

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01845

研究課題名（和文）量子計量・量子幾何テンソルを用いた局在とトポロジーの研究

研究課題名（英文）Study of localization and topology through quantum metric and quantum geometric tensor

研究代表者

小澤 知己（Ozawa, Tomoki）

東北大学・材料科学高等研究所・准教授

研究者番号：80825993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：量子状態がパラメータ空間でどのように変化するかを表す量子状態の幾何学的性質についての研究課題である。本研究を通じて、幾何学的性質の一種である量子計量や量子幾何テンソルのこれまでに知られていなかった物理的意味を明らかにすることに成功した。特に次の3点が主な成果である。多体量子系において定義された量子計量が多体局在をとらえることができることを示すことができた。量子計量とトポロジーの関係を波動関数の正則性という観点から詳しく調べることに成功した。非エルミート系の幾何学的性質、特に非エルミート・アハロノフ・ボーム効果を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

状態の形状（トポロジー）を用いて量子相を分類・理解するトポロジカル物性の研究は近年大きく進展している。トポロジーはある種状態の全体的な形状を問題とするが、より細かい情報である幾何学的性質とも密接に関係する。本研究で、これまでにあまり知られていなかった量子計量や非エルミート系の幾何学などを明らかにすることに成功した。これらの性質は原子・分子・光物理や古典物理においても重要な意味を持ち得ることを明らかできた。量子系だけでなく古典系の状態を幾何学・トポロジーを用いて操作・制御する新たな方法を与え得る点で今後の量子技術の可能性を広い意味で拡張していく結果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：This research topic concerns the geometric properties of quantum states, that describe how quantum states change in a parameter space. Through this study, previously unknown physical meanings of geometric properties, such as quantum metric and quantum geometric tensor, have been successfully elucidated. The main achievements are the following three points. 1. I have shown that quantum metric defined in many-body quantum systems can capture many-body localization. 2. I have successfully investigated the relationship between quantum metric and topology from the perspective of holomorphicity of quantum states. 3. I have discovered physical consequences of certain geometric properties of non-Hermitian systems, particularly the non-Hermitian Aharonov-Bohm effect.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル物性 幾何学的性質 量子計量 非エルミート量子力学 多体局在

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジカル物性物理の研究の盛り上がりに伴い、物理状態の幾何学的な性質を理解する重要性が高まっていた。ここで幾何学的性質とは、考えている空間において波動関数がどのくらい「変化しているのか」を表す局所的な量である。幾何学的性質を適切に積分すると、考えている空間において波動関数が全体としてどれくらい変化しているかというトポロジカルな性質が得られるため、幾何学的性質とトポロジカルな性質は密接に関係する。

研究開始当初、最も活発に調べられていた幾何学的性質はベリー曲率であった。本研究においては、ベリー曲率とは異なる幾何学的性質である量子計量、および、量子計量とベリー曲率を統合した概念である量子幾何テンソルに注目する。量子計量とは、考えている空間において微小に離れた二点間で量子状態がどれくらい違うのかに従って考えている空間に入れる距離(計量)である。運動量空間の量子計量は系の光学応答、ひねり境界条件の空間で定義された量子計量は考える系の局在と関係していることが示唆されていたが、まだその性質の全貌は明らかではなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では量子計量や量子幾何テンソルの物理的意味を明らかにするとともに、しばしば一体の量子系で定義されている量子計量を多体量子系へと拡張することを目指す。また、冷却原子系などの具体的な量子系において、散逸など非エルミートな効果がある状況を含めて量子計量・量子幾何テンソルの物理的帰結を理解することを目指す。特に、多体の量子計量を用いた多体局在の研究の可能性や、量子計量とトポロジーの関係性などを明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は、おおまかに以下の3つの方向に従って研究を行う：

#### (1) 量子計量と局在、特に多体局在の関係

私の2019年の論文において、多体系・不純物系においてひねり境界条件をパラメータ空間として用いると量子計量から量子状態の局在に関する情報を得られることを示している。一方、多体局在という現象が知られている。これは不純物系で粒子間相互作用があるにも関わらず局在が見られるという現象である。量子計量を用いて、多体局在の観測可能な指標を得る。

#### (2) 量子計量とトポロジーの関係

トポロジカル物性の文脈でもっとも詳しく調べられている物理量はベリー曲率であり、ベリー曲率の積分は系のトポロジカルな性質であるチャーン数を与える。一方、量子計量は直接トポロジーとは関係しないと考えられている。しかし、量子計量とベリー曲率を量子幾何テンソルという統一的観点から調べるとそれらの間には関係があることが知られている。この関係を用いて、量子計量からトポロジーを調べる。

#### (3) 非エルミート系における量子幾何テンソルの物理的帰結

ハミルトニアンが非エルミート演算子である非エルミート量子力学における量子状態の幾何学的性質はまだほとんど理解されていない。まずは単純な2準位系から始め、ベリー曲率や量子計量がパラメータの断熱変化などのものでどのような観測量に効いてくるのかを考える。そして、非エルミート系のバンド構造を考え、そこでの幾何学的性質の効果を明らかにする。

### 4. 研究成果

上にあげた3つの研究の方向についてそれぞれの成果を述べる。

#### (1) 量子計量と局在、特に多体局在の関係

研究の方法に述べたように、多体局在を量子計量を用いて特徴づけられるかどうかを調べた[1]。考えたのは1次元のハードコアのボーズ・ハバード模型で、各サイトにランダムなポテンシャルがあり、粒子同士には隣接サイト間で相互作用がある模型である。この模型はランダムポテンシャルの強さ  $W$  と相互作用の強さ  $U$  をパラメータとして相図を書いた時に多体局在相と非局在相が現れることが知られている。(多体局在が熱力学極限で相として存在するかどうかは未だ議論のわかれるところである。ここで多体局在相が現れる、と書いたのは多体局在のある種の特徴づけに対して多体局在と判定するような相が存在する、という意味である。) この系で、多体量子状態に対してひねり境界条件空間で定義された量子計量を計算し、系の長さの関数としてプロットしたところ、多体局在が期待されるパラメータと非局在が期待されるパラメータで明らかに異なる振る舞いが見られた(図1)。特に、系の長さを大きくする極限に外挿すると、多体局在が期待される領域では量子

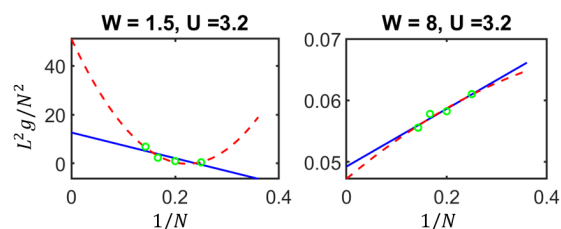


図1: 量子計量を系の長さの逆数でプロットした。左は非局在、右は多体局在相。論文[1]より。

計量は一定値に、非局在が期待される領域では量子計量は発散する振る舞いを示すことが分かった。つまり、系の長さを大きくする極限でのひねり境界条件空間での量子計量の振る舞いから多体局在と非局在を区別できることが分かった。

## (2) 量子計量とトポロジーの関係

ベリー曲率 $\Omega(\mathbf{k})$ と量子計量 $g_{ij}(\mathbf{k})$ の間には、パラメータ空間 $\mathbf{k}$ が2次元の運動量空間の場合には次の不等号の関係が成り立つことが知られている：

$$\sqrt{\det g_{ij}(\mathbf{k})} \geq |\Omega(\mathbf{k})|/2$$

論文[2]においてこの不等号の関係が等号になるのは、波動関数を2次元のパラメータ空間から量子状態の空間（これは典型的には複素射影空間であり、複素多様体である）への写像と見た時に正則写像となっている場合に限ることを見出した。この不等号の両辺を積分することで、次の大域的な不等号も得られる。

$$Q.V. \geq \pi|C|$$

ここで左辺の Q.V. とはパラメータ空間の体積（二次元なので面積のことであるが）を量子計量を用いて測ったものである量子体積（Quantum Volume）であり、右辺の C は系のトポロジーを特徴づけるチャーン数である。この大域的関係が等号となるのは、上の局所的な不等式の等号が各点で成り立ち、かつ、ベリー曲率の符号が全体で常に非負あるいは非正の場合である。

物理的には等号成立条件は次のような性質とつながっていることが証明できた[3]。

- ① 二次元空間を動く一様磁場中の荷電粒子の固有状態であるランダウ準位においては等号が局所・大域の両方で成り立つ。また、ランダウ準位においてはベリー曲率や量子計量は運動量に依存しない定数である。
- ② 2バンド模型においては局所的な不等号は常に等号であり、大域的な等号も（チャーン数がゼロでない場合には）成り立つことが多い。また、2バンド模型では運動量空間においてベリー曲率がゼロとなる点必ず存在する。
- ③ 多バンド模型においては、考えている模型をランダウ準位のようにエネルギー分散がフラットになるように変形していくと、不等号が等号へと近づく傾向にある。ただし、これはあくまでも経験則である。例えば、2次元格子に磁場がかかったハーパー・ホフスタッター模型で磁場を弱くしていく極限でランダウ準位に近づくことが知られているが、図2にその場合に量子体積が $\pi|C|$ に近づく様子を示した。

また、逆に等号が成立し、かつ、ベリー曲率・量子計量が運動量空間で一定であるような波動関数はランダウ準位とその適切な一般化に限ることを証明することもできた[4]。

等号成立が波動関数の正則性と関係しているということは、逆に正則関数を用いて等号が成立するような波動関数を構成することもできるということである。それを実行したのが論文[5]である。等号が成立する波動関数は分数量子ホール効果の安定的な実現とも関係するということが近年分かってきており、上記の一連の研究との関連も調べられつつある。

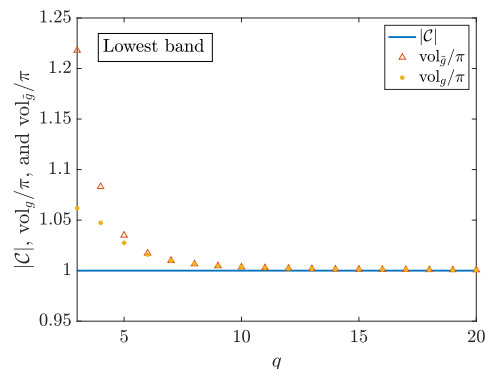


図2: ハーパー・ホフスタッター模型の量子体積を $\pi$ で割ったものを磁場の強さの逆数でプロットしたもの。チャーン数が1のバンドを考えている。論文[3]より。

## (3) 非エルミート系における量子幾何テンソルの物理的帰結

まず、非エルミート系を実現するプラットフォームをイリノイ大学の Bryce Gadway 教授らと提案・実現した[6]。このプラットフォームは古典振動子を2つ用いて、その間に測定に応じたフィードバック制御を与えている。このプラットフォームでは、2準位系の任意の非エルミートハミルトニアンを実現することができる。相互作用も、平均場相互作用の範囲でなら任意のものを実現することができる。

このプラットフォームを用いてパラメータに依存する非エルミートな2準位系を用意し、パラメータの断熱変化のもとでベリー位相の効果を調べることにも成功した[7]。ここでは、ハミルトニアンが非エルミートなことによりベリー位相が虚数成分を持っている。ベリー位相に虚数成分が存在することで、断熱変化の結果波動関数のノルムが変化する。ベリー位相の虚部による波動関数のノルムの変化はまさにアハロノフ・ボーム効果の非エルミート版を観測している

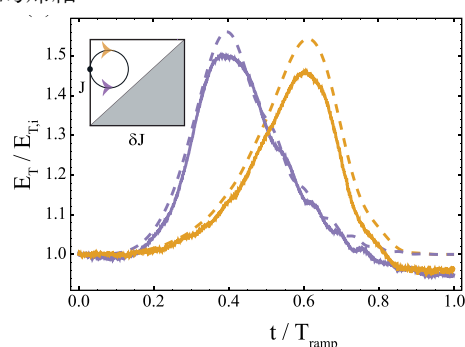


図3: パラメータ空間の非エルミート・アハロノフ・ボーム効果。パラメータ空間中で閉曲線を描く軌跡を考えている。その軌跡の途上での波動関数のノルムの変化は非エルミート・ベリー位相が予言するものと一致する。論文[7]より。

ことになる。ベリー位相はエルミート系では閉曲線に対して定義されるが、非エルミート系では開曲線についてもゲージ不変な形で定義することができ、波動関数のノルムの変化という形で適切な系では観測可能である。

閉曲線でベリー位相を考える場合には曲線内部のベリー曲率の積分と等しく、非エルミート系では一般に虚部が出てくる。ベリー曲率はパラメータ空間における磁場のような役割を果たす。虚数のベリー曲率は、その意味でパラメータ空間の虚数の磁場である。私は、実空間の虚数の磁場の影響も同様に調べた[8]。具体的には、実空間の磁場がかかった2次元格子模型であるハーバー・ホフスタッター模型で磁場を虚数にしたものを考えた。パラメータ空間の場合は外部からパラメータを断熱的に変化させた時の状況を調べるが、実空間の場合は波束を動かした際のダイナミクスを調べることで非エルミート・アハロノフ・ボーム効果が見られることを見つけた。

以上、3つの方向性の全てについて当初予定していた目的を達成することができている。

#### <引用文献>

- [1] W. N. Fugno, Tomoki Ozawa, “Geometric Characterization of Many Body Localization,” arXiv:2311.12280.
- [2] Bruno Mera and Tomoki Ozawa, “Kähler geometry and Chern insulators: Relations between topology and the quantum metric,” Phys. Rev. B **104**, 045104 (2021).
- [3] Tomoki Ozawa and Bruno Mera, “Relations between topology and the quantum metric for Chern insulators,” Phys. Rev. B **104**, 045103 (2021).
- [4] Bruno Mera and Tomoki Ozawa, “Uniqueness of Landau levels and their analogs with higher Chern numbers,” arXiv:2304.00866.
- [5] Bruno Mera and Tomoki Ozawa, “Engineering geometrically flat Chern bands with Fubini-Study Kähler structure,” Phys. Rev. B **104**, 115160 (2021).
- [6] Ritika Anandwade, Yaashnaa Singhal, Sai Naga Manoj Paladugu, Enrico Martello, Michael Castle, Shraddha Agrawal, Ellen Carlson, Cait Battle-McDonald, Tomoki Ozawa, Hannah M. Price, and Bryce Gadway, “Synthetic mechanical lattices with synthetic interactions,” Phys. Rev. A **108**, 012221 (2023).
- [7] Yaashnaa Singhal, Enrico Martello, Shraddha Agrawal, Tomoki Ozawa, Hannah Price, and Bryce Gadway, “Measuring the adiabatic non-Hermitian Berry phase in feedback-coupled oscillators,” Phys. Rev. Research **5**, L032026 (2023).
- [8] Tomoki Ozawa, Tomoya Hayata, Two-dimensional lattice with an imaginary magnetic field,” Phys. Rev. B **109**, 085113 (2024).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Takuto Tsuno, Shintaro Taie, Yosuke Takasu, Kazuya Yamashita, Tomoki Ozawa, Yoshiro Takahashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Gain engineering and topological atom laser in synthetic dimensions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2404.13769
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2404.13769	査読の有無 無
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 Tao Chen, Chenxi Huang, Ivan Velkovsky, Tomoki Ozawa, Hannah Price, Jacob P. Covey, Bryce Gadway	4. 巻 -
2. 論文標題 Interaction-driven breakdown of Aharonov--Bohm caging in flat-band Rydberg lattices	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2404.00737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2404.00737	査読の有無 無
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 Ryo Takahashi, Tomoki Ozawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Bulk-entanglement-spectrum correspondence in PT- and PC-symmetric topological insulators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2403.18372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2403.18372	査読の有無 無
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 Nathan Goldman, Tomoki Ozawa	4. 巻 --
2. 論文標題 Relating the Hall conductivity to the many-body Chern number using Fermi's Golden rule and Kramers-Kronig relations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2403.0334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2403.03340	査読の有無 無
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 W. N. Faugno, Tomoki Ozawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Geometric Characterization of Many Body Localization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2311.1228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2311.12280	査読の有無 無
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 Greta Villa, Iacopo Carusotto, Tomoki Ozawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Mean-chiral displacement in coherently driven photonic lattices and its application to synthetic frequency dimensions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2309.16101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2309.16101	査読の有無 無
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 Bruno Mera, Tomoki Ozawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Uniqueness of Landau levels and their analogs with higher Chern numbers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2304.00866
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.00866	査読の有無 無
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 Ozawa Tomoki, Hayata Tomoya	4. 巻 109
2. 論文標題 Two-dimensional lattice with an imaginary magnetic field	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 85113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.109.085113	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 Faugno W. N., Salerno Mario, Ozawa Tomoki	4. 巻 132
2. 論文標題 Density Dependent Gauge Field Inducing Emergent Su-Schrieffer-Heeger Physics, Solitons, and Condensates in a Discrete Nonlinear Schrödinger Equation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 23401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.132.023401	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 Salerno G., Ozawa T., Torma P.	4. 巻 108
2. 論文標題 Drude weight and the many-body quantum metric in one-dimensional Bose systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L140503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.L140503	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 Martello Enrico, Singhal Yaashnaa, Gadway Bryce, Ozawa Tomoki, Price Hannah M.	4. 巻 107
2. 論文標題 Coexistence of stable and unstable population dynamics in a nonlinear non-Hermitian mechanical dimer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 64211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.107.064211	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 Anandwade Ritika, Singhal Yaashnaa, Paladugu Sai Naga Manoj, Martello Enrico, Castle Michael, Agrawal Shradha, Carlson Ellen, Battle-McDonald Cait, Ozawa Tomoki, Price Hannah M., Gadway Bryce	4. 巻 108
2. 論文標題 Synthetic mechanical lattices with synthetic interactions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 12221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.108.012221	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 Caceres-Aravena Gabriel, Real Bastian, Guzman-Silva Diego, Vildoso Paloma, Salinas Ignacio, Amo Alberto, Ozawa Tomoki, Vicencio Rodrigo A.	4. 巻 8
2. 論文標題 Edge-to-edge topological spectral transfer in diamond photonic lattices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 80801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0153770	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 Takahashi Ryo, Ozawa Tomoki	4. 巻 108
2. 論文標題 Bulk-edge correspondence of Stiefel-Whitney and Euler insulators through the entanglement spectrum and cutting procedure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.075129	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 Singhal Yaashnaa, Martello Enrico, Agrawal Shradha, Ozawa Tomoki, Price Hannah, Gadway Bryce	4. 巻 5
2. 論文標題 Measuring the adiabatic non-Hermitian Berry phase in feedback-coupled oscillators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L032026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.L032026	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 Mochizuki Ken, Ozawa Tomoki	4. 巻 105
2. 論文標題 Band structures under non-Hermitian periodic potentials: Connecting nearly-free and bi-orthogonal tight-binding models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.174108	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 Faugno W.N., Ozawa Tomoki	4. 巻 129
2. 論文標題 Interaction-Induced Non-Hermitian Topological Phases from a Dynamical Gauge Field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 180401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.180401	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 Mera Bruno, Ozawa Tomoki	4. 巻 106
2. 論文標題 Singular-connection approach to topological phases and resonant optical responses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.245134	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 Balcytis Armandas, Ozawa Tomoki, Ota Yasutomo, Iwamoto Satoshi, Maeda Jun, Baba Toshihiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Synthetic dimension band structures on a Si CMOS photonic platform	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabk0468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abk0468	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 Ozawa Tomoki	4. 巻 103
2. 論文標題 Artificial magnetic field for synthetic quantum matter without dynamical modulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 33318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.103.033318	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 Secli Matteo, Ozawa Tomoki, Capone Massimo, Carusotto Jacopo	4. 巻 6
2. 論文標題 Spatial and spectral mode-selection effects in topological lasers with frequency-dependent gain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 050803 ~ 050803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041124	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 Ozawa Tomoki, Mera Bruno	4. 巻 104
2. 論文標題 Relations between topology and the quantum metric for Chern insulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045103	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 Mera Bruno, Ozawa Tomoki	4. 巻 104
2. 論文標題 Kahler geometry and Chern insulators: Relations between topology and the quantum metric	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045104	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 Mera Bruno, Ozawa Tomoki	4. 巻 104
2. 論文標題 Engineering geometrically flat Chern bands with Fubini-Study Kahler structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.115160	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25件(うち招待講演 19件/うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Aharonov-Bohm effect in non-Hermitian systems
3. 学会等名 German-Japanese Workshop co-sponsored by the Cluster of Excellence ct.qmat and Japan Science and Technology Agency (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Recent developments in synthetic-dimension photonics
3. 学会等名 ANZCOP-AIP Summer Meeting 2023 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Inter-disciplinary and inter-dimensional study of topological phases of matter
3. 学会等名 Asian Young Scientist Fellowship Annual Conference 2023 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Probing topology and geometry through periodic shaking in AMO systems
3. 学会等名 Quantum Adiabatic Control and Shortcuts (QUACS) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Probing bulk topology of one dimensional synthetic frequency lattice
3. 学会等名 META 2023 - 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Some topics on topology and quantum geometry related to twisted bi-layer graphene
3. 学会等名 Workshop: Emerging Platforms for Quantum Computing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Quantum engineering of topological phases with atoms and photons
3. 学会等名 1st Workshop on the Chicago-Tohoku Quantum Alliance (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 量子計量とトポロジカルバンド構造
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 冷却原子系と光共振器系を中心とした人工次元物性の進展
3. 学会等名 極限宇宙ワークショップ～実験と理論の協奏に向けて：固体物質系から量子・冷却気体系まで（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 二次元虚磁場中の荷電粒子
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Relations between quantum metric and topology in geometrically flat Chern insulators
3. 学会等名 Korean Physical Society Spring Meeting 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Recent Progress in Synthetic Dimensions and Topological Structures in Silicon Photonics
3. 学会等名 CLEO 2022, San Jose（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Synthetic dimensions and topological band structures in atomic and optical matter
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Bulk-edge correspondence in the entanglement spectrum of Stiefel-Whitney and Euler insulators
3. 学会等名 Workshop "Trends in Topological Materials Science and beyond" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Universality of topological physics in quantum and classical systems
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Quantum geometry for ultracold atoms and other AMO system
3. 学会等名 Virtual KITP program on "Interacting Topological Matter" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Topological photonics and its future prospects
3. 学会等名 Huawei STW 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Quantum metric and topology
3. 学会等名 Bulk-Edge/Boundary-Correspondence 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Artificial magnetic field for synthetic quantum matter without dynamical modulation
3. 学会等名 Bose-Einstein Condensation 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 トポロジカルバンド構造と光：トポロジカル絶縁体との共通点と相違点
3. 学会等名 学振125委員会第272回研究会「光とトポロジー（実空間、波数空間、光と物質の相互作用）」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 古典振動子系を用いた非線形非エルミートハミルトニアンの実現
3. 学会等名 開放系トポロジーの探求 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 トポロジカルバンド構造の理論と応用
3. 学会等名 CREST・さきがけ「トポロジー」公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Ozawa
2. 発表標題 Relations between topology and the quantum metric for Chern insulators
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 (物性)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤知己
2. 発表標題 Artificial magnetic field for ultracold atomic gases without dynamical modulation
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 小澤知己
2. 発表標題 Relations between topology and the quantum metric for Chern insulators
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会（物性）
4. 発表年 2021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			
ポルトガル	Instituto de Telecomunicacoes			
イタリア	Universita di Trento	SISSA	Universita di Salerno	
チリ	Universidad de Chile			
米国	University of Illinois			
英国	University of Birmingham			
フィンランド	Aalto University			