

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01830

研究課題名（和文）強結合ハイブリッド開放量子系における創発量子化現象

研究課題名（英文）Emergent quantization phenomena in strongly coupled hybrid open quantum systems

研究代表者

野村 健太郎（Nomura, Kentaro）

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：00455776

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本計画研究ではトポロジカル物質を主な対象として、その開放系で起こりうる新規な輸送現象および近接効果の解明を行った。トポロジカルDirac半金属ではバンドトポロジーとスピン軌道相互作用に起因して、表面にヘリカルなギャップレス状態が形成される。表面に強磁性体を近接させた系では、トポロジカルDirac半金属に電場を印加すると、スピホール流が発生し、近接した強磁性体に準量子化するトルクが生成されることを明らかにした。また、強磁性体の電極をトポロジカルDirac半金属に接合させた系においては、原理的最大値に近い値のHall効果が起こることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果ではトポロジカル物質における新しい磁気輸送現象およびスピントロニクス効果を明らかにした。トポロジカル物質では電気と磁気自由度が非自明に結合することが知られているが、本研究成果はそれらに開放系や近接効果という新しい要素を加えることで、当該分野の学術的知見をより進化させたものといえる。一方で、トポロジカルDirac半金属の準量子化スピントルク効果は従来の金属に比べ低エネルギー散逸かつ高効率でのスピントロニクス機能を提案したという点で応用上も重要な結果である。

研究成果の概要（英文）：In this project, we mainly focused on topological materials and elucidated new transport phenomena and proximity effects that can occur in open systems. In topological Dirac semimetals, a helical gapless state is formed on the surface due to band topology and spin-orbit interaction. In a system in which a ferromagnetic material is placed close to the surface, it was revealed that when an electric field is applied to a topological Dirac semimetal, a spin Hall flow is generated and a semi-quantized torque is generated in the nearby ferromagnetic material. We also discovered that in a system in which a ferromagnetic electrodes are attached to a topological Dirac semimetal, a Hall effect with a value close to the theoretical maximum occurs.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル物性

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した当初、トポロジカル物性の研究分野では、トポロジカル絶縁体の表面に強磁性絶縁体や超伝導体を接合させることで、量子異常ホール効果やマヨラナゼロモードの生成など多くの現象が理論的に提案され、実験的検証も行われていた。研究代表者は異常ホール伝導率の量子化に関する理論予測(Nomura and Nagaosa, Phys. Rev. Lett. 106, 166802 (2011))を実験に先立って行うなど、トポロジカル絶縁体と磁性体および超伝導体の界面における量子輸送現象の理論研究を進め、この分野の発展を牽引してきた(野村著「トポロジカル絶縁体・超伝導体」丸善)。当時はトポロジカル絶縁体に関しては莫大な理論的・実験的研究によってほぼ調べ尽くされた観があったが、ワイル半金属やディラック半金属、線ノード半金属などのギャップレストポロジカル物質が新たに提案され、それに伴って新現象の探索が試みられており、トポロジカル物質の分野の世界的研究競争は加熱していた。

このような状況において、より独自性の高い研究を行うためには、既存の研究の延長ではなく新しい視点に立った研究の必要性を感じていた。既存の研究、特に輸送現象にフォーカスして顧みると、非平衡現象ではあるが、(線形応答理論の適用範囲という意味で)「孤立系」として、電極などは切り離して解析することが可能な場合の理論研究が大多数を占めることに気づいた。一方、スピントロニクス材料の磁性体界面や超伝導接合系などは開放系特有の新現象がいくつか調べられていたのに対して、界面が本質的な役割を担うトポロジカル物質においては、開放系としての理論研究は行われていなかった。そこで研究代表者らは、電極を含む「ハイブリッド開放系」としてのトポロジカル物質を研究することで、より非自明な現象および多様な機能を発見することができるのではないだろうかという本研究のアイデアに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では電極が強磁性体であったりあるいは超伝導体であったりする場合、すなわち外部と強く相互作用する「開放系としてのトポロジカル物質」が新たに獲得する機能・現象を、輸送現象を中心に探索し、基礎学理を構築する。特に以下3つのテーマの遂行を目標とした。

- 強磁性電極に接続された量子スピンホール絶縁体やトポロジカルディラック半金属の境界にあるヘリカルエッジ状態による伝導が磁化の大きさや方向によって劇的に変化することを明らかにする。
- トポロジカルディラック半金属に強磁性体を接合させた系で、電場を印加することで強磁性体の磁化を反転する機構とその低散逸性を検証する。
- 超伝導体電極に挟まれたトポロジカル半金属において、スピン-運動量ロッキングによってコヒーレンスが增強されたジョセフソン電流を計算し、その安定性を解析する。

## 3. 研究の方法

上で挙げた3つの課題研究に対して以下の方法を用いて研究を遂行した。

- 非平衡グリーン関数の方法を用いて定量的に計算した。この方法の利点は(強磁性秩序および超伝導秩序に対して平均場近似を用いることは別として)、摂動論などの近似によらない信頼性の高い計算が行えること、用途によって解析的アプローチと数値的アプローチの使い分けが可能で、電極の影響を取り入れることができることである。
- トポロジカル半金属と強磁性体の界面における電場誘起スピントルクとそれによるスピンドYNAMIXを、量子系実時間発展形式を用いて解析した。
- スピン軌道相互作用がある場合の超伝導/常伝導/超伝導系におけるジョセフソン電流の微視的理論を定式化し、グリーン関数法を用いてヘリカルエッジを媒介とする超電流を計算することで、安定性とその起源を解明する。

## 4. 研究成果

強磁性電極を備えたトポロジカルディラック半金属における型破りなタイプのホール効果を提案した[1]。トポロジカルなディラック半金属自体は時間反転対称性を持っているが、取り付けられた強磁性電極がそれを局所的に破り、大きなホール応答を引き起こす。この誘起ホール効果は、トポロジカル・ディラック半金属や量子スピンホール絶縁体などのトポロジカル材料で生じるヘリカル表面/エッジ状態の特性によるものである。4端子形状の格子モデルを使用して、ホールコンダクタンス/抵抗とホール角を計算し、電流電極または電圧電極が強磁性であるかどうかに関係なく、誘導ホール効果が発生することを示した。電極内のスピンがほぼ完全に分極すると、ホール角は量子ホール状態または理想的な磁性ワイル半金属の角度と同じくらい大きくなる。このホール応答を使用して2つの強磁性電極の磁化が平行か反平行かを検出できる。

磁化が歳差運動する強磁性絶縁体に付着したトポロジカル・ディラック半金属におけるスピント荷輸送現象の時間発展過程を研究した。[2] 従来の通常の金属と比較して、トポロジカ

ル・ディラック半金属は、取り付けられた強磁性絶縁体からスピン流が汲み上げられると、大きな逆スピンホール効果を示します。誘導された電荷電流は半量子化されていることを明らかにした。つまり、系がトポロジカルなディラック半金属相に留まっている場合、それは運動量空間の2つのディラック点の間の距離にのみ依存し、無秩序の強さにはほとんど依存しない。逆効果として、トポロジカル・ディラック半金属に印加された電場が交換相互作用と半量子化スピンホール効果を通じて、強磁性絶縁体の局所磁化にスピントルクを及ぼすことを示した。これらの結果はトポロジカル・ディラック半金属がスピン電荷変換とスピンスイッチングのための散逸の少ないプラットフォームを提供することを提案する。

超伝導近接効果に対する量子ホール系のカイラルエッジモードの堅牢性にも関わらず、クーパー対はカイラルエッジチャンネルに侵入し、ジョセフソン電流を流すことができる。従来型超伝導体と接合するチャーン数  $\nu = 1$  のスピン偏極量子異常ホール絶縁体(QAHI)のジョセフソン接合系を、カイラルエッジモードと一致するペアリング対称性の観点から研究した[3]。誘導されたペアリング状態は、偶数周波数成分と奇数周波数成分の組み合わせであるスピン三重項であり、非局所的に拡張され、有限の運動量  $2k_F$  をもつことを明らかにした。スピン三重項対の特徴は界面磁化方向への依存性によって確認され、有限運動量対状態の特徴は臨界電流の幅依存性と異常グリーン関数の空間プロファイルによって確認された。ディスオーダーの下ではカイラルエッジモードの堅牢性により、電流が流れるチャンネルの干渉から生じる臨界電流と乱れた配置に対する平衡位相差の感度が高くなる。格子モデル上の数値計算によって簡略化された解析計算の結果を検証した。

1. K. Kobayashi, K. Nomura

“Ferromagnetic-electrodes-induced Hall effect in topological Dirac semimetals”

Phys. Rev. Res. 3, 033023 – 1 - 11 (2021).

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.033023>

2. T. Misawa, K. Nomura

“Semi-Quantized Spin Pumping and Spin-Orbit Torques in Topological Dirac Semimetals”

Sci. Rep. 9, 19659 – 1-8 (2019).

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55802-7>

3. R. Nakai, K. Nomura, Y. Tanaka

“Edge-induced pairing states in a Josephson junction through a spin-polarized quantum anomalous Hall insulator”

Phys. Rev. B 103, 184509 – 1-16 (2021).

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.184509>

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kobayashi Koji, Nomura Kentaro	4. 巻 3
2. 論文標題 Ferromagnetic-electrodes-induced Hall effect in topological Dirac semimetals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033023 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033023	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 Nguyen D.-H.-Minh, Kobayashi Koji, Wichmann Jan-Erik R., Nomura Kentaro	4. 巻 104
2. 論文標題 Quantum Hall effect induced by chiral Landau levels in topological semimetal films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045302 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045302	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 Kurebayashi Daichi, Araki Yasufumi, Nomura Kentaro	4. 巻 90
2. 論文標題 Microscopic Theory of Electrically Induced Spin Torques in Magnetic Weyl Semimetals	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 084702 ~ 084702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.084702	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 Ikeda Junya, Fujiwara Kohei, Shiogai Junichi, Seki Takeshi, Nomura Kentaro, Takanashi Koki, Tsukazaki Atsushi	4. 巻 4
2. 論文標題 Two-dimensionality of metallic surface conduction in Co <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> S <sub>2</sub> thin films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 117 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00627-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 Araki Yasufumi, Watanabe Jin, Nomura Kentaro	4. 巻 90
2. 論文標題 Nodal Lines and Boundary Modes in Topological Dirac Semimetals with Magnetism	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 094702 - 094702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.094702	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 Nakai Ryota, Nomura Kentaro	4. 巻 101
2. 論文標題 Weyl superconductor phases in a Weyl-semimetal/superconductor multilayer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094510 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094510	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 Satake Y., Shiogai J., Mazur G. P., Kimura S., Awaji S., Fujiwara K., Nojima T., Nomura K., Souma S., Sato T., Dietl T., Tsukazaki A.	4. 巻 4
2. 論文標題 Magnetic-field-induced topological phase transition in Fe-doped (Bi,Sb) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 044202 1 - 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.044202	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 Araki Yasufumi, Misawa Takahiro, Nomura Kentaro	4. 巻 2
2. 論文標題 Dynamical spin-to-charge conversion on the edge of quantum spin Hall insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023195 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023195	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 Arimoto Katsuhiko, Koretsune Takashi, Nomura Kentaro	4. 巻 103
2. 論文標題 Quantum anomalous Hall effect in a three-dimensional topological-insulator thin-film-ferromagnetic-metal heterostructure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235315 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.235315	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 Tanaka M., Watanabe K., Taniguchi T., Nomura K., Tarucha S., Yamamoto M.	4. 巻 105
2. 論文標題 Temperature-induced phase transitions in the correlated quantum Hall state of bilayer graphene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075427 1 - 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.075427	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 Ozawa Akihiro, Nomura Kentaro	4. 巻 6
2. 論文標題 Self-consistent analysis of doping effect for magnetic ordering in stacked-kagome Weyl system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 024202 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.6.024202	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 Kobayashi Koji, Nomura Kentaro	4. 巻 91
2. 論文標題 Intrinsic and Extrinsic Anomalous Hall Effects in Disordered Magnetic Weyl Semimetal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013703 1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.013703	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 Ito Naohiro, Nomoto Takuya, Kobayashi Koji, Mankovsky Sergiy, Nomura Kentaro, Arita Ryotaro, Ebert Hubert, Koretsune Takashi	4. 巻 105
2. 論文標題 Wannier-based implementation of the coherent potential approximation with applications to Fe-based transition metal alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125136 1 - 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.125136	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 Tomita S., Yao D.-P., Tsuchiura H., Nomura K.	4. 巻 12
2. 論文標題 Ab initio study on the possible magnetic topological semimetallic state in MnMg204	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035331 1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000317	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 Jin, Araki Yasufumi, Kobayashi Koji, Ozawa Akihiro, Nomura Kentaro	4. 巻 91
2. 論文標題 Magnetic Orderings from Spin-Orbit Coupled Electrons on Kagome Lattice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 083702 1 - 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.083702	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 Ohashi Ryoi, Nakai Ryota, Yokoyama Takehito, Tanaka Yukio, Nomura Kentaro	4. 巻 91
2. 論文標題 Andreev-like Reflection in the Pfaffian Fractional Quantum Hall Effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123703 1 - 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.123703	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 Wang Qiuyuan, Zeng Yi, Yuan Kai, Zeng Qingqi, Gu Pingfan, Xu Xiaolong, Wang Hanwen, Han Zheng, Nomura Kentaro, Wang Wenhong, Liu Enke, Hou Yanglong, Ye Yu	4. 巻 6
2. 論文標題 Magnetism modulation in Co3Sn2S2 by current-assisted domain wall motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Electronics	6. 最初と最後の頁 119 ~ 125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41928-022-00879-8	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 該当する

1. 著者名 Seki Takeshi, Lau Yong-Chang, Ikeda Junya, Fujiwara Kohei, Ozawa Akihiro, Iihama Satoshi, Nomura Kentaro, Tsukazaki Atsushi	4. 巻 5
2. 論文標題 Enhancement of spin-charge conversion efficiency for Co3Sn2S2 across transition from paramagnetic to ferromagnetic phase	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013222 1 - 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013222	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 Lau Yong-Chang, Ikeda Junya, Fujiwara Kohei, Ozawa Akihiro, Zheng Jiaxin, Seki Takeshi, Nomura Kentaro, Du Liang, Wu Quansheng, Tsukazaki Atsushi, Takanashi Koki	4. 巻 108
2. 論文標題 Intercorrelated anomalous Hall and spin Hall effect in kagome-lattice Co3Sn2S2-based shandite films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064429 1 - 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.064429	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 Nakai Ryota, Nomura Kentaro	4. 巻 108
2. 論文標題 Higher-order topological superconductor phases in a multilayer system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184517 1 - 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.184517	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 Ozawa Akihiro, Kobayashi Koji, Nomura Kentaro	4. 巻 21
2. 論文標題 Effective Model Analysis of Intrinsic Spin Hall Effect with Magnetism in the Stacked Kagome Weyl Semimetal Co3Sn2S2	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014041 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.21.014041	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 Meguro Tomonari, Ozawa Akihiro, Kobayashi Koji, Nomura Kentaro	4. 巻 93
2. 論文標題 Effective Tight-Binding Model of Compensated Ferrimagnetic Weyl Semimetal with Spontaneous Orbital Magnetization	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034703 1 - 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.93.034703	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0件

〔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
研究分担者	荒木 康史  (Araki Yasufumi)  (10757131)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究副主幹   (82110)	
研究分担者	佐藤 正寛  (Sato Masatoshi)  (90425570)	千葉大学・大学院理学研究院・教授   (12501)	
研究分担者	三澤 貴宏  (Misawa Takahiro)  (10582687)	早稲田大学・理工学術院・主任研究員 (研究院准教授)   (32689)	

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