

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「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」  
研究課題「トポロジカル絶縁体へテロ接合による  
量子技術の基盤創成」

## 研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年3月

研究代表者: 川崎 雅司  
(東京大学大学院工学系研究科 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1)実施概要

固体中の電子をトポロジーの観点から見ることは今日の物性物理学における最先端の主題であり、そこでは非散逸性電子流など、エレクトロニクスにとって潜在的に有用な新概念が数多く現れている。特に、トポロジカル物質では系の表面や界面といった二次元でその特質が最も顕著に発現する。本研究では、主に二次元原子層物質である  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$  トポロジカル絶縁体を基軸とし、ヘテロ接合界面での磁性・強誘電性・超伝導がもたらす新奇な現象を設計し、テルル化物のヘテロ接合にて実証するとともに、超低消費エネルギーデバイスや度量衡標準に資するユニークな量子デバイスなどの新原理の確立を目指した。全ての研究は、理論による設計・解析、薄膜ヘテロ構造の構築、最先端手法を重畳した物性・機能の評価を三位一体とし、以下の4項目を推進した。

#### **1. 物質設計・接合作製の基盤構築:**

新規トポロジカル物質や界面構造の理論設計と薄膜・界面作製を平行して進めた。実験では、トポロジカル絶縁体を中心に、強磁性体、強誘電体、超伝導体など、テルル化物を基軸にヘテロ接合の形成技術確立し、界面物性を調べて以下のデバイス機能実証の基盤とした。

#### **2. 非散逸エッジ流素子の開発:**

強磁性トポロジカル絶縁体で発現する、ゼロ磁場での量子ホール効果、すなわち、量子化異常ホール効果のデバイス構造の最適化や物性・機能の詳細を調べ、トポロジカル電子流の検出とその制御法を開拓した。検出には、非局所輸送現象、顕微磁気分光、プローブ顕微鏡などを総合的に活用、磁壁の位置制御法として、局所磁化反転、電流注入、電界によるエッジ流制御などを実証した。永久磁石の磁場によって量子化したホール抵抗値の精度がフォンクリッチング定数 ( $25812.807\ 455\Omega$ ) に ppb オーダーで合致する標準抵抗器を実証した。

#### **3. トポロジカルスピントロニクスの開発:**

磁化とディラック電子の結合運動方程式を数値的に解析して、磁化の電場駆動、スピン注入、スピンプンプ、光磁気操作などの機能・効果を、理論的に予言し実験的に検証した。具体的には、界面における高効率のスピン-電荷変換機能や量子化マルチフェロイクス効果の実証など。

#### **4. トポロジカル界面新機能の開発:**

トポロジカル絶縁体と強磁性体や超伝導体を接合させた系などについて、理論設計、ヘテロ構造の構築、物性機能の評価を総合的に推進し、それぞれ量子化異常ホール効果や非相伝導の発現について詳細を明らかにした。後者はトポロジカル量子コンピューティングを可能にする期待されているマヨラナ粒子系への発展の可能性を秘めており、今後も理論と実験の緊密な共同研究が必須となっている。また、当初計画には想定していなかった成果として、インダクター、コンデンサー、抵抗、アンプ、などの電子素子を組み合わせた電気回路を用いることで、トポロジカル量子コンピューティングに類似の機能発現が可能であることを理論的に見出した。

本研究計画の骨子は、トポロジカル量子工学の学理構築により、省エネルギーエレクトロニクスの基礎を確立することにある。半導体の量子効果は、20世紀後半に理論研究、高度な試料作製技術、物性実験が三位一体となって進展して、半導体レーザー・無線通信・単電子操作・量子計算などへと発展し、多数のブレークスルーを惹起した。波動関数の位相を起源とするトポロジカル流の量子効果は、まだまだその端緒であるが、本研究によって技術基盤の整備が進んだと考える。波動関数のトポロジーにより守られた、ゼロ磁場・高温の量子ホール効果やスピントロニクス機能は産業上の意義もおおいに期待できる。また、電気回路を用いたトポロジカル量子コンピューティングの可能性は、実験的検証を含めた次のフェーズに研究開発が進んでいくことを期待する。

## (2) 顕著な成果

### < 優れた基礎研究としての成果 >

#### 1. テルル化物をベースとする二次元系ヘテロ接合技術の確立

概要:トポロジカル絶縁体である二次元物質  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$  とその磁性元素 ( $\text{Mn}$ ,  $\text{V}$ ) を変調ドーピングした強磁性体を中心に、いずれもテルル化物である強磁性体、強誘電体、超伝導体など多彩な物質系との原子レベルで急峻・平坦なヘテロ接合作製技術を確立し、界面で創発する多様な量子現象を理論的に設計、実際に作製し、その物性や機能を定量的に評価し実証した。代表的な物性・機能として、量子化異常ホール効果の安定化と抵抗標準の実証、スピン軌道トルクを用いた電流磁化反転、アクシオン絶縁体の創成、界面超伝導の具現化と非相反伝導の解明およびトポロジカル超伝導体実現へのプラットフォームの整備などである。

#### 2. 磁性変調ドーピングによるトポロジカル絶縁体に特有な量子機能の実証

概要:約 10 分子層(厚さ 10nm)のトポロジカル絶縁体薄膜について、最表面の次の分子層(厚み 1nm)だけに選択的に磁性元素をドーピングする手法を確立した。最表面に現れる線形分散を持つワイル電子状態に磁性不純物による悪影響を与えず、しかし磁性元素による交換相互作用を十分に伝達して線形分散に交換ギャップを開けることにより、極めて安定な量子化異常ホール効果を実現した。また、表裏の磁性元素を  $\text{Cr}$  と  $\text{V}$  ドーピングに分けることにより、抗磁力に十分なコントラストを与えることで、安定なアクシオン絶縁体状態を実現した。 $\text{GaAs}$  ヘテロ接合での二次元電子系において高度な量子ホール物性研究や高移動度トランジスタ応用研究を可能にしたドナーの変調ドーピングの磁性版として適用範囲の広い貴重な手法を確立したと言える。

#### 3. ディラック半金属をベースにしたトポロジカル量子物性の開拓

概要:トポロジカルディラック半金属では、対称性や次元性を変化させる外部制御によってトポロジカル相転移を引き起こし、さまざまなトポロジカル状態と量子伝導を実現できると期待されている。その理想的な系としてディラック半金属の典型物質である  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  に注目し、量子閉じ込めの井戸幅や化学置換によるスピン軌道相互作用のチューニング、および電界効果によりバンドトポロジーと量子伝導の制御に初めて成功した。さらに、カイラルゼロモードと呼ばれるバルク内部の電子状態を介した試料の表裏双方の表面状態を繋ぐサイクロトロン運動(ワイル軌道)の存在を二重ゲート構造によって初めて証明した。

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

#### 1. 永久磁石を用いた ppb 精度の標準抵抗の実証

概要:本 CREST 研究で作製したデバイスを、日本の度量衡を担当する産総研の量子電気標準グループが評価した共同研究により、永久磁石により発現する量子化異常ホール効果のホール抵抗値がフォンクリッチング定数( $25812.807\ 455\Omega$ )と ppb オーダーで一致することを実証した。フォンクリッチング定数は電気抵抗の標準として用いられ、現在は強磁場環境で発現する量子ホール効果を用いて実装されている。これを量子異常ホール効果で置き換えることができれば、磁場が不要なため、安価で簡便な設備で標準抵抗器を実現できる。質量の標準もキログラム原器からフォンクリッチング定数を用いた一種の天秤に変更されているので、度量衡標準の広い普及により科学技術イノベーションに大きく寄与する。

#### 2. 電気回路によるトポロジカル量子計算の提案

概要:量子超越の報道で熱気を帯びる量子計算ではあるが、エラー訂正が必要な量子ゲート型方式では万能計算機の実現までには困難な課題が予想されている。一方で、トポロジカル量子計算では原理的にエラーの問題を軽減できるが、まだマヨラナ粒子の検出を狙う基礎研究の段階であり、マヨラナ粒子を検出したと主張する成果発表に関して様々な議論が成されて

いる。本 CREST プロジェクトで提案した、インダクター、コンデンサー、抵抗、アンプなどを要素とする格子状の電気回路を用いたトポロジカル量子計算の可能性は、まだまだ未解明な点もあるものの、シリコンテクノロジーによる集積化との親和性が高く、室温動作が可能な新原理と言える。今後の進展によって、科学技術イノベーションに大きく寄与する可能性がある。

### 3. トポロジカルスピントロニクス の 基盤実証

概要:トポロジカル絶縁体では、独特かつ多彩なスピントロニクス機能が実現できる。表面電子のスピント運動量が垂直にロックしており、高効率電荷スピン変換や電磁波によるスピン流生成が可能となる。また、強いスピン軌道相互作用は強力なスピン軌道トルクの発生が可能となり、量子化異常ホール状態の符号を電流で逆転することができる。さらに、磁気光学効果の量子化版の実証や、アキシオン絶縁体、半整数パリティ異常など、テラヘルツ領域のスピントロニクス機能の実証も行った。通常の金属磁性体では不可能であり、多彩で巨大なトポロジカル物質に特有な機能の設計と実証を行い、トポロジカルスピントロニクスの基盤を構築したと言える。

#### < 代表的な論文 >

1. K. Yasuda, M. Mogi, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, F. Kagawa and Y. Tokura, “Quantized chiral edge conduction on domain walls of a magnetic topological insulator” *Science* 358, 1311-1314 (2017).

概要:磁性トポロジカル絶縁体の量子異常ホール状態では、磁区の端に散逸を伴わないトポロジカル電流が生じる。このようなトポロジカル電流を制御する新たな手法として、磁区の境界である磁壁に注目し、磁気力顕微鏡による磁区構造の書き込みと、磁壁におけるトポロジカル電流の抵抗値による検出に成功した。この結果は非散逸なトポロジカル電流からなる回路が自在に設計できることを意味しており、非散逸電子流を用いた新たな動作原理からなるスピントロニクスデバイスの基礎を実証したと言える。

2. M. Ezawa, “Braiding of Majorana corner states in electric circuits and its non-Hermitian generalization” *Phys. Rev. B* 100, 045407 (2019).

概要:現在、量子計算機実現に向けて、様々な方式が試みられている。しかし、室温での動作が期待できず、大規模化が困難であるなどの問題がある。一方、電気回路を用いて量子計算がシミュレートできるなら、既存技術を用いて、微細集積化可能で、室温で動作し、携帯可能、かつ安価に大量生産可能な量子計算機が実現できる。この様な量子計算機の実現を可能にする新たな原理を提案した。大きな社会的・経済的波及効果が期待でき、今後の集中的な研究開発が望まれる。

3. Y. Okazaki, T. Oe, M. Kawamura, R. Yoshimi, S. Nakamura, S. Takada, M. Mogi, K. S. Takahashi, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Tokura, N. H. Kaneko “Towards quantum resistance standard with a permanent magnet” *Nature Physics*, 18 25-29 (2022).

概要:量子ホール状態ではホール抵抗値がフォンクリッチング定数 ( $25812.807\ 455\ \Omega$ ) に量子化し、抵抗標準器として用いられている。しかし、GaAs の二次元電子系では超伝導磁石で発生する 10T の強磁場と  $^3\text{He}$  で冷却する 0.5K 以下の極低温が必要である。磁性トポロジカル絶縁体の量子異常ホール効果は原理的にゼロ磁場で実現するので、安価で簡便な設備で標準抵抗器を実現できる可能性がある。量子化異常ホール効果の電流や熱による破壊過程を统一的に理解し、安定化するヘテロ接合の最適化を行い、永久磁石を用いた量子化の評価技術や超高精度の抵抗計測技術を開発し、誤差が ppb オーダーの精度を有する抵抗標準の実証に成功した。量子化異常ホール効果について応用が可能なレベルの初めての实証例である。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「作製」グループ

研究代表者: 川崎 雅司 (東京大学工学系研究科 教授)

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

主たる共同研究者: 十倉 好紀 (東京大学工学系研究科 教授)

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

主たる共同研究者: 江澤 雅彦 (東京大学工学系研究科 講師)

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

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- ・産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門  
金子晋久 首席研究員、岡崎雄馬 主任研究員
- ・磁性トポロジカル絶縁体の量子化異常ホール効果について抵抗標準の可能性を評価  
東京大学 物性研究所 国際超強磁場科学研究施設 徳永将史 准教授
- ・トポロジカル物質の超強磁場 (~60T) における物性評価  
ケルン大学 物理学科安藤陽一教授
- ・磁性トポロジカル絶縁体の MBE 成長に関する情報共有