

Bi-2223 高温酸化物超電導線の基本特性およびコイル特性

田 中 光 雄* ・ 本 田 将 之**

Studies on Fundamental Characteristics and Coil Properties of Bi-2223 Hi-*T_c* Oxide Superconductor

Mitsuo Tanaka and Masayuki Honda

Studies have been made on fundamental superconducting characteristics of a silver-sheathed $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi2223) tape which is typical high-temperature superconductor. Persistent current operation characteristics of a coil wound with the tape have also been studied. As fundamental superconducting characteristics, critical temperature(T_c), dependency of critical current (I_c) on magnetic field intensity and on bending stress have been measured.

Current decay characteristics with a persistent current switch connected to the coil have been investigated. When coil current (magnetic field) is small, current decrease due to L-R circuit is recognized, meanwhile, when coil current is large, reduction of magnetic field (coil current) caused by flux creep phenomenon is superimposed and it results faster decay of coil current.

1. 序論

高温酸化物超電導体が発見されて10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、電力貯蔵用マグネット、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解明・把握することが必要不可欠である。

本論文では、代表的な高温酸化物超電導体である Bi-2223 テープ線材を試料としてその超電導基本特性の評価を行った結果ならびに Bi-2223 超電導コイルを製作し、永久電流スイッチと結合した場合の永久電流減衰特性の評価を行った結果について報告する。

* 電気工学科 ** 電気工学専攻大学院生

2. 高温酸化物超電導テープの基本特性評価

2. 1 試料

実験に用いた試料は、図1に示すように幅 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る。

テープは 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 (P I T) 法によって製作されたものである。なお、本論文での特性測定はいずれも液体窒素 (1 気圧での沸点 77.3K) を用いて行った。

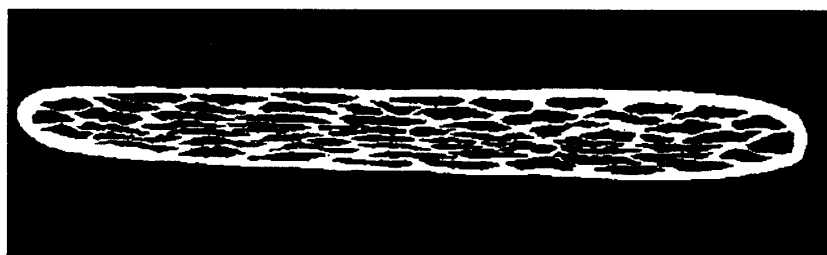


図 1. Bi-2223 超電導テープ断面写真

2. 2 臨界温度特性

まず最初の基本特性として、試料が常電導状態から超電導状態に遷移する温度 (臨界温度: T_c) の測定を行った。

試料は超電導テープ 10cm を用い、電流リード線ならびに電圧リード線を接続し、試料テープの周囲にマンガンヒータを巻きつけ、その外側に繊維補強エポキシ断熱層を設けた。温度コントロールはマンガンヒータ線に供給する電流を変化させることによって行い、温度測定は試料に近接して置いた銅 - コンスタントン熱電対を用いて行った。なお、電圧リード線間隔は 5cm とした。

試料に 0.5A の電流を印加しておき、ヒータを用いて温度を変化させ、常電導状態から超電導状態へ転移するときの温度を測定し、臨界温度 T_c を求めた。

図2に温度 - 抵抗特性を示す。

抵抗は試料の温度が 106K 付近から急激に減少し、97K で 0 になる。

臨界温度としては試料の抵抗が完全に 0 になる温度をとる場合と、急激に抵抗が減少し始める点と 0 になる点の中間値をとる場合がある。前者の立場をとれば T_c は 97K であり、後者をと

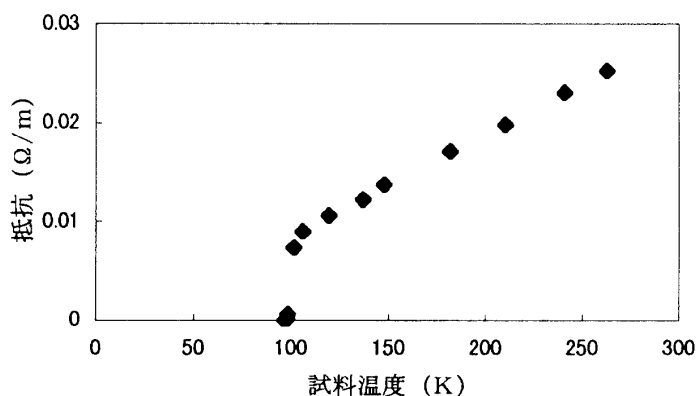


図 2. 臨界温度特性

れば 101.5K となる。多くのテキストや文献では Bi-2223 の T_c は 107K と公表されているので、この測定結果はほぼ妥当なものであると考えられる。

2. 3 臨界電流特性

超電導の電力応用における最も重要な基本特性の一つは臨界電流特性である。ここでは、Bi-2223 超電導テープの臨界電流の外部磁界依存性を測定した。超電導テープに磁界を与えるためのコイルとしては、図 3 に示すように、銅コイル 2 個を同軸的に結合したものをを用いた。銅コイル間の中心部における発生磁界は 400G/A である。

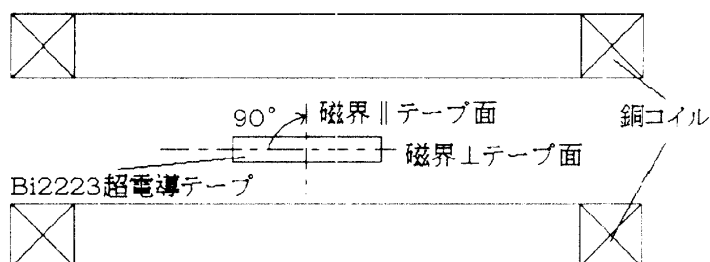


図 3. 実験構成図

2つのコイルの空隙部の中心に超電導テープ 10cm を装着した。電圧リード線間隔は 4cm とした。磁界がテープ面に垂直（ \perp ）の場合と平行（ \parallel ）の場合、そして 45° の角度（ \angle ）の場合の3種類の配置に対するそれぞれについて、外部磁界の変化に対する臨界電流値の変化を測定した。

図 4 に臨界電流の外部磁界依存性を示す。外部磁界がテープ面に対して垂直に印加された場合、臨界電流 I_c は磁界の増加に対して急激に低下するが、平行の場合においては I_c はあまり低下しないことがわかった。また、 45° の角度の場合は I_c は両者の中間値を示した。

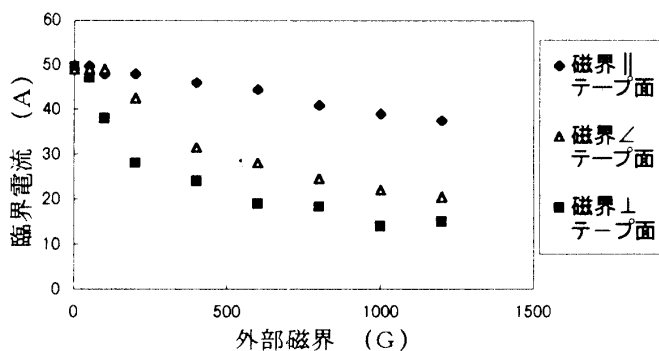


図 4. 臨界電流の外部磁場依存性

Bi-2223 結晶はペロブスカイト構造を基本としているが、超電導的には大きな異方性があり、a,b 軸方向に広がる Cu-O 面がその超電導性を担い、それと垂

直な c 軸方向は絶縁体的性質を示すといわれている^{1) 2)}。Bi-2223 テープは長さおよび幅方向に a,b 軸があり、厚さ方向が c 軸である。このため印加磁界がテープ面と平行（a,b 軸方向）に印加されたときには、大きなピン止め力（量子磁束を拘束する力）が働き、臨界電流は大きくなるが、垂直（c 軸方向）に印加された場合にはピン止め力が弱く、臨界電流が低下してしまうものと考えられる。テープ面と磁界が 45° 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。

2. 4 曲げ歪による臨界電流の劣化

超電導線をコイルに巻く場合には、線材に曲げ歪が加わる。酸化物超電導体はその脆弱性のために、歪に対しては弱いと考えられている。ここでは、Bi-2223 超電導テープの曲げ歪に対する臨界電流 I_c の劣化特性を測定した。試料はテープをそれぞれ 10 cm ずつ用い、直径 50mm から 10mm の間での種々の太さの円筒材にテープを巻きつけて曲げ歪を与えた。歪率 ε は、曲げ直径を D 、テープ厚を t とすると、 $\varepsilon = t/D$ で与えられ、直径 50mm の場合の歪率は 0.49%、10mm の場合は 2.47% である。

実験は液体窒素中、外部磁界ゼロの下において行い、各曲げ直径に対する臨界電流 I_c を測定した。

図 5 は曲げ歪率に対する臨界電流値の劣化の模様を示したものである。直線状試料（曲げ歪率ゼロ）では 49A の臨界電流に対し、50mm ϕ 曲げ（曲げ歪率 $\varepsilon = 0.49\%$ ）では 30A、10mm ϕ 曲げ（ $\varepsilon = 2.47\%$ ）では 21.5A まで臨界電流が低下することがわかる。特に、直線状（曲げゼロ）から 0.6% 付近までの曲げに対して、臨界電流値が大きく低下するが、それより大きな歪に対してはそれほど臨界電流値は低下しないことがわかる。これらは田中ら³⁾が Bi-2212 テープで測定した結果とよく一致している。臨界電流値が低下する主な原因として、超電導テープを曲げることにより、テープの外側部分のフィラメントに断裂などの損傷が加わるためであると考えられる。

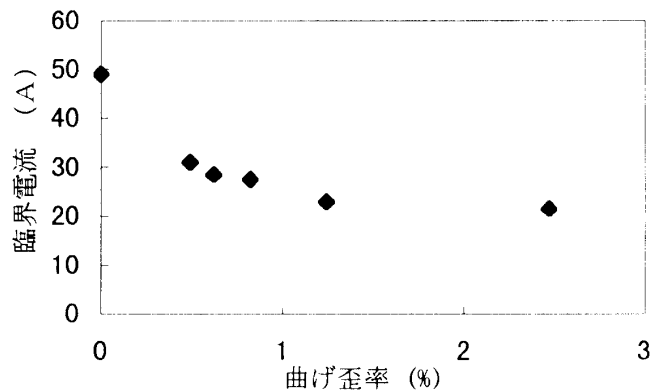


図 5. 曲げによる I_c の劣化

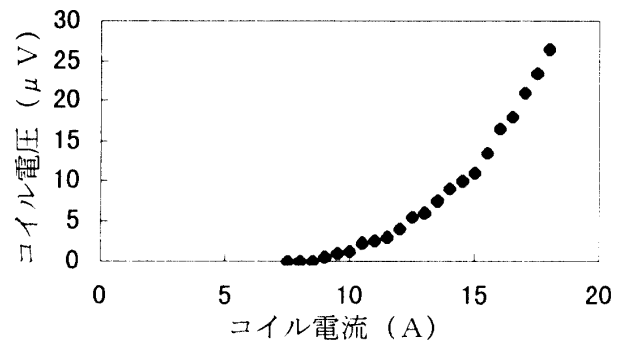
3. 超電導コイル特性

3. 1 コイルの製作とコイル単体試験

超電導テープの基本特性評価の結果を考慮して超電導コイルを製作した。超電導コイルの概要を表 1 に示す。

表 1. コイル諸元

内径	32.3 mm
外径	49.7 mm
長さ	55 mm
総巻き数	203 ターン
層数	19 層
発生磁界	3.5 G/A
自己インダクタンス	0.71 mH

図 6. 超電導コイル $V-I$ 特性

超電導コイルは長さ約 28m の Bi-2223 超電導テープ材をステンレス製の巻き枠にソレノイドコイル状に巻き線したものである。テープ間隔は 2mm 一定として巻き線し、層間絶縁にはマイラーフィルムを用いた。コイル巻き線の両端部には電流リード線ならびに電圧リード線を Pb-Sn はんだを用いて接続した。

液体窒素温度 77.3K における超電導コイルの $V-I$ 特性を図 6 に示す。図 6 より超電導コイルの臨界電流値 I_c は 8.5A であった。

2. 4 で述べたように、超電導テープの曲げによる臨界電流劣化特性では、曲げ直径 30mm の場合の I_c は 25.5A であったのに対して、この超電導コイル（曲げ直径 32.3mm）での I_c が 8.5A に低下している原因としては、

- (1) 超電導コイルにおけるテープ(28m)内の一部に製造上の欠陥などによる I_c の低い部分をもつ可能性があること
- (2) 超電導コイル製作中にわずかながらテープの一部が損傷した可能性があること

などが考えられる。

3. 2 超電導コイルの永久電流運転

3. 2. 1 概要

前節で述べた超電導コイルを用いて永久電流運転を行うため、コイルと同じ超電導テープを用いてソレノイド型の永久電流スイッチ (Persistent current switch : PCS) を製作した。PCS は超電導テープを約 2m 用いて直径 5.0cm の円筒材に巻きつけて（誘導巻き）製作した。PCS の I_c は液体窒素温度において 14.5A であった。

この PCS と超電導コイルを用いた永久電流回路図を図 7 に示す。

永久電流実験は液体窒素温度 77.3K で行い、超電導コイル中心部に発生する磁界はホール素子を用いて測定を行った。始めに PCS を OFF 状態 ($T > T_c$) にしておき、超電導コイルに電流を印加する。試料電圧が 0 であることを確認した上で PCS を ON 状態 ($T = 77.3\text{K}$) にし回路全体を超電導状態にした後、電源電流を 0 にして永久電流回路を形成した⁴⁾。

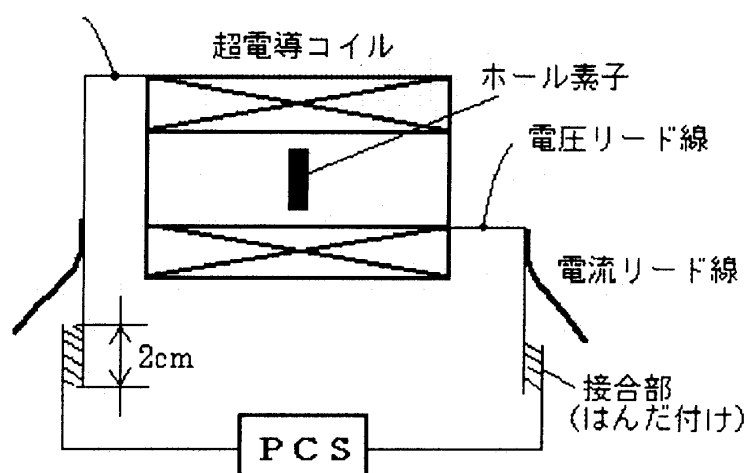


図 7. 永久電流回路

3. 2. 2 実験結果

図 8 はコイルの永久電流減衰の時間変化を示す。初期コイル電流が 8A の場合、コイル電流（発生磁界）は永久電流回路形成直後の初期段階において比較的速い減衰が見られる。しかし、時間の経過とともに減衰度合は緩和する。

永久電流回路を自己インダクタンス $L = 7.1 \times 10^{-4} \text{ H}$ と、PCS と超電導コイル接合部（2 か所）の電気抵抗 $R = 3 \times 10^{-7} \Omega$ （実測値）を含んだ通常の $L - R$ 回路と考えると、この曲線は

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

で与えられることになる。

ここで、図 8 よりコイル磁界が $1/e$ となる時定数 τ を求めると、 $\tau = 0.71 \times 10^3 \text{ sec}$ となり、 $\tau = L/R$ から求めた理論値 $\tau = 2.37 \times 10^3 \text{ sec}$ とは大きな差異が生じることがわかる。さらに(1)式を変形すると、

$$\frac{\log_{10} B - \log_{10} B_0}{t} = -0.434 \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

が導出される。この式に基づいてコイル発生磁界を対数で表わした片対数グラフを図 9 に示す。

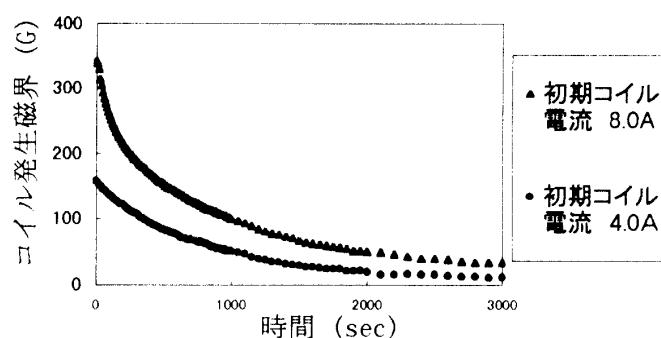
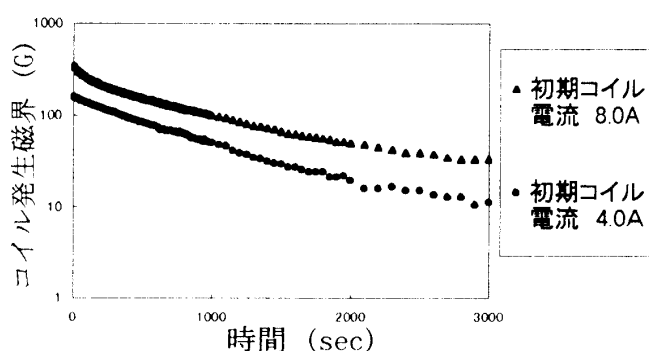


図 8. 超電導コイル永久電流減衰特性

図 9. 超電導コイル永久電流減特性
(コイル発生磁界対数表示)

$t = 200 \text{ sec}$ 以上の部分においては減衰は直線的であり、この傾きから τ を求めると、 $\tau = 1.9 \times$

10^3sec となり、理論値 $\tau = 2.37 \times 10^3 \text{sec}$ に極めて近い値を示すが、時間 $t = 0 \sim 200 \text{sec}$ での初期段階では、時間の変化に対しコイル発生磁界はかなり速い減衰が生じていることがわかる。一方、初期コイル電流 4A の場合には、減衰カーブ全体を通じて片対数グラフでは直線状に減衰しており ($\tau = 1.21 \times 10^3 \text{sec}$)、通常の L - R 回路における減衰特性を示していることがわかる。

3. 2. 3 考察

初期コイル電流 8A の場合の $0 \sim 200 \text{sec}$ における比較的速い減衰部分は通常の L - R 回路の減衰特性から説明することはできず、その他に原因があると考えられる。超電導体内には、格子欠陥や不純物によるピンニング点（量子磁束を拘束する点）が存在するが、このピンニング力が強いほど臨界電流が大きくとれる。ピンニング点に拘束された量子磁束は、熱擾動 (kT) を受けており、ピンニングポテンシャル U_0 の壁を乗り越えることになる。この現象はフラックスクリープと呼ばれるが、これが起こるとコイル内に閉じこめられた磁束は、時間とともに減衰する。従来の低温超電導では、作動温度である液体ヘリウム温度 (4.2K) での kT の項が極めて小さいので、フラックスクリープ現象はほとんど認められていない。

一方、液体窒素温度 (77.3K) では、 kT は 4.2K に比べ約 18 倍にもなるので、フラックスクリープの起こる確率が高くなるものと考えられる。初期コイル電流 8A の場合の $0 \sim 200 \text{sec}$ における急激な電流減衰は、このフラックスクリープ現象が重畳された結果であると見なすことができる。Anderson-Kim⁵⁾によれば、フラックスクリープによるコイル磁界の減衰は、

$$\frac{B}{B_0} = 1 - \frac{kT}{U_0} \log et \quad (3)$$

で与えられる。

図 10 は、時間を対数でとった片対数グラフであるが、この図からピンニングポテンシャル U_0 を求めると $U_0 = 0.125 \text{eV}$ となる。Yokoyama⁶⁾らによれば、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ リングの 77K における U_0 は $0.1 \sim 0.5 \text{eV}$ と報告されており、われわれの結果は、ほぼ妥当な値であることがわかる。

以上の結果から、初期コイル電流 8A の 500 sec 以上および初期コイル電流 4A の場合の減衰特性は、通常の L - R 回路の過渡現象で説明されるものであり、初期コイル電流 8A の $0 \sim 200 \text{sec}$ の場合の減衰特性は、フラックスクリープ現象が重畳されたものであると結論づけることができる。フラックスクリープ現象が初期コイル電流 8A の場合の初期段階にのみ現れ、4A の場合に

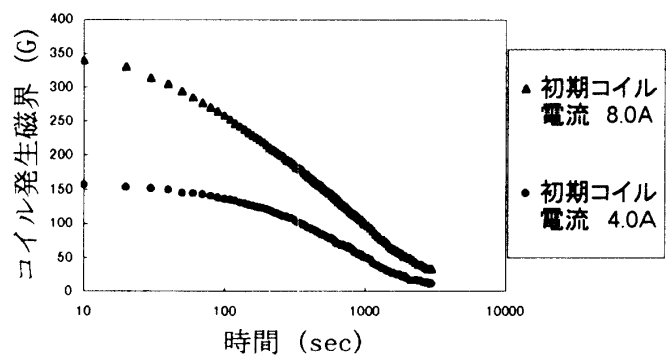


図 10. 超電導コイル永久電流減衰特性
(時間軸対数表示)

現れないのは、ピンニングポテンシャル U_0 は磁界が大きいほど小さくなる⁶⁾ことによるものと考えられる。

4. まとめ

Bi-2223 超電導テープ線材を試料として、その超電導基本特性評価とコイル特性評価を実施した。基本特性は次のとおりであった。

- (1) 試料の臨界温度は 101.5K であり、77.3K における外部磁界ゼロでの臨界電流は 49A であった。
- (2) 外部磁界がテープ面と平行 (a,b 軸方向) に印加された場合、大きなピン止め力が働き、磁界を大きくしても臨界電流はそれほど低下しないが、垂直 (c 軸方向) に印加された場合にはピン止め力は弱く、磁界とともに臨界電流が大きく低下することがわかった。
- (3) テープに曲げ歪を加えると、曲げ歪率 $\varepsilon = 0.49\%$ では 61% に、 $\varepsilon = 2.47\%$ では 44% まで臨界電流が低下することがわかった。

超電導コイルと永久電流スイッチを接続した永久電流回路による運転実験を行い、初期コイル電流 4A および 8A の場合の電流減衰特性を評価した。その結果、初期コイル電流が 4A、および 8A での 500 sec 以上の場合には、コイル電流は通常の L - R 回路の減衰特性に従って時間の経過とともに減衰する。しかし、コイル電流 8A での初期状態 (0~200 sec) においては、通常の L - R 回路での減衰にフラックスクリープ現象が重畳され、コイル電流が急激に減衰することがわかった。

参考文献

- 1) 吉田義勝ほか：低温工学 33 6, (1998) 363
- 2) S.Kobayashi, et al. : Physica C 258 (1996) 336
- 3) 田中和英ほか：低温工学 31 8, (1996) 428
- 4) 長谷隆司ほか：低温工学 31 10, (1996) 533
- 5) P.W.Anderson and Y.B.Kim : Rev.Mod.Phys. 36 (1964) 39
- 6) S.Yokoyama, K.Shimohata, T.Ushijima, T.Yamada: Materials Research Society Symposium Proceedings 169 (1990) 965

(平成10年12月 7 日受理)