

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 齋藤 優

物質科学の劇的な進展によって、原子層レベルの厚みを有する様々な 2 次元物質が得られるようになり、その多様な物性や機能が大きな注目を集めている。その中で近年新しい 2 次元超伝導体に注目が集まっている。2 次元超伝導体研究の歴史は古く、前世紀半ばからアモルファスもしくはグラニューラ構造を有する金属薄膜が研究の対象としてとなってきた。これに対し、近年の 2 次元超伝導体はすべて非常に高い結晶性という際立った特徴を有し、それが従来の 2 次元超伝導体とは異なる物性発現の源泉となっている。本論文は、電界誘起超伝導を対象に、高い結晶性に起因する 2 次元超伝導体の様々な新物性を開発してきた報告であり、反転対称性の破れに起因する新現象や、低次元性に由来する強い量子揺らぎの影響を明らかにしている。本論文は 6 章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第 1 章では、導入として 2 次元超伝導研究の歴史を解説している。前世紀の成果、特に量子相転移について簡潔に述べた後、今世紀になって盛んに開発が進められている高結晶性 2 次元超伝導体について、分子線エピタキシー (MBE) 法、機械的剥離法、界面・電界効果法の順で詳しくレビューを行っている。

第 2 章では、研究対象とした結晶の作製方法、電子ビームリソグラフィーを用いたデバイスの作製法と電気伝導度測定法の説明がなされている。

第 3 章では、2 次元超伝導体の量子相転移について論じている。最初にアモルファス金属薄膜の実験に基づき提唱された超伝導相図を紹介した後、窒化塩化ジルコニウム  $ZrNCl$  における電界誘起超伝導の基礎測定から 2 次元超伝導の証拠を提示している。次に超伝導転移温度以下の電気抵抗の詳細な解析から、本系の磁場中超伝導基底状態は、ゼロ抵抗を示す磁束格子でも磁束ガラスでもなく、有限の抵抗を示す量子金属であると結論している。このような量子金属が発現する理由を、磁束の弱いピン止めと大きな量子揺らぎから議論し、従来の乱れた 2 次元超伝導とは大きく異なる物理描像を提供した。

続いて、超伝導のオンセットの解析から、低温強磁場領域が弱い乱雑さを反映した量子 Griffiths 相として理解できることを示し、従来の乱れた 2 次元系では明瞭に見られなかった量子 Griffiths 相が、結晶性の高い 2 次元超伝導体を対象とすることで顕在化したと主張した。そのうえで、高結晶性 2 次元超伝導体の包括的相図を提示している。

第 4 章では、二硫化モリブデン  $MoS_2$  の電界誘起超伝導の上部臨界磁場  $H_{c2}$  について報告している。特に面内方位に対する  $H_{c2}$  がパウリ極限の 4 倍以上に達する大きな値を示すことを発見し、それを理論家の協力を得て、 $MoS_2$  単層における面内反転対称性の破れとスピン軌道相互作用の効果によって説明した。具体的には、電場下の第 1 原理計算によって決定されたスピナーバレーロッキングを伴うバンド構造を基に、 $H_{c2}$  の実験値を半定量的に再現することに成功した。 $MoS_2$  における電界誘起超伝導は非常に珍しい 3 回対称性を有する超伝導体で、2 次元性という特徴を生かして面内磁場に対する軌道運動を最小化し、反転対称性のない超伝導の特徴を抽出したものであると総括している。

第5章では、 $\text{MoS}_2$ の電界誘起超伝導の非相反超伝導輸送現象について報告している。非相反輸送は反転対称性のない系に共通した性質で、 $\text{MoS}_2$ の結晶性に基づいた選択側を満たすように非相反信号が現れるとともに、非相反信号がノーマル状態から超伝導になることによって大きく増強されることを見出した。さらに、理論家との共同研究によりこれらの現象を定性的に説明することに成功し、非相反輸送特性が反転対称性の破れた超伝導を理解するための新たなプローブとして有効であることを示した。

第6章では、本研究によって得られた成果について総括を行い、展望について述べている。

以上をまとめると、本研究は、機械的剥離法によって作製した  $\text{ZrNCl}$  と  $\text{MoS}_2$  単結晶における電界誘起超伝導の輸送現象の研究を通して、高結晶性 2 次元超伝導体という新しい概念を創出したと総括される。第 1 に、量子金属相や量子 Griffiths 相などを含む、高結晶性 2 次元超伝導の包括的超伝導相図を明らかにした。第 2 に、反転対称性の破れた超伝導の新物性として、上部臨界磁場と非相反輸送現象の大幅な増強という 2 つの新現象を見出すとともに、スピン軌道相互作用や伝導帯の非放物線性を取り入れることによって理論的な説明を与えた。

以上の知見は、近年の 2 次元超伝導の新たな分野を先導するとともに、2 次元物質とその電界効果にはさらに広範な物性・機能性が発現する可能性があることを示した。これらの成果は、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待され、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。