

京都大学	博士 (理学)	氏名	中村 大地
論文題目	Bulk-boundary correspondence in non-Hermitian point-gap topological phases (非エルミート点ギャップトポロジカル相におけるバルク境界対応)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、散逸や環境の影響によってハミルトニアンがエルミート性を失った非エルミート系におけるトポロジカル相の理論的探求、およびその実験的検証に注目が集まっている。エルミート系と異なり、非エルミート系ではエネルギーが複素数となることが可能なため、2つの異なるエネルギーギャップ構造が可能である。一つは、エルミート系におけるギャップ構造の自然な拡張である線ギャップで、もう一つは非エルミート系特有のギャップ構造である点ギャップである。非エルミート系では、これらの異なるギャップ構造によって、それぞれ線ギャップトポロジカル相、および点ギャップトポロジカル相とよばれるトポロジカル相が定義され、エルミート系にない特異な性質が現れる。</p> <p>そのような特異な性質の一つが、バルク・境界対応の破れという現象である。バルク・境界対応とは、トポロジカル相を定義するバルクのトポロジカル数と物理現象として系の端で観測されるギャップレス状態の数が一致するというトポロジカル相特有の現象である。例えば、典型的なトポロジカル相である量子ホール状態では、バルク・境界対応によって、バルクのトポロジカル数であるチャーン数と試料の端にあらわれるエッジ状態の数が一致し、ホール係数の量子化を導く。しかしながら、非エルミート・トポロジカル相では、バルク・境界対応が成り立たない例が知られており、この現象の解明が大きな問題となっていた。</p> <p>このような背景の下、本学位論文で中村氏は、点ギャップトポロジカル相におけるバルク・境界対応が成り立つ条件を明らかにした(2章)。特に、境界条件によって、点ギャップトポロジカル相の分類が変わるという他のトポロジカル相ではみられない著しい性質を発見し、それによってバルク・境界対応の証明に成功した。また、点ギャップトポロジカル相を物質系で実現する方法についても考察を行い、通常のトポロジカル物質の表面に散逸を加えることで系統的に点ギャップトポロジカル相が実現できることを見出した(3章)。以下では各内容を要約する。</p> <p>まず、第2章において、点ギャップトポロジカル相である例外トポロジカル絶縁体を例に、点ギャップトポロジカル相では、境界面の取り方によってバルク・境界対応が成立したり、破れたりすることを示し、この理由が非エルミート表皮効果と呼ばれる非エルミート系特有の局在現象に起因することを明らかにした。続いて、この矛盾がバルクのトポロジカル数を開放境界条件で定義することで回避でき、この新しいトポロジカル数に対してはバルク・境界対応が成り立つことを示した。さらに、K理論という数学的枠組みを使い、この考察を非エルミート系で可能である38の対称性クラスすべてに拡張し、点ギャップトポロジカル相においては、表皮効果によって、開放境界条件と周期的境界条件でトポロジカルな分類が異なること、また開放境界条件におけるバルクトポロジカル数を使うことで、バルク・境界対応が常に成り立つことを証明した。</p> <p>次に第3章において、物質系において点ギャップトポロジカル相を実現する普遍的な方法を提案した。現在、様々な系で点ギャップトポロジカル相の実験的検証が進んでいるが多くの実験は、フォトニック結晶や光学系で行われており、物質系における実験的検証はほとんどなされていない。この理由の一つは、点ギャップトポロジカル相を物質で実現する方法があまりわかっていなかったからであった。中村氏は、トポロジカルギャップレス状態と点ギャップトポロジカル相の関係を与える拡張されたニールセン・二宮の定理を用いることで、トポロジカル物質の表面に散</p>			

(続紙 1)

逸を入れることで、点ギャップトポロジカル相が実現できることを示し、この困難を解決した。さらに、このようにして実現された点ギャップトポロジカル相に第2章で得た結果を応用し、どのような現象が引き起こされるかを明らかにした。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

最近になり、トポロジカル相の概念は、絶縁体や超伝導体など物質それ自身が示す固有の性質だけでなく、散逸やゲイン、相関などの影響でハミルトニアンが非エルミート性を得た非エルミート系にも応用され、生体系を含む広範な分野において、理論、実験ともに活発に研究がなされている。これらの系においては、エルミート系にはないギャップ構造やトポロジカル不変量を導入することが可能であり、また、エルミート系でのトポロジカル相と異なる性質が現れることも報告されているが、トポロジカル相としての全貌は未だ理解されておらず、その解明が重要課題となっている。

本学位論文は、非エルミート系の固有のトポロジカル相である点ギャップトポロジカル相におけるバルク・境界対応という基本的な性質を明らかにしたものである。点ギャップトポロジカル相とは、エネルギーが複素数となるという非エルミート系特有の現象によって初めて可能となるトポロジカル相で、通常のトポロジカル相が2つ以上のエネルギーバンドを必要とするのに対し、点ギャップトポロジカル相は単独のエネルギーバンドでも可能である。このような違いから、トポロジカル相の基礎的な性質であるバルクのトポロジカル数と境界に現れるギャップレス状態の数が一致するというバルク・境界対応が点ギャップトポロジカル相でも成り立つかどうか明らかでなかった。本学位論文で、中村氏は、トポロジカル相を数学的にあつかう道具であるK理論と、エルミート系のトポロジカル相ではあまり用いられていなかった実空間におけるトポロジカル数を用いてこの問題に取り組み、点ギャップトポロジカル相におけるバルク・境界対応の定式化に成功した。特に、開放境界条件のトポロジカル数で定義される点ギャップ・トポロジカル相の分類が、周期的境界条件のトポロジカル数で定義される分類と異なることを発見し、開放境界条件の点ギャップトポロジカル相でバルク・境界対応が成り立つことを証明した。バルク・境界対応に関しては、3次元以下のすべての可能な点ギャップトポロジカル相のバルク・境界対応の証明を与えており、今後の非エルミートトポロジカル相の基礎となる重要な成果である。また、本学位論文では、エルミート系のトポロジカル相と点ギャップトポロジカル相の関係を見出すことで、通常のトポロジカル物質から、点ギャップトポロジカル相を普遍的に実現する方法も提案しており、実験で自身の理論を検証する道筋も与えている。

以上の結果は、いずれも非エルミートトポロジカル相の基礎的な結果であり、汎用性も高い。よって本論文は、博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降