

二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出  
2016 年度採択研究代表者

2020 年度 年次報告書
------------------

川崎 雅司

東京大学 大学院工学系研究科  
教授

トポロジカル絶縁体ヘテロ接合による量子技術の基盤創成

## § 1. 研究成果の概要

本研究では、トポロジカル絶縁体と呼ばれる特殊な物質で可能となる、試料の端(エッジ:3次元試料の表面や2次元試料の辺)に生じるエネルギー散逸がほとんどない電子流について、理論設計・物質合成・物性評価・機能開拓と一貫通貫の研究を行い、エレクトロニクス応用への可能性を明らかにすることを目標としている。これまでに、強磁性トポロジカル絶縁体の磁壁に沿って生じる非散逸電子流を検出し、さらに磁壁の位置を人為的に制御することに成功した。また、トポロジカル絶縁体のみならず、類似の化学的性質や結晶構造を有する超伝導体・強誘電体・強磁性体・ディラック半金属などとのヘテロ接合の形成により、その機能設計の自由度を大きく広げてきた。

本年度の実験研究では、エッジ流を起源とする非相反伝導現象の検出や電流誘起磁化反転に成功してトポロジカルスピントロニクス機能を拡張するとともに、量子異常ホール効果により ppb 精度の抵抗標準としての応用に目処をつけた。さらに、ダブルゲートデバイスによりディラック半金属における試料の表裏の表面間を貫通するワイル軌道の存在を直接検証した。

理論研究では、トポロジカル物質の非線形光伝導とマヨラエッジの光学応答の定式化に成功して機能開発実験への指針を明らかにし、キタエフ p 波トポロジカル超伝導やパラフェルミオンをシミュレートする電気回路の設計にも成功した。

前者の実験研究の成果は、トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の機能開発や応用への道を切り開く成果である。後者の理論研究の成果は、トポロジカル超伝導の実現を目指す実験へ指針を与えるとともに、電気回路を用いたマヨラナ粒子のブレイディングによるトポロジカル量子計算の可能性を開くものである。これらを統合することで、本研究課題の一層の発展が期待できる。

## § 2. 研究実施体制

### (1)「作製」グループ

- ① 研究代表者:川崎 雅司 (東京大学 大学院工学系研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・トポロジカル絶縁体ヘテロ構造の作製と雛形デバイスの構築

### (2)「物性」グループ

- ① 主たる共同研究者:十倉 好紀 (東京大学 大学院工学系研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・トポロジカル絶縁体量子機能実証とスピントロニクス応用

### (3)「理論」グループ

- ① 主たる共同研究者:江澤 雅彦 (東京大学 大学院工学系研究科、講師)
- ② 研究項目
  - ・トポロジカル界面を用いた量子機能設計と新奇トポロジカル・デバイス原理構築

### 【代表的な原著論文情報】

1. Junyeong Ahn, Guang-Yu Guo, and Naoto Nagaosa, “Low-Frequency Divergence and Quantum Geometry of the Bulk Photovoltaic Effect in Topological Semimetals”, *Phys. Rev. X* 10, 041041 (2020).
2. K. Yasuda, T. Morimoto, R. Yoshimi, M. Mogi, A. Tsukazaki, M. Kawamura, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, N. Nagaosa, and Y. Tokura, “Large non-reciprocal charge transport mediated by quantum anomalous Hall edge states”, *Nat. Nanotechnol.* 15, 831 (2020).
3. M. Ezawa, “Edge-Corner Correspondence: Boundary-Obstructed Topological Phases with Chiral Symmetry”, *Phys. Rev. B* 102, 121405 (2020).
4. S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Taguchi, M. Kawasaki, “Intrinsic coupling between spatially-separated surface Fermi-arcs in Weyl orbit quantum Hall states”, *Nat. Commun.* 12, 2572 (2021).
5. M. Kawamura, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, “Current scaling of the topological quantum phase transition between a quantum anomalous Hall insulator and a trivial insulator”, *Phys. Rev. B* 102, 041301 (2020).
6. M. Mogi, Y. Okamura, M. Kawamura, R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, T. Morimoto, N. Nagaosa, M. Kawasaki, Y. Takahashi, Y. Tokura, “Experimental signature of parity anomaly in semi-magnetic topological insulator”, submitted.
7. Y. Okamura, S. Minami, Y. Kato, Y. Fujishiro, Y. Kaneko, J. Ikeda, J. Muramoto, R. Kaneko, K. Ueda, V. Kocsis, N. Kanazawa, Y. Taguchi, T. Koretsune, K. Fujiwara, A. Tsukazaki, R. Arita, Y. Tokura, Y. Takahashi, “Giant magneto-optical responses in magnetic Weyl semimetal  $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ”, *Nature Commun.* 11, 4619 (2020).
8. M. Mogi, K. Yasuda, R. Fujimura, R. Yoshimi, N. Ogawa, A. Tsukazaki, M. Kawamura, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, “Current-induced switching of proximity-induced ferromagnetic surface states in a topological insulator”, *Nat. Commun.* 12, 1404 (2021).
9. Y. Nakazawa, M. Uchida, S. Nishihaya, M. Ohno, S. Sato, M. Kawasaki, “Enhancement of spin-orbit coupling in Dirac semimetal  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  films”, *Phys. Rev. B.* 103, 045109 (2020).