

審査の結果の要旨

氏名 土屋 雄司

近年の微細加工技術の発展により、超伝導体に様々な構造を導入し、多様な機能を発現させることが可能となってきた。このような背景のもと、ナノ構造超伝導体と言われる様々な微細構造を導入した超伝導体において、磁束量子の有用な運動を制御し、不要な運動を抑制しようとする研究に大きな関心が集まっている。これは、超伝導体の電磁応答が、外部磁場や電流により誘起される磁束量子の振る舞いに支配されているためである。

様々なナノ構造超伝導体のうち、周期的な構造を導入した多重連結系として、空孔の小さなアンチドット系と空孔の大きなネットワーク系が知られている。これまで、このようなナノ構造超伝導体における磁束量子の振る舞いは、主に磁化測定や抵抗測定等の巨視的な物理量の測定により推測されて来た。一方、1990年代中頃より様々な局所磁場測定法が開発され、超伝導体中での磁束量子の配置および磁束分布の測定が可能となってきた。その中で、磁気光学効果を用い、広い測定範囲と実時間観察可能性を有する磁気光学イメージング法が盛んに用いられるようになってきた。本研究では、2種類の全く異なるナノ構造超伝導体における磁束量子の振る舞いを、磁束侵入過程の磁気光学イメージングにより詳細に研究した。

本論文は全6章より構成されている。第1章は概要であり、本研究の背景と研究目的・内容が簡潔に紹介されている。第2章では、予備知識として後の議論に必要な基礎知識および、微細加工を施した超伝導体における磁束の運動および磁束雪崩についてのこれまでの研究が詳しく紹介されている。第3章では、本研究で用いた主要な実験手法である磁気光学イメージング法に関し、その原理、実験装置・実験方法、および得られたイメージの解析方法が詳細に述べられている。第4章および第5章において、本論文の主題である2種類のナノ構造超伝導体における磁束量子の侵入の様子が、磁気光学イメージングのデータを基に詳細に議論されている。第4章では、超伝導薄膜を微細加工した2次元ナノ構造超伝導体の代表として正方格子ネットワークにおける磁束侵入が詳細に研究されている。本研究以前には、アンチドットを導入した正方格子ネットワークでは、直感的に理解容易な“vortex channeling”モデルで説明される格子平行（最近接）方向への運動が普遍的な磁束量子の侵入様式と考えられていた。しかし、格子平行方向ではなく、対角（次近接）方向への磁束量子の侵入が多くの場合に起こることを、超伝導ネットワークの線幅、周期、膜厚、超伝導材料 (Nb、MoGe)、温度、磁場、熱伝導率を系統的に変化させながら測定することにより明らかにした。対角侵入領域は、高温対角侵入領域と低温対角侵入領域に分かれる。磁束量子のピン止めが弱くなる高温での対角侵入は、主に空孔に捕捉された磁束量子間の反発力に支配されており、時間依存 GL 方程式による磁束ピン止めのないネットワーク系のシミュレーション結果と定性的に一致する。また、この領域が有効磁場侵入長～格子周期程度となったときに起こることからも、磁束量子間の反発力が重要な役割を果たしていることが裏打ちされる。試料を Nb より臨界電流密度が小さなアモルファス MoGe にすることにより、高温対角侵入領域が広がることも、上記の解釈を支持している。低温対角侵入領域は、正方形空孔の角の部分から磁束ジェットが次近接空孔方向に伸びることにより発生するものと解釈される。磁束ジェットは、超伝導体にお

ける電流-電圧特性の非常に大きな非線形性と試料の欠陥（今の場合空孔）の共同作用により発生するものと理解されている。第5章では、超伝導体の微細加工技術の更なる進歩により可能となってきた多層構造を持つ3次元ナノ構造超伝導体の最も簡単な例として、Nbの超伝導ストリップアレーを2層積層した3次元構造超伝導ストリップアレーにおける磁束侵入および磁束雪崩の挙動を詳細に報告している。この3次元構造超伝導ストリップアレーでは、反磁場効果を高めるため、下層と上層の超伝導ストリップを半周期ずらして積層している。各ストリップの線幅を8 μm に固定し、ストリップ周期、超伝導膜厚、層間絶縁層膜厚を様々に変化させた3次元構造超伝導ストリップアレーにおける磁束侵入過程を磁気光学イメージングにより系統的かつ詳細に研究した。上下層のストリップに重なりがある時、熱磁気不安定性に起因する磁束雪崩が観測される。特に、上下層の重なりが最大の試料では、電気的にはつながっていない超伝導ストリップを横切る線状の磁束雪崩を初めて観測した。単一の超伝導ストリップにおける磁束雪崩現象は、これまでもいくつかの詳細な研究がなされており、試料の大きさに依存したしきい磁場・しきい温度が存在することが知られている。本研究で用いた各超伝導ストリップの幅は、Nbの単一超伝導ストリップが液体ヘリウム温度程度で磁束雪崩を起こす最小試料幅よりもずっと狭いにも関わらず、臨界温度の9割程度の高温まで磁束雪崩が観測されたことは、特筆に値する。何重にも増強された反磁場効果により、超伝導層間に磁束密度の非常に高い領域が発生したことが原因と推測している。また、このことは臨界状態における磁束密度分布の計算からも確認されている。第6章は総括であり、2種類のナノ構造超伝導体における磁束量子の振る舞いがまとめられ、ナノ構造超伝導体の磁気光学イメージングによる研究の今後の展望が述べられている。

以上要約すると、本論文は、様々なナノ構造超伝導体における磁束侵入の機構および特徴を、最先端の磁気光学イメージングを用いて観測することにより明らかにし、ナノ構造超伝導体の応用に関する貴重な知見を与えたものであり、物理工学、超伝導工学の発展に寄与するところは大きい。よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格であると認められる。