

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	塩崎 謙
論文題目	Topological insulators and superconductors: classification of topological crystalline phases and axion phenomena (トポロジカル絶縁体・超伝導体: 結晶トポロジカル相の分類とアクシオン現象について)		
(論文内容の要旨)			
<p>多くの物質相は対称性とその自発的対称性の破れによって記述されるが、近年、同一の対称性でありながら自明な物質相とは明らかに異なる物性を示す物質相に注目が集まっている。このような物質相はトポロジカル相と総称され、基底状態の波動関数は、何らかの位相幾何学的な特徴付けを有する。トポロジカル相の研究においては、どのような対称性の下どのようなトポロジカル相が可能か、という分類問題が出发点となる。中でも、空間群の対称性によって守られた結晶トポロジカル相についてその分類問題は現在の重要課題の一つとなっている。分類問題に続く課題はトポロジカル相において自明相との違いを明確化する基本物性の解明である。さらに、トポロジカル相における動的な側面、例えば、熱・量子ゆらぎと非自明なトポロジーとの関係などを明らかにすることも重要課題の一つである。このような背景の下、本論文では次の3つの項目を扱っている。[I]位数2の点群対称性によって守られた結晶トポロジカル相の分類。[II]空間奇数次元のカイラル・トポロジカル相を特徴付ける巻きつき数と物理量の関係の解明。[III]超伝導体における動的アクシオン現象の提案。</p> <p>[I]においては、位数2の点群対称性（鏡映、2回回転、空間反転、及びそれらの磁気点群の対称性）によって守られた結晶トポロジカル相の分類問題のK理論を用いた包括的な解析を行っている。異なる空間次元・対称性クラスの中の階層性に注目することにより、全ての位数2の点群対称性によって守られたトポロジカル相がディラック理論で記述可能であることを示している。さらに、渦欠陥に局在するゼロエネルギー状態のような欠陥ギャップレス状態の分類、及び、ギャップレス・トポロジカル相（例：ワイル半金属）の分類も与えている。さらにK理論の持つ同型構造を用いて、バルク・トポロジカル相、欠陥ギャップレス状態、ギャップレス・トポロジカル相といった異なるトポロジカル相が互いに密接に関係することを示し、個々のトポロジカル相に注目するのではなく、様々なトポロジカル相の間関係性に注目するというトポロジカル相を解析する上で有用な視点を提供している。</p> <p>[II]においては、系の有するカイラル対称性に注目することにより、巻きつき数によって特徴付けられるアクシオン（熱）輸送現象の定式化を行っている。例えばカイラル・トポロジカル超伝導体の場合には、（バルクの超伝導秩序に対して相対的な）複素s波超伝導体との接合系において、巻きつき数が熱Hall効果により直接観測可能であること指摘している。また、カイラル分極というある種の電気分極量が印加磁場に対して巻きつき数により特徴付けられる応答を示すことを明らかにしている。</p> <p>[III]においては、トポロジカル超伝導体における動的アクシオン現象の、熱応答の観点から解析を行っている。複素s波の超伝導ゆらぎが動的アクシオン場を誘導することを示し、特にスピン・軌道相互作用の存在下においてはLeggett mode (s波とp波超伝導秩序の相対位相ゆらぎ)が、プラズマ・ギャップから解放され低エネルギーで有効に存在することに注目し、広範囲のパラメタ領域において動的アクシオン場が実現可能であることを示している。また動的アクシオン由来の物理現象として、有限の温度勾配下における有限の周波数に対する慣性モーメントの増大を指摘している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、トポロジカル相と呼ばれる、自発的対称性の破れとは異なる特徴付けを持った量子凝縮相が凝縮系物理における新しい研究テーマを提供している。従来の“トポロジカル絶縁体・超伝導体の周期表”は空間的に局所な対称性にのみ注目したものであり、現実の結晶構造の持つ空間群の対称性を考慮したトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類表の確立は目下の課題である。また、個々のトポロジカル相において、その非自明なトポロジを反映するような物性の解明も、理論・応用面から重要な課題である。このような背景の下、塩崎氏は以下の3つの研究を行った。

[I]鏡映対称性、2回回転対称性といった2回で元の空間位置に戻るような位数2の点群対称性についてトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類問題を解決した。この結果により先行研究で得られていた鏡映対称性に対する27通りのトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の周期表を148通りにまで拡張することに成功している。また、K理論の持つ数学的な階層性を用いて、バルクのギャップフル・トポロジカル相と、欠陥ギャップレス状態、及びワイル半金属のようなギャップレス・トポロジカル相の分類問題が密接に関係することを示しており、結晶対称性によって守られたトポロジカル相の統一的、包括的な解決法を示しており、これらの結果は一般の空間群対称性によって守られたトポロジカル相の分類問題の解決に向けた重要な成果である。

[II]空間3次元においてカイラル対称性を有する系のトポロジカル相を特徴づける巻きつき数と物理量の関係の解明を行った。特にこのクラスは時間反転対称なトポロジカル超伝導体・超流動体(例: 3He-B 相, $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$)を含み、巻きつき数がどのような物理現象に現れるかは喫緊の課題であった。塩崎氏はアクシオン(熱)輸送現象に注目し、ある種のヘテロ接合系において巻きつき数が熱Hall効果により直接観測可能であることを見出している。また、カイラル分極というある種の電気分極量が印加磁場に対して巻きつき数により特徴付けられる応答を示すことを明らかにしている。

[III]絶縁体における動的アクシオン現象については先行研究によりその実現可能性と物理現象が議論されていた。塩崎氏は動的アクシオン現象の超伝導体における実現可能性を初めて議論した。その中で、超伝導体においては複素s波の超伝導ゆらぎが動的アクシオン場を誘導することを示し、特にスピン・軌道相互作用の存在下においてはLeggett mode(s波とp波超伝導秩序の相対位相ゆらぎ)が、プラズマ・ギャップから解放され低エネルギーで有為に存在することに注目し、広範囲のパラメタ領域において動的アクシオン場が実現可能であることを示した。

このように、本論文はトポロジカル相における分類問題、及び基本物性の解明といったトポロジカル相の研究の出発点となる基本的な問題についてのいくつかの部分的な解決に成功している。博士論文公聴会においても、塩崎氏は入念に準備された発表を行い、質疑応答にも丁寧に答え、高い学識を有していることをアピールした。以上の事より、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、平成26年12月22日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。