

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18K03447
研究課題名（和文）マヨラナフェルミオン表示による量子スピン系の経路積分量子モンテカルロ法の構築

研究課題名（英文）Quantum Monte Carlo study on quantum magnets based on Majorana fermion representations

研究代表者
加藤 康之（Yasuyuki, Kato）
東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：50708534
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：量子多体系のシミュレーションに現れる難問である負符号問題を解消する試みとして、経路積分におけるレフシツシンブル法が素粒子物理学の分野で発展している。これを物性物理学の中心的話題の一つである量子スピン液体の問題に適用し、負符号問題の軽減の実際を明らかにした。さらに、種々の磁性体の理論模型に対しても、量子モンテカルロ法、厳密対角化法、平均場理論、鞍点法などから最適な方法を選定し、可能な限り近似を排した数値計算を実装した。そして、カイラルスピン液体、マグノンのエフィモフ効果、分数磁化、磁気ヘッジホッグ格子、カイラル反強磁性体の電気磁気効果といった諸問題に対する新たな知見を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の成果は量子多体問題に対する基礎的な知見を与えるものであり、磁性体を中心に非自明な物性を予測説明するものである。特に手法開発に主眼をおいており、長年の物理学の未解決問題である量子多体系のシミュレーションの負符号問題を軽減する新手法として素粒子物理学の分野で精力的に研究が進められているレフシツシンブル法を、近年の物性物理学の中心の関心事の一つであるキタエフスピン液体の問題に適用する方法を示し実装した。

研究成果の概要（英文）：We applied the Lefschetz thimble method recently developed in the field of particle physics for the negative-sign free quantum Monte Carlo simulation to the Kitaev model hosting a quantum spin liquid, which is one of the central topics of condensed matter physics. As a result, we successfully clarified the practical mitigation of the negative sign problem. Furthermore, for theoretical models of various magnetic materials, we chose an appropriate method from the quantum Monte Carlo method, the exact diagonalization, the mean field theory, the saddle point method, etc., and implemented numerical calculations. These calculations provided new insights into various focused topics such as chiral spin liquid, magnon Efimov effect, fractional corner magnetization, magnetic hedgehog lattice, and magnetoelectric effect of chiral antiferromagnets.

研究分野：物性II

キーワード：量子スピン系 量子モンテカルロ法 量子スピン液体

1. 研究開始当初の背景

量子力学的な粒子が、強く相互作用する量子多体系は興味深い物理現象の宝庫である。そうした量子多体系の問題に対して解析解を得ることは一般に難しく、数値シミュレーションによるアプローチが重要な役割を果たしている。しかし興味ある問題に対する数値シミュレーションによる求解は、しばしば負符号問題と呼ばれる問題に阻まれる。この問題は、物性物理学だけでなく物理学全体の様々な分野に広く関わる難問のひとつである。そのため素粒子物理学における格子ゲージ理論でも本質的に同じ問題が存在するが、研究開始当初、Lefschetz thimble 法および複素ランジュバン法と呼ばれる新しい手法を用いて負符号問題を回避する試みが盛んに行われていた。本研究課題では、これらの方法を物性物理学の問題に適用し改良することにより、量子多体系の一つである量子スピン系のシミュレーションに現れる負符号問題解消を目指した。長年の未解決問題である量子スピン液体の解析を念頭に、Kitaev 模型への適用を行うことにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、物理学の様々な分野に広く関わる難問のひとつである、量子多体系のシミュレーションに現れる負符号問題を回避する数値計算手法を開発することである。本研究では、本質的に同じ問題に直面している素粒子物理学における量子色力学、特に格子ゲージ理論における最近の取り組みにヒントを得て、物性物理学における興味深い量子多体系の典型例である量子スピン系に対する新しいシミュレーション技法を開発する。格子ゲージ理論の分野で発展している経路積分における新しい手法である Lefschetz thimble 法を、磁性絶縁体の理論模型である量子スピン模型に適用して、量子スピン系に対する新しい数値計算手法を開発する。さらに、その適用により、世界的な研究競争が激化している量子スピン液体の性質の解明に、新しい可能性を切り拓くことを目指す。また、解析計算が困難な量子磁性体および金属磁性体の模型に対する極力近似を排した数値解析で、諸問題の新たな知見を得ることに貢献する。

3. 研究の方法

量子スピン模型のフェルミ粒子の生成消滅演算子で表示し、フェルミ粒子系の経路積分の漸近的 Lefschetz thimble 法の実装法を提案する。そして、負符号問題が顕在化する磁場下の Kitaev 模型を例にとり、この手法を適用し、負符号問題の軽減を実際を明らかにする。また、その他の量子磁性体および金属磁性体の理論模型に対しても、これまでの研究を踏まえ、(量子)モンテカルロ法、平均場理論、摂動論に基づいた有効模型構築、厳密対角化法などの中から最適な方法を選定し、可能な限り近似を排した量子多体模型の数値計算を行う。

4. 研究成果

本研究課題の成果は、以下の6つに大別される。

(1) 漸近的 Lefschetz thimble 法は、量子多体系のシミュレーションに現れる負符号問題を軽減するために特別に考案された数値アルゴリズムである。本研究ではこの方法を任意の二体相互作用を持つ量子スピン模型に適用する枠組みを提案した[1]。ここでは量子スピンを Popov-Fedotov 変換によりフェルミ粒子にマッピングし、従来型の経路積分に基づく量子モンテカルロ法で用いられる Hubbard-Stratonovich 変換により実数の補助場を導入する。そして補助場の積分域を複素平面へと拡張することで負符号問題が軽減される。デモンストレーションとして、基底状態が非アベール統計エニオン準粒子励起を伴うカイラル量子スピン液体になると予想される磁場下 Kitaev 模型への適用例を示した。複素空間中における鞍点と Lefschetz thimble の可視化を行うと共に、負符号問題の軽減率を検証し、磁場領域によっては十分な数値精度が得られることを示した。

(2) 磁場下 Kitaev 模型に対するクラスター連続時間量子モンテカルロ法の適用により、準粒子がマヨラナフェルミ粒子からマグノンへとクロスオーバーする様子が捉えられた[2]。低磁場領域ではスピン自由度が二種類のフェルミオンの自由度に分裂しているのに対して、高磁場領域では従来型のマグノン励起が現れていることが明らかになった。ここでは基底の取り方を工夫して負符号問題の軽減を実現しており、連続時間量子モンテカルロ法の単純な適用に比べ低温・低磁場のシミュレーションが可能になった。また、磁場の方向によってはマヨラナ準粒子のトポロジカルな性質が変化する逐次トポロジカル転移が起こることを平均場理論および厳密対角化法を用いて明らかにした[3]。

種々の三次元 Kitaev 模型のマヨラナフェルミオン表示を用いたモンテカルロ法による解析も

行い、有限温度スピン液体転移の性質を明らかにした[4, 5]. 特に時間反転対称性の破れを伴うカイラルスピン液体については変分法を併用して、基底状態相図と各相におけるマヨラナ準粒子励起の詳細を調べた. その結果、複数の相で励起スペクトルにワイル点が現れ、それに伴う非自明なトポロジカル表面状態を見出すことに成功した[4].

Kitaev スピン液体の候補物質の探索も行なっており、 α - $\text{RuH}_{3/2}\text{X}_{3/2}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}$) [6], A_2PrO_3 (A : アルカリ金属) [7, 8]において、強い反強磁性 Kitaev 型相互作用が予想されることを、第一原理計算に基づく有効模型構築によって明らかにしている. また、候補物質探索に関する総説論文[9]も出版している. さらに将来の量子計算への応用を見据えた試みとして、 α - RuCl_3 の第一原理計算を用いて、局所的な原子の変位がマヨラナフェルミオンに及ぼす影響を調べた. その結果、原子の変位によって活性化される反対称相互作用 (Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用) が有効的に Kitaev 相互作用に変調をもたらすことがわかり、相互作用の変調による Z_2 フラックスの誘起が可能であることを明らかにした[10].

(3) エフィモフ束縛状態は、粒子間に働く引力による散乱長が発散的に大きくなる領域で、量子力学的機構によって普遍的に現れる三体の束縛状態である. この束縛状態は、これまで原子物理学の分野でのみ観測に成功している. 量子磁性体においても準粒子マグノンの束縛状態の形成を予言していたが、観測に至っていない. その主な要因は、磁性体では準粒子間の相互作用を広範囲で調節する方法が欠如しているためと考えられる. そこで、強いスピン軌道結合を有する量子磁性体に注目し、マグノン間の散乱長の外部磁場の方向や強さの依存性を調べることにした. その結果、マグノン間の散乱長を広範囲で制御可能であることを示すことに成功した[11]. 具体的には量子スピン液体の候補物質として注目を集めているパイロクロア酸化物 $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ の有効模型を用いて、摂動論と散乱理論に基づいた数値解析を実装し、実験で実現可能な磁場 (13T 程度) でユニタリティ極限が実現することを予想する結果を得た. さらにユニタリティ極限近傍における二体の束縛状態および普遍的に現れる三体のエフィモフ束縛状態の束縛エネルギーの磁場依存性を明らかにした.

(4) 正方格子および立方格子上の反強磁性量子ハイゼンベルク模型の量子モンテカルロシミュレーションを実装し、系の角に現れる分数磁化の数値的評価を行なった[12]. 特に相互作用の異方性に対する分数磁化の堅牢性について定量的な評価を与えることに成功し、分数磁化は広いパラメータ領域で理想値に近い値を示すことを明らかにした.

(5) 金属磁性体で観測されている磁気スカーミオン格子や磁気ヘッジホッグ格子といった複雑な磁気構造の異方的相互作用の効果の解明[13]や系統的な理解[14]を目指した研究にも取り組んでいる. 金属磁性体における伝導電子を介した長距離スピン間相互作用が支配的な有効スピン模型が提案され、解析が進められている. 我々はこのクラスの有効スピン模型の熱力学極限が、鞍点法を用いて厳密に解析可能であることを明らかにした[15]. また、熱励起による異常ホール伝導度の増大[16], 線形スピン波理論によるスピン励起[17], 非線形光学応答の解析[18]についても報告している.

(6) 実験研究グループと共同で、電気磁気効果を示すカイラル反強磁性正四角台塔系 $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_4(\text{PO}_4)_4$ の研究を行なった. 磁化曲線および電気分極の磁場依存性をよく再現する有効量子スピン模型に対して、クラスター平均場理論を用いた解析を行い、磁場誘起相における非相反方向二色性と磁気秩序パラメータの関係[19]および、カイラリティ誘起の拡張多極子に対応する非線形電気磁気応答[20]の微視的機構を明らかにした.

<引用文献>

- [1] P.A. Mishchenko, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. D **104**, 074517 (2021).
- [2] J. Yoshitake, J. Nasu, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **101**, 100408(R) (2020).
- [3] J. Nasu, Y. Kato, Y. Kamiya, and Y. Motome, Phys. Rev. B **98**, 060416(R) (2018).
- [4] P.A. Mishchenko, Y. Kato, K. O'Brien, T.A. Bojesen, T. Eschmann, M. Hermanns, S. Trebst, and Y. Motome, Phys. Rev. B **101**, 045118 (2020).
- [5] T. Eschmann, P.A. Mishchenko, K. O'Brien, T.A. Bojesen, Y. Kato, M. Hermanns, Y. Motome, and S. Trebst, Phys. Rev. B **102**, 075125 (2020).
- [6] Y. Sugita, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **101**, 100410(R) (2020).
- [7] S.-H. Jang, R. Sano, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **99**, 241106(R) (2019).
- [8] S.-H. Jang, R. Sano, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. Materials **4**, 104420 (2020).
- [9] Y. Motome, R. Sano, S.-H. Jang, Y. Sugita, and Y. Kato, J. Phys.: Condens. Matter **32**, 404001 (2020).
- [10] S.-H. Jang, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **104**, 085142 (2021).
- [11] Y. Kato, S.-S. Zhang, Y. Nishida, and C.D. Batista, Phys. Rev. Research **2**, 033024 (2020).
- [12] H. Watanabe, Y. Kato, H. C. Po, and Y. Motome, Phys. Rev. B **103**, 134430 (2021).
- [13] K. Shimizu, S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **103**, 054427 (2021).
- [14] K. Shimizu, S. Okumura, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **103**, 184421 (2021).
- [15] Y. Kato and Y. Motome, Phys. Rev. B **105**, 174413 (2022).
- [16] Y. Kato and H. Ishizuka, Phys. Rev. Applied **12**, 021001 (2019).
- [17] Y. Kato, S. Hayami, and Y. Motome, Phys. Rev. B **104**, 224405 (2021).
- [18] S. Okumura, T. Morimoto, Y. Kato, and Y. Motome, Phys. Rev. B **104**, L180407 (2021).
- [19] T. Katsuyoshi, K. Kimura, Z. Yang, Y. Kato, S. Kimura, Y. Motome, Y. Kohama, and T. Kimura, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 123701 (2021).
- [20] K. Kimura, Y. Kato, S. Kimura, Y. Motome, and T. Kimura, npj Quantum Mater. **6**, 54 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Watanabe Haruki, Kato Yasuyuki, Po Hoi Chun, Motome Yukitoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Fractional corner magnetization of collinear antiferromagnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.134430	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 Shimizu Kotaro, Okumura Shun, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Spin moire engineering of topological magnetism and emergent electromagnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184421	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 Kimura Kenta, Kato Yasuyuki, Kimura Shojiro, Motome Yukitoshi, Kimura Tsuyoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Crystal-chirality-dependent control of magnetic domains in a time-reversal-broken antiferromagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-021-00355-0	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 Jang Seong-Hoon, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Vortex creation and control in the Kitaev spin liquid by local bond modulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.085142	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 Mishchenko Petr A., Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Quantum Monte-Carlo method on asymptotic Lefschetz thimbles for quantum spin systems: An application to the Kitaev model in a magnetic field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.074517	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 Katsuyoshi Tsukasa, Kimura Kenta, Yang Zhuo, Kato Yasuyuki, Kimura Shojiro, Motome Yukitoshi, Kohama Yoshimitsu, Kimura Tsuyoshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Nonreciprocal Directional Dichroism in a Magnetic-Field-Induced Ferroelectric Phase of $\text{Pb}(\text{TiO})\text{Cu}_{4-x}\text{P}_{x-4}$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.123701	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 Okumura Shun, Morimoto Takahiro, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Quadratic optical responses in a chiral magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L180407	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 Kato Yasuyuki, Hayami Satoru, Motome Yukitoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Spin excitation spectra in helimagnetic states: Proper-screw, cycloid, vortex-crystal, and hedgehog lattices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.224405	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 Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 105
2. 論文標題 Magnetic field-temperature phase diagrams for multiple-Q magnetic ordering: Exact steepest descent approach to long-range interacting spin systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.174413	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 Shimizu Kotaro, Okumura Shun, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Phase transitions between helices, vortices, and hedgehogs driven by spatial anisotropy in chiral magnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 54427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.054427	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 Jang Seong-Hoon, Sano Ryoya, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Computational design of f-electron Kitaev magnets: Honeycomb and hyperhoneycomb compounds A ₂ PrO ₃ (A= alkali metals)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.104420	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 Eschmann Tim, Mishchenko Petr A., O'Brien Kevin, Bojesen Troels A., Kato Yasuyuki, Hermanns Maria, Motome Yukitoshi, Trebst Simon	4. 巻 102
2. 論文標題 Thermodynamic classification of three-dimensional Kitaev spin liquids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.075125	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 Kato Yasuyuki, Zhang Shang-Shun, Nishida Yusuke, Batista C. D.	4. 巻 2
2. 論文標題 Magnetic field induced tunability of spin Hamiltonians: Resonances and Efimov states in Yb ₂ Ti ₂ O ₇	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033024	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 Motome Yukitoshi, Sano Ryoya, Jang Seonghoon, Sugita Yusuke, Kato Yasuyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Materials design of Kitaev spin liquids beyond the Jackeli-Khalilullin mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 404001 ~ 404001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab8525	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 Sugita Yusuke, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Antiferromagnetic Kitaev interactions in polar spin-orbit Mott insulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 100410(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.100410	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 Yoshitake Junki, Nasu Joji, Kato Yasuyuki, Motome Yukitoshi	4. 巻 101
2. 論文標題 Majorana-magnon crossover by a magnetic field in the Kitaev model: Continuous-time quantum Monte Carlo study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 100408(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.100408	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 Mishchenko Petr A., Kato Yasuyuki, O'Brien Kevin, Bojesen Troels A., Eschmann Tim, Hermanns Maria, Trebst Simon, Motome Yukihiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Chiral spin liquids with crystalline Z2 gauge order in a three-dimensional Kitaev model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.045118	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 Kato Yasuyuki, Ishizuka Hiroaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Colossal Enhancement of Spin-Chirality-Related Hall Effect by Thermal Fluctuation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 21001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.021001	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 Jang Seong-Hoon, Sano Ryoya, Kato Yasuyuki, Motome Yukihiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Antiferromagnetic Kitaev interaction in f-electron based honeycomb magnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 241106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.241106	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 Nasu Joji, Kato Yasuyuki, Kamiya Yoshitomo, Motome Yukihiro	4. 巻 98
2. 論文標題 Successive Majorana topological transitions driven by a magnetic field in the Kitaev model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060416(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.060416	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19件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 加藤 康之
2. 発表標題 トポロジカル多重 Q 磁気秩序の温度磁場相図とスピン波励起
3. 学会等名 第 17 回量子スピン系研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 温度や磁場で誘起される多重 Q 磁気秩序と逐次転移の理論解析
3. 学会等名 日本物理学会「第 77 回年次大会 (2022 年)」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 康之, 求 幸年
2. 発表標題 多重 Q 磁気秩序の有効模型解析: 温度磁場相図
3. 学会等名 日本物理学会「2021 年秋季大会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 康之, 速水 賢, 求 幸年
2. 発表標題 多重 Q 磁気秩序相のスピン波励起
3. 学会等名 日本物理学会「第 76 回年次大会 (2021 年)」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato and Y. Motome
2. 発表標題 Magnetic field-temperature phase diagrams for multiple-Q magnetic orderings
3. 学会等名 令和 3 年度 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 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato, S. Hayami, and Y. Motome
2. 発表標題 Spin excitation spectra in multiple-Q magnetic orderings
3. 学会等名 令和 3 年度 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 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato
2. 発表標題 Spin Excitation Spectra in Helimagnetic States: Proper-screw, Cycloid, Vortex Crystal, and Hedgehog Lattice
3. 学会等名 Institute Seminars, Winter Semester 2021-2022
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤康之, Shang-Shun Zhang, 西田 祐介, C.D. Batista
2. 発表標題 マグノン・マグノン散乱の外部磁場制御: Yb ₂ Ti ₂ O ₇ におけるユニタリティ極限とエフィモフ効果の実現
3. 学会等名 日本物理学会「秋季大会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤 康之, 速水 賢, 求 幸年
2. 発表標題 多重 Q 磁気秩序相のスピン波励起
3. 学会等名 日本物理学会「第 76 回 年次大会 (2021 年)」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato
2. 発表標題 Magnetic-field-induced tunability of magnon bound states: Scattering resonances and Efimov states in Yb ₂ Ti ₂ O ₇
3. 学会等名 International Workshop on Quantum Magnets in Extreme Conditions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato
2. 発表標題 Three-dimensional chiral spin liquids in hypernonagon Kitaev model
3. 学会等名 The 3rd Asia-Pacific workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之
2. 発表標題 反強磁性正四角台塔系(A(TiO)Cu ₄ (PO ₄) ₄ , A = Ba, Sr, Pb)の磁化曲線と電気磁気効果
3. 学会等名 WIAS Top Runners' Lecture Collection : 「物質の構造と対称性がもたらす電磁交差応答の最前線: マルチフェロイクスとスピントロニクス」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之
2. 発表標題 ハイパーノゴン格子キタエフ模型の3次元カイラルスピン液体
3. 学会等名 第14回 量子スピン系研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之, 求幸年
2. 発表標題 反強磁性正四角台塔系A(TiO)Cu ₄ (PO ₄) ₄ スピン励起の理論解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之, 木村健太, 三宅厚志, 徳永将史, 松尾晶, 金道浩一, 赤木暢, 萩原政幸, 木村尚次郎, 木村剛, 求幸年
2. 発表標題 反強磁性正四角台塔系A(TiO)Cu ₄ (PO ₄) ₄ , A = Srの磁化曲線と電気磁気効果: A = Ba, Pbとの比較
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuyuki Kato and Yukitoshi Motome
2. 発表標題 Magnetoelectric properties in antiferromagnets composed of square cupolas A(TiO)Cu ₄ (PO ₄) ₄ (A=Ba, Sr, Pb)
3. 学会等名 APS March Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之
2. 発表標題 第八回「強相関電子系理論の最前線」
3. 学会等名 熱ゆらぎによる異常ホール効果の増大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤康之
2. 発表標題 反強磁性正四角台塔系の磁化過程と電気磁気応答
3. 学会等名 基研研究会「スピン系物理研究の最前線」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤康之, 石塚大晃
2. 発表標題 熱ゆらぎによる異常ホール効果の増大: モンテカルロ法を用いた数値的研究
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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