

# 博士論文審査報告書

氏名	郷地 順 (ゴウヂ ジュン)
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	博理第 8 5 号
学位授与報告番号	甲第 2 5 5 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 3 月 2 2 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
論文題目	トンネル現象を用いた重い電子系の多重超伝導相の研究
論文審査委員	(主査) 教授 住山 昭彦 (副査) 教授 高橋 慶紀 (副査) 教授 小林 寿夫 (副査) 教授 藤 秀樹 (神戸大学大学院理学研究科) (副査) 准教授 水戸 毅

## 1. 論文内容の要旨

近年発見されたウラン化合物の  $\text{UPt}_3$  と  $\text{UBe}_{13}$  は、電子の有効質量が非常に大きな重い電子系超伝導体として知られており、その超伝導状態は BCS 理論で説明できる従来型のものではなく、スピン三重項超伝導状態であると考えられている。この超伝導状態は内部自由度をもつため、温度、磁場、圧力に依存して、多重の超伝導相が生じる可能性がある。本論文では、トンネル現象であるジョセフソン効果と点接合分光を用いて、これら 2 つの超伝導体を示す多重超伝導相についての研究を行った。

$\text{UPt}_3$  は温度と磁場に依存して 3 つの超伝導相 (A, B, C 相) を示し、その超伝導の秩序変数の候補として  $E_{2u}$  モデルと  $E_{1u}$  モデルが提案されている。本論文では低温低磁場で現れる B 相で点接合分光を行い、単結晶の  $a, b, c$  軸いずれの方向でも、零バイアス近傍に超伝導ギャップを示唆する微分抵抗のピークを観測した。この結果は、フェルミ面の赤道上でギャップが消失している  $E_{2u}$  モデルではなく  $E_{1u}$  モデルを支持しており、申請者が修士課程で行った B 相のジョセフソン効果の研究において、 $E_{1u}$  モデルを支持する結果が得られたこととも合致している。

また、 $\text{UPt}_3$  に圧力を印加すると、高温低磁場で現れる A 相が臨界圧力  $P_c \sim 0.4$  GPa 以上で消失し、同時に反強磁性モーメントも消失することが観測されているが、一方で  $P_c$  以上では B 相のみが現れるという報告と、本来低温高磁場で現れていた C 相が出現するという報告がなされている。本論文では、 $c$  軸方向のジョセフソン効果を検出するための接合が形成された  $\text{UPt}_3$  単結晶を用いて、高圧下でのジョセフソン臨界電流、及び磁化測定を行い、 $P_c$  前後での超伝導特性の変化を調べた。まず、磁化測定では  $P_c$  付近でマイスナー効果が最小になることが観測され、磁束のピン止め量が最大となることがわかった。一方、ジ

ジョセフソン効果については、 $E_{1u}$ モデルではC相でc軸方向のジョセフソン効果が禁止されるが、 $P_c$ 以上でもジョセフソン効果が観察されているので、B相が現れている可能性が高い。ただ、その大きさは $P_c$ 以上では抑制されており、 $P_c$ 以上でB相内に変化が生じるという理論の予測と合致している。また、磁場依存性で評価される接合の特性が、高圧下でも良好なまま維持されることが確認され、磁場依存性から導き出された磁場侵入長が $P_c$ 以下では一定であるのに対し、 $P_c$ 以上で減少を始めることも明らかになった。

一方 $UBe_{13}$ では、超伝導相内の $T_L \sim 0.7$  K以下で相転移を示唆する異常が現れることが報告され、その起源として、磁気秩序、並びに $U_{1-x}Th_xBe_{13}$  ( $0.02 < x < 0.04$ )で観察されている多重超伝導相の前駆現象としての可能性が提案されている。本論文では $UBe_{13}$ のジョセフソン効果と点接合分光の研究を行い、超伝導転移温度以下で出現し降温とともに増大していたジョセフソン臨界電流が、 $T_L$ 以下で急激な増大を始めることを見出した。一方、点接合分光では、零バイアスにおける微分抵抗が転移温度直下で一度減少し、 $T_L$ より低温で再び減少する二段階の減少を示すことが観察された。これらの振る舞いから、超伝導相内の $T_L$ 以下で観察される異常が、磁気秩序ではなく超伝導に由来するものであることを明らかにした。

## 2. 論文審査結果

本論文は、多重超伝導相を示す重い電子系超伝導体として注目を集めている $UPt_3$ と $UBe_{13}$ の示す特異な超伝導性を、トンネル現象を用いて研究し、多重超伝導相の検出、並びにその起源となる秩序変数の解明を目指したものである。

まず、 $UPt_3$ の秩序変数については有力な候補として $E_{2u}$ モデルと $E_{1u}$ モデルが提案されているが、申請者は修士課程でのジョセフソン効果の研究に続き、点接合分光でも $E_{1u}$ モデルが支持されることを示した。また、ジョセフソン効果については、これまで試みられた例のない圧力下での実験に取り組み、高圧下でもジョセフソン効果の研究が可能であることを示すとともに、臨界圧力前後でジョセフソン臨界電流、磁場侵入長、マイスナー効果の圧力依存性に異常が現れることを明らかにした。また、この異常が、B相内での秩序変数の変化を示唆していることを指摘した。

一方、 $UBe_{13}$ については、超伝導転移温度以下で相転移を示唆する異常の出現が報告されていたが、それをジョセフソン効果、点接合分光の両方で検出し、その起源が磁気秩序ではなく超伝導にあることを示した。

これらの成果は、重い電子系超伝導体において多重超伝導相を生じさせる秩序変数を解明する上で、基本的な情報を与えている。特に圧力下のジョセフソン効果の研究は、まだ確立していない $UPt_3$ の圧力相図に対して新たな知見を与えるとともに、他の超伝導体への適用も期待できる有益な成果といえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成28年1月25日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。