

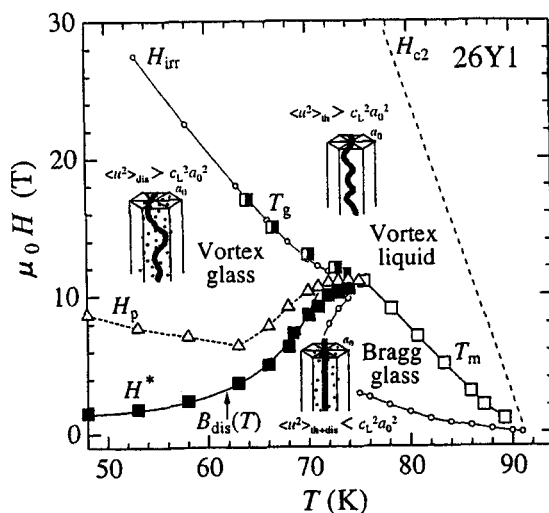
1. はじめに

第2種超伝導体の渦糸状態は、熱エネルギー、渦糸のピン止めエネルギー、渦糸間の相互作用エネルギー、母体結晶の異方性の強さによって決定されている。高温超伝導体の渦糸状態は、これら4つのエネルギーがほぼ同じ大きさを持ち、その相対的強さに依存して、渦糸状態は複雑な様相を示すことが解ってきた。一方、高温超伝導体をはじめとして、 $\text{UPt}_3$ ,  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  など強い電子相関を持つ超伝導体で超伝導状態の対称性が話題になっている。その中で、超伝導状態の対称性が磁束渦糸芯の電子状態や空間構造に与える効果について研究が急がれている。

高温超伝導体の応用にとっては、その利用目的に適合した性質を持つ材料の開発が求められ、そのためには、その基礎物性を理解し、性質を制御する必要がある。本研究では、高温超伝導体を中心とした新しいタイプの超伝導体の混合状態で現われる渦糸系の多様な相転移やクロスオーバー、不規則相の形成、渦糸と電磁波との相互作用などの多彩な現象を、極低温、強磁場、高周波などの極限的環境下において探求し、超伝導渦糸状態の基礎的理解を与え、それらの成果を材料開発に役立てることを目的としている。高温超伝導体の性質を支配する要因としては、渦糸の空間的配置とその運動であり、さらに渦糸の内部構造である電子状態である。本講演では、これらの問題に関して、本研究グループのメンバーによって行われた研究の1部について紹介したい。

2. ボルテックスマターの相転移

高温超伝導体としては異方性の強さがまったく異なる  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (YBCO) と  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  (BSCCO) に関して渦糸系の相転移が詳しく研究された。1図に典型的な例として、最適酸素濃度よりもわずかに高い酸素濃度を持つ YBCO の渦糸状態における渦糸系の磁場-温度相図を示す。渦糸相は大きく3つに分けられる。低温・低磁場では、渦糸は規則正しく配列した格子相(渦糸格子または Bragg glass

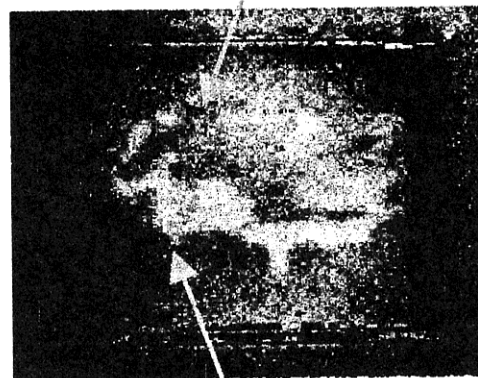


1 図

相と呼ばれる)を形成している。しかし、磁場の増加とともに、磁束ピン止めの効果が強く作用し、渦糸の配列が乱れた非秩序状態 (Vortex glass 相) に変わる (磁場誘起規則-不規則転移)。一方、温度が上昇すると、渦糸は熱エネルギーのためにその平衡位置を中心として大きく揺らぎ、ついには周りの渦糸からの束縛を振り切って動き回るようになる。これは、渦糸の固体状態から液体状態への融解を意味する。この渦糸系の相転移の様子は、母体結晶中の格子欠陥や不純物によって強く影響され、わずかな欠陥の変化によってもきわめて多彩な相転移を示すことが明らかにされた。BSCCO においても定性的には同様の相図が描かれる。しかし、BSCCO では強い異方性があるために、磁場誘起規則-不規則転移は、伝導層に垂直な方向の渦糸の相関が切れる 2 次元性の発現をきっかけとして現われ、その磁場の値も数 10 ミリテスラと YBCO の数テスラに比べてきわめて小さい磁場で起こる。BSCCO における磁場誘起規則-不規則転移は磁束格子融解相転移と同様に 1 次相転移であることがジョセフソンプラズマ共鳴の実験から明らかにされたが、YBCO ではまだ明らかになっていない。

渦糸格子の融解転移が 1 次の相転移であるために、この転移に伴って磁化のとびが観測される。これを利用して渦糸格子の融解が起こっている様子を目で見ようという試みが行われた。これは、ファラデー効果を用いた磁気光学的手法に基づいて、CCD カメラを利用した差像測定法を改良することによって、微小な磁束密度の変化を観測する方法である。この技術を用いて BSCCO における渦糸格子融解転移の様子を観測することに始めて成功した。結果の一例を 2 図に示す。複雑なパターンを示す固液界面を見ることができる。

70 K, 103 Oe 境界のピン止め

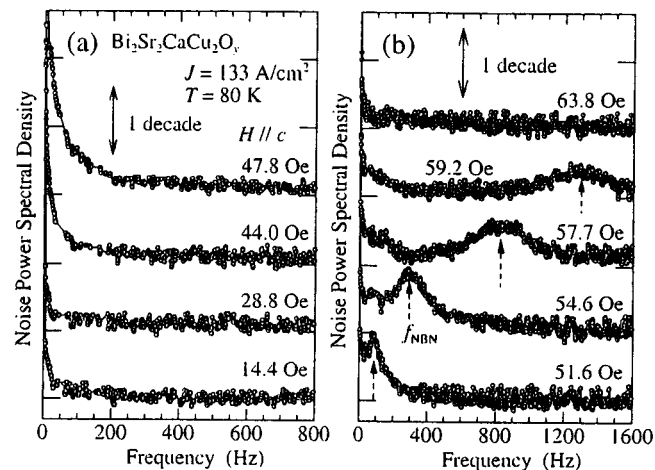


2 図 境界が大きく動く

### 3. ボルテックスマターのダイナミクス

渦糸の空間構造に関する静的な問題については、かなり詳しく調べられてきたが、渦糸の状態を記述するも一つの要素であるダイナミックな性質に関してはまだよくわかっていない。渦糸のダイナミクスを知る一つの手段として、渦糸の運動に伴う伝導ノイズや局所磁化とその揺らぎの測定がある。これらの測定によって渦糸の運動の特徴が理解される。3 図は、BSCCO に直流電流を流したときに現れる伝導度のノイズスペクトルの測定例である。50 Oe 以下の弱磁

場では、伝導度ノイズは周波数の増加とともに減少するが、低周波領域におけるノイズの大きさは 50 Oe 付近で最大となる。一方、50 ~ 60 Oe の領域ではノイズスペクトルにピークが見られ、磁場の増加とともに高周波側にシフトする。前者は、ブロードバンドノイズと呼ばれ、プラスチックフローに起因すると考えられ、また後者はコヒーレントフローに特徴的な性質と



3 図

理解される。渦糸の運動は、物理学の問題としては、渦糸間の相互作用の非局所性、電磁場、ランダムなピン止め中心との相互作用を含む複雑な問題である。同様の問題は、電荷密度波やスピン密度波のダイナミクスにも存在し、固体間の摩擦の問題へとつながる基本的、かつ重要な研究テーマである。

#### 4. ボルテックスマターの電子状態

強い電子相関を持つ超伝導体では異方性を持った超伝導電子対形成の可能性が指摘されている。このような電子対の異方的対称性は、超伝導体の渦糸状態にも影響を与えることが予想され、渦糸内部の準粒子励起状態や渦糸の空間構造に関する研究が最近急速に進みつつある。渦糸状態における準粒子の電子状態の性質を調べるために、比熱、熱伝導、フロー抵抗、NMR などの研究を行った。従来、渦糸はコヒーレンス長のスケールを持った常伝導コアとその周りを流れる超伝導電流といった単純なイメージで捕らえられてきたが、実験結果は、このような単純な考え方では理解できない多くの異常な性質を示した。これらの異常は、NbSe<sub>2</sub> などの従来型の超伝導物質でも観測されており、波動関数の対称性だけで解決できる問題なのか、それともさらに別の要因を考える必要があるのか、今後の検討が必要である。

我々が行った研究を、ボルテックスマターの相図・ダイナミクス・電子状態というテーマで捕らえてみると、相図に関しては、ジョセフソンプラズマ共鳴、キャリア制御、磁化や抵抗の高感度測定、直接観察などの研究手段の開発によって、かなりの部分が理解されたと思う。しかし、ダイナミクスや電子状態については、まだ研究の積み重ねが不十分であり、今後新たな展開が期待される領域である。