

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

平成29年度採択分
令和2年3月31日現在

**トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：
固体物理学を越えて分野横断へ**

Variety and universality of bulk-edge correspondence in
topological phases:
From solid state physics to transdisciplinary concepts

課題番号：17H06138

初貝 安弘 (HATSUGAI, YASUHIRO)

筑波大学・数理物質系・教授



研究の概要（4行以内）

端を見て中身を考える「バルク・エッジ対応」はバルクに特徴を持たないトポロジカル相の本質である。冷却原子実験と角度分解光電子分光実験をバルク・エッジ対応の理論で概念の普遍性を追求する立場から繋ぐ試みを、非量子系であるフォトニック結晶やマクロな周期的古典力学系にまで拡張し、更に数学者等との連携も模索し物理学を越えた分野横断的学理を構築する。

研究分野：物性基礎論

キーワード：バルク・エッジ対応、トポロジカル相

1. 研究開始当初の背景

2016年のノーベル物理学賞の対象となったトポロジカル相の多くは、直接のバルクの観測をもたず、「バルクは隠れていて見えない」。その隠れた非自明な特徴は系に境界や不純物があるとき、局在したエッジ状態として顕在化し、このエッジ状態を観測することで系の特徴が理解可能となる。端をみて隠れた中身を考えるわけである。これが代表が1993年に量子ホール効果で定式化した「バルク・エッジ対応」の概念であり、近年、世界中の多くの研究により、その適用範囲は、広範囲にわたり固体物理学を越えて古典電磁場や古典力学系等、非量子系をも包含した普遍的なものであると徐々にではあるが広く認識されつつあった。

2. 研究の目的

この「バルク・エッジ対応」が重要な意味を持つ現象として、(A)トポロジカル絶縁体の角度分解光電子分光における表面状態の観測と(B)極限量子系である冷却原子系におけるトポロジカルポンプ現象があるが、一見大きく異なるこの2つの現象をバルク・エッジ対応をキーワードとしてバルク・エッジ対応の理論で繋ぎ、理論-実験の連携の下でトポロジカル相の理解におけるブレークスルーを目指す。この連携の試みを展開して、バルク・エッジ対応の普遍性をより広く確立することを目指し、対象とする分野をフォトニック結晶としての古典電磁場やマクロな周期的古典力学系（バネ-質点系）等にまで拡張して、多様な対象の中に広く存在する特性としてのバルク・エッジ対応の普遍性を追求す

る。更には、物理学者のみならずバルク・エッジ対応に興味を持つ数学者等の他分野とも連携することでバルク・エッジ対応をキーワードに固体物理学を越えて異なる分野と物理学関連の諸分野にわたる広範囲な分野横断的な学理構築にいたることを目的とする。

3. 研究の方法

実績ある実験家、理論家、更には数学者を分担者、連携研究者に配置して、バルク・エッジ対応を共通の興味、キーワードとして、多様な形での研究交流、共同作業、連携を積極的に行う。その過程でトポロジカル相における新しいブレークスルーを模索し、各専門分野での実績を挙げつつ、各論を越えてトポロジカル相における「バルク・エッジ対応」の有効性ならびに普遍性の確立を目指し、各専門分野を越えた分野横断的な研究を行う。更に若手の気鋭の研究者を3名程度、研究員でなく助教/准教授として雇用して、国際的に認知される特徴ある研究グループを構成する。また、本科研費で主催する国際研究集会を定期的に開催することで本研究で得られた成果を広く世界的に周知する。この国際研究集会には、国内外から新進気鋭の研究者を招待し、バルク・エッジ対応を共通の興味とした新しい共同研究の可能性も模索し、広く情報共有、異分野交流の場とする。

4. これまでの成果

開始3年間に4度の国際ワークショップを開催し(2020年2月予定分はコロナウイルス蔓延により仮想化)、異分野交流、ブレーンストーミングの場として参加者から好評を得

た。具体的成果（の一部）は、以下の通り
[1] 近年、数学と物理学（固体物理と素粒子分野）の3グループで独立に見出された高次トポロジカル相では、広義のバルク・エッジ対応であるバルク・コーナー対応が成立するが、この時のバルクのトポロジカル数として(1)エンタングルメント分極(2)電子相関を含む系多体系にも適用可能な量子化ベリー位相 (Z_N ベリー位相) の2種を、理論グループで数学者等との緩やかな連携の下で見出し、その有効性を多数の論文で確立した。数値計算の手法の進展もあった。また、高次トポロジカル相の古典力学での類似物に関しても量子化ベリー位相を用いて、広義のバルク・エッジ対応の視点で解明した。

更に機械学習の手法を用いた高次トポロジカル相でのバルク・コーナー対応の観点での相分類を世界的な研究初期に行った。これは計画時の予定を超える展開であり、物理-情報という異分野交流の成功例でもある。

[2] 冷却原子実験に関して、トポロジカルポンプについて、トポロジーと乱れの非自明な関連を実験的に見出した。関連して理論班では、トポロジカルポンプでの電子相関の効果をバルク・エッジ対応に基づき検討し新規なトポロジカル相転移の可能性を見出した。また、トポロジカル超流動に関して、イッテルビウム原子系に対して光励起によるスピン軌道相互作用の導入に成功した。また理論分担者が提案する平坦バンド由来の現象について、リーブ型光格子を用いて「空間断熱通過現象」の実証に成功した（新聞掲載）。関連して理論班では、平坦バンド系を一般に構築する新しい手法を解明し、後述の高次トポロジカル相との関連なども解明した。さらに、バルク・エッジ対応を直接の観測することを可能にする、高感度かつ高空間分解能な観測法である量子気体顕微鏡装置を新規開発し、また量子非破壊測定する手法も考案した。

[3] 放射光 ARPE 実験に関連し、傾いたワイルコーンを持つワイル半金属 $TaIrTe_4$ の表面フェルミアークのスピントクスチャーを実験的に解明した。関連して理論班では、メカニカルダイヤモンドと呼ばれる古典力学系においても、ワイル点が存在し、フェルミアークの古典力学での類似物が存在することを理論的に示した。これはバルク・エッジ対応の普遍性を明確に示す成果である。次に、量子異常ホール効果を示す磁性元素ドーブ型のトポロジカル絶縁体について時間分解 ARPES 実験で超高速キャリアダイナミクスを系統的に解明した。また、ディラック線ノード半金属のスピントクスチャーの直接的観測によりバルク・エッジ対応に関する系統的理解が加速する示唆を得た。さらには最近、層状反磁性体の $MnBi_2Te_4$ について放射光やレーザー光を用いた ARPES により同物質が反強磁性

トポロジカル絶縁体であることを実証した。
[4] フォトニック結晶構造におけるバルク・エッジ対応について、理論・実験の両面から研究を推進し、3次元フォトニック結晶におけるバルク・エッジ対応について、代表と分担者として共同で理論的解析を進め、カイラルフォトニック結晶におけるワイル点の特徴を明らかにした。また提案時には想定していなかった成果として、トポロジカルナノ共振器レーザーの実現に成功した。更に、固体物理系で大きな興味を集め、理論班でも成果をあげている高次トポロジカル絶縁体におけるコーナー状態を、ナノフォトニクス系で世界に先駆けて実現した。

5. 今後の計画

計画に沿い十分に成果をあげてきた現在までの研究を継続し、研究目的を実現する。更に新規な展開を模索しブレークスルーを目指す。特に分野横断的研究交流に力を注ぐ。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. "Higher-Order Topological Mott Insulators", K. Kudo, T. Yoshida and Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. 123, 196402 (1-6) (2019) 査読有。

2. "Many-Body Chern Number without Integration", K. Kudo, H. Watanabe, T. Kariyado, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. 122, 146601(1-5) (2019) (selected as Editors' suggestion). 査読有。

3. "Phase Diagram of a Disordered Higher-Order Topological Insulator: A Machine Learning Study", H. Araki, T. Mizoguchi, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. B99, 085406 (1-8)(2019). 査読有。

4. " Z_N Berry Phases in Symmetry Protected Topological Phases", T. Kariyado, T. Morimoto, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. Lett. 120, 247202(1-5) (2018). 査読有。

5. "Spatial adiabatic passage of massive quantum particles in an optical Lieb lattice", S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa and Y. Takahashi, Nature Comm.11, 257 (1-6) (2020). 査読有。

6. "Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator", A. Kimura (44人中30番目), Nature 576, 416-422 (2019). 査読有。

7. "Circularly Polarized Topological Edge States Derived from Optical Weyl Points in Semiconductor-Based Chiral Woodpile Photonic Crystals", S. Takahashi, S. Oono, S. Iwamoto, Y. Hatsugai, and Y. Arakawa, J. Phys. Soc. Jpn., 87, 123401(1-5) (2018). 査読有。

[受賞] 初貝 安弘 2018年4月10日: 平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰, 科学技術賞 (研究部門) 「トポロジカル相でのバルクエッジ対応の研究」

7. ホームページ等

http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/~hatsugai/modules/pico/index.php?content_id=216