

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 黒川穂高

鉄原子を主要な構成要素として含む鉄系超伝導体は、2008 年の発見以来、50 K を超える高い超伝導転移温度と非従来型の超伝導発現機構、多バンド性などから非常に注目を集めてきた。中でも、鉄とカルコゲナイドのみからなる鉄カルコゲナイド超伝導体 FeSe は、結晶構造こそ PbO 型と単純だが極めて多彩な物性を示すことから、鉄系超伝導体の中でも現在最も関心を持たれている物質の一つである。FeSe の電子相図の研究では物理圧力または同族元素置換 (Te または S) による化学圧力が広く用いられるが、そこではネマティック秩序相が超伝導に与える影響の理解が大きな問題として提起されている。現在、バルク、薄膜試料ともにほぼ全組成での $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 試料の合成が報告されているが、 T_c の振る舞いだけを見てもネマティック秩序と超伝導との関連は複雑である。特に興味深い振る舞いとして、薄膜試料でのみ Te 置換によるネマティック秩序相の消失に伴って T_c が 1.5-2 倍と大幅に上昇することが確認されている。このような薄膜試料における T_c の変化の起源、薄膜とバルク試料との差異の起源を解明することは、ネマティック秩序が超伝導に与える影響の理解、さらには、本系の超伝導発現機構の理解のために必須である。

黒川氏は、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜においてネマティック秩序が超伝導状態に与える影響を解明することを目的として、薄膜試料の複素電気伝導度の測定手法の開発、並びにそれを用いた $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜の物性の測定をテーマとして研究を行い、論文を提出した。

論文は全部で六章から成る。

第一章は、研究の背景についての記述である。FeSe におけるネマティック秩序相、バルクの $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 試料における超伝導ギャップ構造、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜試料の電子相図といった論文の目的に密接に関わる事柄について重点を置きながら、鉄カルコゲナイド超伝導体の物性についての研究の歴史・現状が記述されている。

第二章は、第一章に記述された研究背景を踏まえた本研究の動機がまとめられ、研究の目的が記述されている。

第三章は、複素電気伝導度の虚部 σ_2 ($\propto \lambda^{-2}$) (λ : 磁場侵入長) の測定について記述されている。最初に、 λ の測定手法である coplanar 共振器法による解析の原理、共振器の加工方法、試料の特性について記述された後、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜の測定結果と考察が提示され

る。中心的成果として、ネマティック秩序の有無によらず超流体密度と T_c に比例関係が見られたことから、 T_c の決定に寄与するのは超流体の多寡であることが指摘されている。

第四章は、複素電気伝導度の実部 σ_1 の測定について記述されている。まず、薄膜試料における σ_1 の測定手法が十分に確立されていない現状が紹介された後、論文の提出者が考案した σ_1 の解析法と実験手法が記述される。NbN 薄膜を用いた測定・解析手法の検証について触れられた後、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜の σ_1 の測定結果が示される。 σ_1 から得られた緩和時間 τ の温度依存性がネマティック秩序の有無で変化することから、同秩序が超伝導ギャップ構造にけるノードまたは極小の形成に重要な役割を果たしていると考えられている。

第三章と第四章の実験結果を踏まえた上で、第五章では、密度汎関数法による $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ のバンド分散の計算結果について、ネマティック転移の効果、格子ひずみ効果、Te 置換効果の三点に主眼を置いて記述されている。ネマティック相と非ネマティック相のバンド分散の比較から、ネマティック相では非ネマティック相に比べ Fermi 面近傍の状態密度が減少する傾向があることが示される。格子歪み効果については、圧縮歪みによってネマティック相が不安定化するという実験と整合する傾向が計算でも確認されている。Te 置換効果についての節では、Te 置換に伴う電子相関の減少を計算に取り込むことで実験的に観測されるネマティック相の不安定化が再現されることが示されている。また最後に、ネマティック転移と Te 置換に伴う電子相関の減少を考慮することで、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜とバルク試料において T_c の Te 量依存性が異なる原因を説明できると提案している。

第六章は全体を総括し、本研究の結論が記述されている。

以上のように本論文中では、薄膜試料の σ の測定について論文提出者が測定手法の開発から取り組み、新規手法による測定装置を新たに建設したこと、 σ の測定に加えバンド計算も駆使し、これまで明らかでなかった $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜におけるネマティック秩序と超伝導との関係を解明したことが報告されている。ネマティック相は FeSe のみならず多くの非従来型超伝導体で観測される秩序相であり、ネマティック秩序と超伝導との関連の理解は $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 以外の幅広い非従来型超伝導体における超伝導現象の理解に向けても極めて重要な視点であると考えられる。したがって、本研究は今後の超伝導研究の広汎な進展にも寄与する、高く評価できる内容であると言える。

本論文における研究成果は、本研究科前田研究室において行われたものであり、また部分的には青山学院大学の北野晴久氏、孫悦氏の助力のもとに進められているが、研究の主要な部分は申請者がほぼ独力で行ったものである。したがって、本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。