

平成21年6月26日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760017

研究課題名（和文） 人工ナノ構造をもつ高温超伝導体単結晶超薄膜の作製と磁束線物性

研究課題名（英文） Fabrication of ultra-thin films of high- $T_c$  superconductors with artificial nano-structures and vortex physics in these system

研究代表者

大井 修一（OOI SHUICHI）

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導材料センター・主任研究員

研究者番号：10354292

研究成果の概要：

超伝導体中の量子化された磁場（量子化磁束、渦糸）の振る舞いを理解し、人為的に制御することは、学術的な興味のみならず、できるだけロスのない超電導電力ケーブルや渦糸の運動を利用したデバイスなどへの応用面からも重要である。本研究では、劈開による薄膜作製が可能な高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$  への人工的な微細孔の導入、および物性評価を行い、人工孔格子が渦糸系に与える影響を系統的に調べた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	0	2,600,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	240,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：超伝導体、銅酸化物高温超伝導体、アンチドット格子、磁束量子

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導状態における量子化された磁束（渦糸）の状態やダイナミックスの研究は、ひも状物体の多体系の実例として、学究的にも興味ある研究対象となっている。近年では、大きな熱揺らぎや弱いピン止め力、層状の結晶構造といった従来超伝導体に無い特徴を持つ高温超伝導体の発見により、渦糸の研究範囲は大きく広がり、様々な相状態の存在が理論・実験の両面から研究され、その理解は飛躍的に進展した。ただし、磁束状態は試料中

のナノサイズの欠陥の質・量によって大きく影響を受けるが、人工的に制御された微細構造を導入し、それが渦糸状態へ与える影響についての研究は特に高温超伝導体ではほとんどなかった。

## 2. 研究の目的

(1) ナノ構造導入のために、純良な高温超伝導体単結晶薄膜の劈開による作製方法を見出し、本質的な物性を観測することに利用する。

(2) 良質な高温超伝導体単結晶薄膜に人工的にナノ構造（特に規則的な孔格子構造）を導入し、高温超伝導体の渦糸状態に与える影響を明らかにする。さらに、人為的な渦糸状態の制御を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 人工孔格子を持つ高品質な単結晶薄膜  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_3\text{O}_{8+d}$  ( $\text{Bi2212}$ ) の作製

人工構造を導入する前の基本となる単結晶薄膜作製方法を確立し、劈開法でも膜厚をある程度制御できるようにする。特に、単結晶薄膜の厚みを薄くした100nm以下、究極的には $\text{Bi2212}$ 結晶の1層分にあたる1.5nmまで薄くした超薄膜試料を作製を可能とする。

(2) 様々な人工ナノ構造導入と渦糸状態

これまでに渦糸フロー抵抗測定において見出した渦糸液体相でのマッチング効果について本質を明らかにするため、技術的に可能な限り微小な孔作製を試みるとともに、さまざまな人工孔配置パターン、孔直径、孔密度などのパラメータを変化させた試料を準備し、系統的に渦糸状態の変化を追う。また、孔が一つの単一リング構造で期待される Little-Parks 振動や、空間的に非対称な人工孔を導入することで渦糸が一方向にだけ容易に運動させる、渦糸ラチェット効果の観察を高温超伝導体において試みる。

### 4. 研究成果

(1) 分数マッチング効果

図1に示すように1ミクロン間隔で正三角格子状にアンチドットを配置した場合、これまでの研究で、渦糸液体相での整数マッチング効果が観測されることを見出したが、加工中の試料ダメージを低減することで、マッチング磁場 (23.9 Oe) 以下において、図2に示すようなある分数値において谷を持つ微細構造が渦糸フロー抵抗に現れることを高温超伝導体で初めて見出した。正三角格子の孔配列への、正三角渦糸格子の整合性を考えると、 $1/3$ 、 $1/4$  における分数マッチングを説明できる。 $1/2$  より大きい  $2/3$ 、 $3/4$ 、 $6/7$  は渦糸に占有されていない空孔を作る格子を考えることで同じく説明可能であるが、 $1/2$

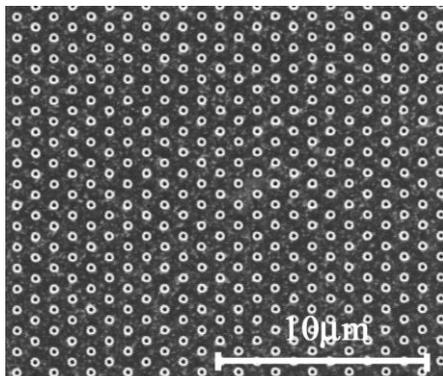


図1. 1 $\mu\text{m}$ 間隔で正三角格子状に配置された人工孔格子.

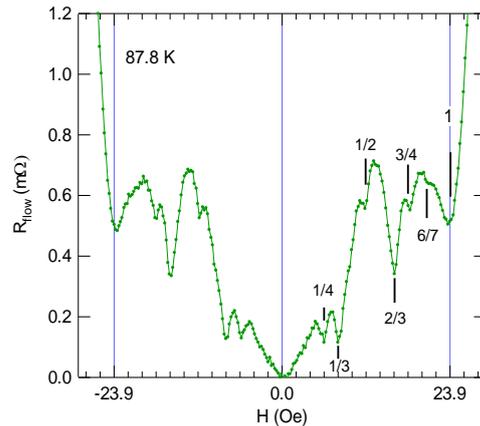


図2. 正三角格子状の人工孔配列を導入した試料における渦糸フロー抵抗の磁場依存性.

における分数マッチングはこの単純なモデルでは説明できない。インターステイシャルな位置に渦糸が入った格子構造を組むことで  $1/2$  での渦糸格子が安定化されている可能性がある。

ここに示した以外に、正方格子、ランダム配置、準結晶配置（ペンローズパターン）などにおいて実験を行い、正方格子においては、分数値が異なるが、同様の分数マッチング効果が起こることがわかった。

(2) 単一リングにおける渦糸状態と Little-Parks 振動

図3に示した試料を用いて超伝導状態において磁場中で電気抵抗測定を行い、リング中に侵入する渦糸の影響を調べた。ただし、このままではリング幅が広過ぎるため抵抗は磁場の増加とともに単調に増加する振る舞いを示す。そこで、リング幅を小さくするために、自作にて組み立てた、低温での抵抗測定が同時に可能なアルゴンイオンミリング装置中で試料をミリングしつつ、磁気抵抗測定を行い、その振る舞いの変化を追った。事前の実験で、イオンミリングを  $\text{Bi2212}$  に適用すると、膜厚が薄くなるだけでなく、面内方向の試料のサイズが劇的に小さくなることを見出した。そのためアルゴンイオンミリング処理によりリングの幅が縮小し、内径は大きくすることが予想される。実際、25分ミ

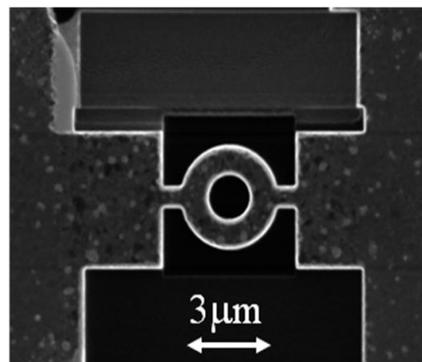


図3. 高温超伝導体  $\text{Bi2212}$  の単一リング.

リング後の観察ではリング幅が200-300nmへと小さくなったことを確認した。ミリング処理を施した試料において測定した抵抗の磁場依存性を図4に示す。超伝導転移温度近傍にて、磁気抵抗に僅かではあるが振動成分が現れた。より見易くするために、抵抗の磁場微分を磁場に対してプロットしたものを図4の内挿図に示す。この図から見積もられる振動周期は約12 Oeであり、リング内の渦糸数に対応すると思われる振動を観測した。高温超伝導体においては、期待される超伝導転移温度の振動が小さいためか、未だLittle-Parks振動を観察した例はない。今回の実験からLittle-Parks振動観察のために必要なリングサイズが見えてきたと考えており、今後より微小なリングでの観測を目指す。

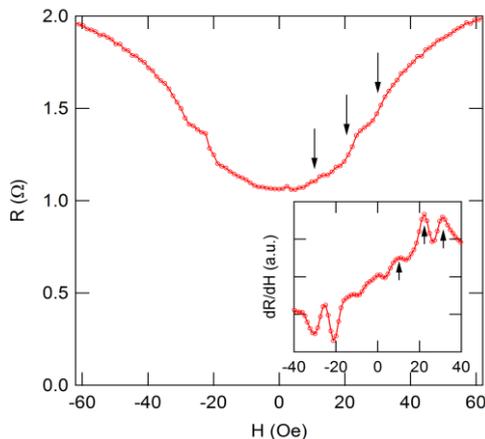


図4. 単一リング試料の磁気抵抗とその磁場微分(内挿図)

### (3) 渦糸ラチェット効果

磁束量子のラチェット効果を観察すべく作製した試料(図5)において、超伝導転移温度直下の温度で磁場中電気抵抗測定を行った。正方格子状に作製されたアンチドットパターンの影響を受けて、磁束量子のフロー抵抗(図6右軸  $R_{flow}$ )には20.7 Oeに抵抗の極小を持つマッチング効果がみられる。このフロー抵抗は図の上方向および下方向に運動する場合の磁束フロー抵抗の平均値である。実際には、人工的に導入した微細孔が三角形であり、空間的に非対称なピン止めポテンシャルとなることを反映して、上下方向で磁束量子の運動には非対称性があり、その差を測定したもの(整流効果の度合い)が図6の左軸  $R_{rect}$  であり、実際に整流効果があることが確かめられた。磁場0を境に磁束量子の向きが変わるため、整流効果の向きも逆になる。興味深いことに、マッチング磁場である  $\pm 20.7$  Oeにおいて、整流の向きが跳びを伴って逆になり、その跳びの前後で絶対値は極大であった。このことは一本の磁束量子と一個の非対称ピン止めを考えただけでは説明できず、集団としての磁束格子とピン止め格

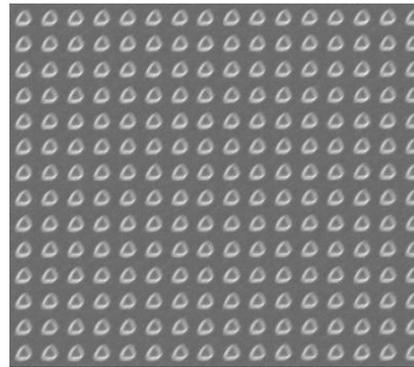


図5. 空間的に非対称な人工欠陥を導入したBi2212薄膜試料

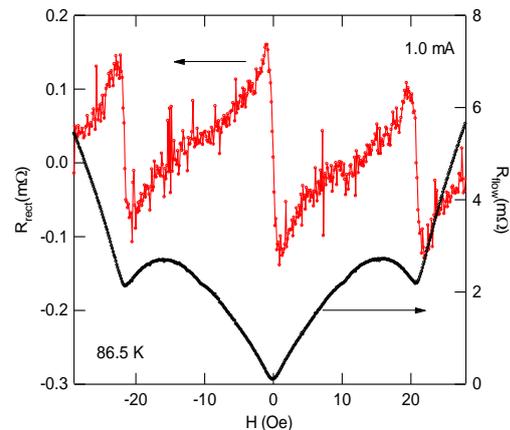


図6. 渦糸フロー抵抗(右軸)と整流抵抗(左軸)

子の相互作用を考慮する必要がある。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, "Fractional Matching Effect in Single-Crystal Films of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub> with Antidot Lattice", Physica C (2009), to be published. 査読有
- ② S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, "Fractional matching of vortices in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub> with triangular array of antidots", Journal of Physics: Conference Series **150** (2009) 052203 1-4. 査読有
- ③ S. Ooi, T. Mochiku, K. Hirata, "Vortex ratchet effect in single-crystal films of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>", Physica C **468** (2008)

1291-1294. 査読有

- ④ S. Ooi, *et al.*, "Nonlinear Nanodevices Using Magnetic Flux Quanta", *Phys. Rev. Lett.* **99** (2007) 207003 1-4. 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 大井修一、茂筑高士、平田和人、「微細孔格子を持つBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>における渦糸系の相転移」、日本物理学会、第64回年次大会、平成21年3月30日、立教大学
- ② 大井修一、「高温超伝導体Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>単結晶の微細加工と磁束線物性」、日本物理学会 第64回年次大会、平成21年3月27日、立教大学
- ③ 大井修一、茂筑高士、平田和人、「アンチドット格子を導入したBi<sub>2</sub>212の渦糸相図」、第16回渦糸物理国内会、平成20年12月9日、東京工業大学
- ④ Ooi S, Mochiku T, Hirata K, "Fractional matching effect in single-crystal films of Bi<sub>2</sub>212 with antidot lattice", International Symposium on Superconductivity, 平成20年10月29日, Epochal Tsukuba
- ⑤ 大井修一、茂筑高士、平田和人、「微細孔格子を持つBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub>における渦糸相図」日本物理学会、2008年秋季大会、平成20年9月23日、岩手大学
- ⑥ Ooi S, Mochiku T, Hirata K, "Fractional matching of vortices in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+y</sub> with triangular array of antidots", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), 平成20年8月10日, RAI Congress Center, Amsterdam
- ⑦ 大井修一、茂筑高士、平田和人、「Bi<sub>2</sub>212における磁束格子の分数マッチング効果」、日本物理学会、第63回年次大会、平成20年3月26日、近畿大学
- ⑧ Ooi S, Mochiku T, Hirata K, "Vortex Ratchet Effect in Single-Crystal Films of Bi<sub>2</sub>212", International Symposium on Superconductivity, 平成19年11月7日、Epochal Tsukuba
- ⑨ 大井修一、茂筑高士、平田和人、「Bi<sub>2</sub>212 単結晶薄膜の膜厚制御と磁束状態」、日本物理学会、第62回年次大会、平成19年9月22日、北海道大学

[その他]

ホームページ:

[http://www.nims.go.jp/units/p05\\_superconducting.html](http://www.nims.go.jp/units/p05_superconducting.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大井 修一 (OOI SHUICHI)

独立行政法人物質・材料研究機構、超伝導材料センター、主任研究員

研究者番号: 10354292

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし