

令和 4 年 4 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05490

研究課題名(和文)トポロジーと結晶群に基づく新奇量子相の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study on novel quantum phases based on topology and crystal groups

研究代表者

江澤 雅彦 (Ezawa, Motohiko)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：10504805

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)：トポロジカル物性物理学の最新の課題に関して先駆的な理論研究の成果を発表してきた。特にトポロジカル絶縁体を拡張した高次トポロジカル絶縁体のモデルとしてブリージング・カゴメ格子モデルを提案した。また、電気回路における非エルミート・トポロジカル系の実現やマヨラナ状態のシミュレートに関しても様々な提案を行った。その発展として戸田格子などの非線形格子モデルを拡張する事で様々な非線形トポロジカル系を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル物性物理学はトポロジという数学的概念が物理学に応用されて誕生した。トポロジカル安定性によって、系の乱雑さや不純物に対してロバストであるなどの性質がある。これを応用したトポロジカル工学を提唱した。例えば、電気回路にトポロジカル物性物理学の概念を導入する事より、トポロジカルに安定な電気回路を作成する事が可能になる。また、電気抵抗などの散逸は実際のデバイスに存在するが、その影響を非エルミート項として取り扱い、非エルミート・トポロジカル現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Several pioneering works were reported relating to the frontier of topological condensed-matter physics. Especially, the breathing-Kagome model was proposed as an example of higher-order topological insulators, which are generalization of topological insulators. In addition, non-Hermitian topological systems and simulations of Majorana states based on electric circuits were also proposed. As an extension of these results, various nonlinear topological systems were proposed by generalizing nonlinear lattice models such as the Toda lattice model.

研究分野：トポロジカル物性物理学

キーワード：トポロジカル物性物理学 高次トポロジカル絶縁体 非エルミート・トポロジカル絶縁体 非線形トポロジカル系 トポロジカル工学 非線形トポロジカル光学 トポロジカル戸田格子 トポロジカル電気回路

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

トポロジカル物性物理学は量子ホール効果やソリトンとしての渦などから出発したが、21世紀に入り、トポロジカル絶縁体として新たな発展があった。そこではトポロジーや結晶群などの数学的概念が有効である事が認識され始めており、それらを用いて更なるトポロジカル物性物理学の発展が期待されていた。また、実験手法の発展により、トポロジカル相特有のエッジ状態の観測が可能になってきていた。

## 2. 研究の目的

結晶構造などに着目してトポロジカル物性物理学を拡張し、更なるフロンティアを開拓する。

## 3. 研究の方法

解析的な手法と数値的な手法を併用する事で物理現象を明らかにする。特にトポロジカル数に関してはトポロジーなどの解析な手法を用い、エッジ状態などに関しては数値厳密対角化を用いて数値計算をする。Skyrmionの非平衡ダイナミクスはOOMMFやmumaxなどのマイクロ・マグネティック系の専用シミュレータを用いて解析する。また、Pontryagin 数を差分化する事で、数値積分し評価し、Skyrmionの量子化を証明する。

## 4. 研究成果

### ノード・トポロジカル半金属の理論的研究

様々な新奇なトポロジカル物質に対してトポロジーと対称性の観点からその量子物性を明らかにした。特にワイル半金属、ライン・ノード半金属、高次トポロジカル絶縁体などの近年発見されたトポロジカル相に対してそのトポロジカルな性質、バンド構造やエッジ状態を対称性の議論と強束縛近似模型を用いて明らかにした。まず、任意のホップ数を持つ絡み合ったライン・ノードを持つ半金属を一般的に構成した。更に、交差したライン・ノードを持つ半金属に光照射した場合をフロッケ理論を用いて解析し、1より大きい運動量空間での単極子を持つワイル半金属を生成できる事を示した。また、二次や三次の分散を持つディラック半金属で磁場の向きを制御する事で、運動量空間での単極子の合成、分離を実現できる事を示した。遷移金属ダイカルコゲナイドで二次トポロジカル絶縁体とループ・ノード半金属が実現することを示した。

### 高次トポロジカル相の理論的研究

breathing カゴメ格子と breathing パイロクロア格子で二次トポロジカル絶縁体と三次トポロジカル絶縁体を実現する事を示し、トポロジカル・コーナー状態が現れる事を明らかにした。また、ハニカム格子とダイヤモンド格子もホッピングに異方性を導入する事により、コーナー状態が出現し、二次トポロジカル絶縁体と三次トポロジカル絶縁体を実現する事を示した。特に燐の原子層物質であるフォスフォレンで二次トポロジカル絶縁体相が実現する事を予言した。また、磁場を用いた高次トポロジカル相の生成と制御を議論し、トポロジカル・スイッチという概念を提唱した。

通常トポロジカル絶縁体はバルクのギャップが閉じる事によって、トポロジカル相転移を起こす。それに対してバルクが開いたままエッジのギャップが閉じる事によるトポロジカル相転移(境界障害トポロジカル絶縁体)を明らかにした。また、あるハミルトニアンで二乗がトポロジカル絶縁体になる平方根トポロジカル絶縁体をグラフ理論に基づき一般的に構成する方法を提案した。

### トポロジカル電気回路

様々な新奇なトポロジカル現象を電気回路により実現できることを示した。先ず、LC 電気回路を用いて高次トポロジカル絶縁体を実現できることを示した。コーナー状態はインピーダンス共鳴を用いて実験的に検出できる。この結果、従来は固体物質中で研究されていた様々なトポロジカル相が、電気回路を用いて簡便に研究できることを示している。特に、可変コンデンサーを

用いることで系のパラメータを詳細に制御する事が可能であり、トポロジカル相転移の研究に最適であることを指摘した。更に、breathing カゴメ格子状にコンデンサーを配置し、各ノードをコイルで接地することで、二次トポロジカル絶縁体を実現できることを示した。また、高次トポロジカル絶縁体に関連する研究として、二次トポロジカル絶縁体とトポロジカル結晶絶縁体が、磁場の向きを変えるだけで切り替えられることを示した。具体的には非エルミート・チャーン絶縁体、四次元以上の偶数次元における非エルミート・高次チャーン絶縁体、非エルミート高次トポロジカル相、非エルミート・マヨラナ状態、非相反・非エルミート状態、非エルミート量子ウォークが電気回路で実現できる事を示した。これらはインピーダンス共鳴を用いる事で観測が可能である。これらを結晶群の対称性などによって規定される対称性指標などでトポロジカル相を特徴づけ、そのバルク境界対応を明らかにした。電気機械結合系 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)でトポロジカル系を作成できる事を世界で初めて示した。特に静電アクチュエータを並列に並べた系で自由振動系と強制振動系で異なるトポロジカル相を実現する事を示した。

#### 電気回路を用いた量子計算のシミュレーション

電気回路で高次トポロジカル超伝導体をシミュレートすることで、マヨラナ状態のブレイディングを電気回路で実現できる事を示した。更に電信方程式がシュレーディンガー方程式をシミュレートできる事を示した。これらの結果は電気回路が豊かなトポロジカル物性を持っているだけでなく、量子力学のシミュレートによる量子計算への道を開くものである。

高周波電気回路や LC 振動子を用いて位相シフトゲート、Hadamard ゲート、CNOT ゲートを作成する事によりユニバーサル量子計算をシミュレートできる事を示した。また、白黒画像とカラー画像を波動関数で表現し、類似度を内積によって判定する量子画像認識を提案した。識更に実ベクトルに対して定義される Euler 数で特徴づけられるトポロジカル Euler 絶縁体を提案した。

#### 非線形トポロジカル相

トポロジカル現象は近年盛んに研究されているが、線形系において議論されているだけで、非線形系でのトポロジカル現象は未解明である。平成 2021 年度の成果として、様々な非線形におけるトポロジカル現象を明らかにした。非線形系の特徴的な現象はソリトン解の存在であり、トポロジカル現象との相互作用の探求は興味深い。ソリトン解を持つ典型的な非線形格子模型は戸田格子模型である。しかし、この系はトポロジカルに自明である。先ず、この模型を拡張して二量体化戸田格子模型を提唱した。この模型には自明な相とトポロジカル相が存在する。具体的な実現方法は、バリアブル・キャパシタンス・ダイオードとコイルを連結した伝送線からなる電気回路を用いる事である。伝送線の端点のみに電圧を与えた後の電圧伝搬の時間発展を追う事により、トポロジカル相とトリビアル相で顕著な違いが存在する事を発見した。次いで、戸田格子にランダムネスを導入する事により、非線形アンダーソン局在の議論をした。機械振動子系においても、二量体化サインゴードン模型を提唱し、同様の非線形トポロジカル相を実現できる事を示した。更に、これらの知見を非線形トポロジカル光学応用した。特に、非線形非エルミート・トポロジカル・レーザーの理論を発展させ、非線形 Su-Schrieffer-Heeger 模型や非線形ブリージング・カゴメ模型におけるレーザー現象を明らかにした。また、格子非線形シュレディンガー方程式が非線形トポロジカル光学において実現する事に着目し、非線形トポロジカル相をクエンチ・ダイナミクスで解析した。更に、非相反ホッピングを持つ典型的な模型である羽田野ネルソン模型に非線形シュレディンガー方程式の非線形項を導入する事で非エルミート・スキン効果と非線形シュレディンガー方程式特有のトラップ効果が同時に実現するトラップ・スキン状態を発見し、非線形トポロジカル相図を明らかにした。

#### Skyrmion のダイナミクス

磁気スキルミオンに関する解析も行った。フラストレート磁性体中でのスカームイオンのダイナミクスを大規模シミュレーションによって明らかにし、磁気メモリとして応用できる事を示した。反強磁性スキルミオンの電場勾配による駆動やスピン・トルクによるナノ振動子の研究を行った。また、反強磁性結合した磁気二重層におけるスキルミオンを電場勾配で駆動する方法や、フラストレート磁性体の二重層におけるスキルミオンのダイナミクスを、数値シミュレーションにより明らかにした。更に、実験による検証も行った。これらの成果

は国際共同研究により得られたものである。反強磁性対中のスカーミオンやバイメロンのダイナミクスについてもシミュレーションを行った。特に、反強磁性体中のバイメロンがカオスダイナミクスを示すことを示した。更にスピン・トルク振動子を用いたスパイクング・ニューロンがスカーミオンで実現できる事示した。フラストレート磁性体中のスカーミオンのヘリシティを反転できる事を実験的に示した。楕円形のスカーミオンのダイナミクスを数値シミュレーションで明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計53件（うち査読付論文 52件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ezawa Motohiko	4. 巻 89
2. 論文標題 Dirac Formulation for Universal Quantum Gates and Shor's Integer Factorization in High-frequency Electric Circuits	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 124712 ~ 124712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.124712	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 2
2. 論文標題 Systematic construction of square-root topological insulators and superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033397	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 102
2. 論文標題 Edge-corner correspondence: Boundary-obstructed topological phases with chiral symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.121405	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 2
2. 論文標題 Electric circuits for universal quantum gates and quantum Fourier transformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023278	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 102
2. 論文標題 Non-Abelian braiding of Majorana-like edge states and topological quantum computations in electric circuits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.075424	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 Shen Laichuan, Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Liu Xiaoxi, Zhao Guoping, Zhou Yan	4. 巻 124
2. 論文標題 Current-Induced Dynamics and Chaos of Antiferromagnetic Bimerons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 37202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.037202	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 Park Tae-Eon, et. al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Neel-type skyrmions and their current-induced motion in van der Waals ferromagnet-based heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.104410	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Shao Qiming, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 116
2. 論文標題 Dynamics of an elliptical ferromagnetic skyrmion driven by the spin-orbit torque	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 022407 ~ 022407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132915	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Shen Laichuan, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Zhao Guoping, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 101
2. 論文標題 Static and dynamic properties of bimerons in a frustrated ferromagnetic monolayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.144435	査読の有無 無
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 Li Xiaoguang, Shen Laichuan, Bai Yuhao, Wang Junlin, Zhang Xichao, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Xu Xiaohong, Mruczkiewicz Michal, Krawczyk Maciej, Xu Yongbing, Evans Richard F. L., Chantrell Roy W., Zhou Yan	4. 巻 6
2. 論文標題 Bimeron clusters in chiral antiferromagnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Computational Materials	6. 最初と最後の頁 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41524-020-00435-y	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Hou Zhipeng, Wang Wenhong, Zhao Guoping, Liu Xiaoxi, Diep Hung T., Zhou Yan	4. 巻 117
2. 論文標題 Current-driven skyrmionium in a frustrated magnetic system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012403 ~ 012403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012706	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 Shen Laichuan, Li Xiaoguang, Xia Jing, Qiu Lei, Zhang Xichao, Tretiakov Oleg A., Ezawa Motohiko, Zhou Yan	4. 巻 102
2. 論文標題 Dynamics of ferromagnetic bimerons driven by spin currents and magnetic fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.104427	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Diep Hung T., Zhao Guoping, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 118
2. 論文標題 A frustrated bimeronium: Static structure and dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 052411 ~ 052411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0034396	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 Shen Laichuan, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Zhao Guoping, Zhou Yan	4. 巻 118
2. 論文標題 Signal detection based on the chaotic motion of an antiferromagnetic domain wall	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012402 ~ 012402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0034997	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 100
2. 論文標題 Electric-circuit simulation of the Schroedinger equation and non-Hermitian quantum walks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165419 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.165419	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 100
2. 論文標題 Electric circuit simulations of nth-Chern-number insulators in 2n-dimensional space and their non-Hermitian generalizations for arbitrary n	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075423 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.075423	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 100
2. 論文標題 Electric circuits for non-Hermitian Chern insulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 081401 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.081401	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 99
2. 論文標題 Non-Hermitian boundary and interface states in nonreciprocal higher-order topological metals and electrical circuits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121411 (1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.121411	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 99
2. 論文標題 Non-Hermitian boundary and interface states in nonreciprocal higher-order topological metals and electrical circuits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 121411 (1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.121411	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 Ezawa Motohiko	4. 巻 99
2. 論文標題 Non-Hermitian higher-order topological states in nonreciprocal and reciprocal systems with their electric-circuit realization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 201411 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.201411	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 Liang Xue, Zhang Xichao, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Zhao Yuelei, Zhao Guoping, Zhou Yan	4. 巻 116
2. 論文標題 A spiking neuron constructed by the skyrmion-based spin torque nano-oscillator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122402 ~ 122402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0001557	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 Hou Zhipeng, Zhang Qiang, Zhang Xichao, Xu Guizhou, Xia Jing, Ding Bei, Li Hang, Zhang Senfu, Batra Nitin M., Costa Pedro M. F. J., Liu Enke, Wu Guangheng, Ezawa Motohiko, Liu Xiaoxi, Zhou Yan, Zhang Xixiang, Wang Wenhong	4. 巻 32
2. 論文標題 Current Induced Helicity Reversal of a Single Skyrmionic Bubble Chain in a Nanostructured Frustrated Magnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 1904815 ~ 1904815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.201904815	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Shao Qiming, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 116
2. 論文標題 Dynamics of an elliptical ferromagnetic skyrmion driven by the spin-orbit torque	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 022407 ~ 022407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5132915	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 Shen Laichuan, Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Liu Xiaoxi, Zhao Guoping, Zhou Yan	4. 巻 124
2. 論文標題 Current-Induced Dynamics and Chaos of Antiferromagnetic Bimerons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 037202 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.037202	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Hou Zhipeng, Wang Wenhong, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 11
2. 論文標題 Current-Driven Dynamics of Frustrated Skyrmions in a Synthetic Antiferromagnetic Bilayer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 044046 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.11.044046	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 121
2. 論文標題 Topological switch between second-order topological insulators and topological crystalline insulators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 116801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.116801	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Higher-order topological electric circuits and topological corner resonance on the breathing Kagome and pyrochlore lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B Rapid Communication	6. 最初と最後の頁 201402(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.201402	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Topological quantum quench dynamics carrying arbitrary Hopf and second-Chern numbers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.205406	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Strong and weak second-order topological insulators with hexagonal symmetry and Z <sub>3</sub> index	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B Rapid Communicationis	6. 最初と最後の頁 241402(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.241402	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Magnetic second-order topological insulators and semimetals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.155305	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 Sai Li, Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Wang Kang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Weisheng Zhao	4. 巻 112
2. 論文標題 Dynamics of a magnetic skyrmionium driven by spin waves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5026632	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 98
2. 論文標題 Minimal models for Wannier-type higher-order topological insulators and phosphorene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.045125	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Exact solutions for two-dimensional topological superconductors: Hubbard interaction induced spontaneous symmetry breaking	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 241113(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.241113	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 Chuang Ma, Xichao Zhang, Jing Xia, Motohiko Ezawa, Wanjun Jiang, Teruo Ono, S. N. Piramanayagam, Akimitsu Morisako, Yan Zhou, and Xiaoxi Liu	4. 巻 19
2. 論文標題 Electric Field-Induced Creation and Directional Motion of Domain Walls and Skyrmion Bubbles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 353-161
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b03983	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 Renan P. Loreto, Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, Xiaoxi Liu, Clodoaldo I. L. de Araujo	4. 巻 482
2. 論文標題 Manipulation of magnetic skyrmions in a locally modified synthetic antiferromagnetic racetrack	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Magn. Magn. Mater.	6. 最初と最後の頁 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2019.03.030	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Simple model for second-order topological insulators and loop-nodal semimetals in Transition Metal Dichalcogenides XTe <sub>2</sub> (X=Mo,W)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-41746-5	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 Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou	4. 巻 98
2. 論文標題 Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmion Induced by a Magnetic Anisotropy Gradient	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.134448	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 Laichuan Shen, Jing Xia, Guoping Zhao, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Oleg A. Tretiakov, Xiaoxi Liu, Yan Zhou	4. 巻 114
2. 論文標題 Spin torque nano-oscillators based on antiferromagnetic skyrmions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 42402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5080302	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 Motohiko Ezawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Non-Hermitian boundary and interface states in nonreciprocal higher-order topological metals and electrical circuits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B Rapid Communication	6. 最初と最後の頁 121411(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.121411	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 Sai Li, Jing Xia, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Wang Kang, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Weisheng Zhao	4. 巻 112
2. 論文標題 Dynamics of a magnetic skyrmionium driven by spin waves	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 142404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5026632	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 M. Ezawa	4. 巻 120
2. 論文標題 M. Ezawa, <l>Higher-order topological insulators and semimetals on the breathing Kagome and pyrochlore lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 26801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.026801	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 M. Ezawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Exact solutions and topological phase diagram in interacting dimerized Kitaev topological superconductors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 121105(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.121105	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 Keita Hamamoto, Motohiko Ezawa, Kun Woo Kim, Takahiro Morimoto, and Naoto Nagaosa	4. 巻 95
2. 論文標題 Nonlinear spin current generation in noncentrosymmetric spin-orbit coupled systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 224430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.224430	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 Seonghoon Woo, Kyung Mee Song, Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Yan Zhou, Xiaoxi Liu, Markus Weigand, Jun Woo Choi, Byoung-Chul Min, Hyun Cheol Koo, Joonyeon Chang	4. 巻 9
2. 論文標題 Deterministic creation and deletion of a single magnetic skyrmion observed by direct time-resolved X-ray microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-03378-7	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 M. Ezawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Merging of momentum-space monopoles by controlling Zeeman field: From cubic-Dirac to triple-Weyl fermion systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 161202(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.161202	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 M. Ezawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Photoinduced topological phase transition from a crossing-line nodal semimetal to a multiple-Weyl semimetal	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 041205(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.041205	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 M. Ezawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Topological semimetals carrying arbitrary Hopf numbers: Fermi surface topologies of a Hopf link, Solomon's knot, trefoil knot, and other linked nodal varieties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 41202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.041202	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 M. Ezawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Triplet Fermions and Dirac Fermions in Borophene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 35425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.035425	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Zhou Yan, Liu Xiaoxi, Zhang Han, Ezawa Motohiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Skyrmion dynamics in a frustrated ferromagnetic film?and current-induced helicity locking-unlocking transition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-017-01785-w	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 Loreto R.P., Moura-Melo W.A., Pereira A.R., Zhang X., Zhou Y., Ezawa M., de Araujo C.I.L.	4. 巻 455
2. 論文標題 Creation, transport and detection of imprinted magnetic solitons stabilized by spin-polarized current	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 25 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2017.04.074	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 M. Ezawa	4. 巻 95
2. 論文標題 Chiral anomaly enhancement in multi-band touching fermion systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 205201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.95.205201	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 Wakatsuki Ryohei, Saito Yu, Hoshino Shintaro, Itahashi Yuki M., Ideue Toshiya, Ezawa Motohiko, Iwasa Yoshihiro, Nagaosa Naoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 e1602390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.1602390	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 M. Ezawa, E. Salomon, P. De Padova, D. Solonenko, P. Vogt, M. E. Davila, A. Molle, T. Angot, G. Le Lay	4. 巻 3
2. 論文標題 Fundamentals and functionalities of silicene, germanene, and stanene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 La Rivista del Nuovo Cimento	6. 最初と最後の頁 175-224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1393/ncr/i2018-10145-y	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4件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Motohiko Ezawa
2. 発表標題 Electric circuits realization of higher-order topological phases and non-Hermitian 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" [ BEC2018X ] (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江澤雅彦
2. 発表標題 高次トポロジカル系の物質設計
3. 学会等名 新学術領域研究トポロジカル物質科学第4回領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江澤雅彦
2. 発表標題 電気回路による高次トポロジカル絶縁体の実現と 非エルミート系
3. 学会等名 第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江澤 雅彦
2. 発表標題 トポロジカル物質科学と表面科学の最前線：高次トポロジカル絶縁体
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 電気回路	発明者 江澤雅彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-88598	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電気回路	発明者 江澤雅彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、国際出願PCT/JP2020/ 40218	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 電気回路	発明者 江澤 雅彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-209011	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/ezawa/papers.html">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/ezawa/papers.html</a> <a href="http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/ezawa/profile.html">http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/ezawa/profile.html</a>
--

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