



Title	Theoretical Study on Electrical Control of Emergent Topological Properties and Superconducting Diode Effects in Multi-terminal Josephson Junctions
Author(s)	竹村, 建人
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105545
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 ＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed >大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 （ 竹 村 建 人 ）	
論文題名	Theoretical Study on Electrical Control of Emergent Topological Properties and Superconducting Diode Effects in Multi-terminal Josephson Junctions (多端子ジョセフソン接合に創発するトポロジカル物性と超伝導ダイオード効果の電氣的制御に関する理論研究)
論文内容の要旨	
メゾスコピック系とは量子効果が現れるマイクロメートル以上の人工系を指し、新奇な量子効果の創発舞台である。典型例に、超伝導端子の巨視的波動関数の位相差が電流となるジョセフソン接合がある。多端子ジョセフソン接合（多端子系）は超伝導端子を3つ以上に拡張した系であり、複数の超伝導位相によって非局所的効果や高次元バンド構造が現れる。我々は多端子系に量子ポイントコンタクト構造を導入し、ゲート電圧制御によって新奇的物性の創発と制御を促す。本論文では、多端子系に創発するトポロジカルに保護されたワイル点と超伝導ダイオード効果に焦点をあて、ワイル点の創発確率の低さやその創発理由と非相反な電気応答発生が未解明という課題の解決と新奇物理現象の発見が本研究の目的である。 第1章では、多端子系と量子ポイントコンタクト構造について説明し、多端子系での先行研究とトポロジカル物性について概説した。第2章では、多端子系でのアンドレーエフ束縛状態のエネルギーと超伝導電流を求めるための理論的枠組みを紹介した。第3章では、4端子系と5端子系において、1つの端子に量子ポイントコンタクト構造を組み込みことで電子透過率を変調し、ワイル点ならびにトポロジカル相の電氣的制御が可能であると示した。また、4端子系では電氣的制御に伴うワイル点の対生成・対消滅の過程として現れる軌道が幾何学的に分類出来ることを、10万ものランダムサンプリングによって新たに発見した。第4章では、4端子系において複数の端子で伝導チャンネルの透過率を制御し、チャンネル数の配分とワイル点の創発確率の関係性を明らかにした。この結果から、創発確率を向上させる条件を示した。第5章では、量子ポイントコンタクト構造を介して、ナノワイヤ型のジョセフソン接合を3端子系に拡張した系で超伝導ダイオード効果が電氣的に制御可能であることを示し、超伝導位相とダイオード効果の関係性について議論した。 本論文の成果は、多端子系でのトポロジカル物性とダイオード効果の制御法の提案と、メゾスコピック系という分野を拡張するものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (竹 村 建 人)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	芦 田 昌 明
	副 査	教 授	清 水 克 哉
	副 査	教 授	田 中 秀 和
	副 査	教 授	江 藤 幹 雄 (慶應義塾大学 理工学部)

論文審査の結果の要旨

本論文は、多端子ジョセフソン接合に量子ポイントコンタクト (QPC) を組み込み、ゲート電圧で透過率を制御することにより、超伝導位相空間におけるトポロジカル特異点 (ワイル点) および非相反超伝導輸送 (超伝導ダイオード効果) を電氣的に実現・操作する理論を体系化したものである。多端子系では複数の超伝導位相が独立自由度となり高次元の有効バンド構造が現れる一方、ワイル点は偶然的にしか現れず、その生成条件や制御指針、さらに非相反応答の微視的起源が十分に整理されていなかった。申請者は、散乱行列に基づくアンドレーエフ束縛状態の解析手法を整備し、4端子・5端子接合においてQPC透過率を連続可変とすることで、ワイル点の出現・消滅を系統的に誘起し、トポロジカル相の切替えを可能にすることを示した。特に4端子系については、大規模ランダムサンプリングによりワイル点の対生成・対消滅過程を幾何学的に分類し、位相空間における典型的軌道と普遍的特徴を抽出した点が新規である。さらに、各端子に配分されるチャンネル数とワイル点創発確率の関係を定量化し、創発確率を高める設計条件を与えた。加えて3端子ナノワイヤ接合では、ゲート電圧や位相差の設定により超伝導ダイオード効果の大きさ・符号を制御できること、ならびに非相反性がアンドレーエフ準位の非対称な再配置に由来することを明確化し、非相反超伝導素子設計への具体的指針を示した。これらの議論は、複數位相をパラメータとする「人工次元」上のバンド交差を電氣的に走査するプロトコルを与え、実験検証とデバイス応用に直結する点でも評価できる。また、モデル化から統計解析まで一貫した議論により、先行研究で散発的な知見を整理し、ワイル点創発の起こりやすさを設計変数として扱えることを示した。

以上の成果は、多端子トポロジカル超伝導の理解と制御に新たな道を開くものであり、博士 (理学) の学位論文として十分な価値を有する。