

審査の結果の要旨

氏名 浅井 栄大

近年、超伝導体の特性を生かした高機能デバイスや省エネルギー機器は、通信や医療等様々な分野でその実用化が進みつつある。このような実用化の中で特に重要な役割を果たしている第二種超伝導体においては、磁場下における臨界電流密度 (J_c) を十分高くするために、磁場下で侵入する量子化磁束を「ピン止め」する必要がある。他方、メゾスコピック系において発現する磁束の特異な状態が、新規なデバイスへの応用の観点から注目されている。このように超伝導磁束のダイナミクスは工学的応用と密接に関わっているが、まだ十分には理解されているといえず、またこれを実験的手法のみによって解明するのは難しい。本論文は、超伝導体における磁束のダイナミクスを計算機シミュレーションにより調べ、実用化に向けた高性能な超伝導材料の設計指針を得ようとしたものである。本論文は 6 章からなる。

第 1 章は緒言であり、工学における超伝導体の重要性を簡潔に述べた後、 J_c 向上における磁束量子の制御の必要性、メゾスコピック系における特異な磁束状態の発現とその応用の可能性、および統計物理学からの磁束状態への興味など、磁束の状態に関するこれまでの研究の流れを様々な観点から概観している。さらに、磁束の状態及び運動に関する実験観察の研究例を紹介した上で、磁束のダイナミクスに未解明な点が多く残されており、それを実験的手法のみで解明することが難しいことを指摘して、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、磁束の状態に関する基礎理論を述べている。超伝導に対するロンドン理論およびギンツブルグ - ランダウ理論の概略を述べることから始めて、磁束の状態、磁束間の相互作用、外部磁場による磁束の運動等についての理論的基盤を概説し、その後、本研究の計算に用いる磁束の運動方程式を説明している。

第 3 章では、様々な配置の面状ピン止めを導入した系における磁束ダイナミクスを分子動力学法により調べた結果を述べている。まず、二次元の計算モデルを用いて等間隔に面状ピン止めが並んだ系における J_c (正確には $0K$ における J_c に相当する臨界 $depinning$ 力 (f_{cr})) の磁束密度依存性について調べた。一般に周期構造を持ったピン止め配置では、その周期構造に磁束格子が適合した場合にピン止め効率が上昇するマッチング効果と呼ばれる現象が見られるが、面状ピン止めを周期的に導入した場合には、磁束密度 - f_{cr} 曲線にこのマッチング効果のピークが幅広くなったものと見なせる平坦領域が現れることを明らかにした。次に同様に二次元の計算モデルを用いて、基本周期が長短 2 つのユニットの組み合わせになっているやや複雑な周期構造において f_{cr} の磁束密度依存性について調べた。ピン止め力や面状ピン止め密度を前記の等間隔モデルの場合と等しくなるようにして比較すると、 f_{cr} が等間隔モデルの場合より大きくなる磁束密度領域が現れることがわかった。

次に、3次元モデルを用いて面状ピン止めとランダムに分布した点状ピン止めとが混在した系における磁束ダイナミクスを計算した。 f_{cr} は、点状ピン止めのピン止め力を面状ピン止めのそれより弱くしていく場合には面状ピン止めのみ存在する時の値に、逆に強くしていく場合には点状ピン止めのみ存在する時の値に、それぞれ漸近していくことが確認され、両者のピン止め力が拮抗する領域においては面状ピン止め・点状ピン止めの一方のみが存在する場合よりも大きな値となることが示された。さらに、このようなピン止め特性の変化が三次元的な磁束構造の変化と密接に関連している事がわかった。

第4章では、メゾスコピック超伝導体において、注入される外部電流の分布と磁束ダイナミクスとの関係について時間依存ギンツブルグ-ランダウ方程式に基づいて調べた。二本の細い架橋によって結合された二つの直方体試料のモデルに対して架橋を流れる電流量の磁場依存性を計算した結果、ある磁場値の付近で電流が急激に変化するスイッチング現象を見出した。そして、この振る舞いが電流リード及び架橋の周りにおける磁場分布の磁束侵入による変化に起因することを示した。このスイッチング現象は、新規超伝導デバイスへの応用が期待される。さらに、異なる厚みの試料について同様な計算を行った結果から、このスイッチング現象における電流変動の幅が試料の厚みに依存する事を見いだした。

第5章では、上で得られた結果を踏まえて、工学的応用に向けての考察を行った。まず第3章で得られた知見に基づいて J_c 向上の指針を述べると共に、本論文における解析では考慮されていないが実用を目指した材料・デバイス設計においては留意すべき点として有限温度の効果やピン止めポテンシャルの形状の影響などがあることを指摘した。次に第4章で得られた知見に基づいてスイッチング素子の設計指針について述べた。特に、第4章で用いたモデルよりも単純だが同様のスイッチング現象が発現しうる構造を提案した。

第6章は総括である。

以上のように、本論文は、超伝導体における量子化磁束の振る舞いを計算機シミュレーションにより解析した。面状ピン止めが様々な周期配列で導入された場合やメゾスコピック構造における磁束の振る舞いを解析し、臨界電流密度向上のための材料設計や、新規なスイッチングデバイスの設計の上で有用な知見を得た。よって本論文の超伝導工学、計算マテリアル工学への寄与は大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。