

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01808

研究課題名(和文)分極ゆらぎのスケーリングとギャップレス相の量子ダイナミクス

研究課題名(英文)Scaling of the fluctuation of polarizations and quantum dynamics in gapless phases

研究代表者

押川 正毅(Oshikawa, Masaki)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：50262043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：アハロノフ・ボーム磁束の挿入という思考実験に基づいて周波数和則とコーン公式を統一的に導出し、これらを非線形伝導に拡張した。すなわち、 $n$ 次の非線形伝導度の全周波数積分は、ハミルトニアンベクトルポテンシャルによる $n+1$ 階微分の期待値であらわされる。また、 $n$ 次の非線形ドルーデ重みは、エネルギー固有値の $n+1$ 階微分であらわされる。非線形ドルーデ重みは場合によって発散するが、この発散は、コーン公式では断熱極限を熱力学的極限の前に取ることに起因することを解明した。バルクの輸送特性は、断熱極限を熱力学的極限の後に取った「バルク・ドルーデ重み」で特徴づけられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気伝導度は、物質を特徴づける非常に基本的な量である。また、非線形応答、特に非線形伝導は、近年の実験技術の進歩もあり、その重要性がますます増大している。本研究によって、非線形伝導に関する普遍的な2種類の表式、すなわち(非線形)周波数和則と(非線形)コーン公式を、思考実験に基づく議論によって統一的に導くことができた。これは、今後の非線形伝導の研究において重要な手がかりになると考えられる。可積分系における非線形コーン公式の厳密な評価をきっかけに、バルクの輸送特性は断熱極限を後で取った「バルク・ドルーデ重み」で与えられるが、これはコーン公式の与える量と一致しない場合があることを明確にした。

研究成果の概要(英文)：Based on a thought experiment of inserting an Aharonov-Bohm flux, we derived the frequency sum rule and Kohn's formula in a unified manner and extended them to nonlinear conduction. Specifically, the total frequency integral of the  $n$ -th order nonlinear conductivity is expressed as the expectation value of the  $(n+1)$ -th derivative of the Hamiltonian with respect to the vector potential. On the other hand, the  $n$ -th order nonlinear Drude weight is represented by the  $(n+1)$ -th derivative of the energy eigenvalues. The nonlinear Drude weight is found to diverge in some cases, we clarified that this divergence arises because Kohn's formula takes the adiabatic limit before the thermodynamic limit. The bulk transport properties are characterized by the "bulk Drude weight," which is defined by taking the adiabatic limit after the thermodynamic limit.

研究分野：物性理論・統計力学

キーワード：非線形伝導度、ドルーデ重み、周波数和則、電気分極、多重極分極、ゲージ対称性、共形場理論、有限サイズスケーリング

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

電気分極は、物質を特徴づける基本的な量であり、ベリー位相による公式や、捻り演算子の期待値を用いたレスタ公式などが知られている。しかし、これらの異なる定式化の間の関係や、それぞれの物理的な意味づけには最近まで不明な点が多かった。また、これらの定式化の四重極などの多重極分極への拡張には更なる混乱が見られた。特に、レスタ公式の多重極分極への拡張は、原点の取り方に依存するなど病的な特性が見出された。

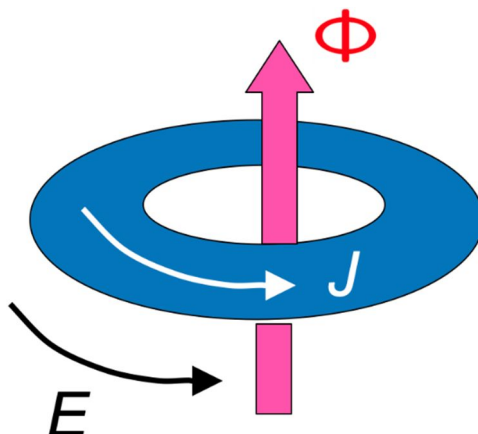
研究代表者らは、近年、電気分極に電場の断熱的な印可に対する系の応答という物理的な解釈を与えた。1次元のギャップ系など、場合によっては電場の瞬間的な印可も断熱的な印可と本質的に同じ応答を示す。このとき、電場の瞬間的な印可に対する系の応答によって電気分極を与えるものがレスタ公式に他ならない。

しかし、このような新たな観点からの電気分極や物質の電磁応答に関する理論的枠組みは未開拓であった。研究代表者らは、これまでもアハロノフ・ボーム(AB)磁束の断熱挿入とゲージ不変性を組み合わせて量子多体系に対する数々の普遍的な制約を導いた。しかし、それらの研究では主に系の運動量変化を考察の対象としており、電磁応答の観点からの検討は行われていなかった。

## 2. 研究の目的

リング状の系への AB 磁束の挿入によって、一様な電場の印可を引き起こすことができる。このときの系の電磁応答、特に電場により誘起される電流に着目し、量子多体系の新たな普遍的法則を見出す。

**思考実験の概念図:** AB 磁束の増加により、系に電場を印可する。このときに生じる電流は、電場に対する応答として線形および非線形伝導度によって決定される。



## 3. 研究の方法

AB 磁束 (すなわち、系内のある方向のベクトルポテンシャル) を時間の関数として増加させることを考える。電流演算子は、ハミルトニアン  $H$  のベクトルポテンシャルによる微分で与えられる。ベクトルポテンシャルは時間の増加関数なので、電流とハミルトニアン  $H$  の時間微分を結びつけることができる。これを積分すると、電流の時間積分がハミルトニアン  $H$  の期待値、すなわちエネルギーの増加と結びつく。電流を電場に対する応答 (伝導度) によって表現することで、伝導度とエネルギー増加の間の恒等式を導くことができる。

この議論は AB 磁束の任意の増加速度について成り立つが、特に AB 磁束の瞬間的な増加を考えると、電場に対する瞬間的な電流応答を検出できる。瞬間的な電流応答は、フーリエ変換して周波数空間に移ると、伝導度の全周波数積分に対応する。このようにして、伝導度の周波数積分がハミルトニアン  $H$  の 2 階微分の期待値に等しいことを示すことができるが、これは線形伝導度についてはよく知られた周波数和則 ( $f$ -sum rule) に他ならない。一方、本研究の手法は、非線形伝導にもただちに拡張することができる。

一方で、AB 磁束の断熱的な (無限に遅い) 増加を考えると、電場の印可から無限に長い時間後に残る電流応答を検出できる。これは完全導体を特徴づけるドルーデ重みに対応する。このようにして、線形伝導度についてのドルーデ重みが、エネルギー固有値のベクトルポテンシャルによる 2 階微分で与えられることを示すことができる。これは再びよく知られたコーン公式に他ならないが、本研究の手法は非線形伝導度についてのドルーデ重みにもただちに拡張することができる。

#### 4. 研究成果

AB 磁束の挿入という思考実験に基づいて周波数和則とコーン公式を統一的に導出し、これら  
を非線形伝導に拡張することに成功した。すなわち、 $n$  次の非線形伝導度の全周波数積分は、ハ  
ミルトニアンの特ポテンシャルによる  $n+1$  階微分の期待値であらわされる。また、 $n$  次  
の非線形ドルーデ重みは、エネルギー固有値の  $n+1$  階微分であらわされる。

タイトバインディング模型について、非線形伝導度の全周波数積分とドルーデ重みを数值的  
に求め、本研究で導いた公式が成立することを確認した。

一般次数の周波数和則 [H. Watanabe and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **102**, 165137 (2020)]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega_1}{2\pi} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega_N}{2\pi} \sigma_i^{i_1 \dots i_N}(\omega_1, \dots, \omega_N)$$

$$= \frac{1}{2^N V} \left\langle \frac{\partial^{N+1} \hat{H}(\vec{A})}{\partial A_i \partial A_{i_1} \dots \partial A_{i_N}} \Big|_{\vec{A}=\vec{0}} \right\rangle_0.$$

一般の次数のコーン公式 [同上]

$$\mathcal{D}_i^{i_1 \dots i_N} = \frac{1}{V} \frac{\partial^{N+1} \mathcal{E}(\vec{A})}{\partial A_i \partial A_{i_1} \dots \partial A_{i_N}} \Big|_{\vec{A}=\vec{0}},$$

$$\mathcal{E}(\vec{A}) \equiv \sum_n \rho_n \mathcal{E}_n(\vec{A}).$$

$S=1/2$  XXZ 鎖については、その可積分性を活用して、非線形コーン公式に基づき 3 次の非線  
形ドルーデ重みの厳密な解析的表式を得ることができた。ただし、この 3 次の非線形ドルーデ  
重みは、XXZ 鎖の異方性パラメータのある領域で発散する。(我々の研究に引き続き、谷川らに  
よってより高次の非線形ドルーデ重みの厳密解が求められ、より広い領域での発散が見出され  
た。[Y. Tanikawa, K. Takasan, and H. Katsura, Phys. Rev. B **103**, L201120 (2021)])

非線形ドルーデ重みの発散の原因を解明するため、1 次元タイトバインディング模型に不純物  
ポテンシャルを導入した模型について非線形ドルーデ重みを計算した。その結果、非線形コー  
ン公式で求めた非線形ドルーデ重みには不純物由来の発散が生じることを明らかにした。[K.  
Takasan, M. Oshikawa, and H. Watanabe, Phys. Rev. B **107**, 075141 (2023)]コーン公式では  
断熱極限を熱力学的極限よりも先に取ったことになるが、断熱極限を熱力学的極限の後で取る  
ことにより、発散が除去されて不純物によらないドルーデ重みが得られることがわかった。これ  
は、一般に、バルクの弾道的輸送特性を特徴づけるドルーデ重みは、断熱極限を熱力学的極限の  
後で取ったもので与えられることを示唆する。これを「バルク・ドルーデ重み」と呼び、コー  
ン公式により得られる「コーン・ドルーデ重み」と区別することを提案した。両者は一致する場合  
もあるが、必ずしも一致するとは限らない。非線形(コーン・)ドルーデ重みが発散する場合は、  
この極限の取り方に原因があると考えられる。

また、電気分極に関するレスタ公式を、瞬間的な電場の印可に対する系の応答という点から捉  
えなおした。レスタ公式は、瞬間的な電場の印可後の状態と、元の状態の内積を取ることにより、  
電場の印可による状態の位相変化を検出するものと解釈できる。この位相変化は、系の電気分極  
に比例しているため、位相変化から電気分極を求められるわけである。ただし、瞬間的な電場の  
印可後の状態は、一般に元の状態と異なるので、内積(分極振幅)の大きさは 1 より小さくな  
る。特に、高次元系やギャップレス系ではこの内積は熱力学的極限でゼロに近づくため、その位  
相の意味づけは微妙になる。別の言い方をすると、レスタ公式では電気分極が量子数と対応付け  
られているわけではない。

本研究では、空間反転に対して対称な系について、新たな定式化によってこの問題点を解消し  
た。[Y. Tada and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **108**, 235150 (2023)]すなわち、ゼロでない背景ベ  
クトルポテンシャルのある初期状態に対して瞬間的な電場を印可し、続けて空間反転を行う合  
成操作を考えた。このとき、合成操作をあらわすユニタリ演算子はハミルトニアンと可換であり、  
その固有値(量子数)から位相を決めることができる。ただし、この位相は、電気分極に由来す  
るものと、空間反転に対する応答の両者を含む。そこで、ベクトルポテンシャルがない場合のパ  
リティ固有値を差し引くことで、電気分極を取り出すことができる。この改良されたレスタ公式  
は量子数に基づくため、数値的な安定性が高い。さらに、この方針を、回転不変性を持つ 2 次元  
系の四重極分極に適用し、やはり量子数によって四重極分極を求める、改良されたレスタ型公式  
を得た。この改良された公式では、既存の一般化に見られた病的な性質のいくつかが除去されて  
いる。

以上の他にも、物性理論・統計力学の基礎的な問題について多くの成果をあげ論文を出版した。

## 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 4件／うちオープンアクセス 20件）

1. 著者名 Kang Yao-Tai, Lo Chung-Yu, Oshikawa Masaki, Kao Ying-Jer, Chen Pochung	4. 巻 104
2. 論文標題 Two-wire junction of inequivalent Tomonaga-Luttinger liquids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235142 (1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.087001	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 Ueda Atsushi, Oshikawa Masaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Resolving the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition in the two-dimensional XY model with tensor-network-based level spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165132 (1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.017204	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 Li Zi-Long, Oshikawa Masaki, Wan Yuan	4. 巻 11
2. 論文標題 Photon Echo from Lensing of Fractional Excitations in Tomonaga-Luttinger Spin Liquid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 031035 (1-17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.014104	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 Watanabe Haruki, Oshikawa Masaki	4. 巻 102
2. 論文標題 Generalized f-sum rules and Kohn formulas for nonlinear conductivities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165137 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.024413	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 Watanabe Haruki, Liu Yankang, Oshikawa Masaki	4. 巻 181
2. 論文標題 On the General Properties of Non-linear Optical Conductivities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 2050 ~ 2070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.075141	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 Yao Yuan, Oshikawa Masaki	4. 巻 126
2. 論文標題 Twisted Boundary Condition and Lieb-Schultz-Mattis Ingappability for Discrete Symmetries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.235150	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 Watanabe Haruki, Oshikawa Masaki, Koma Tohru	4. 巻 178
2. 論文標題 Proof of the Absence of Long-Range Temporal Orders in Gibbs States	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 926 ~ 935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.087001	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 Lu Yuan-Ming, Ran Ying, Oshikawa Masaki	4. 巻 413
2. 論文標題 Filling-enforced constraint on the quantized Hall conductivity on a periodic lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168060 ~ 168060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.017204	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 Yao Yuan, Hsieh Chang-Tse, Oshikawa Masaki	4. 巻 123
2. 論文標題 Anomaly Matching and Symmetry-Protected Critical Phases in SU(N) Spin Systems in 1+1 Dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 180201(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.014104	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 Yao Yuan, Oshikawa Masaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Generalized Boundary Condition Applied to Lieb-Schultz-Mattis-Type Incompatibilities and Many-Body Chern Numbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 031008(1-23)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.024413	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 Masuki Kanta, Sudo Hiroyuki, Oshikawa Masaki, Ashida Yuto	4. 巻 129
2. 論文標題 Absence versus Presence of Dissipative Quantum Phase Transition in Josephson Junctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 087001(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.075141	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 Yao Yuan, Oshikawa Masaki, Furusaki Akira	4. 巻 129
2. 論文標題 Gappability Index for Quantum Many-Body Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 017204(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.235142	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 Ueda Atsushi、Oshikawa Masaki	4. 巻 106
2. 論文標題 Tensor network renormalization study on the crossover in classical Heisenberg and RP2 models in two dimensions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 014104(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.165132	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 Ueda Atsushi、Oshikawa Masaki	4. 巻 108
2. 論文標題 Finite-size and finite bond dimension effects of tensor network renormalization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024413 (1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.11.031035	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 Takasan Kazuaki、Oshikawa Masaki、Watanabe Haruki	4. 巻 107
2. 論文標題 Drude weights in one-dimensional systems with a single defect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075141(1-21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.165137	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 Watanabe Haruki、Liu Yankang、Oshikawa Masaki	4. 巻 181
2. 論文標題 On the General Properties of Non-linear Optical Conductivities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 2050 ~ 2070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-020-02654-5	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 Yao Yuan、Oshikawa Masaki	4. 巻 126
2. 論文標題 Twisted Boundary Condition and Lieb-Schultz-Mattis Incompatibility for Discrete Symmetries	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 217201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.217201	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 Watanabe Haruki、Oshikawa Masaki、Koma Tohru	4. 巻 178
2. 論文標題 Proof of the Absence of Long-Range Temporal Orders in Gibbs States	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Physics	6. 最初と最後の頁 926 ~ 935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10955-019-02471-5	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 Lu Yuan-Ming、Ran Ying、Oshikawa Masaki	4. 巻 413
2. 論文標題 Filling-enforced constraint on the quantized Hall conductivity on a periodic lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168060 ~ 168060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2019.168060	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 Yao Yuan、Hsieh Chang-Tse、Oshikawa Masaki	4. 巻 123
2. 論文標題 Anomaly Matching and Symmetry-Protected Critical Phases in SU(N) Spin Systems in 1+1 Dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 180201 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.180201	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35件 (うち招待講演 35件 / うち国際学会 35件)

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Generalized Kohn formula and f-sum rules on nonlinear conductivities
3. 学会等名 CUNY-BU Symposium "Driving, tuning and controlling correlated systems: From switching to quantum computation" (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Resolving Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition in 2D XY model with TNR+CFT
3. 学会等名 Simons Center for Geometry and Physics Virtual Workshop: New directions in topological phases: from fractons to spatial symmetries (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Adiabatic and non-adiabatic flux insertion and electrical conduction
3. 学会等名 The NCTS international summer school and workshop on emergent quantum many-body phenomena (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Twisted Boundary Conditions and Lieb-Schultz-Mattis ingappabilities
3. 学会等名 Yukawa Institute for Theoretical Physics Workshop, Theoretical studies of topological phases of matter, Kyoto (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Applications of Adiabatic Flux Insertion to Quantum Many-Body Systems: A Pedagogical Introduction
3. 学会等名 Condensed Matter Physics in All the Cities 2020 (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Adiabatic vs Sudden Flux Insertion and Nonlinear Electric Conduction
3. 学会等名 Condensed Matter Physics in All the Cities 2020 (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Electrons in Honeycomb Network
3. 学会等名 UK-Japan Workshop on Strongly Correlated Systems, 18th Theoretical and Experimental Magnetism Meeting (TEMM) (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Transport in 2D Conducting Networks
3. 学会等名 APCTP-NORDITA Meeting on Quantum Matter (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Twisted boundary conditions and LSM ingappability for discrete symmetries
3. 学会等名 Kavli Instite for Theoretical Physics (UC Santa Barbara) Program “ Correlated Systems with Multi-component Local Hilbert Spaces ” (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Twisted boundary conditions and LSM ingappability for discrete symmetries
3. 学会等名 Princeton Center for Theoretical Sciences Online Workshop "Quantum Matter in the Age of Entanglement" (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Oshikawa
2. 発表標題 Twisted Boundary Conditions, Symmetry of Quantum Transfer Matrix, and LSM for Discrete Symmetries
3. 学会等名 Benasque Workshop "Entanglement in Strongly Correlated Systems" (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Quantum Quench and f-Sum Rules on Linear and Non-linear Conductivities
3. 学会等名 Conference on Spins in a Quantum 1D Multi-particle Environment: from Exotic Phases and Non-trivial Topology to Protected Transport (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Polarization in Quantum Many-Body Systems
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Universal Gap Scaling in Finite Quantum Ising Chains
3. 学会等名 Computational Approaches to Quantum Many-body Problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Quantum Quench and f-Sum Rules on Linear and Non-linear Conductivities
3. 学会等名 Aspen Summer Workshop 2019: Realizations and Applications of Quantum Coherence in Non- Equilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Sum Rules for Linear and Non-Linear Conductivities
3. 学会等名 Amsterdam Summer Workshop on Low-D Quantum Condensed Matter 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Universal Gap Scaling in Finite Quantum Ising Chains
3. 学会等名 Low-dimensional emergent phenomena in correlated systems and topological quantum matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Gauge Invariance, Polarization, and Conductivity
3. 学会等名 CMSA Program Topological Aspects of Condensed Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Topological constraints on the low-energy spectrum of quantum many-body systems
3. 学会等名 International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Twisted Boundary Conditions and Lieb-Schultz-Mattis ingappabilities
3. 学会等名 Yukawa Institute for Theoretical Physics Workshop, Theoretical studies of topological phases of matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Tensor-Network Renormalization Approach to Topological Phase Transitions
3. 学会等名 Topological Quantum Electrons Interacting In-person (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Tensor-Network Renormalization Approach to Topological Phase Transitions
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Protecting Quantum Criticality: when is the system conducting/insulating?
3. 学会等名 APCTP-IACS-SNBNC Workshop on Computational Methods for Emergent Quantum Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Finite-Size "Level Spectroscopy" Approach with Tensor Network Renormalization
3. 学会等名 Entanglement Scaling and Criticality with Tensor Networks (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Drude Weights and f-Sum Rules for Nonlinear Conductivities
3. 学会等名 Quantum Geometric Advantage Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Duality between SPT and SSB phases
3. 学会等名 ICMAT Focus Week "Tensor Networks" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Non-Invertible Duality Transformation Between SPT and SSB Phases
3. 学会等名 Theoretical studies of topological phases of matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 SPT-SSB Duality in 1D and Its Applications
3. 学会等名 Aspen Summer Workshop "Exotic Phases, Gauge Field Theories and Dynamics in Systems with Constraints" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Drude Weights and f-sum Rules for Nonlinear Optical Conductivities
3. 学会等名 Strongly Correlated Electron Systems 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Drude Weights and f-sum Rules for Nonlinear Conductivities
3. 学会等名 The 7th Workshop on Correlations in Integrable Quantum Many-Body Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Spin dynamics near the field-induced gap-closing transition in 1D magnets
3. 学会等名 KITP Conference "Dynamical Response and Transport in Quantum Magnets" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Construction of Symmetry-Protected Topological Phases with Duality Transformations
3. 学会等名 ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Element of Magnetism and Bose-Einstein Condensation
3. 学会等名 S.-T. Yau Science Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Construction of Symmetry-Protected Topological Phases with Duality Transformations
3. 学会等名 KIAS-IBC-PCS Workshop "Correlation and Topology in Quantum Matter" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikawa Masaki
2. 発表標題 Construction of Gapped and Gapless Symmetry-Protected Topological Phases with Duality Transformations
3. 学会等名 KITP Program "Correlated Gapless Quantum Matter" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究協力者	渡辺 悠樹  (Watanabe Haruki)		

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	多田 靖啓  (Tada Yasuhiro)		
研究協力者	姚 元  (Yao Yuan)		
研究協力者	上田 篤  (Ueda Atsushi)		
研究協力者	ルー ユアンミン  (Lu Yuan-Ming)		
研究協力者	ラン イン  (Ran Ying)		
研究協力者	高三 和晃  (Takasan Kazuaki)		
研究協力者	謝 長澤  (Hsieh Chang-Tse)		
研究協力者	李 林豪  (Li Linhao)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	万 源  (Wan Yuan)		
研究協力者	李 子竜  (Li Zi-Long)		

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			
中国	中国科学院 物理研究所			
その他の国・地域 台湾	国立台湾大学	国立清華大学		
米国	Boston College	Ohio State University		