

氏名	よね 米	ざわ 澤	しん 進	ご 吾
学位(専攻分野)	博士(理学)			
学位記番号	理博第3232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	Anisotropy of the superconducting state in the quasi-one-dimensional organic compound (TMTSF) ₂ ClO ₄ (擬一次元有機物質 (TMTSF) ₂ ClO ₄ の超伝導相の異方性)			
論文調査委員	(主査) 教授 前野悦輝 教授 石田憲二 教授 松田祐司			

論文内容の要旨

本論文は、分子性導電体 (TMTSF)₂ClO₄の超伝導相の磁場に対する安定性の磁場強度および方向依存性を詳細に調べ、低次元性に由来する新奇な超伝導相の異方性を発見した研究をまとめたものである。この物質は典型的な擬一次元超伝導体であり、これまでも低次元性に由来する数々の興味深い超伝導現象が報告されている。しかしその一方で超伝導対称性など基本的かつ重要な超伝導の性質について、30年近い歴史がありながら未だに決着が付いていない点も多く、超伝導についての新しい切り口の研究が必要とされている。

本論文の「第一章：序章」では低次元系における超伝導や擬一次元有機導電体 (TMTSF)₂X系のこれまでの研究経緯や未解決問題について簡潔にまとめ、本研究の動機について述べている。また、本論文の各章の概観を行っている。

「第二章：理論の概説」では、本研究の内容を理解するために必要なこれまでの理論的研究についてまとめている。

「第三章：実験」では、実験装置の設計、温度計の較正、電気抵抗の測定方法などの実験方法について記述している。ベクトルマグネット装置という磁場方向を3次元的に精密制御できる装置を用いて、磁場方向と結晶軸方向を精確に一致させるための手順については特に詳細に記述している。

「第四章：磁場中での面間方向電気抵抗」では、超伝導性の議論に先立って、磁場中での電気抵抗の振舞いをもとに試料中の不純物の量や磁場誘起次元性クロスオーバーの磁場方向依存性について議論している。さらに、(TMTSF)₂ClO₄では常伝導状態の電気抵抗が磁場中で複雑な振舞いをするが、その影響を分離して超伝導のオンセット温度 T_c^{onset} を正しく決めるために開発した新しい方法についても詳述している。

「第五章：超伝導オンセットの磁場強度および方向依存性」は本研究の結果の中心の章で、 T_c^{onset} の磁場強度・磁場方向依存性の結果を示している。磁場が試料結晶の a 軸または b' 軸に平行なときには、50 kOe という超伝導凝縮エネルギーの倍程度のエネルギーに対応する大きな磁場中でも超伝導相が安定であることを見出した。一方、磁場を導電面内で回転したときの T_c^{onset} の磁場角度 ϕ 依存性に 20 kOe 以上の高磁場で複雑な構造が出現することを発見した。磁場角度 $\phi = \pm 17^\circ$ 付近の $T_c^{\text{onset}}(\phi)$ 曲線のディップ構造は、磁場によって電子状態の次元性が低下し超伝導が磁場によって破壊されにくくなっていることを反映している。さらに高磁場では $T_c^{\text{onset}}(\phi)$ 曲線の $\phi = 0^\circ$ に対する鏡映対称性が消失している。これは超伝導状態の空間的な対称性が変化していることを示している。これらの振舞いに対する不純物効果や磁場を導電面から傾けた場合の効果も考え合わせると、(TMTSF)₂ClO₄はスピン一重項超伝導体であり、低温高磁場においては実空間で秩序変数に変調した超伝導状態 (FFLO 状態) が発現している、というシナリオが最も有力であることを本章では結論している。

「第六章：結論」では上記の結論に至った結果と議論を総括してまとめるとともに、今後の研究の方向性についても言及している。

「付録A：Ag₅Pb₂O₆の超伝導状態と常伝導状態の性質」では、申請者の米澤氏が超伝導を発見した物質であり、もう一つの研究課題でもある銀鉛酸化物超伝導体 Ag₅Pb₂O₆の性質について簡単にまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文で扱われている分子性超伝導体 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ は、典型的な擬一次元的超伝導体としてよく知られている。この超伝導体および関連超伝導体では、磁場による超伝導状態の破壊を特徴付ける上部臨界磁場が、超伝導転移温度のエネルギースケールに比べて異常に高い。このことを説明するために、従来の超伝導体とは異なりスピン三重項の電子対が形成されている可能性や、電子対のスピンは一重項であるが全運動量がゼロでなくなるいわゆる FFLO (Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov) 状態が出現している可能性、あるいは磁場印加によってスピン一重項から三重項への移り変わりが起こっている可能性などが議論されてきたが、まだ解釈は決着していない。この物質での上部臨界磁場の異常な増大機構を解明することは、超伝導研究にとって重要な未解決問題のひとつになっている。

米澤氏はこの研究に新たな視点を与えるべく、京都大学の研究室で開発した「ベクトルマグネット装置」を駆使して、磁場方位を精確に制御しての電気抵抗測定を100ミリケルビン以下の低温まで行った。その結果、これまでにない緻密で詳細な情報を得ると共に、報告のなかった条件下での新たな現象を見出すことに成功した。具体的には、上部臨界磁場が導電面内の2つの方向で異常な増大を示すことがわかった。この研究ではベクトルマグネット装置を使いこなしての測定に加えて、ベチガード教授（デンマーク）のグループからきわめて純良な試料結晶が提供されたことが、高精度・高確度のデータ得るための重要なポイントとなっている。

上部臨界磁場が導電面内の2つの方向で異常な増大を示すことについて、一方は電子状態が二次元的で金属伝導も二次元であるのに対して、もうひとつの磁場方向では3次元金属性が保たれている。詳しい角度依存・温度依存の実験結果から、前者では電子の軌道運動が二次元的に制限されることで上部臨界磁場が増大する説明が得られた。さらに低温での上部臨界磁場の増大は結晶主軸とは少しずれた方向で最大となり、しかもその方向が温度と共に少し回転するという予想外の現象を見出した。この振る舞いによって、低温高磁場領域の超伝導状態はFFLO状態でもっとも自然に理解できることが示されたといえる。

これに対して3次元的な金属性が保たれる磁場方向では、上部臨界磁場の異常な増大は擬一次元性を特徴づける結晶主軸に一致した、極めて限られた磁場方向のみで起こることが初めて明らかになった。この条件下での超伝導状態についてはまだ理論的な分析が進んでおらず、今後の理論研究にも指針を与えるものとして意義がある。

この様に典型的な低次元超伝導体について、これまでにない精度・確度で方位制御した磁場のもとでの緻密な研究によって、その上部臨界磁場の増大現象について新たな重要な知見が得られたといえる。実験技術的にも超伝導体の臨界磁場決定に、これまでにない高精度な研究手法を確立した成果は大きく、今後、他の異方的超伝導体にも適用する発展性が見込まれる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。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、申請者の学識も確認できたので合格と認めた。