

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  
平成 28 年度採択研究代表者

2018 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することを計画している。

本年度は、Te 化物であるトポロジカル絶縁体と相性の良い強誘電性かつ強磁性(マルチフェロイックス)である(Ge,Mn)Te 薄膜の作製に成功し、反転対称性の破れた強誘電ラッシュバ効果で分裂した電子構造を利用して、電流により磁化の向きを反転させることに成功した[1]。

また、これまではトポロジカル絶縁体に磁性元素をドーピングして強磁性を付与したが、非磁性のトポロジカル絶縁体と非トポロジカルな強磁性体の接合界面を利用するために、後者の候補物質である  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  の薄膜化に成功した[3]。

さらに、これまで良質の薄膜作製と量子ホール効果の観測に成功したディラック半金属である  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  について、Zn による Cd サイトの置換により、バンド構造のトポロジカルな性質の制御に成功し、さらに電界効果型トランジスタによる量子ホール状態の制御に成功した[3]。

前二者の成果は、トポロジカル絶縁体を基軸とするヘテロ構造の作製に重要な要素技術であり、今後はトポロジカルスピントロニクス等への展開が期待できる。さらに、オール Te 化物ヘテロ接合に関して、物質科学の大きな進展を明示する成果と言える。後者のディラック半金属は、トポロジカル絶縁体をはじめ、各種のバンド構造を有するトポロジカル物質群の最も基礎となる母物質であり、ヘテロ接合を活用した物質開拓と物性・機能開発に大きな展開が期待できる。

### 【代表的な原著論文】

- [1] R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura “Current-driven magnetization switching in ferromagnetic bulk Rashba semiconductor (Ge,Mn)Te” *Science Advances*, **4**, eaat9989-1-6 (2018)
- [2] M. Mogi, A. Tsukazaki, Y. Kaneko, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura “Ferromagnetic insulator  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  thin films with perpendicular remanence” *APL Materials*, **6**, 091104-1-8 (2018)
- [3] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Nakazawa, M. Kriener, Y. Kozuka, Y. Taguchi, and M. Kawasaki “Gate-tuned quantum Hall states in Dirac semimetal  $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)_3\text{As}_2$ ” *Science Advances* **4**, eaar5668-1-8 (2018)

## § 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

### (2)「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