

## 平成27年度 新学術領域研究（研究領域提案型）事後評価結果（所見）

### 研究領域名

対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象

### 研究期間

平成22年度～26年度

### 領域代表者

前野 悦輝（京都大学・大学院理学研究科・教授）

### 研究領域の概要

物性物理学研究の顕著な潮流の一つは、量子状態の多重構造などトポロジカルに特徴づけられる状態が起源となって発現する新奇現象の発見・解明である。本新学術領域の目的は、対称性の破れた量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカルに特徴付けられる新奇現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、新たな学術領域を形成することである。研究対象とする主な物質系は、(A) 時間反転対称性の破れた超伝導体、(B) スピン三重項超流動体、(C) 空間反転対称性の破れのもと強いスピン軌道相互作用をもつ超伝導体・絶縁体である。それらに固有の顕著な量子現象の理解を礎に、分野横断的研究連携によって、表面・界面の束縛状態やエッジ流をはじめとするトポロジカル量子現象の包括的な物性解明を目指す。

### 領域代表者からの報告

#### 1. 研究領域の目的及び意義

本新学術領域の研究目的は、対称性の破れた量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカルに特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、新たな学術領域を形成することである。

その研究対象は、凝縮体のかたまり「バルク」の対称性破れに物理学の重要課題を含む超伝導体や超流動体、そしてトポロジカルな新奇現象が発現する舞台として「エッジ」と名付けられるそれらの表面・界面である。「バルク」で創発する対称性の破れた量子現象に対する徹底的な理解は、「エッジ」での量子現象の本質をトポロジーの観点から理解するための第一ステップといえる。

本領域では当該の各分野で世界をリードする研究者を結集し、異分野連携を格段と強化することでトポロジカル量子現象の新学術分野を一気に拡大する。トポロジカル量子現象の物理は、純粋にアカデミックな研究対象としての価値に留まらず、スピントロニクスや量子コンピュータなど、将来の高度な応用科学にとっても重要な基礎となると期待される。

本領域で対象にする主な物質系は、(A) 時間反転対称性の破れた超伝導体、(B) スピン三重項超流動体、(C) 空間反転対称性の破れた超伝導体・絶縁体で、それらに太い横糸を通す形で(D) トポロジカル凝縮体の量子現象の理論を展開する。このために計画研究 A01, B01, C01, D01 の各班を設けるとともに、公募研究によって研究の一層の進展を目指す。

## 2. 研究の進展状況及び成果の概要

本領域が新しい言葉も導入して提唱した「トポロジカル量子現象」は、その内容の実体がこの5年間で世界的にも広く認知されるものとなり、さらなる展開に向けて世界で活発に研究されている。その中で、超伝導体・絶縁体だけでなく、超流動体・冷却原子系も含めた世界的にも他に例を見ない分野融合型プロジェクトを、我が国が世界に先駆けて推進した。

本新学術領域研究では当初の予想を超えて、以下のような様々な研究成果を通じて、トポロジカル量子現象の開拓と発展に寄与した。主な例を挙げると：

①物質内部の絶縁性の高いトポロジカル絶縁体の開発とトポロジカル表面状態の存在・特性の実証・確立、②トポロジカル結晶絶縁体の実証及びそれに基づく超伝導体の発見、③トポロジカル超伝導体やトポロジカル超流動体の表面状態の実証、④トポロジカル絶縁体に基づく超伝導体のトポロジカル超伝導性の発見、⑤半整数磁束量子や奇周波数超伝導などトポロジカル超伝導・超流動に特有の新現象の発見や学理の深化、⑥空間反転対称性の破れた超伝導体でのパリティ混合や、電場誘起表面超伝導など、関連現象の研究推進、⑦結晶対称性を取り入れてのトポロジカル物質の分類に関する理論展開と学理の深化、⑧冷却原子系でのトポロジカル分類、などである。

これらの成果の多くは、絶縁体、超伝導体、超流動体、冷却原子系などの既存の研究分野を超えての、研究者間での活発な研究交流と概念クロスオーバーからもたらされた。

### 審査部会における所見

A+ (研究領域の設定目的に照らして、期待以上の成果があった)

#### 1. 総合所見

本研究領域は「トポロジー」をキーワードとして、新しい物理現象を発見するとともに、普遍概念の創出を目的とした研究領域である。本研究領域は世界をリードする多くの研究成果を生み出し、当該学問分野における我が国の国際的優位性の確保と、その向上に大きく貢献した。分野横断的な集中連携研究会を多数開催して、量子トポロジカル現象の概念の共通理解を促進することで、多くの共同研究とそれによる研究成果が上げられた。また、積極的にアウトリーチ活動が実施されたことは、物性物理学における新しい概念の普及という点で高く評価できる。本研究領域の活動によって、多くの若手研究者が育成されたと認められる。以上を総合的に勘案すると、研究領域の設定目的に照らして期待以上の成果があったと評価でき、関連学問分野における今後の更なる展開が期待できる。

#### 2. 評価の着目点ごとの所見

##### (1)研究領域の設定目的の達成度

本研究領域が発足した当初は、トポロジカル超流動やマヨラナ粒子などの研究の黎明期であり、トポロジカル量子現象という学理の曖昧さは否定できなかったが、本研究領域の活動により、実験と理論の両面で世界をリードする研究成果が生み出され、その概念の深化に大きく貢献した。特に、既存の概念では説明できない新しい物理的概念であることを明確にした点は、高く評価できる。本研究領域における活動とその成果は基礎的研究の範疇にあったが、今後、このトポロジカル量子現象の物理学全体への波及とともに、材料やデバイス等の応用分野への展開を期待したい。

## (2)研究成果

真のトポロジカル絶縁体物質や、トポロジカル結晶絶縁体物質を世界に先駆けて実現したことに加え、マヨラナ表面状態の実証など、研究領域発足当初の目標を超えた優れた成果が得られている。特に、トポロジカル物質の周期表の理論的な導出は、特筆すべき成果といえる。また、いくつかの論文では、掲載後数年にもかかわらず被引用数が100回を超えるなど、インパクトのある先駆的研究が行われたと認められる。さらに、中高生を含めた広い世代の市民や異分野研究者へのアウトリーチ活動も活発に行われたことも評価できる。

## (3)研究組織

研究組織を超えた分野横断的な特定のテーマによる集中連携研究会を17回開催し、異分野交流と情報交換に努めたことは、高く評価できる。その結果、計画研究組織のグループ間や計画研究組織と公募研究者との間での共同研究の活性化が図られ、多数の共著論文の発表に繋がったことから、優れた連携関係が築かれたと認められる。

## (4)研究費の使用

特に問題はなかった。

## (5)当該学問分野、関連学問分野への貢献度

世界的に急成長している研究分野であり、研究期間中にも英国やイタリアなど複数の国で関連する研究プロジェクトが発足している。その中で、本研究領域は、その先導的かつ中心的な役割を果たしており、その存在と研究成果は国際的にも高く評価されている。また、関連分野における複数の学会で合同シンポジウムなどが開催されるなど、波及効果は高く、多大な貢献を果たしたと認められる。

## (6)若手研究者育成への貢献度

若手研究者相互滞在プログラムや若手研究者主導の国際会議の開催などを通じて、分野横断型の研究視点と国際性を持つ若手研究者の育成が行われた。さらに、若手研究者の海外派遣や共同研究なども活発に行われた結果、数多くの若手研究者を対象にした奨励賞の受賞や昇任などがあり、優れた若手研究者の育成に貢献したと認められる。