

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	なかむら たけとも 中村 壮智
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) Topological interference of superconductivity in Pb/Ru/Sr ₂ RuO ₄ junctions (Pb/Ru/Sr ₂ RuO ₄ 接合における トポロジカルな超伝導干渉効果)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 前野悦輝 教授 寺嶋孝仁 教授 石田憲二 教授

京都大学	博士（理学）	氏名	中村 壮智
論文題目	Topological interference of superconductivity in Pb/Ru/Sr ₂ RuO ₄ junctions		
(論文内容の要旨)			
本論文は、ルテニウム酸化物超伝導体Sr₂RuO₄と従来型のs波超伝導体との超伝導接合素子で、臨界電流の特異な温度依存性を再現性良く観測し、その現象を生み出すための新奇な超伝導接合素子構造の本質を明らかにするとともに、超伝導波動関数の位相巻き付き数の違いによる超伝導干渉効果による現象で説明できると結論づけたものである。 第1章「序論」では、超伝導接合の振舞いの基本となるジョゼフソン効果について、s波超伝導体以外の異方的超伝導体を用いた場合を含め紹介している。特に、通常の接合界面開放型の超伝導接合に対して、新奇な接合界面連結型のものが異方的超伝導体の研究に有効である可能性を述べている。また、スピン三重項p波超伝導体として知られるSr₂RuO₄と、Ru金属が自然析出したSr₂RuO₄-Ru共晶系の超伝導性を紹介している。そして本研究の目的として、超伝導波動関数のトポロジカルな性質を顕在化できる超伝導接合の実現を挙げている。 第2章「ジョゼフソン効果とSr₂RuO₄」では、超伝導接合の臨界電流の理論をまとめている。またSr₂RuO₄とSr₂RuO₄-Ru共晶系の超伝導性、カイラルp波超伝導状態の波動関数について解説している。特に、析出したRuを取り巻くSr₂RuO₄の超伝導位相の巻き付き数、すなわちトポロジーが温度と共にいかに変化するかについては詳しく議論している。さらにSr₂RuO₄を用いた超伝導接合の先行研究について、接合の種類ごとに分類してレビューしている。そして、本研究の直接の先行研究となった1999年発表のJinらの研究とそれを解釈する理論についても解説している。 第3章「実験」では、本研究で用いた超伝導素子の作製方法について自ら行った結晶育成や集束イオンビーム(FIB)加工の詳細を記述し、また試料冷却と接合特性の測定方法を記載している。特に、本研究で用いた、Ru析出体の位置や鉛電極の配置の異なる様々な接合構造の素子の作成方法については詳しく述べている。 第4章「特異な超伝導干渉をうむ基本構造」では、先行研究と同様の接合構造を含む3種類の異なる接合構造の電流・電圧特性の比較を行っている。そして、s波超伝導体とカイラルp波超伝導体として知られるSr₂RuO₄との超伝導干渉効果で接合臨界電流が特異な抑制効果を示す基本素子構造が、先行研究で考えられていたものとは異なり、鉛電極1つのPb/Ru/Sr₂RuO₄接合であることを突き止めた結果をまとめている。 第5章「Pb/Ru/Sr₂RuO₄接合におけるトポロジカルな超伝導干渉効果」では、得られた本質的な接合素子構造をもとに、臨界電流の特異な温度依存性が、Ru析出体周りのs波とp波の超伝導位相の巻き付き数の変化によって説明できることを示している。すなわち超伝導状態のトポロジーの変化が本質となるわけで、このような新奇構造の接合を「トポロジカル超伝導接合」と名付けている。 第6章「結論」では、本研究によってRu周りに発生するSr₂RuO₄の超伝導のトポロジカルな性質が変化することが検証でき、カイラルp波超伝導状態の検証が進んだと同時に、トポロジカル超伝導接合という新奇な概念が有効な接合構造が提案できたことを結論している。また本研究での提案モデルをさらに検証するために今後必要な研究について展望している。			

(論文審査の結果の要旨)

ルテニウム酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 は、その超伝導発見以来の数多くの実験と超伝導機構に対する緻密な理論から、スピン三重項奇パリティ超伝導体の最有力候補である。しかも電子対の軌道角運動量の状態が時間反転対称性を破る、カイラル p 波状態であることを示す実験結果がいくつもある。これまでスピン三重項超伝導体としてその詳細まで完全に確立された例はなく、多角的かつ決定的な実験・理論の蓄積によって Sr_2RuO_4 のスピン三重項超伝導を検証・確立することは、現在の超伝導研究の重要課題の一つといっても過言ではない。

これまでに知られていた注目すべき現象として、 Sr_2RuO_4 結晶の上にスピン一重項 s 波超伝導体の鉛電極二つを互いに近接させて蒸着した $\text{Pb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Pb}$ 接合で、臨界電流の特異な温度依存性があげられる。これは1999年にJinらによって報告されたもので、接合臨界電流は温度と共に増大する通常の振舞いであったものが、 Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度1.5 Kのすぐ下で急激に減少し、さらに低温で鋭く上昇に転じる。理論的には、 Sr_2RuO_4 超伝導の奇パリティ対称性ゆえに1.5 K以下では2つの鉛電極の間の超伝導位相差が不連続に飛んで、ゼロ接合から π 接合に転じるためとして説明されてきた。

中村氏はこの顕著な現象が、当初考えられていたものとは別の配置の超伝導接合によるものであり、再現された実験結果が、接合界面周りの超伝導位相の巻き付き数の違いによって説明できることを明らかにして、従来の定説を覆した。以前の実験でも、用いられた Sr_2RuO_4 結晶にはRu金属が共晶析出していることが知られていた。中村氏は、特異な超伝導干渉効果を生む接合構造は、従来考えられてきた2つの鉛電極を必要とする $\text{Pb}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Pb}$ 接合ではなく、本質的には1枚の鉛電極を用いた $\text{Pb}/\text{Ru}/\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ であることを明らかにした。この接合構造では、近接効果による弱結合を含む超伝導体/常伝導金属/超伝導体(SNS')接合の接合界面がRu析出片周りを一周して閉じていることが重要となる。

このことから、中村氏は観測された超伝導量子干渉現象が、鉛からの超伝導近接効果でRu金属に誘起された s 波超伝導と、それを取り巻く Sr_2RuO_4 の超伝導の間での、位相巻き付き数が温度によって相互変化することに起因するというモデルを初めて提唱した。これは超伝導接合界面がこれまでの素子で用いられてきたような開放型ではなく、接合界面が閉鎖連結していることに根差したもので、得られた臨界電流等の特異な温度依存性は、 Sr_2RuO_4 の超伝導がカイラル p 波状態であることを検証するものとなっている、このような新奇なメカニズムゆえ、中村氏の解明した新奇な接合構造は「トポロジカル接合」と呼べるべきものである。今後はRu1個だけを用いた接合素子での検証や、低温での臨界電流再上昇のモデルの正しさの検証など課題も残されている。

このような新奇性のある構造の接合素子を作製し、その振舞いについて新たなモデルを提唱した中村氏の本研究は、Physical Review B誌にも論文公開され、共同研究者が何度も関連分野の国際会議で招待講演に招かれるなど、世界的にも大いに注目されている。中村氏は、本論文の研究において、単結晶育成から微細加工技術を用いての接合素子作製、低温での精密測定装置やソフトウェアの開発、結果を説明するモデルの提案まですべてを手掛け、必要な国内・海外の共同研究にも自ら中心的にかかわってきた。超伝導位相の巻き付き数の違いを利用した超伝導接合素子は、今後様々な異方的超伝導体におけるトポロジカルに異なる波動関数を特定するのにも有効と期待でき、オリジナリティも高い。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認める。また、平成24年1月12日に論文内容とそれに関連した口答試問を行った。その結果合格と認めた。