

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	PT対称なノーダルライン半金属におけるノーダルラインのトポロジー変化の分類
Title(English)	Classification of topology changes of nodal lines in PT-symmetric nodal-line semimetals
著者(和文)	竹市学
Author(English)	Manabu Takeichi
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12312号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:村上 修一,笹本 智弘,納富 雅也,西田 祐介,石塚 大晃
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12312号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	竹市 学	
論文審査 審査員		氏名	職名		
	主査	村上 修一	教授	石塚 大晃	准教授
	審査員	笹本 智弘	教授		
		納富 雅也	教授		
	西田 祐介	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Classification of topology changes of nodal lines in PT-symmetric nodal-line semimetals」と題し、PT 対称性の下での 3 次元ノーダルライン半金属において、外部パラメタの変化によってノーダルラインのトポロジーが変化する事象を、さまざまな対称性の下で網羅的に理論研究を行ったもので、6 章よりなる。

第 1 章「Introduction」ではトポロジカル相について概観している。トポロジカル絶縁体について解説した後、トポロジカル半金属について概観し、本論文の中心となる PT 対称性を持つノーダルライン半金属について述べている。最後に本論文の全体を概観している。

第 2 章「Review of topological semimetals」では、ベリー位相や 2 次元・3 次元のワイル半金属について、そのトポロジカルな性質を含めて説明したのち、PT 対称性を持つ 3 次元ノーダルライン半金属について詳細に説明している。特にノーダルラインが π に量子化したベリー位相によって保護されていることを説明している。さらにノーダルライン半金属に関する最近の進展、例えばノーダルチェーンなどのさまざまな周辺の話題についても解説している。

第 3 章「Morse-theory study for nodal lines」では、モース理論を導入してノーダルラインのトポロジー変化を分類する理論を構築している。まず先行研究で提案された、ノーダルラインがノーダルチェーンを経てノーダルリングに至る模型について説明し、この振る舞いが摂動に対して不安定であって一般性を持たないことを説明している。さらに、モース理論を用いれば、一般的な系でのノーダルラインのトポロジー変化を分類できることを示している。すなわち、ノーダルラインのトポロジー変化が、モース理論では、 (\mathbf{k}, m) (\mathbf{k} : ブロッチ波数、 m : 模型に含まれる外部パラメタ) のなす 4 次元空間でノーダルラインが形成する 2 次元多様体の臨界点に対応することを示し、さらに各臨界点に付随する Index という整数の値 0, 1, 2 がそれぞれ、ノーダルラインの生成、組み換え、消滅に対応することを示している。

第 4 章「Evolution of nodal lines with simple symmetries」では、1 種類の対称操作を含むような点群対称性を持つ k 点で起こる、ノーダルラインのトポロジー変化について一般的に議論している。まず n 回回転対称性 ($n=2, 3, 4, 6$) を持つ k 点におけるトポロジー変化については、そのままの形ではモース理論が適用できない場合があることを説明している。さらにそうした場合にも、該当する関数は必ず因数分解することができ、各因数について別個にモース理論を適用すればトポロジー変化を分類できることを示している。また、鏡映対称性を持つ k 点におけるトポロジー変化については、同様に因数分解によってノーダルラインのトポロジー変化を分類でき、その結果、そうしたトポロジー変化が 2 種に分けられることを示している。これらの場合については、ノーダルラインの変化の模式図を示して、さらに簡単な模型を構築して確かにここでの分類に合致していることを示している。

第 5 章「Evolution of nodal lines with composite symmetries」では、第 4 章の結果を一般化して、tetragonal, orthorhombic など複雑な点群対称性を持っている k 点におけるトポロジー変化についても、モース理論によって分類できることを示している。この場合も因数分解を行うことがこの分類の鍵となっており、考えている 2 つのバンドの既約表現のさまざまな組み合わせについても網羅的に調べることができ、それぞれの場合についてどのようなノーダルラインの変化を示すか計算で与えて、さらにそれらを模式図で示している。さらに簡単な模型を構築してこの分類結果に合致していることを示している。特にいくつかの場合においては、ノーダルラインのトポロジー変化が限定されたパターンでのみ生じることを示している。例えば D_{2h} 対称性においては、鏡映面 3 枚の全てにおいて同時にノーダルラインの組み換えが起こることがないことを示している。

第 6 章「Conclusion」では、論文の全体を概観し今後の展望について述べている。特に本論文で示した現象の、電子系やメタマテリアル系での検証の可能性や、また多バンドでのノーダルラインの物

性への展開の可能性などを議論している。

以上をまとめると本論文では、3次元ノーダルライン半金属でのノーダルラインのトポロジー変化について一般論を構築している。こうしたトポロジー変化については、先行研究では個別の系に関する議論にとどまり、一般論の展開は困難であった。本博士論文では数学で知られているモース理論を適用することで一般論を展開できることを指摘し、実際さまざまな点群対称性について網羅的にノーダルラインの変化の分類を行っている。ここでの議論は対称性のみによっているため一般性を持ち、さまざまな系に広く適用できると期待され、今後の波及効果が大きい。このようにノーダルラインのトポロジー変化に関して一般論の構築を行った本論文は、理学の発展に大いに資するものと判定され、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があると認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。