エルミートハミルトニアンの固有値変化 [成果(2)]

(3) BEC の南部-ゴールドストーン (NG) モードは、ゼロエネルギー極限において透過確率 1 でポテンシャル障壁を透過するという、異常トンネリング現象を示す。この現象を一般化し、動的に不安定な BEC においても NG モードは異常トンネリング現象を示すことを発見した。ただし、完全透過を示すモードは、純虚数エネルギーを持つモードであるため、虚軸に沿ってゼロエネルギー極限をとる必要がある。また、エネルギーの虚部が最大となる点で、動的に不安定なモードの完全な反射が存在することを見出した。非エルミートハミルトニアンに関する伝搬では例外点の出現に伴い完全反射が起こることがあるが、今回は、例外点由来ではなく、入射波と反射波の干渉により準粒子波動関数の振幅が強く抑制されていた。[Journal of the Physical Society of Japan **90**, 034501 (2021)]

#### (II) 実空間トポロジ

(4) 2 成分原子気体の相分離ダイナミクスにおいて、ドメインの粗視化ダイナミクスを調べた。2 成分の成分比に偏りがある場合には、ドメイン成長の初期と後期で成長則のべきが変わることを明らかにした。べきの変化は、スピン流の存在がドメインのランダムな運動に寄与するかどうか、ドメインのサイズに依存して変わることによって寄与することが分かった。[Physical Review A **101**, 023608 (2020)]

(5) スピン・軌道結合した BEC におけるストライプ相は超固体の一種である。実験的に到達可能なパラメータを利用し、スピン・軌道角運動量 (S-OAM) 結合した BEC において、大きな縞間隔と高い縞コントラストを持つ環状の縞構造が実現できることを示した。変分法的解析法を開発し、これまでの解析法にはない本質的な相互作用を一次までとらえることに成功した。この結果は、SOAMC BEC におけるストライプ相を実験的に直接観測する可能性を開くものである。[New Journal of Physics **22**, 093017 (2020)]

(6) 実空間トポロジカル構造であるスキルミオンに働く相互作用について調べた。これまで単純な 2 次元カイラル磁性体では、スキルミオン間相互作用は短距離的な斥力のみであることが知られていた。それに対し本研究では、面内磁場や結晶磁気異方性によりスキルミオンがひずむことで、スキルミオンに引力が働くことを見出した。とくに、結晶磁気異方性が強い場合には、2 つのスキルミオン間に安定なドメインを作ることにより、スキルミオンが強く束縛され、束縛エネルギーが交換相互作用と同程度となることが分かった。このような系に面内磁場を加えると引力を弱めることができ、外的な制御が可能となる。また、スキルミオン間引力に由来するスキルミオン格子が生じることもわかった。[Physical Review B **104**, 174446 (2021)]

(7) S-OAM 結合した原子気体 BEC において、渦生成のダイナミクスの研究を行った。S-OAM 結合は BEC 中にスピントクスチャを作り、原子に実効的に働く人工的なゲージ場を生み出す。特に、本研究で考えたスピントクスチャは BEC の中心付近に局在した人工磁場を作る。その結果、BEC の中心で渦・反渦が生成された後、一方のみが BEC の外部に放出されて、安定な渦状態に至るといったダイナミクスを得た。この結果は台湾の実験グループとの国際共同研究で、理論計算の結果は実験結果を定量的によく説明するものであった。[Phys. Rev. Lett. 誌に投稿中, arXiv:2403.17403]

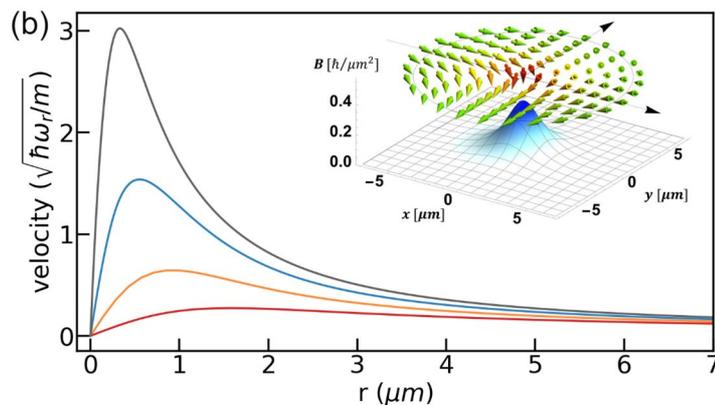


図 2: S-OAM 結合により生じるスピントクスチャ (inset) とそれにより生じる速度場 [成果(7)]

#### (IV) フロケ系

(8) 原子気体の内部状態の制御として、振動外場下における内部ジョセフソン振動について調べた。これは超伝導におけるシャピロ共鳴に対応するものであるが、実空間での粒子の流れではなく、原子の内部自由度間での流れでジョセフソン振動を起こすというものである。空間自由度も含めたスピン 1 の BEC に対して、振動外場下での応答をフロケの定理を用いて解析した結果、共鳴条件や共鳴幅、フロケ指数を解析的に求めることができた。共鳴が生じる背景には、ボース粒子系の励起スペクトルが非エルミート方程式で記述されるという事実が重要であることがわかった。得られた共鳴条件に対して、数値計算により長時間ダイナミクスを調べ、スピン波成長における非線形効果についても明らかにした。[Physical Review Research **3**, 043090 (2021)]

(9) 原子気体のキックローターモデルにより、フロケトポロジカル相の実現に向けたモデルを考案した。スピン自由度を持った原子気体にスピン依存した光格子ポテンシャルを周期的なパルスとして照射すると、一周期の時間発展が波数空間の強束縛モデルとして書ける (キックローター)。特に、一周期に 2 回光格子パルスを打ち込むと、スピンと副格子の合計 4 自由度を持つモ

デルを構築できる。この系の対称性を詳しく調べた結果、一次元でトポロジカルに非自明な構造をとるクラスがすべて、光格子のパラメータを操作するだけで得られることが分かった。[Physical Review Research 5, 043167 (2023)]

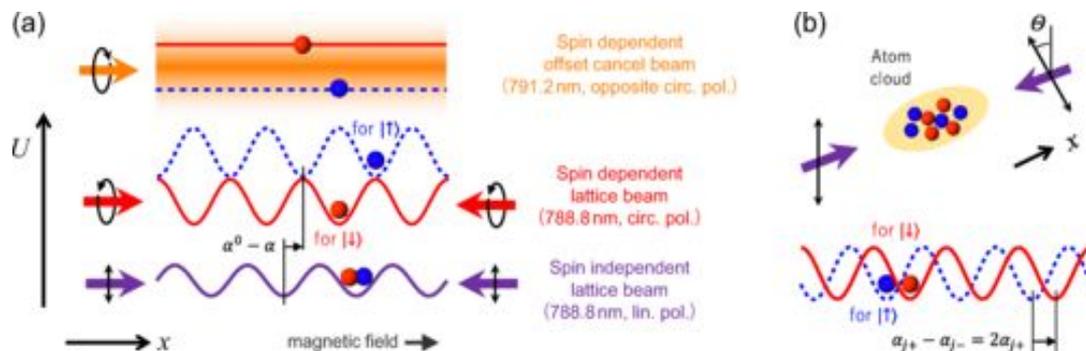


図 3 : 1 次元 Kicked rotor 模型でトポロジカルに非自明なクラスを実現させるための光格子ポテンシャルの提案 [成果(9)]

(10) 1 次元ボース・ハバードモデルにおける多体の量子状態を厳密に計算し、基底状態から流れのある励起状態への振動外場による遷移の過程を調べた。その結果、多体系でスペクトルが密であるにもかかわらず、共鳴現象はほぼ 2 準位のみ関与するラビ振動の形で得られ、精度のよい流れの制御が可能であることが分かった。これは、系の対称性から共鳴しうる状態が限定されるためである。[Phys. Rev. A 誌に投稿中, arXiv:2304.01578]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 8件）

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki                                | 4. 巻<br>129          |
| 2. 論文標題<br>Impact of Dissipation on Universal Fluctuation Dynamics in Open Quantum Systems | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>110403 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.129.110403                                 | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Maeno Koki, Kawaguchi Yuki, Asano Yasuhiro, Kobayashi Shingo               | 4. 巻<br>107         |
| 2. 論文標題<br>Nuclear spin relaxation rate of nonunitary Dirac and Weyl superconductors | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>64511 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.107.064511                              | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Koyama Yusuke, Fujimoto Kazuya, Nakajima Shuta, Kawaguchi Yuki  | 4. 巻<br>5           |
| 2. 論文標題<br>Designing nontrivial one-dimensional Floquet topological phases using a spin-1/2 double-kicked rotor | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Research  | 6. 最初と最後の頁<br>43167 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevResearch.5.043167  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Shuto Mizuno, Kazuya Fujimoto, Yuki Kawaguchi                                   | 4. 巻<br>2304       |
| 2. 論文標題<br>Controlling particle current in a many-body quantum system by external driving | 5. 発行年<br>2023年    |
| 3. 雑誌名<br>arXiv   | 6. 最初と最後の頁<br>1578 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.48550/arXiv.2304.01578                                     | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Ryoi Ohashi, Shingo Kobayashi, Shotaro Kanazawa, Yukio Tanaka, Yuki Kawaguchi                                     | 4. 巻<br>2311       |
| 2. 論文標題<br>Surface density of states and tunneling spectroscopy of a spin-3/2 superconductor with Bogoliubov Fermi Surfaces | 5. 発行年<br>2023年    |
| 3. 雑誌名<br>arXiv   | 6. 最初と最後の頁<br>3717 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.48550/arXiv.2311.03717   | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Mai Kameda, Koji Kobayashi, Yuki Kawaguchi                        | 4. 巻<br>2311        |
| 2. 論文標題<br>Interactions between atomic-scale skyrmions in 2D chiral magnets | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>arXiv   | 6. 最初と最後の頁<br>17310 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.48550/arXiv.2311.17310                       | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>L.-R. Liu, S.-C. Wu, T.-W. Liu, H.-Y. Hsu, T.-K. Shen, S.-K. Yip, Y. Kawaguchi, Y.-J. Lin | 4. 巻<br>2403        |
| 2. 論文標題<br>Vortex nucleations in spinor Bose condensates under localized synthetic magnetic fields  | 5. 発行年<br>2024年     |
| 3. 雑誌名<br>arXiv   | 6. 最初と最後の頁<br>17403 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.48550/arXiv.2403.17403   | 査読の有無<br>無          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Nagase Tomoki, So Yeong-Gi, Yasui Hayata, Ishida Takafumi, Yoshida Hiroyuki K., Tanaka Yukio, Saitoh Koh, Ikarashi Nobuyuki, Kawaguchi Yuki, Kuwahara Makoto, Nagao Masahiro | 4. 巻<br>12         |
| 2. 論文標題<br>Observation of domain wall bimerons in chiral magnets   | 5. 発行年<br>2021年    |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications  | 6. 最初と最後の頁<br>3490 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-021-23845-y   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki   | 4. 巻<br>127         |
| 2. 論文標題<br>Dynamical Scaling of Surface Roughness and Entanglement Entropy in Disordered Fermion Models | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>90601 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.127.090601  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Imaeda Yuya, Fujimoto Kazuya, Kawaguchi Yuki                                  | 4. 巻<br>3           |
| 2. 論文標題<br>Spin-wave growth via Shapiro resonances in a spinor Bose-Einstein condensate | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Research  | 6. 最初と最後の頁<br>43090 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevResearch.3.043090                            | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Kameda Mai, Koyama Rio, Nakajima Takuro, Kawaguchi Yuki  | 4. 巻<br>104          |
| 2. 論文標題<br>Controllable interskyrmion attractive interactions and resulting skyrmion-lattice structures in two-dimensional chiral magnets with in-plane anisotropy | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>174446 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.104.174446  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Fujimoto Kazuya, Hamazaki Ryusuke, Kawaguchi Yuki                             | 4. 巻<br>124          |
| 2. 論文標題<br>Family-Vicsek Scaling of Roughness Growth in a Strongly Interacting Bose Gas | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>210604 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PHYSREVLETT.124.210604                              | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Chiu N-C, Kawaguchi Y, Yip S-K, Lin Y-J   | 4. 巻<br>22                    |
| 2. 論文標題<br>Visible stripe phases in spin-orbital-angular-momentum coupled Bose-Einstein condensates | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>New Journal of Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>093017 ~ 093017 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1367-2630/ABAC3C  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ohashi Terumichi, Kawaguchi Yuki   | 4. 巻<br>90                    |
| 2. 論文標題<br>Perfect Transmission and Perfect Reflection of Bogoliubov Quasiparticles in a Dynamically Unstable Bose-Einstein Condensate | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan   | 6. 最初と最後の頁<br>034501 ~ 034501 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.90.034501   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Toki Tsubasa, Nakosai Sho, Tanaka Yukio, Kawaguchi Yuki                        | 4. 巻<br>100          |
| 2. 論文標題<br>Theory of the Josephson current on a magnetically doped topological insulator | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>104518 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.100.104518                                  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Nagase T., Komatsu M., So Y., Ishida T., Yoshida H., Kawaguchi Y., Tanaka Y., Saitoh K., Ikarashi N., Kuwahara M., Nagao M.             | 4. 巻<br>123          |
| 2. 論文標題<br>Smectic Liquid-Crystalline Structure of Skyrmions in Chiral Magnet Co <sub>8.5</sub> Zn <sub>7.5</sub> Mn <sub>4</sub> (110) Thin Film | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>137203 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.123.137203  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Ohashi Terumichi、Kobayashi Shingo、Kawaguchi Yuki                                 | 4. 巻<br>101         |
| 2. 論文標題<br>Generalized Berry phase for a bosonic Bogoliubov system with exceptional points | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review A  | 6. 最初と最後の頁<br>13625 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.101.013625                                    | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Fujimoto Kazuya、Haneda Kazunori、Kudo Kazue、Kawaguchi Yuki  | 4. 巻<br>101         |
| 2. 論文標題<br>Scale-invariant relaxation dynamics in two-component Bose-Einstein condensates with large particle-number imbalance | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review A  | 6. 最初と最後の頁<br>23608 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.101.023608  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小山湧介、藤本和也、中島秀太、川口由紀              |
| 2. 発表標題<br>量子kicked rotorを用いたフロケ・トポロジカル相の提案 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022年秋季大会                  |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>水野充人、藤本和也、川口由紀       |
| 2. 発表標題<br>振動外場を用いた量子多体系のカレント制御 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022年秋季大会      |
| 4. 発表年<br>2022年                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>米屋斗馬、藤本和也、川口由紀                |
| 2. 発表標題<br>スピン1マイクロBECでの量子相転移点近傍における多体効果 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022年秋季大会               |
| 4. 発表年<br>2022年                          |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>中河西翔、柏谷聡、川口由紀             |
| 2. 発表標題<br>磁場下でのSQUID素子中のマヨラナ状態の振る舞い |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022年秋季大会           |
| 4. 発表年<br>2022年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi  |
| 2. 発表標題<br>Quantized vortices in a Bose-Einstein condensate with internal degrees of freedom |
| 3. 学会等名<br>研究集「渦と磁場を焦点とする時空のトポロジーと幾何」(招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi                     |
| 2. 発表標題<br>Superfluids under external driving |
| 3. 学会等名<br>研究会「量子流体における数理解の解明の件」(招待講演)        |
| 4. 発表年<br>2023年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Mai Kameda, Yuki Kawaguchi   |
| 2. 発表標題<br>Attractively interacting skyrmions under magneto-crystalline anisotropy in 2D chiral magnets |
| 3. 学会等名<br>APS March Meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中村陸人、川口由紀                                  |
| 2. 発表標題<br>スピノールボース・アインシュタイン凝縮体における異モード結合によるパラメトリック共鳴 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第78回年次大会                             |
| 4. 発表年<br>2023年                                       |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>米屋斗馬、藤本和也、川口由紀         |
| 2. 発表標題<br>スピン1マイクロBECにおける散逸誘起磁性相 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第78回年次大会         |
| 4. 発表年<br>2023年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Mai Kameda, Koji Kobayashi, Yuki Kawaguchi           |
| 2. 発表標題<br>Mechanisms and Control of Inter-Skyrmion Attractions |
| 3. 学会等名<br>Intermag 2023 (国際学会)                                 |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>亀田麻衣、廣部大地、川口由紀            |
| 2. 発表標題<br>歪んだスキルミオン三角格子が誘起する異方のホール角 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2024年春季大会           |
| 4. 発表年<br>2024年                      |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>亀田麻衣、廣部大地、川口由紀         |
| 2. 発表標題<br>歪んだスキルミオン結晶における異方のホール角 |
| 3. 学会等名<br>2024年第71回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年<br>2024年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuya Imaeda, Kazuya Fujimoto, and Yuki Kawaguchi                     |
| 2. 発表標題<br>Inhomogeneous Shapiro resonance in a spinor Bose-Einstein condensate |
| 3. 学会等名<br>Laser Physics 21 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>亀田麻衣、川口由紀                            |
| 2. 発表標題<br>異方的2次元カイラル磁性体における歪んだ磁気スキルミオン間の引力相互作用 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2021年秋季大会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>亀田麻衣、川口由紀  |
| 2. 発表標題<br>Attractive inter-skyrmion couplings induced by distorted skyrmions                     |
| 3. 学会等名<br>The 5th Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>亀田麻衣、川口由紀  |
| 2. 発表標題<br>Attractive inter-skyrmion couplings induced by distorted skyrmions |
| 3. 学会等名<br>EP2DS-24/MSS-20  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|                            |
|----------------------------|
| 1. 発表者名<br>藤本和也、濱崎立資、川口由紀  |
| 2. 発表標題<br>開放量子系における界面粗さ成長 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第77回年次大会  |
| 4. 発表年<br>2022年            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi   |
| 2. 発表標題<br>Spin-wave growth via Shapiro resonances in a spinor Bose-Einstein condensate |
| 3. 学会等名<br>Ultracold Atoms Japan 2022 (招待講演) (国際学会)                                     |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi   |
| 2. 発表標題<br>Superfluids under External Driving                                     |
| 3. 学会等名<br>29th International Conference on Low Temperature Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今枝祐哉, 藤本和也, 川口由紀                  |
| 2. 発表標題<br>スピノールボース・アインシュタイン凝縮体における非一様シャピロ共鳴 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2020年秋季大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>金澤彰太郎, 小林伸吾, 田仲由喜夫, 川口由紀               |
| 2. 発表標題<br>擬スピン $3/2$ 超伝導の表面状態密度: ポゴリューボフフェルミ面の効果 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2020年秋季大会                        |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今枝祐哉, 藤本和也, 川口由紀                  |
| 2. 発表標題<br>スピノールボース・アインシュタイン凝縮体における非一様シャピロ共鳴 |
| 3. 学会等名<br>第2回冷却原子研究会 アトム会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>川口由紀                              |
| 2. 発表標題<br>内部自由度を持った原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体の理論研究 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第76回年次大会 (招待講演)             |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤本和也、濱崎立資、川口由紀                     |
| 2. 発表標題<br>乱れたポテンシャル中のフェルミ粒子系における非平衡界面揺らぎの成長則 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第76回年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大橋輝道、小林伸吾、川口由紀   |
| 2. 発表標題<br>Topological phases in 1D bosonic Bogoliubov bands with dynamical instability |
| 3. 学会等名<br>28th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'19) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi  |
| 2. 発表標題<br>Generalized Berry phase for a bosonic Bogoliubov system with exceptional points |
| 3. 学会等名<br>Mathematical approach for topological physics (II) (招待講演) (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>前納行希、小林伸吾、川口由紀   |
| 2. 発表標題<br>Anisotropic spin relaxation rate of three-dimensional chiral superconductors |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>飯田悠矢、川口由紀  |
| 2. 発表標題<br>Spin-wave spectrum of a skyrmion-string structure in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Kawaguchi and Y.-J. Lin  |
| 2. 発表標題<br>Vortex nucleation dynamics in a spin-orbital angular momentum coupled BEC |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Topological Materials Science 2019 (国際学会)     |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川口由紀   |
| 2. 発表標題<br>秩序は混沌からどのように生まれるか？                             |
| 3. 学会等名<br>第6回 名古屋大学の卓越・先端・次世代研究シンポジウム『専門性と学際性の狭間で』（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yuki Kawaguchi  |
| 2. 発表標題<br>Bose-Einstein Condensates with Spin-orbit Interactions  |
| 3. 学会等名<br>REIMEI Workshop on "Universal Features of Quantum Flows with Spin, Orbital and Tensor Correlations" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>藤本和也、濱崎立資、川口由紀                        |
| 2. 発表標題<br>強く相互作用するBose気体におけるFamily-Vicsekスケーリング |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第75回年次大会                       |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                          | 備考 |
|-----------|---|--|----|
| 研究<br>分担者 | 小林 伸吾<br>(Kobayashi Shingo)<br><br>(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<br><br>(82401) |    |
| 研究<br>分担者 | 藤本 和也<br>(Fujimoto Kazuya)<br><br>(40838059)  | 東京工業大学・理学院・助教<br><br>(12608)                   |    |

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-----------|---------------------------|-----------------------|----|
| 研究<br>協力者 | リン ユージュ<br>(Lin Yu-Ju)    |                       |    |

## 6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)   | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|-----------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | イップ サンキット<br>(Yip Sungkit)  |                       |    |
| 研究協力者 | 濱崎 立資<br>(Hamasaki Ryusuke) |                       |    |
| 研究協力者 | 亀田 麻衣<br>(Kameda Mai)       |                       |    |
| 研究協力者 | 田仲 由喜夫<br>(Tanaka Yukio)    |                       |    |
| 研究協力者 | 大橋 輝道<br>(Ohashi Terumichi) |                       |    |
| 研究協力者 | 工藤 和恵<br>(Kudo Kazue)       |                       |    |
| 研究協力者 | 中島 秀太<br>(Nakajima Shuta)   |                       |    |
| 研究協力者 | 中河西 翔<br>(Nakosai Sho)      |                       |    |

## 6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|----------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 小山 湧介<br><br>(Koyama Yusuke)     |                       |    |
| 研究協力者 | 米屋 斗馬<br><br>(Yoneya Toma)       |                       |    |
| 研究協力者 | 水野 充人<br><br>(Mizuno Shuto)      |                       |    |
| 研究協力者 | 今枝 祐哉<br><br>(Imaeda Yuya)       |                       |    |
| 研究協力者 | 金沢 彰太郎<br><br>(Kanazawa Shotaro) |                       |    |
| 研究協力者 | 前納 行希<br><br>(Maeno Koki)        |                       |    |
| 研究協力者 | 土岐 翼<br><br>(Tsubasa Toki)       |                       |    |
| 研究協力者 | 中島 拓朗<br><br>(Nakajima Takuro)   |                       |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|---------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 小山 莉央<br><br>(Koyama Rio)       |                       |    |
| 研究協力者 | 羽根田 和紀<br><br>(Haneda Kazunori) |                       |    |

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 |  |  |  |
|-------------|---------|--|--|--|
| その他の国・地域 台湾 | 中央研究院   |  |  |  |