

|             |                                                                              |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | 笠 原 裕 一                                                                      |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (理 学)                                                                    |
| 学 位 記 番 号   | 理 博 第 3226 号                                                                 |
| 学位授与の日付     | 平 成 20 年 3 月 24 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 | Thermal transport study of exotic superconductors<br>(エキゾチック超伝導体の熱輸送特性による研究) |

論文調査委員 (主 査) 教 授 松 田 祐 司 教 授 前 野 悦 輝 教 授 川 上 則 雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文で笠原氏は他の超伝導体には見られない特異な現象を示す様々なエキゾチックな超伝導体の超伝導状態の研究を熱輸送特性をプローブとして行った。その結果、超伝導対波動関数の構造を明らかにしただけでなく、数々の特異な準粒子輸送現象を見出した。

CeやUを含むf電子化合物では伝導電子の有効質量が自由電子よりも数百倍も重くなることがあり、重い電子系化合物と呼ばれている。重い電子系化合物はしばしば超伝導に転移するが、強い電子相関効果のため超伝導電子対が従来のものとは異なった非従来型の超伝導が実現されている。このような非従来型の超伝導状態は物性物理学における中心的課題の一つである。

重い電子系化合物では超伝導はしばしば反強磁性や強磁性といった磁気秩序と共存をする。これに対し笠原氏が研究を行った重い電子系  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  においては「隠れた秩序」と呼ばれる非磁性の相転移と非従来型の超伝導が共存する。この系の研究は20年にも及ぶが、超伝導対称性は明らかにされてこなかった。笠原氏はこれまでで最高純度の単結晶試料を用いて電子・熱輸送特性を測定し、隠れた秩序相における特異な電子状態と数々の異常な超伝導状態を明らかにした。電子輸送特性からは、この系が隠れた秩序相において補償された半金属的な電子状態になっていることを明らかにした。熱輸送特性からは、低温における常伝導-超伝導転移が通常の2次相転移ではなく1次転移になっていること、バンドごとに異なる超伝導ノード構造をもつという前例のない超伝導ギャップ構造をとることを明らかにし、時間反転対称性を破った超伝導対称性が実現している可能性を示した。さらには熱伝導度が常伝導状態よりも超伝導状態の方が高いという、他の物質とは逆のふるまいを示すことを発見した。

笠原氏は  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の研究以外の重い電子系超伝導体の研究を行っている。まず反強磁性量子臨界点近傍に位置する超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  において、熱ホール効果測定を重い電子系超伝導体に対して初めて行った。その結果超伝導状態で準粒子の平均自由行程が急速に伸びることを定量的に示した。また、準粒子の渦糸による散乱時間を正確に見積もり、この系の準粒子輸送特性が極めて特異であることを発見した。さらに2つの異なる超伝導ドームを持つ  $\text{CeCoIn}_5$  の超伝導対称性を調べるために回転磁場中熱伝導率測定を行い、その結果  $\text{CeIrIn}_5$  の超伝導は  $\text{CeRhIn}_5$ 、 $\text{CeCoIn}_5$  と同じ対称性をもつことを明らかにした。また、笠原氏は内包原子が非調和振動する、いわゆるラットリング現象を示す  $\text{KOs}_2\text{O}_6$  においては、超伝導ギャップが等方的に開いたs波超伝導体であることを明らかにした。さらには強い電子相関を持つこと、そしてラットリングフォノンによる強い非弾性散乱機構をもつことを明らかにした。これにより、 $\text{KOs}_2\text{O}_6$  は通常非従来型の超伝導を起こすほど電子相関が強いにも関わらず、従来型の超伝導を示すという、ユニークな系であることを明らかにした。

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文で笠原氏は他の超伝導体には見られない特異な現象を示す様々なエキゾチックな超伝導体の超伝導状態の研究を行

った。その結果、超伝導対波動関数の構造を明らかにしただけでなく、数々の特異な準粒子輸送現象を見出した。CeやUを含むf電子化合物では伝導電子の有効質量が自由電子よりも数百倍も重くなることがあり、重い電子系化合物と呼ばれている。重い電子系化合物はしばしば超伝導に転移するが、強い電子相関効果のため超伝導電子対が従来のものとは異なった非従来型の超伝導が実現されている。このような非従来型の超伝導状態は物性物理学における中心的課題の一つである。

笠原氏が研究を行った重い電子系  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  においては「隠れた秩序」と呼ばれる非磁性の相転移と非従来型の超伝導が共存する。この系の研究は20年にも及ぶが、超伝導対称性は明らかにされてこなかった。笠原氏はこれまでで最高純度の単結晶試料を用いて電子・熱輸送特性を測定し、隠れた秩序相における特異な電子状態と数々の異常な超伝導状態を明らかにした。さらに笠原氏は  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  の研究以外の重い電子系超伝導体の研究も行った。まず反強磁性量子臨界点近傍に位置する超伝導体  $\text{CeCoIn}_5$  において、熱ホール効果測定を重い電子系超伝導体に対して初めて行い、この系の準粒子輸送特性が極めて特異であることを発見した。さらに2つの異なる超伝導ドームを持つ  $\text{CeIrIn}_5$  の超伝導対称性を調べるために回転磁場中熱伝導率測定を行い、その結果  $\text{CeIrIn}_5$  の超伝導は  $\text{CeRhIn}_5$ 、 $\text{CeCoIn}_5$  と同じ対称性をもつことを明らかにした。また、笠原氏は内包原子が非調和振動する、いわゆるラットリング現象を示す  $\text{KOs}_2\text{O}_6$  においては、超伝導ギャップが等方的に開いたs波超伝導体であることを明らかにし、 $\text{KOs}_2\text{O}_6$  は通常非従来型の超伝導を起こすほど電子相関が強いにも関わらず、従来型の超伝導を示すという、ユニークな系であることを明らかにした。

以上本研究は非従来型の超伝導体における異常な超伝導状態の新しい研究分野を開拓した点で高く評価できる。よって、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、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。