

Bi-2223超電導線の臨界電流の磁界依存性

田 中 光 雄*・横 川 弘 樹**

Magnetic Field Dependence of Critical Current in Bi-2223 Oxide Superconducting Tape

Mitsuo Tanaka・Hiroki Yokokawa

Studies have been made on dependency of critical current on magnetic field of a silver-sheathed $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) tape which is typical high temperature superconductor.

Magnetic field was applied parallel, 45-degree angle and perpendicular to the tape surface.

In parallel field case critical current decreases slightly with magnetic field, on the other hand, in perpendicular case critical current decreases largely with the field. At 45-degree angle critical current takes intermediate values between parallel and perpendicular case.

To explain the experimental results, anisotropy of pinning force applied to flux quantum line based on perovskite crystal structure of Bi-2223 has been studied.

1. 序論

高温酸化物超電導体が発見されて 15 年余が経過し、その超電導基本特性も向上したことにより、工学的な応用にも大きな期待が寄せられるようになってきた。高温超電導に関する研究開発は着実に発展し、さまざまな工学分野においてこれを応用する試みがなされている。例えば、電力貯蔵マグネット、磁気遮蔽、電力ケーブル、電流リードなどはその代表的な例であるが、これらの実用化を考える際、超電導体の電磁気的特性を十分解明・把握しておくことが必要不可欠である。

前報（福井工業大学研究紀要、第 31 号¹⁾）では、代表的な高温酸化物超電導体である Bi-2223 テープ線材を用いて、その基本特性として、臨界電流の温度依存性について報告したが、本報で

* 電気電子工学科 ** 電気工学専攻大学院生

は同線材を用い、臨界電流が、磁界の大きさおよび磁界の方向とテープ面のなす角度によって、どのように変化するかを測定・評価するとともに、そのメカニズムについて検討を行ったので報告したい。

超電導マグネットなどの応用を考える場合、臨界電流の磁界依存性は、重要な基礎データであり、これについて検討しておく必要がある。

2. 臨界温度の磁界依存性について

2. 1 臨界電流

超電導体の超電導状態を制限するパラメーターは臨界温度、臨界磁界および臨界電流である。

臨界温度や臨界磁界が超電導体の種類によってほぼ決まった値を持っているのに対して、臨界電流は材料固有の値ではなく、さまざまな要因によって決定されている。

図1は、超電導体の薄板状試料に一定の磁界を、試料面に垂直に加え、電流方向に発生する電圧を観測した例ある。電流を加えても、磁束線に働くローレンツ力がピン止め力より小さい間は、磁束線は動くことができず、したがって電圧は発生しない。電流が増加して、ローレンツ力がピン止め力に打ち勝つと、磁束は動き出し、その運動速度に相応した電圧が発生する。この限界の電流値を臨界電流という。電流が臨界電流より十分に大きな場合には、電流—電圧特性は直線的である。この直線部分の微分抵抗 $R_f = dV/dI$ を磁束流抵抗 (flow resistance)、また R_f に対応した抵抗率 ρ_f を磁束流抵抗率 (flow resistivity) と呼ぶ。

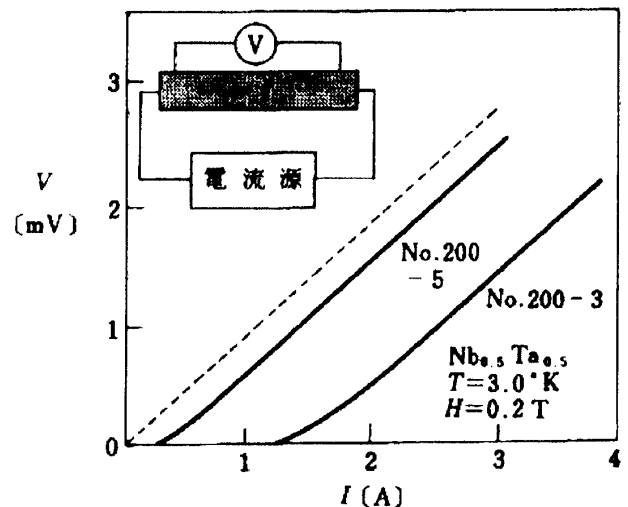


図1. 磁束流による電圧発生

ピン止めの中心は、さまざまな種類の格子不整、析出物、空孔などよりなり、その強さと密度は超電導体の材質、加工度、熱処理などに強く依存する。ピン止め中心の密度を高めれば、ピン止め力が大となり、したがって臨界電流が大となる。一方、磁束流抵抗率 ρ_f はピン止め力にあまり依存せず、材質の常電導抵抗、磁界、温度などで決まる。

図1には、二つの試料の特性が示されている。二つの試料は、材料、形状は同じであるが、ピン止め力が異なるため、臨界電流値が異なっている。

さらに YBCO や Bi-2223 のような高温酸化物超電導体では印加磁界が導体内に入り込む角度によっても臨界電流値は大きく変化し、大きな異方性が現れる。

2. 2 臨界電流の磁界依存性の報告例

種々の研究開発の努力により、Bi-2223 銀シーステープ線材の液体窒素温度における臨界電流密度の向上が図られ、電力ケーブルなどの大電流応用に対しては、 $J_c(77.3\text{K}, \text{水平磁界 } 0.1\text{T}) = 42300\text{A/cm}^2$ 、マグネット応用に対しては、 $J_c(77.3\text{K}, \text{水平磁界 } 1\text{T}) = 12000\text{A/cm}^2$ が得られている²⁾。図 2³⁾に、臨界電流密度の磁界特性の報告例を示す。パラメータとしては、テープ面と磁界方向のなす角度をとり、その角度を垂直および平行としており液体ヘリウム温度から、液体窒素温度までの広い温度領域における J_c の磁界特性を示している。

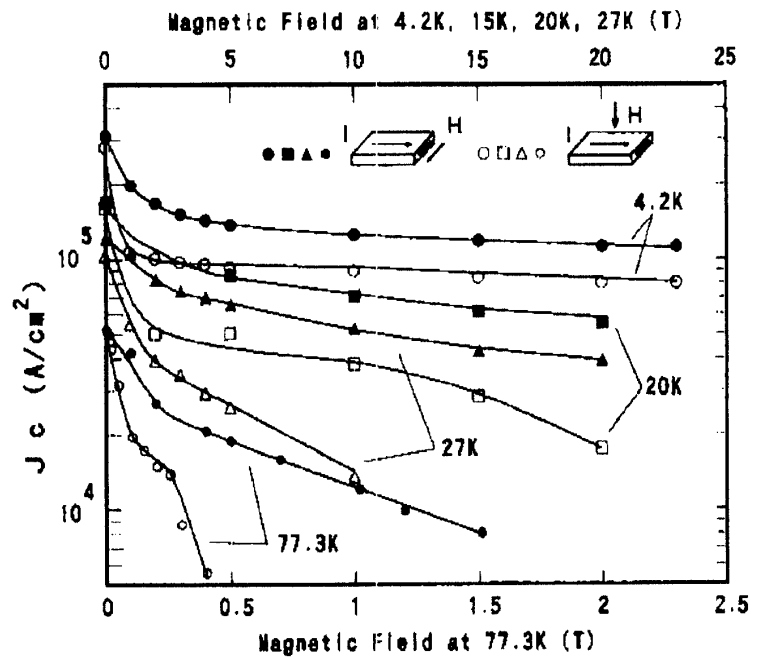


図 2. Bi-2223 超電導線の臨界電流密度の磁場特性

図からわかるように、各温度によっ

て臨界電流密度が変化するのは、前報でも報告したように、ピン止め力が温度に対して直線的に減少しているためと考えられる。またいずれの温度においても、印加磁界が平行の時と比べると、垂直の時は臨界電流密度が大きく低下しているのがわかる。以上のように、高温酸化物超電導体では、超電導体に外部磁界を印加した場合、縦方向、横方向によって異方性が現れ、これにより臨界電流値は大きく変化する。今回は、外部磁界を垂直・平行および 45 度の場合の臨界電流の磁界依存性について検討した。

3. 実験概要

3. 1 実験試料

実験に用いた試料は、幅 3.46mm、厚さ 0.25mm の $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) 銀シーステープ線材であり、断面写真を図 3 に示す。

テープは平均的に幅 $280\mu\text{m}$ 、厚さ $35\mu\text{m}$ の Bi-2223 超電導フィラメント 61 本が銀母材中に埋め込まれたものであり、Powder-in-tube (PIT) 法によって製作されたものである。

本研究は、液体窒素(77.3K)を冷媒として用いて実験を行った。

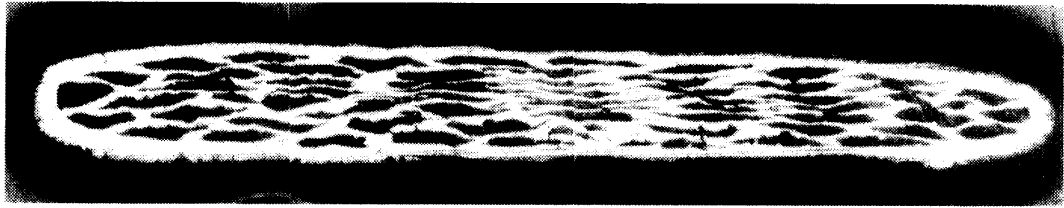


図3. Bi-2223 超電導テープ断面写真

3. 2 実験方法

試料テープ 10cm を用い、直流 4 端子測定法のための電流リード線ならびに、電圧リード線（電圧リード線間隔は 4 cm とした）を接続した。

印加磁界は、1A あたり 20mT 発生する銅コイルを 2 つ使い、その中心に超電導テープを 3 種類の角度で固定した。銅コイル諸元を図 4 に示した。

液体窒素温度 77.3K、印加外部磁界を 0~80mT まで変化させ、測定を行った。試料に電流を印加するための電源は、最大 60A 発生する直流安定化電源を用い、電圧計はテープの微小な電圧を測定することができる μV 計を用いた。

実験は、液体窒素容器内に試料を設置し、液体窒素をゆっくり注ぎ込む。しばらく時間を置くと、液体窒素によって試料は徐々に冷やされ、常電導状態から超電導状態（臨界温度：約 107K）へと転移する。このことは、あらかじめ試料にわずかな電流を流しておくことにより発生する電圧がゼロになることによって確認する。超電導状態を確認した後、印加電流を増加して行き電圧を測定する。電圧の発生したときの電流値をもって臨界電流とした。印加磁界を種々の値に設定して、この測定を繰り返した。

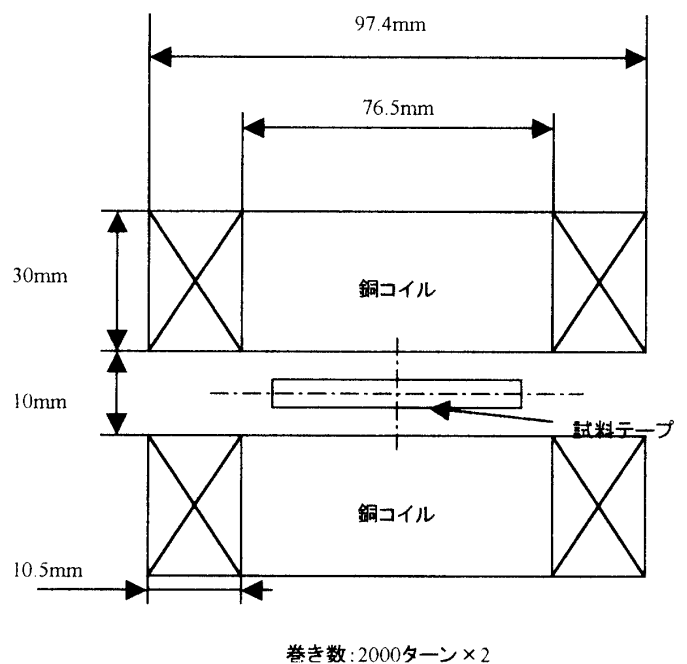


図4. 実験構成図

4. 実験結果

実験に用いた Bi-2223 超電導テープ線材の外部印加磁界ゼロでの臨界電流値は 51A であった。一般的に Bi-2223 超電導線材の臨界電流値は、製造方法や不純物の混入する割合などによって様々であるが、約 50A と言われているので、ほぼ実験結果と一致する。

さらに外部磁界を加え、角度を変化させた場合の結果は次の通りとなった。

図 5 は外部磁界がテープ面に

対して、垂直に印加された場合の I-V 特性を示す。図よりわかるように、試料電圧の増加していく割合は、印加磁界の増減に対してほとんど変化していない。これは、磁界を平行、45 度に印加した場合も同様であった。しかし、磁界をテープ面が垂直の場合では、臨界電流値は磁界を印加すると急激に減少し始める。印加磁界が 80mT の時は 14A まで臨界電流は低下した。

同様に、平行・45 度に角度を変えた時の I-V 特性を測定し、以上 3 種類の角度の時の臨界電流の変化をグラフに表したものが図 6 である。この図からもわかるように、テープ面に平行に磁界を加えた時は、臨界電流はそれほど大きく低下していない。これに対しテープ面に垂直に磁界を加えた場合は、磁界を印加するにつれて急激に臨界電流は減少している。また 45 度に磁界を印加した時は、平行と垂直の場合のほぼ中間の値をとっているのがわかる。

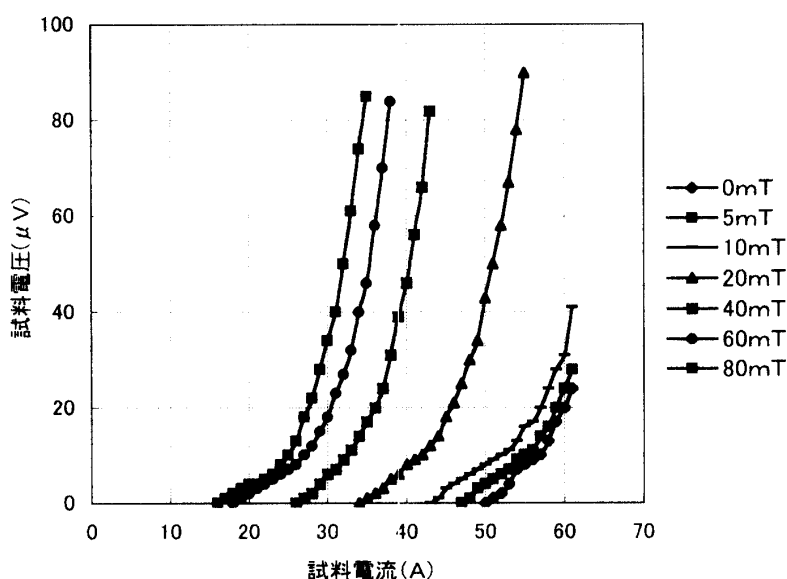


図 5. 試料に磁界を垂直に印加した時の I-V 特性

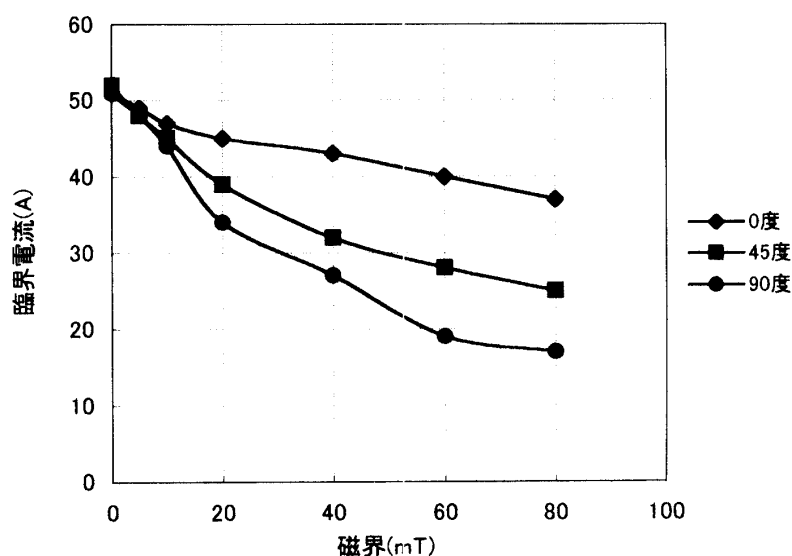


図 6. 臨界電流の磁界依存性

5. 考察

Bi-2223のような銅酸化物超電導体に共通する重要な性質は、CuとOからなる図7のような、ペロブスカイト型結晶構造に特徴的な二次元正方格子（ CuO_2 面）が存在し、超電導キャリアは CuO_2 面を伝導していることである。 CuO_2 面は上下を正に帯電したブロックに挟み込まれており、この CuO_2 面が高温超電導を担う伝導面となっている。これとは逆に、 CuO_2 面に垂直な方向には半導体的又は絶縁的な中間層が存在し電気伝導性に劣る⁴⁾⁵⁾。

また、コヒーレンス長にも異方性が存在し、これが磁束のピン止め力と密接な関係を持つので、そのため臨界電流値が磁界の方向に依存するという異方性を示すことも知られている⁶⁾。

さらに、図8に示すように、テープ面の長手方向と幅方向にa、b軸が存在し、テープ面の厚手方向にはc軸が存在する。このことから、テープに平行な方向（a、b軸）に磁界が印加された場合、ピン止め力はc軸方向に働くため、c軸方向の絶縁体的性質によって強いピン止め力が現れ、臨界電流値があまり低下しないと考えられる。

一方、テープに垂直な方向（c軸）に磁界が印加された場合、ピン止め力はa、b軸方向に働き、人工的に導入された微細な CaCuO_3 や、 $(\text{Sr}, \text{Ca}) \text{CuO}_2$ 等の析出物によってピン止めされるが、これはc軸方向の絶縁体的性質によるピン止め力より弱くなるためと考えられ、したがって臨界電流値が比較的大きく低下するものと思われる。テープ面と印加磁界が45度の場合は、その中間の性質が現れているものと考えられる。

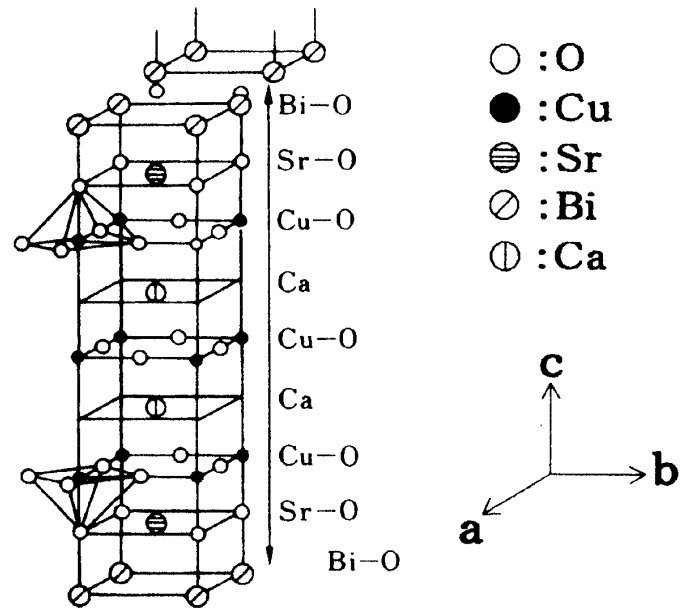


図7. Bi-2223 線材のペロブスカイト構造

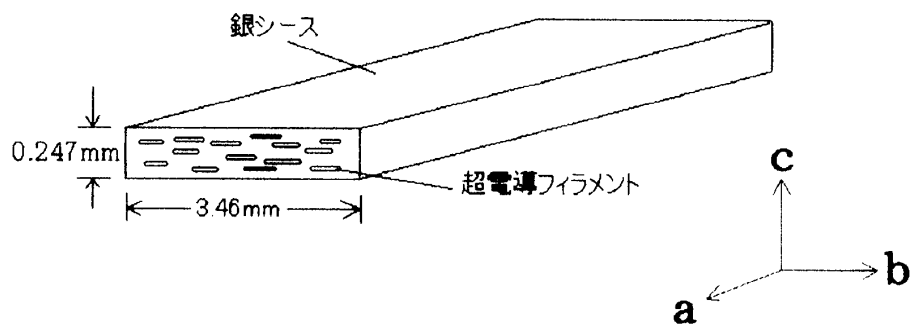


図8. テープ面と軸との関係

6. まとめ

(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (Bi-2223)銀シーステープ線材を用いて、その臨界電流の磁界依存性を実験的に検討した。

テープ面と磁界が平行の時、臨界電流の磁界による低下はそれほど大きくないが、テープ面と磁界が垂直の時は、臨界電流は磁界とともに大きく低下した。一方、テープ面と磁界が 45 度の時は、平行と垂直の場合のほぼ中間の値であった。これは、絶縁体的性質の c 軸方向のピン止め力は強く、それに比べ、a,b 軸方向のピン止め力は相対的に小さいと考えられるので、磁界と超電導テープ面が平行の場合には、磁界を大きくしても臨界電流はあまり低下せず、垂直の場合には、ピン止め力の低下によって磁界とともに、臨界電流が大きく低下するものと思われる。

参考文献

- 1) 田中光雄、本田将之：福井工業大学研究紀要 第 29 号 (1999) p67
- 2) M.Ueyama et al. : Adv.in Superconductivity VII,eds.K.Yamafuji,T.Morishita(Springer Verlag,1995)847.
- 3) 中嶋貞雄ほか：超電導技術とその応用 ISTEC ジャーナル編 丸善株式会社 (1996) p.134
- 4) 吉田義勝ほか：低温工学 33 6, (1998) 363
- 5) S.Kobayashi, et al : Physica C 258 (1996) 336
- 6) 松下照男：磁束ピンニングと電磁現象 産業図書 (1994)

(平成 13 年 12 月 6 日受理)