



10. 高温超伝導体中にトラップされたボルテックスの走査 SQUID 観察

東京工業大学応用セラミックス研究所 長谷川哲也

1. はじめに

走査型 SQUID 顕微鏡 (SSM) は、弱磁場下 ($< 100 \mu\text{T}$) には限られるものの、超伝導体中のボルテックスを直接可視化できるという特徴を持つ。弱磁場下でフィールドクールした場合、 T_c の極近傍を除いてはボルテックス間の相互作用は小さく、従って、観測されたボルテックス配列は、試料中に存在する比較的強いピニングサイトの分布を反映するものと考えられる。

ここでは、LaSr214 系、並びに Bi2212 系単結晶中にトラップされたボルテックスの SSM 測定を行ったので、その結果について報告する。

2. La214 系のボルテックス観察

La_{2-x}Sr_xCuO₄ 試料としては、TSFZ 法で合成された単結晶 ($x=0.15, 0.20$) を用いた。磁化測定から見積もった T_c はそれぞれ 35.6 K、30.0 K であり、前者はほぼ最適ドーブ、後者はオーバードープ状態にある。

図 1 に、最適ドーブ試料 ab 面の SSM 像 (測定温度 3 K) を示す。ここで、試料は $2 \mu\text{T}$ の外部磁場 (ab 面に垂直) の下で冷却している。図で幾つかの磁気ピークが認められるが、その周囲における磁束密度 B_z の積算値から、それぞれが単一磁束量子 ϕ_0 とであることを確認している。

図 1 より、ボルテックスはランダムに分布していることがわかるが、これは良質の単結晶試料に対してむしろ予想された結果といえる。実際、Y123 系単結晶でも同様のランダムな磁束配列が観測されている。

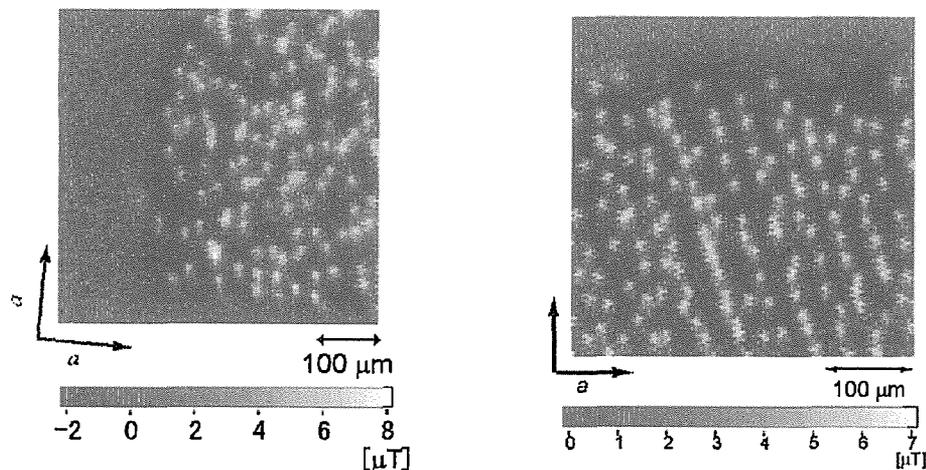


図 1. 最適ドーブ La214 の SSM 像(3 K) 図 2. オーバードープ La214 の SSM 像(3 K)

オーバードープ La214 で観測された SSM 像 (測定温度 3K) を図 2 に示す。この場合でも最適ドープ試料同様、単一磁束量子のみが観測されたが、ボルテックスは 1 次元的に配列する傾向を示した。しかも、その 1 次元配列の方向は結晶磁区とは無関係であり、 b 軸に対し 16 度の角度をなしている。

同じ試料で観測された SSM 像の温度変化を図 3 に示す。 $T_c(\text{onset})$ 以上の温度では一様な磁場が観測されるだけであるが、 $T_c(\text{onset})$ 付近になると、暗いコントラストの帯状領域が出現する。これは反磁性による磁束の排除を表しており、従って、図 3 の暗い領域は T_c が高く、局所的に超伝導に転移していることがわかる。さらに温度を下げるとボルテックスが出現するが、観測されたボルテックスの大きさは低温に比べ明らかに大きく、 λ の増大あるいはボルテックスの振動によるものと考えられる。温度の低下とともにボルテックス像は明瞭になり、23 K 以下ではもはや最低温度(3 K)での像と変わらない。これらの振る舞いは、定性的にマクロな磁化の温度依存性と良く対応している。

ここで注目すべきはボルテックスの分布であり、上述の帯状高 T_c 領域とほぼ平行して 1 次元的に配列していることがわかる。配列間の間隔はほぼ一定であり、この外部磁場条件 ($B_{\text{ext}}=2 \mu\text{T}$) の下では、 $d_{\perp}=55 \mu\text{m}$ 程度である。一方、1 つの列内でのボルテックス配列は比較的ランダムであるが、平均間隔 d_{\parallel} は $\sim 25 \mu\text{m}$ と d_{\perp} よりもかなり短い。さらに、 d_{\parallel} 、 d_{\perp} とも、 B_{ext} の増大に連れ減少する傾向を示した。

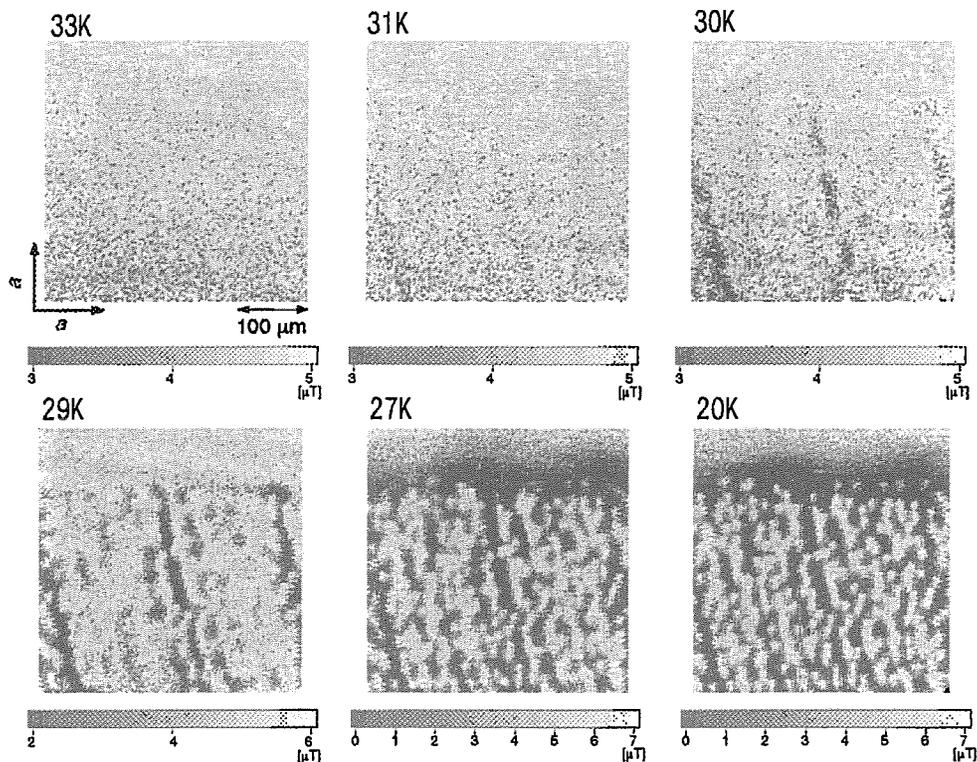


図 3. オーバードープ La214 における SSM 像の温度依存

以上の結果は、少なくとも μm レベル以下の割合で、面状のピンングサイトが存在することを示唆している。その起源としては、組成の揺らぎ（特に Sr 濃度および酸素量）、転位、あるいは小傾角粒界などが考えられる。現在様々な手法により、試料のキャラクタリゼーションを進めているが、まだ結論を得るには至っていない。少なくとも EPMA レベルでは組成の揺らぎは観測されておらず、また TEM 観察からも転位等は見い出されていない。一方、微小領域 X 線回折の結果からは、 a 軸に平行して小傾角粒界 ($\sim 2^\circ$ 程度) が幾つか走っている様子が観測された。しかし、粒界とボルテックス配列との間には明確な関係は見られないことから、少なくとも La214 系では、小傾角粒界は強いピンングサイトとしては機能しないと思われる。

2. Bi2212 系のボルテックス観察

図4は、Bi2212 系単結晶 ab 面の SSM 像である。図から明らかなように、それぞれのピークの強度は一定ではなく、実際に磁束量を算出してみると、多くの場合 $n\phi_0$ ($n>1$ の整数) となっている。走査 SQUID の空間分解能は $5 \mu\text{m}$ 程度であるため、個々のピーク内部の構造は不明であるが、 μm 以内の領域に複数のボルテックスが存在すると考えるのが自然であろう。すなわち、図4のピークは、ボルテックスの集合体を表していると考えられる。これは、不純物ドーパした系も含め Bi2212 一般に言えることであり、La214 系や Y123 系とは対照的である。

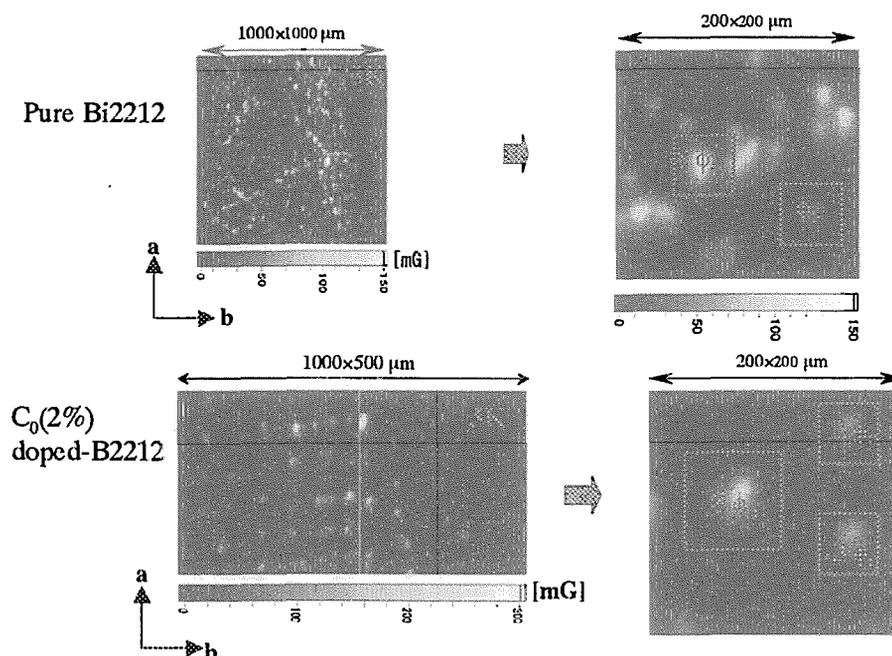


図4. pure および Co ドープ Bi2212 の SSM 像

図4のボルテックス分布は一見ランダムであり、顕著な配列構造は見られない。しかし、 $10 \mu\text{T}$ の磁場の下で冷却すると、ボルテックスは ab 軸に対し45度の角度に配列する傾向が見られた。上記の配列傾向は、Coを2%ドーブしたBi2212試料でより顕著である。図5に示す様に、弱磁場下でもボルテックスは(110)方向に配列しており、磁場を強くしていくと、配列間の間隔は一定のまま配列内の磁束数が増大し、最終的には磁場はほぼ連続的に分布するようになる。

このような(110)方向に沿った構造の起源として現時点で有力なのは、組成の揺らぎである。実際、EPMA測定によりBi/CuあるいはSr/Cuが周期的に揺らいでいることが確認されており、ボルテックス配列との対応関係について現在詳細に検討中である。

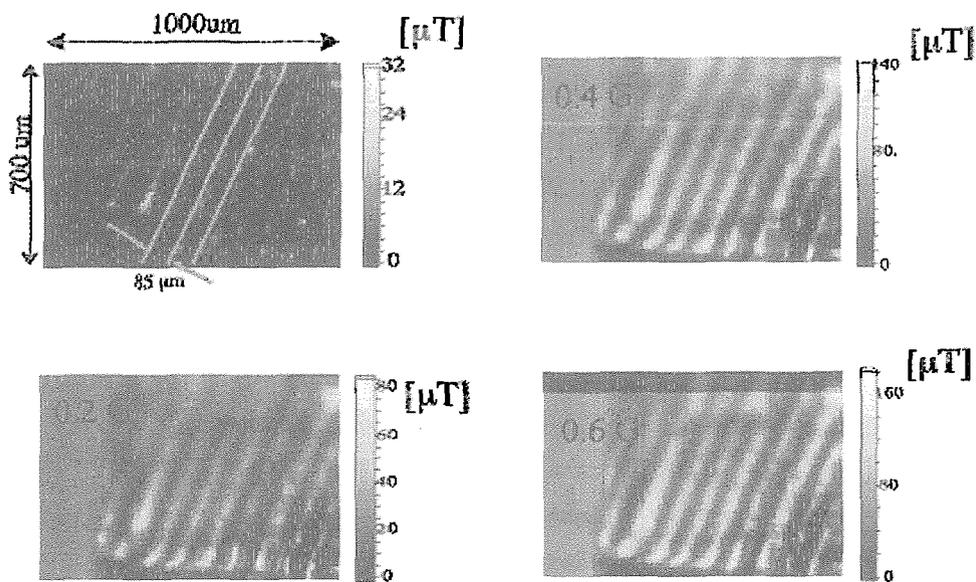


図5. CoドーブBi2212におけるSSM像の磁場依存