

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

2019 年度 実績報告書

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(中味は絶縁体で表面に有効質量がほぼゼロでスピンと運動量が直行した電子が存在する金属)で可能とな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、トポロジカル絶縁体に磁石の性質を付与することで、磁化の向きの異なる境界(磁壁)に非散逸電子量が生じることを確認し、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。

本年度は、これまで良質の薄膜作製による量子ホール効果の観測と、元素置換や電界効果トランジスタによる量子ホール状態の制御に成功したディラック半金属(CdZn)₃As₂について、100nm程度の厚い試料でバルク由来と表面由来の量子輸送を独立に観測し、カイラルゼロモードの存在を実験的に検証した[1]。

また、トポロジカル量子計算の可能性を明らかにするために、トポロジカル超伝導体の実現を目指す一貫として、(BiSb)₂Te₃/FeTe ヘテロ接合界面に発現する超伝導状態について調べ、スピン軌道相互作用が大きく反転対象の破れた系に特徴的な非相反超伝導現象を見出した[2]。

さらに、電気回路のラプラシアンをKitaev・トポロジカル超伝導体のハミルトニアンに対応するように設計する事で、マヨラナ粒子状のトポロジカル状態を電気回路でシミュレートできる事を明らかにした。ブレイディングを実行する事でイジング・エニオンの統計性を持つ事をベリー位相の計算により示した[3]。

前2者の成果は、トポロジカル絶縁体を基軸とするヘテロ構造の要素技術を、CREST 後半で計画している量子技術基盤につなげる成果であり、今後はトポロジカルスピントロニクスやトポロジカル超伝導等への展開が期待できる。また、後者は、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。

【代表的な原著論文】

- [1] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, R. Kurihara, K. Akiba, M. Kriener, A. Miyake, Y. Taguchi, M. Tokunaga, M. Kawasaki, “Quantized surface transport in topological Dirac semimetal films” Nat. Commun. **10**, 2564 (2019).
- [2] K. Yasuda, H. Yasuda, T. Liang, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, N. Nagaosa, M. Kawasaki, and Y. Tokura, “Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface” Nat. Commun. **10**, 2734 (2019).
- [3] Motohiko Ezawa, “Braiding of Majorana corner states in electric circuits and its non-Hermitian generalization” Phys. Rev. B **100**, 045407 (2019).

§ 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