

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01155

研究課題名（和文）トポロジカル絶縁体表面における量子干渉効果

研究課題名（英文）Quantum interference effect on the surface of topological insulators

研究代表者

川村 稔（Kawamura, Minoru）

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・専任研究員

研究者番号：60391926

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカル絶縁体表面の電子状態における幾何学的位相の効果を、電気伝導測定という巨視的な物理量の測定から明らかにする研究をおこなった。当初計画していたアハロノフ・ボーム効果などの量子干渉効果の実験では、非弾性散乱長が試料サイズよりも短かったために、干渉効果を明瞭に測定することができなかった。一方、磁性元素を添加した磁性トポロジカル絶縁体の研究では、電子系の幾何学的位相の効果である量子異常ホール効果のホール抵抗が8桁以上の精度で量子抵抗値に一致することを示した。さらに、ラフリン電荷ポンプ現象を観測し、電極を結ぶ端チャンネルが存在しない系においてもホール伝導率が量子化することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子異常ホール効果の精密測定では、ホール抵抗値が8桁以上の精度で量子化することを示した。この成果は量子異常ホール効果の学理を構築する上で重要な測定結果であると同時に、量子異常ホール効果を無磁場でも使える電気抵抗標準へ応用するための第一歩である。物質のトポロジーを積極的に利用した典型的な応用例であり、トポロジカル物質への応用研究へ向けて弾みがつくことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We investigated the effect of the geometrical phase on the electronic state of the surface of topological insulators through the measurement of macroscopic physical quantities called electrical transport measurements. In the originally planned experiments on quantum interference effects such as the Aharonov-Bohm effect, the inelastic scattering length was shorter than the sample size, so the interference effects could not be clearly measured. On the other hand, in the study of magnetic topological insulators doped with magnetic elements, it was shown that the Hall resistance of the quantum anomalous Hall effect, which is an effect of the geometrical phase of the electronic system, matches the quantum resistance value with an accuracy of eight orders of magnitude or more. Furthermore, we observed Laughlin charge pump phenomenon and showed that the hole conductivity quantized even in systems without end channels connecting the electrodes.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル絶縁体 量子異常ホール効果 ラフリン電荷ポンプ 電気磁気効果

1. 研究開始当初の背景

近年の物質科学では、バンド構造のトポロジーによって特徴づけられるトポロジカル物質群が注目を集めている。3次元トポロジカル絶縁体は中でも最も顕著な物質群の一つで、物質内部の3次元バルク部分が絶縁体である一方で、試料表面に線形なエネルギー分散関係をもつディラック電子系が現れるという特徴を持っている。トポロジカル絶縁体の表面状態(トポロジカル表面状態)では、電子スピンと運動量の方向が直交するという性質を持つため、電子が運動量空間でループを描くように運動すると、それに応じて、非ゼロの幾何学的位相を獲得する場合がある。こうした幾何学的位相は、運動量空間が特異点の周りで曲率を有するという表面状態のトポロジカルな性質の直接的な帰結である。波動関数の位相を測定するためには、干渉効果等の難易度の高い実験が必要であり、これまでのトポロジカル絶縁体の研究では、幾何学的位相を直接測定し、それを人為的に制御する実験研究はほとんど行われてこなかった。

研究開始当初のトポロジカル絶縁体の研究では、物質探索および分光的手段による表面状態の電子状態解明の研究が精力的におこなわれていた。これに対し、トポロジカル絶縁体に特徴的な機能物性を探索する研究は、まだ端緒についたばかりと言える。伝導現象に関しては、トポロジカル絶縁体の研究の初期段階において、 Bi_2Se_3 ナノリボンや劈開薄膜を用いて、反局在現象、アハロノフ ポーム効果といった量子伝導現象の研究例が幾つか報告されている。しかし、トポロジカル絶縁体研究の初期に行われたこれらの実験では、試料の電子濃度の制御が十分にできていなかったため、試料のバルク部分からの寄与が無視できず、測定された現象がトポロジカル表面状態に帰着できるかという非常に本質的な部分に曖昧さが残っていた。

2. 研究の目的

アハロノフ ポーム効果は電子の波動関数の干渉効果であり、磁束による位相変調と通じて電気伝導度の変化として観測できることが知られている。本研究では、トポロジカル絶縁体微小リングの電気伝導度測定をおこない、アハロノフ ポーム効果を観測し、磁場に対する電気伝導度の振動から電子波動関数の幾何学的位相を論ずることを目的として研究をおこなった。微小リングの材料として3次元トポロジカル絶縁体の典型物質として知られる $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ を用いた。分子線エピタキシー法によってフェルミエネルギー、膜厚、磁性を制御した試料を作製するのが本研究の特徴である。膜厚や磁化といった薄膜パラメータを自在に制御することで、トポロジカル表面状態の運動量空間におけるトポロジーに変調を与え、トポロジカル相転移を引き起こすことができる。高度に制御されたトポロジカル絶縁体薄膜を用いて、トポロジカル相転移に伴う幾何学的位相の変化を観測するのが本研究の独自性である。

3. 研究の方法

分子線エピタキシー法によって成長したトポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ 薄膜を、電子ビームリソグラフィとドライ/ウェットエッチング法を用いて、直径1~2 μm のリング形状の試料に微細加工する。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機を用いて試料を100 mK以下の低温に冷却し、電気伝導測定をおこなう。リングを貫く方向に磁場を印加し、その強さを掃引することにより、リングを時計回り/反時計回りに透過した電子波の位相差に変化を与え、アハロノフ ポーム効果による電気伝導度の振動現象を観測する。ゲート電圧を変化させてフェルミエネルギーを少しずつシフトさせながら同様の測定を繰り返すことで、電気伝導度振動の位相がフェルミエネルギーに対してどのように変化するかを調べる。トポロジカル表面状態のエネルギー分散関係が理想的な線形分散の場合、幾何学的位相は に固定されて変化しないため、電気伝導度振動の位相はフェルミエネルギーに依存しないと期待される。逆に位相の からのズレが観測されれば、ズレの大きさから分散関係の非線形性などが議論できる。また、電気伝導度によるアハロノフ ポーム効果の測定では、通常の二端子法による測定の場合、オンサーガ の相反定理により、位相がゼロまたは しか許容されなくなる。これを避けるために局所・非局所配置を組み合わせて電気伝導度測定を進めていく。

また、3次元トポロジカル絶縁体薄膜では、表と裏のトポロジカル表面状態の間に有限の混成がある場合や、磁性元素を導入してエネルギーギャップを開けた場合、エネルギー分散関係が変化すると同時に幾何学的位相も変化することが期待できる。薄膜試料の膜厚や磁性を制御することで、表面・裏面混成によるエネルギーギャップや磁気エネルギーギャップの生成による幾何学的位相の変化を測定する。

4. 研究成果

(1) リング形状試料におけるアハロノフ-ボーム効果の実験

本研究の目的は、トポロジカル絶縁体表面状態の電気伝導特性に現れる量子干渉効果を測定し、トポロジカル表面状態における電子波動関数の幾何学的位相を直接捉えることである。量子干渉効果の実験をおこなうために、分子線エピタキシー法により成長した高品質3次元トポロジカル絶縁体(Bi,Sb)₂Te₃ 薄膜を作製した。Bi/Sb 比を調整することで、フェルミエネルギーがバルク状態のエネルギーギャップ内に存在するように調整をおこなった。量子干渉効果を測定するために、(Bi,Sb)₂Te₃ 薄膜試料から直径1マイクロメートル程度のリング形状の試料を切り出す微細加工プロセスを確立した。当初計画では、酸性エッチング液によるウェットエッチングを想定していたが、実験してみると、膜面方向のエッチング速度が速く、微細なパターンをうまく切り出すことができなかった。そこでアルゴンイオンミリングによるドライエッチングをおこなったところ、線幅100nm程度の細線を切り出すことができた。アルゴンイオン打ち込みをおこなった結果、室温では基板の一部が伝導的になったが、液体ヘリウム温度まで冷却すると、基板を介した伝導の影響はほとんどないことが分かった。

リング形状の試料を、希釈冷凍機を用いて100mK以下まで冷却し、量子干渉効果の実験をおこなったが、アハロノフ-ボーム効果の観測には至らなかった。電子波の非弾性散乱長が試料サイズに比べて短いためだと考えられる。

(2) 細線形状試料におけるアルトシューラー アロノフ スピバック効果の実験

量子干渉効果を得るため、3次元トポロジカル絶縁体薄膜を幅500nmの細線形状に加工し、細線の長手方向へ磁場を印加して、トポロジカル表面状態を周回する軌道の量子干渉効果であるアルトシューラー アロノフ スピバック効果を測定する実験を試みた。希釈冷凍機を用いて試料を60mKまで冷却して実験をおこなったが、干渉効果の兆候は観測できなかった。この結果は、60mKの低温であっても電子波の非弾性散乱長が1μmよりも短いということを示している。非弾性散乱長を調べるために、2μm角に加工した(Bi,Sb)₂Te₃ 薄膜試料の磁気抵抗を測定したところ、普遍的コンダクタンス揺らぎを観測した。コンダクタンス揺らぎの大きさは温度の平方根の逆数に比例して増大し、約100mKで飽和する振る舞いを示した。最低温度でのコンダクタンス揺らぎの振幅は量子コンダクタンス e^2/h の約5分の1程度まで大きくなった。これは典型的な普遍的コンダクタンス揺らぎの振る舞いであり、100mKよりも高温の温度域では、電子温度で決まる熱的拡散長が量子コヒーレンスを支配していることが分かった。また、コンダクタンス揺らぎの自己相関関数からコヒーレンス長を求めたところ、約500nm程度という値が得られた。この結果は上述の500nm幅細線で干渉効果が観測できなかった実験結果と整合する。

また、磁性元素であるCrを添加した磁性トポロジカル絶縁体(Cr,Bi,Sb)₂Te₃において、量子異常ホール効果状態と通常絶縁体状態の間のトポロジカル量子相転移現象の測定をおこなった。励起電流を大きくすると電子温度が上昇し、相転移が緩やかになっていく。この電流依存性と以前に測定した温度依存性の結果を組み合わせ、相転移の量子臨界点近傍における非弾性散乱長の発散の指数を決定した。非弾性散乱長は、温度を上昇するに従い、温度の-1.7の冪で減少することが分かった。この結果は、磁性トポロジカル絶縁体表面電子の非弾性散乱長が非磁性半導体に比べて、温度に敏感であることを示している。フォノン散乱に加えてマグノン散乱などの非弾性散乱の影響が強いためではないかと考えている。

(3) 磁性トポロジカル絶縁体におけるラフリン電荷ポンプ

磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造薄膜(Cr,Bi,Sb)₂Te₃/(Bi,Sb)₂Te₃/(Cr,Bi,Sb)₂Te₃をドーナツ型に加工した試料を用いて、ラフリン電荷ポンプを観測した。ラフリン電荷ポンプは、ドーナツ型の試料の中心穴を通過する磁束を変化させることで、電荷を動径方向へ輸送する現象である。電荷はトポロジカル絶縁体の表・裏の表面状態を介して輸送されるが、表面状態には磁気ギャップが開いているため、電荷はエネルギー散逸なく輸送される。磁場を数ヘルツの周波数で振動させ、ラフリン電荷ポンプによって誘起される交流電流をコンデンサへ流し、コンデンサの両端に生じる電圧を測定した。電圧と交流磁場振幅の比は周波数に寄らず一定値をとることを観測した。この比の値からトポロジカル絶縁体の表と裏の寄与を合わせた表面ホール伝導率を求めることができる。試料が量子異常ホール状態にある場合には、表面ホール伝導率は量子コンダクタンス e^2/h とよく一致した。一方、試料がアキシオン絶縁体状態にある場合には、表面と裏面の寄与が相殺することにより、表面ホール伝導率はゼロとなった。これらの結果は、磁性トポロジカル絶縁体表面の表面ホール伝導率が1枚あたり $e^2/2h$ に半整数量子化していることを示している。ホール伝導率の半整数量子化は、磁気ギャップを有する単一ディラック電子系において理論的に予測されている幾何学的位相による効果の一つであり、今回の研究はその特徴を捉

えたものと言える。ここで観測したラフリン電荷ポンプは、トポロジカル絶縁体表面におけるエネルギー散逸を伴わない非散逸輸送現象である。これは、既に知られている量子異常ホール効果と相補的な現象であるが、研究開始当初は想定していなかった成果である。一方、この現象における量子干渉効果の役割は未解明な部分があり、今後検討していく必要がある。

(4) 量子異常ホール効果の精密測定

本研究を遂行する過程で、トポロジカル絶縁体薄膜の品質が目覚ましく向上した。そこで、磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造薄膜 $(\text{Cr, Bi, Sb})_2\text{Te}_3 / (\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3 / (\text{Cr, Bi, Sb})_2\text{Te}_3$ を作製し、量子異常ホール効果の量子化精度の測定をおこなった。量子異常ホール効果は、薄膜の磁化さえ一方向を向いていれば、ホール抵抗が h/e^2 に量子化するため、ゼロ磁場でも量子抵抗が得らる。このため、超伝導磁石を使わない電気抵抗標準として利用できる可能性が指摘され、注目を集めている。幅 $800 \mu\text{m}$ のホールバー型試料を作製し、ネオジウム磁石を用いて試料の磁化を一方向へ揃えて、ホール抵抗測定をおこなったところ、ホール抵抗値は8桁の精度で量子抵抗と一致することが分かった。今後は更なる量子化精度向上へ向けて、測定方法の改善、膜質の改善をおこなっていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yuma Okazaki, Takehiko Oe, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshimi, Shuji Nakamura, Shintaro Takada, Masataka Mogi, Kei S. Takahashi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, and Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 18
2. 論文標題 Quantum anomalous Hall effect with a permanent magnet defines a quantum resistance standard	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 25-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41567-021-01424-8	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 Reika Fujimura, Ryutaro Yoshimi, Masataka Mogi, Atsushi Tsukazaki, Minoru Kawamura, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura	4. 巻 119
2. 論文標題 Current-induced magnetization switching at charge-transferred interface between topological insulator (Bi,Sb)2Te3 and van der Waals ferromagnet Fe3GeT32	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 32402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0057863	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 Mogi Masataka, Yasuda Kenji, Fujimura Reika, Yoshimi Ryutaro, Ogawa Naoki, Tsukazaki Atsushi, Kawamura Minoru, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 12
2. 論文標題 Current-induced switching of proximity-induced ferromagnetic surface states in a topological insulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-21672-9	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 Masuko M., Yoshimi R., Tsukazaki A., Kawamura M., Takahashi K. S., Kawasaki M., Tokura Y.	4. 巻 4
2. 論文標題 Molecular beam epitaxy of superconducting Sn1-xInxTe thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 91202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.4.091202	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 Kawamura Minoru, Mogi Masataka, Yoshimi Ryutaro, Tsukazaki Atsushi, Kozuka Yusuke, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 102
2. 論文標題 Current scaling of the topological quantum phase transition between a quantum anomalous Hall insulator and a trivial insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 41301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.041301	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 Yasuda Kenji, Morimoto Takahiro, Yoshimi Ryutaro, Mogi Masataka, Tsukazaki Atsushi, Kawamura Minoru, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 15
2. 論文標題 Large non-reciprocal charge transport mediated by quantum anomalous Hall edge states	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 831 ~ 835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41565-020-0733-2	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 R. Watanabe, R. Yoshimi, M. Kawamura, M. Mogi, A. Tsukazaki, X. Z. Yu, K. Nakajima, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura	4. 巻 115
2. 論文標題 Quantum anomalous Hall effect driven by magnetic proximity coupling in all-telluride based heterostructure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 102403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5111891	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 Mogi Masataka, Nakajima Taro, Ukleev Victor, Tsukazaki Atsushi, Yoshimi Ryutaro, Kawamura Minoru, Takahashi Kei S., Hanashima Takayasu, Kakurai Kazuhisa, Arima Taka-hisa, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 123
2. 論文標題 Large Anomalous Hall Effect in Topological Insulators with Proximitized Ferromagnetic Insulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 16804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.016804	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 Kawamura Minoru, Mogi Masataka, Yoshimi Ryutaro, Tsukazaki Atsushi, Kozuka Yusuke, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 98
2. 論文標題 Topological quantum phase transition in magnetic topological insulator upon magnetization rotation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.140404	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 Watanabe R., Yoshimi R., Shirai M., Tanigaki T., Kawamura M., Tsukazaki A., Takahashi K. S., Arita R., Kawasaki M., Tokura Y.	4. 巻 113
2. 論文標題 Emergence of interfacial conduction and ferromagnetism in MnTe/InP	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 181602 ~ 181602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5050446	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 Mogi M., Okamura Y., Kawamura M., Yoshimi R., Yasuda K., Tsukazaki A., Takahashi K. S., Morimoto T., Nagaosa N., Kawasaki M., Takahashi Y., Tokura Y.	4. 巻 18
2. 論文標題 Experimental signature of the parity anomaly in a semi-magnetic topological insulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 390 ~ 394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01490-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 -

1. 著者名 Masuko Makoto, Kawamura Minoru, Yoshimi Ryutaro, Hirayama Motoaki, Ikeda Yuya, Watanabe Ryota, He James Jun, Maryenko Denis, Tsukazaki Atsushi, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 7
2. 論文標題 Nonreciprocal charge transport in topological superconductor candidate Bi ₂ Te ₃ /PdTe ₂ heterostructure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-022-00514-x	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 Yoshimi Ryutaro, Kawamura Minoru, Yasuda Kenji, Tsukazaki Atsushi, Takahashi Kei S., Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 106
2. 論文標題 Nonreciprocal electrical transport in the multiferroic semiconductor (Ge,Mn)Te	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.115202	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 Kawamura Minoru, Mogi Masataka, Yoshimi Ryutaro, Morimoto Takahiro, Takahashi Kei S., Tsukazaki Atsushi, Nagaosa Naoto, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori	4. 巻 19
2. 論文標題 Laughlin charge pumping in a quantum anomalous Hall insulator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 333 ~ 337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01888-2	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16件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Quantum transport phenomena in magnetic topological insulator thin films
3. 学会等名 The International Symposium on Advanced Science and Technology (Chung Hsing University, Taiwan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Observation of half-integer Hall conductivity in topological insulator thin film
3. 学会等名 APW-RIKEN-Tsinghua-Kavli workshop "Highlights on condensed matter physics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Critical behavior of the quantum anomalous Hall plateau transition
3. 学会等名 Localisation seminar series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村稔、茂木将孝、吉見龍太郎、塚崎敦、小塚裕介、高橋圭、川崎雅司、十倉好紀
2. 発表標題 量子異常ホール絶縁体 通常絶縁体相転移の電流スケーリング
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 quantum anomalous Hall effect in magnetic-proximity-coupled topological insulator
3. 学会等名 APW2019 and Tsinghua-RIKEN-KITS Joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Watanabe, R. Yoshimi, M. Kawamura, M. Mogi, A. Tsukazaki, X. Yu, K. Nakajima, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura
2. 発表標題 Proximity-induced Quantum Anomalous Hall Effect in (Zn,Cr)Te/(Bi,Sb) ₂ Te ₃ /(Zn,Cr)Te Heterostructure Film
3. 学会等名 International symposium on hybrid quantum systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kawamura, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura
2. 発表標題 Metal-insulator transition in magnetic topological insulator driven by magnetization angle rotation
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Topological quantum phase transition in magnetic topological insulator
3. 学会等名 2019 RIKEN-NCHU Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Kawamura, Masataka Mogi, Ryutaro Yoshimi, Atsushi Tsukazaki, Yusuke Kozuka, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura
2. 発表標題 Quantum phase transition in magnetic topological insulator studied by transport measurement
3. 学会等名 Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Kawamura, Masataka Mogi, Ryutaro Yoshimi, Atsushi Tsukazaki, Yusuke Kozuka, Kei S. Takahashi, Masashi Kawasaki, and Yoshinori Tokura
2. 発表標題 Quantum phase transition in magnetic topological insulator driven by magnetization rotation
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Topology: a new knob for electric switch
3. 学会等名 France-Japan Bilateral Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Quantum phase transition in magnetic topological insulator studied by transport measurement
3. 学会等名 China-Japan International Workshop on Quantum Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minoru Kawamura
2. 発表標題 Metal-insulator transition in magnetic topological insulator
3. 学会等名 The 34th international conference on physics of semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村稔
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体の量子伝導物性
3. 学会等名 産総研・理研 量子技術イノベーションコアWorkshop (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuma Okazaki, Takehiko Oe, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshimi, Shuji Nakamura, Shintaro Takada, Masataka Mogi, Kei S Takahashi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura, Nobuhisa Kaneko
2. 発表標題 Precision measurement of quantum anomalous Hall effect in magnetic topological insulator
3. 学会等名 The 29th International Conference on Low Temperature Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村稔、茂木将孝、吉見龍太郎、森本高裕、高橋圭、塚崎敦、永長直人、川崎雅司、十倉好紀
2. 発表標題 量子異常ホール絶縁体におけるラフリン電荷ポンプ
3. 学会等名 日本物理学会2022秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>強磁場発生装置を用いない量子抵抗標準素子の開発に成功 https://www.riken.jp/press/2021/20211214_1/index.html トポロジカル絶縁体で電気磁気効果を初めて観測 https://www.riken.jp/press/2023/20230120_1/ 二次元ディラック電子の量子異常を実証 https://www.riken.jp/press/2022/20220128_1/</p>
--

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