

論文の内容の要旨

論文題目 高温酸化物超伝導体における磁束系動的相図の研究

氏名 戸川 欣彦

[緒言] 高温酸化物超伝導体は、その名の由来通り、高温で超伝導転移を示す。そのため、熱揺らぎが大きくなり様々な物性に影響を及ぼす。超伝導体に磁場を印加した際現れる超伝導磁束系においても、熱揺らぎ、さらに、不純物等によるピンニングの効果で、磁束固体相のみならず磁束流体相など多様な静的状態が現れることがわかり、従来の理解は大きく変更を迫られた。高温酸化物超伝導体における磁束系動的挙動もまた、熱揺らぎとピンニングの影響を受け、動的相転移などの新たな現象が観測される可能性があり興味深い。また、超伝導体における磁束系ダイナミクスは、密度波、ウィグナー結晶、ジョセフソン格子の位相、ドメイン壁の運動、固体間摩擦、地震などのランダムピン中の内部多自由度系の運動に共通する現象、概念を探る上でのモデルとして注目を集めている。

このような問題に対して、駆動力に対する動的挙動の変化を探ることが重要となる。磁束系のような2次元の運動では、駆動力が大きくなると、ピン止めから外れた磁束が静止している磁束領域間を流れるというプラスティックフローが発生することが知られている。さらに駆動力を大きくすると、理論的には磁束は再秩序化すると考えられている。再秩序化相として、格子状に再秩序化した moving-Bragg-glass 相や、進行方向と垂直にのみ相関が発達した moving-smectic 相が提唱されているが、未だ見解は一致していない。moving-Bragg-glass 相がランダムピン中を並進運動をすると、ワッシュボード変調と呼ばれる周期的な速度変調が生じる。この現象は

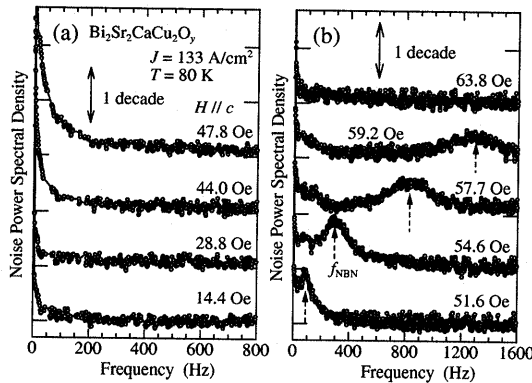


図 1: 伝導ノイズスペクトル

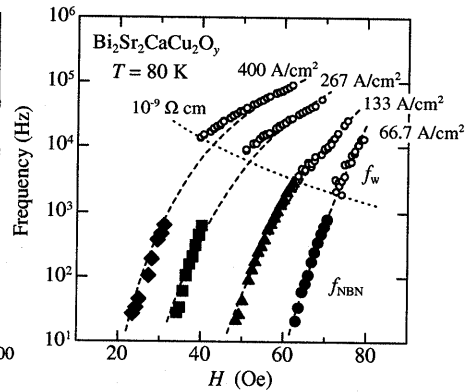


図 2: f_{NBN} と抵抗率から見積もられる f_w

密度波の運動状態のノイズスペクトル中でよく観測されているが、ランダムピン中の磁束系では極めて小さな領域においてしか観測されておらず、より巨視的スケールで観測されるかどうか再秩序化相を探る上で重要となる。さらに、高温酸化銅超伝導体においては、磁束系の動的挙動の推移はまだほとんど明らかにされていない。

本研究では、高温酸化銅超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ($\text{Bi}2212$) において、磁束系の運動における時間秩序に注目し、磁束の運動に伴い発生する速度揺らぎと密度揺らぎに着目したノイズ測定、直流信号と交流信号を同時に加えた干渉効果の手法を用い、駆動力に対する動的磁束状態の変化、動的相図を探ることを目的とした。

[実験] Floating Zone 法により育成した $\text{Bi}2212$ 単結晶棒を大気中で 800°C , 72 時間アニールした後、試料を切り出した。板状試料の典型的な大きさは、 ab 面内に $1.5 \times 1.0 \text{ mm}^2$, c 軸方向に 0.015 mm であった。電流、電圧端子用のパッドを金蒸着により形成し、さらに大気中で 800°C , 24 時間アニールを行い、試料を最適ドーピング状態にした。零磁場下での四端子法による ab 面内の直流抵抗率測定と c 軸平行磁場下での微小ホール素子アレイを用いた局所磁化測定により試料の特性を評価した。ノイズ、干渉効果の測定には、急峻な超伝導転移を示し、超伝導転移温度 T_c 直上の残留抵抗率が $400 \mu\Omega\text{cm}$ 以下であり、磁化可逆領域で磁束格子の一次相転移による局所磁化の跳びが観測される試料のみを用いた。 c 軸平行に磁場を印加し、駆動電流は ab 面内に流した。駆動された磁束が示す二種類の揺らぎ (電圧の揺らぎと局所密度の揺らぎ) のスペクトルを FFT アナライザー (HP-35670A) に用いて測定した。以下では、前者の測定を伝導ノイズ、後者の測定を局所密度ノイズと呼ぶ。また、直流電流と交流電流を同時に流す干渉実験では SR 830 を用いたロックイン検出により、微分抵抗を測定した。

[結果・考察] 図 1 に示すのは、 $T_c = 92.2 \text{ K}$ の試料の 80 K , 133 A/cm^2 での伝導ノイズスペクトルである。この温度での磁束格子の一次相転移磁場 (H_{pt}) は 70 Oe であった。磁場を増加すると、低周波領域に広がる broad-band noise (BBN) が観測される。さらに高磁場では、ピーク構造をもった narrow-band noise (NBN) が出現し、磁場の上昇と共に急速に高周波側へ移動していく。さらに磁場が増加すると、特徴的なノイズ構造は観測されなくなる。伝導ノイズの BBN と NBN はいずれも磁束固体相で観測された。

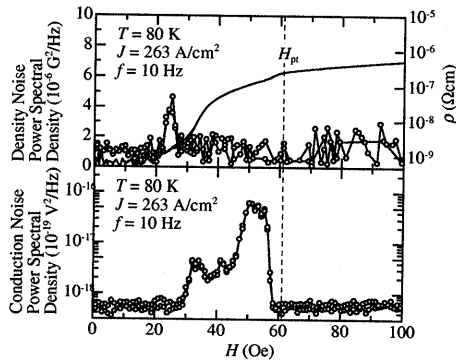


図 3: 同時測定による局所密度 BBN 強度と伝導 BBN 強度、および抵抗率の磁場依存性

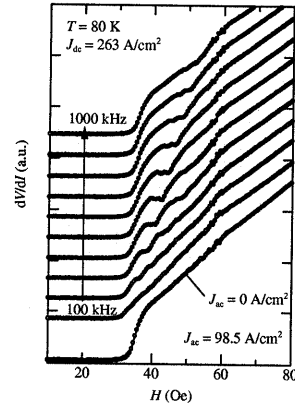


図 4: 干渉効果の磁場依存性

図 2 に示すのは伝導 NBN のピーク位置 f_{NBN} の磁場依存性である。ノイズスペクトルの特徴的なピーク構造の起源として、最も有力なのはワッシュボードノイズである。磁束系においてワッシュボード周波数は $f_w = v/a = (\sqrt{3}/2)^{1/2} \rho j / (B\Phi_0)^{1/2}$ と表される。ここで、 v は平均速度、 a は格子間隔、 ρ は抵抗率、 j は電流密度、 B は磁場、 Φ_0 は磁束量子である。図 2 には、測定感度 ($10^{-9} \Omega\text{cm}$) 以上の抵抗率測定の実験データを用いて見積もった f_w を併せてプロットしている。NBN は抵抗が発生する直前の磁束クリープ領域 (速度に換算すると、 $10 \mu\text{m/s} \sim 1 \text{mm/s}$) でのみ観測されたため、同一領域での f_{NBN} と f_w の直接的な比較はできないが、両者が極めて自然かつスムーズにつながる様子が見出される。このことは、伝導 NBN がワッシュボードノイズであり、少なくとも電圧端子間距離 ($\sim 1 \text{mm}$) 程度にわたって、磁束が再秩序化してコヒーレントに運動している様子を示している。進行方向に相関が発達した相として現在提唱されている動的状態は moving-Bragg-glass 相のみであり、今回のワッシュボードノイズの観測は高温酸化物超伝導体で初めてその存在を明らかにするものである。

駆動力が増すにつれワッシュボードノイズの強度が減衰する振る舞いが見出された。これは、駆動力が増すにつれピンニングの影響は相対的に弱くなり磁束のコヒーレンスが高まるという直感的な予想と反する。従って、この領域で動的相図が複雑に入り組んでいる可能性が考えられる。また、ワッシュボードノイズが観測された領域は、抵抗の振る舞いから磁束クリープ領域と見なされる。磁束クリープ領域では磁束バンドルが確率的に遷移すると考えられているが、その描像はコヒーレントな運動と矛盾する。少数 (~ 20 個) の磁束が極めて低速 ($\sim 1 \text{nm/s}$) でワッシュボード変調を示すという報告もある。どの速度領域までコヒーレントな状態が存在するか、また、クリープの概念の妥当性の検討は今後の課題であろう。

伝導ノイズで測定される量は磁束速度揺らぎ δv と磁束密度揺らぎ δn の重ねあわせとなる。一方、局所密度ノイズでは磁束密度の揺らぎ δn を観測する。従って、同一の試料で伝導ノイズと局所密度ノイズを同時に測定することで、 δv と δn を評価することができる。図 3 は $T_c = 91.1 \text{K}$ の試料の同時測定による伝導ノイズと局所密度ノイズの 10Hz でのノイズパワース

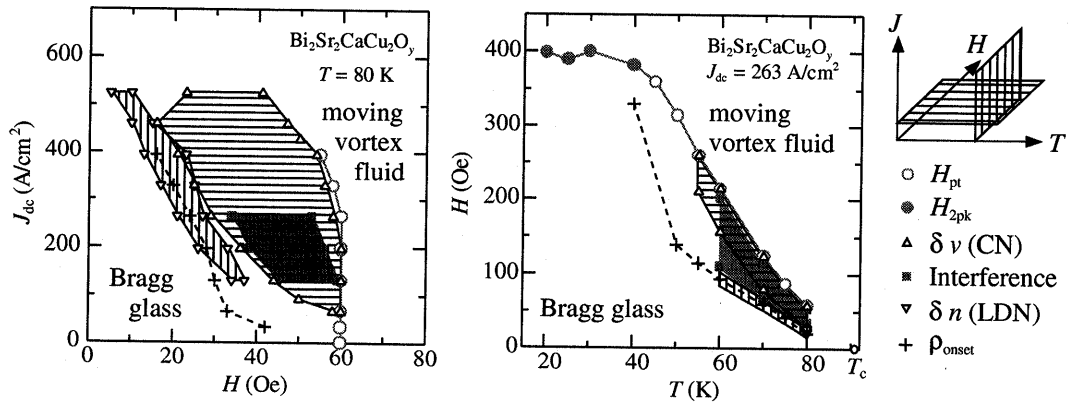


図 5: ノイズ及び干渉の手法により得られた高温酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ における磁束系動的相図の電流-磁場平面、及び、磁場-温度平面

ペクトル密度を示したもので、それぞれの BBN の磁場依存性を示している。磁場が増加すると、抵抗が発生し、その周辺で局所密度 BBN が発生する。それが減衰すると伝導 BBN が発生する様子が見出された。局所密度ノイズ測定から見積もられる δn を伝導ノイズに変換すると、ノイズフロアより五桁程低く、伝導ノイズへの寄与は極めて小さい。従って、伝導ノイズで観測されている揺らぎ量は速度揺らぎ δv によるものである。この結果から、磁束系ダイナミクスを理論的・数値的に考慮する際、密度揺らぎと速度揺らぎを別個の物理量として区別することが重要であることが分かる。

伝導 BBN の起源を探るため、コルピノ配置の電極を持つ試料を作製し、BBN の発生起源として有力な二つの可能性 (表面バリアと局所バルクピン) を直接的に検討した。その結果、コルピノ配置の試料の伝導ノイズにおいても、板状試料と同様な BBN が観測された。電極配置にかかわらず観測される伝導 BBN の起源は局所バルクピンによるものと考えられる。

また、大交流電流による強制的な磁束の振動と磁束格子のワッシュボード変調の干渉の観測に $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 系で初めて成功した。干渉効果の磁場依存性を図 4 に示す。興味深いことに、干渉効果が出現する磁場領域が、伝導 BBN が観測される磁場領域とほぼ一致した。これらの観測結果から、この磁場領域において、直流電流下でも少なからず磁束の進行方向に対する周期性が発達しており、また、伝導 BBN がコヒーレントなワッシュボード変調の前駆体とみなせることが示唆される。

以上の実験より得られた高温酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ における磁束系動的相図の電流-磁場、磁場-温度平面を示す。電流、磁場により駆動力が増加すると、ピン止めされた静止状態 (Bragg glass) \rightarrow 密度揺らぎを伴うプラスチックフロー状態 \rightarrow ランダムな速度揺らぎを伴うコヒーレント状態の前駆状態 \rightarrow ワッシュボードノイズ、干渉効果を示すコヒーレント状態 (moving-Bragg-glass) \rightarrow コヒーレンスが徐々に破れてゆく状態 \rightarrow 磁束流体相 (moving-vortex-fluid) というような高温酸化物超伝導体における磁束系の動的状態の移り変わりに関する描像を得た。