

氏名(本籍)	丹下将克(岡山県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第4241号		
学位授与年月日	平成19年3月23日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8+δ</sub> ウィスカーにおけるボルテックスダイナミクスの研究		
主査	筑波大学教授	工学博士	吉崎亮造
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治
副査	筑波大学教授	理学博士	門脇和男
副査	筑波大学助教授	Ph. D.	小泉裕康

### 論文の内容の要旨

酸化物高温超伝導体 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> (Bi-2212) を用いて、ボルテックスに関する研究が今まで盛んに行われてきた。結晶の *c* 軸方向に磁場を印加したときのボルテックスダイナミクスに関して、巨視的な系での理解は急速に進んだ。一方で、微視的な系におけるボルテックスダイナミクスに関しては、その理解はまだまだ不十分である。微視的な系における特性を調べるために、Bi-2212 ウィスカー（ひげ結晶）を測定サンプルとして選択した。サブマイクロメートルもしくはマイクロメートルスケールの矩形断面をもつ Bi-2212 ウィスカーの規則的な形状は、微視的な系、特に擬一次元系（ストリップ系）でのボルテックスダイナミクスにおける特異な現象を探索するのに適した材料形体である。

Bi-2212 ウィスカーを self-powder compaction 法によって準備し、標準四端子法を用いて電気輸送測定を行った。我々が開発したこの成長方法は、他の Bi-2212 ウィスカー育成方法と比較すると、次の2点が特徴的である。第1点として、結晶育成のための前駆体であるペレットに、溶融-急冷して作製したガラス質状のペレットではなく、圧粉体のペレットを用いている点である。第2点として、そのペレットの組成には Bi-2212 組成 (Bi<sub>2+x</sub>Sr<sub>2-x</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub>) を用い、Pb や Al などの他元素が添加されていない点である。酸素分圧と育成温度を調節しながらペレットに熱処理を施すことで、ペレットの焼結力を駆動力にしてウィスカーを育成している。したがって、他元素による表面の汚染を心配することなく、ウィスカーを比較的容易に育成でき、結果として1段の超伝導転移を示す試料を準備することができる。この良質な Bi-2212 ウィスカーについて T<sub>c</sub> に近い高温 (70-77K) において数 100Oe 以下の弱磁場領域で電気輸送測定を行った結果、大きく分けて3つの注目すべき特性が観測された。

- ① (弱磁場下における J<sub>c</sub> のピーク効果) 一定温度で外部磁場が増加するとき、0.5μV という電圧基準を使って電圧-電流 (V-I) 曲線より見積もった J<sub>c</sub> は、数 100Oe 以下の領域で磁場と共に増加する。そして、J<sub>c</sub> の値がピークに到達した後、さらに磁場が増加すると J<sub>c</sub> は減少する。通常、Pb などの元素をドーピングしていないピンニングの弱い Bi-2212 バルク単結晶では、このような高温領域におけるピーク効果は起こらず、磁場の増加と共に J<sub>c</sub> は減少する。したがって、この弱磁場、高温領域で観測された J<sub>c</sub> のピーク効果は、ストリップ形状に固有な現象であると思われる。この J<sub>c</sub> のピーク効果に関して、サンプル幅 *w* に依存し

た変化 ( $w$  の減少に伴う  $H_{\text{peak}}$  の増加) を我々は観測している。このサンプル幅による  $H_{\text{peak}}$  の変化は、高温領域における  $J_c$  のピーク効果に対する解釈と矛盾しない。つまり、サンプル幅が小さいほど、前駆的なボルテックス配置から Bragg glass へ変化するのに必要な磁場が大きくなるからである。

- ② (磁場に対する電圧応答のリエントラントな振る舞い) 自己磁場下で抵抗を生じさせるような電流密度 ( $> J_c$ ) をもつ一定輸送電流下において外部磁場を増加させたとき、その磁場に対する電圧応答は、磁場の増加に伴って有限電圧状態から磁場誘起ゼロ電圧状態に変化する。さらに大きな磁場においては、再び有限電圧状態が観測される。磁場の増加に伴って電圧が減少し、最終的に電圧の消失、つまり磁場誘起ゼロ電圧状態が生じる。その後、磁場の増加に伴って電圧が再び現れ、徐々に増加する。このリエントラントな振る舞いは、サンプル幅が極端に小さい場合 ( $w = 3.5 \mu\text{m}$ ) には観測されなかった。また、その場合には  $J_c$  のピーク効果も観測されていない。これは、前駆的なボルテックス配置から Bragg glass への変化を反映した現象が起こるためには、ある程度のサンプル幅が必要であることを示唆している。
- ③ (自己磁場下における  $J_c$  のサンプル幅依存)  $V$ - $I$  曲線より見積もった自己磁場下での  $J_c$  において、サンプル幅  $w$  が  $5 \mu\text{m}$  より大きい場合は、 $w$  の減少に伴って  $J_c$  が上昇する。これは、表面バリアによる高い電流密度をもつエッジカレントの  $J_c$  に対する寄与を考えると妥当である。一方、 $w$  が  $5 \mu\text{m}$  より小さくなると、 $J_c$  は急激に減少する。この急激な  $J_c$  の減少は、サンプル幅がボルテックスフリー領域の長さスケールになると、表面バリアの効果が弱まることを示唆しているのではないかと考えられる。また、磁場中での電気抵抗率の温度依存性において、サンプル幅がおよそ  $5 \mu\text{m}$  前後のときを境にして、その抵抗率プロファイルが明確に変化することを我々は観測している。このことから、極端に狭い幅を持つサンプルでは表面バリアの効果が減少することが示唆される。

このように、Bi-2212 ウィスカーに対して電気輸送測定を行うことで、我々は擬 1 次元的な形状 (ストリップ形状) に閉じ込められた希薄なボルテックスにおける動的特性を明らかにした。本論文で報告した動的特性はボルテックスダイナミクスに対する物理的な関心だけでなく工学的にも魅力的であり、特に、磁場に対するリエントラントな電圧応答は非線形応答であることから、デバイス応用への期待が大きい。さらに、このようなサンプル幅に依存して発生する現象の発見は、ボルテックスダイナミクスにおいて結晶の形状およびサイズの重要性を再認識させることになった。

## 審査の結果の要旨

本研究では新しい結晶成長方法で良質な Bi-2212 ウィスカーの育成に成功した。この良質な試料を用いてミクロンサイズの微少領域において量子磁束線渦糸状態 (ボルテックス) の動的振る舞いを 4 端子法による抵抗測定によって明らかにした。特に超伝導転移温度近傍の高温領域でのボルテックスフロー状態についてバルク単結晶試料ではこれまで観測されたことのない特徴的な試料のサイズ効果が本研究のウィスカー試料で観測された。観測された 3 つの効果はそれぞれに特徴的な振る舞いを示しており、その起源の考察は綿密な実験、実験データの詳細な検討と完璧性を求めた推論によって行われている。このように本研究がボルテックス間の相関と表面領域との相関という新しいテーマを開拓し、ボルテックスダイナミクスについて新たな知見を見出したことは高く評価される。

よって、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。