

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	トポロジカル絶縁体による革新的デバイスの創出
研究機関・部局・職名	大阪大学・産業科学研究所・教授
氏名	安藤 陽一

## 【研究目的】

トポロジカル絶縁体は、内部は電気を通さない絶縁体なのに表面には、特殊なスピン偏極を持ち、低損失で電気が流れる、電流を流す方向によってスピンの向きを制御できるなどの特徴を有する。トポロジカル絶縁体はその存在が知られるようになってから日が浅いが、固体における新しいトポロジカル量子状態として非常に興味深い物理を示すことが理論的に予想されていることから学術的に重要であると同時に超省エネ型スピントロニクスや擾乱に強いトポロジカル量子コンピュータへの応用の可能性があり、グリーン・イノベーションに大きく貢献することが期待されている。しかしトポロジカル絶縁体は数が限られていること、既存の物質では、バルクの絶縁性が低く、表面状態を調べる上での大きな障害があった。

本研究は、国際競争力の高い研究プログラムを展開し、トポロジカル絶縁体における新奇な量子現象を世界に先駆けて観測・解明し、超省エネ型スピントロニクス素子や擾乱に強いトポロジカル量子コンピュータの実現に向けたトポロジカル絶縁体の学理の確立とデバイス応用の基礎の構築を行うことを目的としており、具体的に次の5項目を具体的な目標に掲げている。(1) 試料のバルク絶縁性の確保、(2) 表面ディラック粒子の物性解明、(3) トポロジカル超伝導状態の検証、(4) 表面スピン流の直接観測、(5) 新奇な電気磁気効果の検証と解明。

## 【総合評価】

<input type="checkbox"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="checkbox"/>	一定の成果が得られている
<input type="checkbox"/>	十分な成果が得られていない

## 【所見】

## ① 総合所見

本研究は、トポロジカル絶縁体における新奇な量子現象を、学理的により深く世界に先駆けて観測・解明することを企図し、トポロジカル絶縁体の特長を利用した革新的な情報処理デバイスを実現させ、グリーン・イノベーションに大きく貢献することを目的としており、5つの具体的な目標を挙げて行われた。

特筆すべき成果として、(i)  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ 、 $\text{Bi}_{2-x}\text{SbxTe}_3-y\text{Se}_y$  においてバルク絶縁性が高いことを見出し、結晶成長条件の最適化により表面電気伝導度がバルク電気伝導度を上回る試料を世界で初めて実現、(ii)  $\text{TlBi}(\text{S}, \text{Se})_2$  においてトポロジカル絶縁体と普通の絶縁体との間の量子相転移を観測すると共にその層境界でディラック粒子が質量を獲得する得な現象を見出した、(iii) 高品位な  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の作製に成功し、表面電気伝導のトポロジカル保護」を世界で初めて実証に成功、(iv) 「トポロジカル結晶絶縁体」という新規なトポロジカルをもつ物質の実証、(v) 高品位な  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  超伝導体試料の合成に成功し、BCS 理論に従わない非従来型を示すことを示唆し、さらに表面微分コンダクタンス測定をとおして、この超伝導体が表面にマヨラナ粒子の出現を伴う時間反転対称トポロジカル超伝導体であることの発見、等が挙げられる。これらにより、当初の目標の(1)～(3)は十分クリアしたと考えられ、トポロジカル絶縁体における新奇な量子現象の学理を世界に先駆けて観測・解明するという目標達成に向けて大きく貢献したことは明らかである。

残る 2 課題に対しても研究が進行中であったが、研究期間を 1 年残して新たに採択された研究費のため本研究が廃止されたことは、大変残念であるが、新たな研究助成を受けて残る 2 課題の研究が引き継がれ、大きく進展することは、十分期待される。

## ② 目的の達成状況

・ 所期の目的が

( 全て達成された ・  一部達成された ・  達成されなかった)

本研究は、トポロジカル絶縁体における新奇な量子現象を、学理的により深く世界に先駆けて観測・解明することを企図し、トポロジカル絶縁体の特長を利用した革新的な情報処理デバイスを実現させ、グリーン・イノベーションに大きく貢献することを目的としており、具体的な目標として (1) 試料のバルク絶縁性の確保、(2) 表面ディラック粒子の物性解明、(3) トポロジカル超伝導状態の検証、(4) 表面スピン流の直接観測、(5) 新奇な電気磁気効果の検証と解明の 5 つが掲げられている。

(1)に関しては、 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ 、 $\text{Bi}_{2-x}\text{SbxTe}_3-y\text{Se}_y$  においてバルク絶縁性が高いことを見出し、結晶成長条件の最適化により表面電気伝導度がバルク電気伝導度を上回る試料を世界で初めて実現したことで十分達成しているといえる。また(2)に関しては、 $\text{TlBi}(\text{S}, \text{Se})_2$  においてトポロジカル絶縁体と普通の絶縁体との間の量子相転移を観測すると共にその層境界でディラック粒子が質量を獲得する得な現象を見出したこと、さらには、高品位な  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の作製に成功し、表面電気伝導のトポロジカル保護」を世界で初めて実証に成功したこと、「トポロジカル結晶絶縁体」という新規なトポロジカルをもつ物質の実証など、数々の成果が挙げられており、十分達成されているといえる。(3)に関しては、高品位な  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  超伝導体試料の合成に成功し、BCS 理論に従わない非従来型を示すことを示唆すると共に、表面微分コンダクタンス測定を通して、この超伝導体が表面にマヨラナ粒子の出現を伴う時間反転対称トポロジカル超伝導体であることの発見したことで、十分達成したと判断できる。

以上より(1)～(3)の課題に対しては、世界的にトップレベルの成果が挙げたと判

断できるが、(4)、(5)の課題に関しては研究が進行中であったが、最終年度を残して研究が廃止されたため、未達成の課題が残ったことは残念であった。しかしながら、大きな目的の1つであったトポロジカル絶縁体の学理の確立という観点では、大きな成果があったと考えられる。

### ③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が  
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が  
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

具体的研究目標の(1)～(3)については、いずれの項目においても世界的に大きな注目を浴びる成果を挙げ、これによってトポロジカル絶縁体の学理の確立という目的はほぼ達成されている。

#### (1) 試料のバルク絶縁体の確保

本申請者等によって発見されたトポロジカル絶縁体としての  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  の関連物質である  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$  において、前物質を上回るバルク絶縁性を示す一連の組成を発見し、さらに結晶成長条件の最適化により、表面電気伝導度がバルク電気伝導度を上回る試料を世界で初めて実現している。これらの結果は、本課題の重要目標であった「バルク絶縁性の十分に高い高品質単結晶試料の実現」を達成したといえる。さらに本物質は、バルク絶縁性を保ちながらディラック粒子の電荷の符号を自在に制御する Dirac-cone engineering の実現にも成功している。

#### (2) 表面ディラック粒子の物性解明

$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  の関連物質である  $\text{TlBi}(\text{S}, \text{Se})_2$  において、トポロジカル絶縁体と普通の絶縁体との間の量子相転移を実現し、その相境界においてディラック粒子が質量を獲得する予想外の現象を発見した。さらに、デバイス開発に重要な  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜の作製を MBE 方法を用いて成功し、このトポロジカル絶縁体において理論的に予想された「表面電気伝導のトポロジカル保護」の実現に世界で初めて成功した。これらの成果により「表面ディラック粒子の物性解明」という目標も高いレベルで達成されたものと判断できる。

さらに、当初の目的の他に得られた特筆すべき結果として、学術上、これまでのトポロジカル絶縁体とは異なる新しいトポロジーで守られた「トポロジカル結晶絶縁体」という新奇なトポロジカル物質の存在を世界で初めて実証し、トポロジカル物質の概念を拡張する重要な特筆すべき成果と考えられる。

#### (3) トポロジカル超伝導状態の検証

トポロジカル超伝導体として注目を集めていた  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の高品質試料を得ることに成功し、超伝導状態における初の電子比熱測定の結果、超伝導状態が通常の BCS 理論には従わない、非従来型のものである可能性が高いことを明らかにした。さらに、本材料を用いての表面微分コンダクタンス測定を行い、この超伝導性が表

面にマヨラナ粒子の出現を伴う時間反転対称トポロジカル超伝導体の最初の具体例であることを見出した。

これにより、「トポロジカル超伝導状態の検証」という目標を達成している。さらに  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  が、やはり時間反転対称トポロジカル超伝導体であることを見出している。

これらの基礎学理の解明の研究と並行して、デバイス応用のための基礎研究が進められている。この薄膜を利用して、電界効果デバイスの研究やスピン流検出用ナノデバイスを作製の研究が行われているが、まだ、成果には結びついていない。

本課題は、研究費の重複受給制限のために廃止となり、本課題の成果に基づく科学研究費助成事業基盤研究(S)に引き継がれ、更なる深化、発展が期待される。

#### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

物理的先進性を示す結果として、世界最高のバルク絶縁性を示すトポロジカル絶縁体である  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$  の開発に成功し、表面電気伝導度がバルク電気伝導度を上回る「表面支配伝導」を世界で初めて実現している。さらに、明確な量子振動 (Shubnikov-de Hass 振動) を示す高移動度  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜を MBE 法により世界で初めて成功させたことは、トポロジカル絶縁体の基礎、応用両面でのブレークスルーとなる。また、「トポロジカル結晶絶縁体」の存在を世界で初めて実証し、トポロジカル物質の概念に新風を巻き起こしたこと、時間反転対称トポロジカル超伝導体の具体例を世界で初めて見出したこと等はトポロジカル超伝導の研究を実験的に進めることを可能にした。以上のような物理成果は、トポロジカル絶縁体の学理の解明上、非常に重要な貢献と考えられる。

研究成果の社会的・経済的課題の解決への具体的な貢献としては、本課題で得られた成果は、これまでのところ基礎物理学に関するものであり、これらの研究の発展は将来的にトポロジカル量子現象を利用する省エネルギー型デバイス技術の開発に役立つと期待されるものの、これらの研究は、まだ端緒についたばかりであり、直ちにグリーン・イノベーションの推進に役立つかどうか、即ち、社会的・経済的な問題解決に直接役立つか判断するには時期尚早と言わざるを得ない。

#### ⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

本研究は、研究代表者の研究室メンバーによる試料作製から物性測定に至る実験的研究と研究室外の理論家とのコラボレーションにより実施されているが、優れた研究目標の達成状況から、研究遂行に関して適切なマネジメントが行われたと判断できる。

当初予定の研究期間を全うせずに廃止され、基盤研究(S)へ移行することになったことは、本プログラムの遂行という観点では大変残念であるが、新たな研究助成の元で更なる研究の成果を期待したい。

一方、研究成果の発信としては、雑誌論文：30件、会議発表：90件と量的にも非常に多く、質的に極めて高いものが多く、十分と判断できる。ただし将来エレクトロニクスの核となる物理工学的な概念は、知的財産権として出願すべきと考えられる、知的財産権の出願が0件（取得済0件、出願中0件）である点には不満が残る。

国民との科学・技術対話は、十分とは言えないが、サイエンスカフェ等を通して2度ほど実施している。内容が基礎学理寄りであり、高度な内容を含むことから、無理からぬ点もあるが、より多くの対話を行うことが望まれる。