

# Ag/Bi2223酸化物超電導線の臨界電流の引張応力依存性

田 中 光 雄\*・奥 泉 達 寿\*\*

## Tensile Stress Dependence of Critical current in Bi-2223 Oxide Superconducting Tape

Mitsuo Tanaka and Tatsuhisa Okuizumi

Studies have been made on dependency of critical current on tensile stress 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.

In stress-strain characteristics, tensile strength in liquid nitrogen temperature (77K) is about 1.5 times larger than that in room temperature.

Critical current does not decrease under tensile stress from 0 through 130 Mpa (120N), then gradually decreases and break of tape occurs at 140 Mpa (132N).

These results are considered as follows. Under tensile stress 0 through 130 Mpa superconducting filaments deform elastically, but beyond this stress range, filaments gradually break at mechanically weaker points. Then critical current decreases gradually.

### 1. 序論

1986年に高温酸化物超電導体が発見されて18年余が経過し、その超電導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、様々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。特に、銀シース Bi 系 2223 相、すなわち  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  高温酸化物超電導線材は液体窒素温度(77.3K)でも超電導状態を示すという高い臨界温度を持っており、さらに、線材化も容易という大きな長所がある。そのため、将来の送電用ケーブル、超電導マグネットなど様々な応用が期待されている。

しかし、長所だけではなく欠点もある。フィラメント部分はセラミックス状であるため、

---

\* 電気電子工学科 \*\* 電気工学専攻大学院生

延性がほとんど無く、非常に脆弱であるため応力や歪によって劣化しやすいという欠点をもっている。この欠点のため、機械的な取り扱いが難しいという大きな問題がある。しかし、超電導コイルや超電導マグネット等への応用を考えた場合には、熱応力や稼動時の大電流、高磁場によるローレンツ力など、様々な応力が負荷される。特にローレンツ力はコイル径を広げる方向に作用し線材には引張応力が印加されるためこの欠点は無視することができない。

本実験では、Ag/Bi-2223 超電導線材の引張応力負荷時における臨界電流の測定を行った。

## 2. 臨界電流

超電導体の超電導状態を制限するパラメータは臨界温度、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、臨界電流は材質固有の値ではなく、様々な値によって決定されている。

よく知られたように、超電導の臨界電流は、磁束量子線に働くローレンツ力とピン止め力のバランスによって規定される。

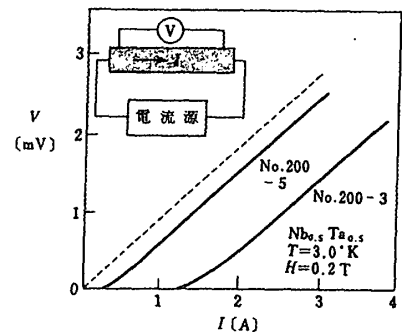


図1. 磁束流による電圧発生

実用超電導体の大半を占める第二種超電導体の中では、磁束は量子化されており、その磁束量子線は規則正しく配列している。実際の超電導体では、種々の析出物や格子不整が内部に存在するため、物理的性質が場所により変わってくるので、磁束量子線が存在しやすい部分と存在しにくい部分ができる。そのため、電流を加えた場合に電流密度と磁束密度の積で与えられるローレンツ力によって磁束量子線が動こうとすると、磁束線はあちこちで引っかかりを生じ、運動が妨げられる。この効果をピン止め効果と呼び、ローレンツ力に逆らって磁束線の運動を妨げる力をピン止め力という。図1は超電導体の薄板状試料に電流を加えた場合の電流—電圧特性を観測した例である。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出来ず電圧は発生しない。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、磁束線(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。この電圧が発生する直前の限界の電流値を臨界電流という。

## 3. 実験試料

今回の実験で用いた超電導線材は平均的に幅 3.9mm、厚さ 0.25mm の

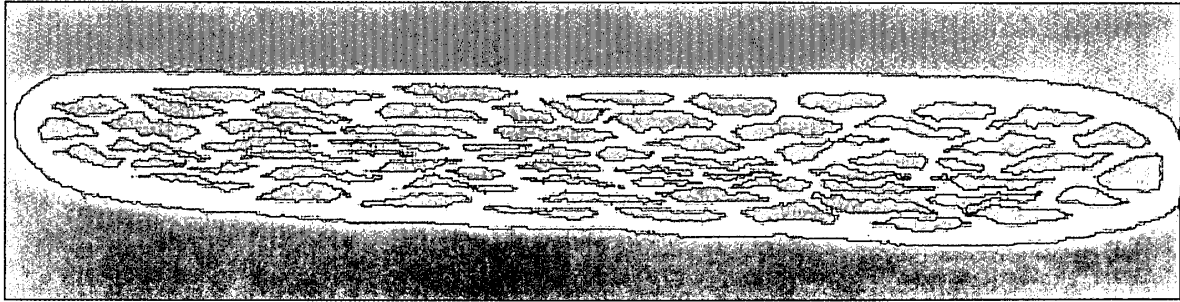


図2. Bi-2223 超電導線材の断面写真

$(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223) 銀シーステープ線材であり、断面写真を図2に示す。

テープは極細化された超電導フィラメント 61 本が銀母材内部に埋め込まれたものであり、Powder-in-tube 法 (PIT 法) によって製作されたものである。

#### 4. 実験

(1) 最初に引張試験機を用いて常温時に線材に荷重を加えた時の伸びの測定を行った。同様に液体窒素温度 77.3 K 中で荷重を加えたときの伸びの測定を行った。試料テープの長さはいずれの実験でも 13cm とした。

次に液体窒素温度 77.3 K 中で引張応力を加えた場合の臨界電流の測定を 4 端子法 (電圧端子間 50 mm) を用いて行った。引張応力を加えた状態で試料に電流を印加して、抵抗が発生し始める電流値である臨界電流値がどのように変化するかを測定した。

引張荷重の印加は引張試験機を用いて行った。図3の写真に示すように引張試験機には液体窒素を満たした発泡スチロール容器を挿入するためのステンレス製治具を装着して実験を行なった。

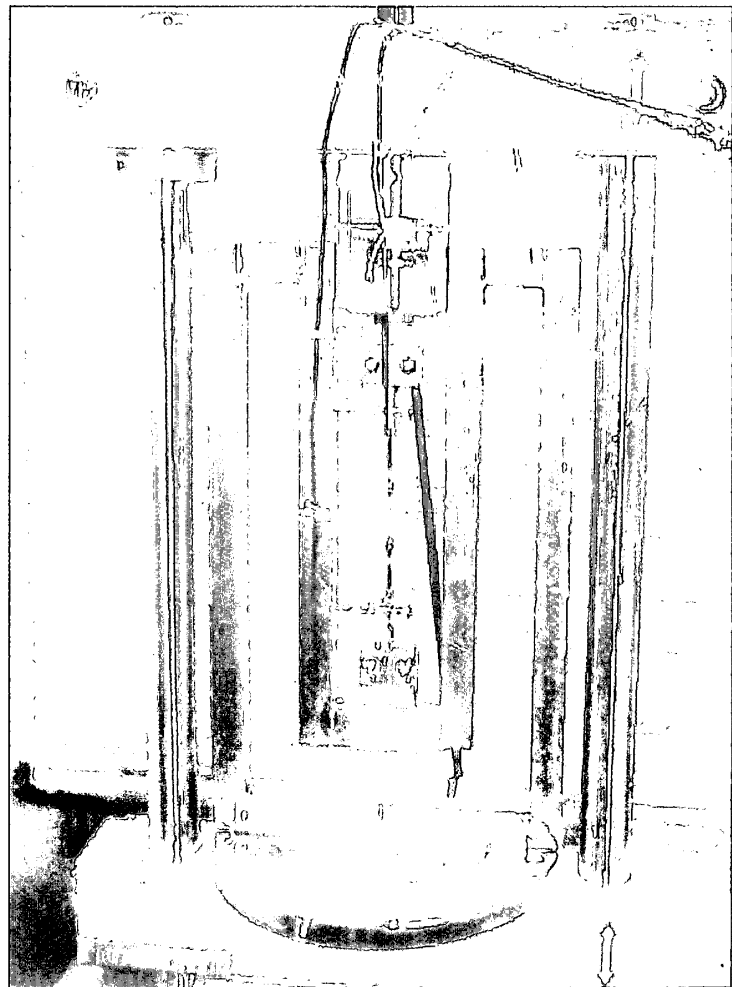


図3. 治具をセットした写真

図4には液体窒素を充填する発泡スチロール容器をセットした写真を示す。

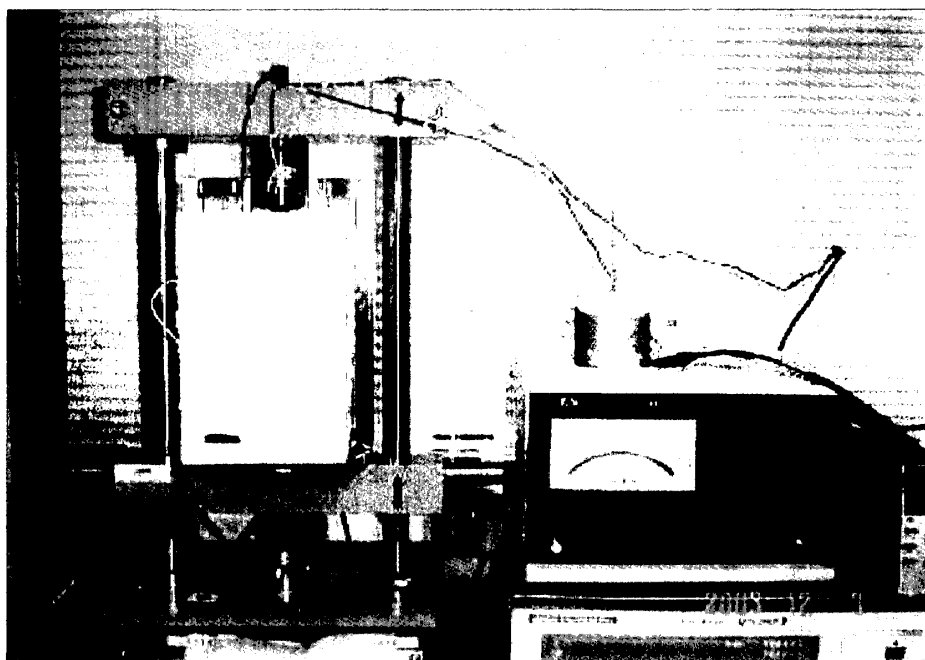


図4. 発泡スチロール容器をセットした写真

(2) 次章で述べるように、引張荷重を加えた超電導テープは、ある応力値から臨界電流値が急激に低下していき、ついにテープの破断に至る。このときに、テープ内部の超電導フィラメントがどのような状態になっているかを観察するために実験で使用した超電導テープの断面の顕微鏡観察ならびに電子線マイクロアナライザー (EPMA) 観察を行なった。

## 5. 実験結果

(1) 図5に常温と液体窒素温度の引張荷重 - 伸び特性を、図6にこれを応力 - 歪特性に変換したものを示す。

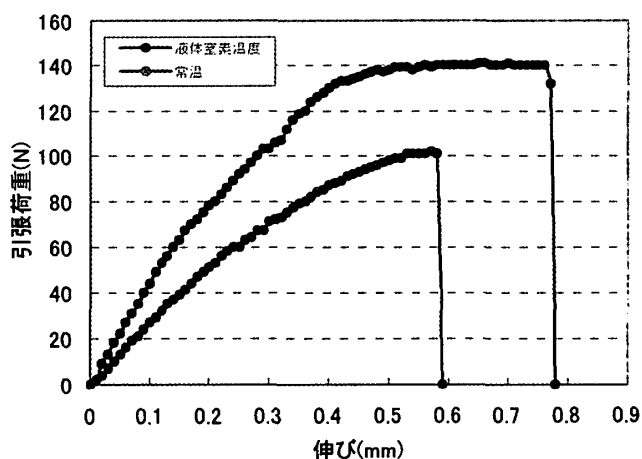


図5. 常温と液体窒素温度の伸びの比較

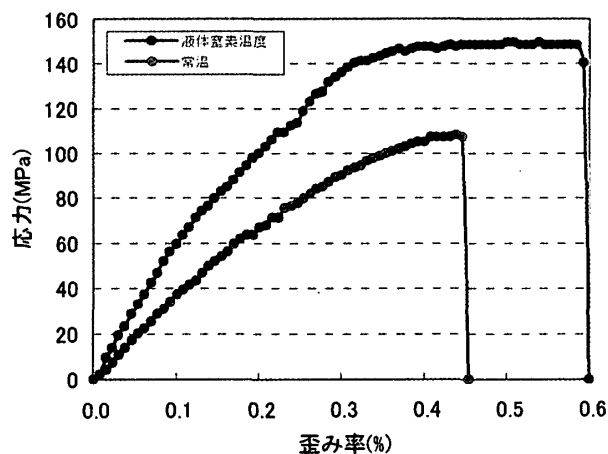


図6. 常温と液体窒素温度の歪み率の比較

同じ荷重では液体窒素温度の方が伸びの値が小さく、例えば荷重80Nの伸びの数値を比較すると、液体窒素温度では伸びが0.2mm程度であるが、常温では0.35mmと1.7倍以上もの大きな差が出ている。

また、液体窒素温度では印加荷重 140 N、伸び 0.5 mm 付近から荷重をかけていかなくても伸びの数値が上昇していく。この数値付近では Bi-2223 超電導線材は完全に破断しており、母材である銀のみが塑性変形をしていると考えられる。

図 7 の実験結果のグラフに引張荷重を加えた時の臨界電流の変化を示す。

引張荷重が 120 N (127 MPa) 以下では臨界電流の低下はほとんど確認できないが、120 N 以上荷重を印加していくと急激に臨界電流の低下が始まる。

120 N での臨界電流は 53 A であったが、130 N (138 MPa) での臨界電流はおよそ半分に、140 N (149 MPa) では零付近まで低下している。また、150 N (159 MPa) 付近で線材が破断している。

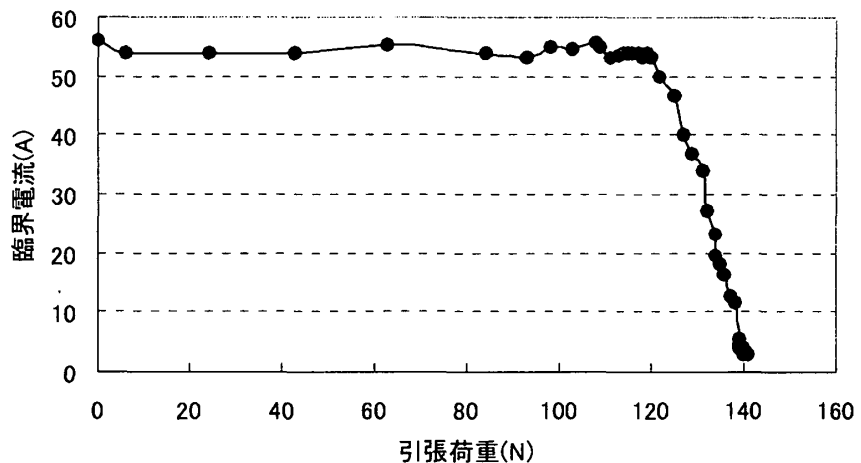


図7 引張荷重と臨界電流

図 8 の実験結果のグラフには伸びと臨界電流の関係を表すグラフである。

伸びが 0.3 mm (歪み率 0.25%) 以下では臨界電流の低下がほとんど無く、伸びが 0.3 mm 以上になると急激に臨界電流の低下が始まる。

伸びが 0.4 mm (0.31%) で臨界電流が約半分に、伸びが 0.5 mm (0.39%) でほぼ零になっている。

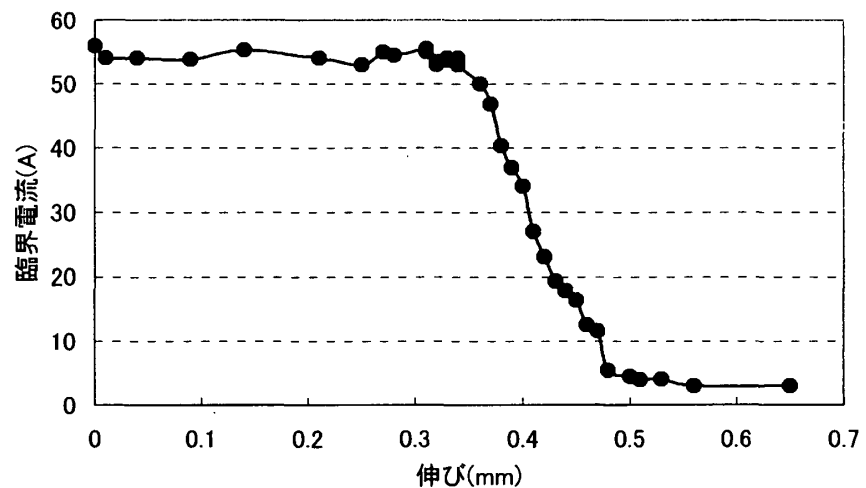


図8 伸びと臨界電流

さらに伸びが 0.65 mm (0.50%) 付近で線材が破断している。

今回の実験結果は、先の図 5 の結果と合わせて次のように解釈することができる。荷重 120 N (応力 127 MPa)、伸び 0.3 mm (歪み率 0.23%) 付近までは Bi-2223 超電導フィラメントは弾性的に変形するため、臨界電流の低下は起こらない。しかし、この数値を超えるとフィラメントは塑性変形をするのではなく、弱い部分から断線していくものと考えられる。このフィラメントの逐次破断が臨界電流の低下をもたらし、荷重 140 N (149 MPa)、伸び (0.5 mm (0.39%)) ではほとんどの全てのフィラメントが破断してしまうものと考えられる。

(2) 実験の結果から臨界電流の低下は超電導フィラメントの破断によるためと考えられるので実験に使用した Bi-2223 超電導線材の線方向断面の観察を行なった。図 9 に超電導線材の EPMA 写真を示す。

白く写っている部分は母材の銀で、黒く写っている部分が Bi-2223 超電導フィラメント部分である。

黒丸で囲んである部分には粒状の異物を確認することが出来る。これは PIT 法によって製作された際、溶解の解け残りの異物と考えられる。

この異物の付近は特に引張に弱く破断しやすい部分と考えられる。

図 10 にさらに拡大した写真を示す。

写真の黒丸で囲んである部分に異物を中心にしてその回りが特に欠けている様子が確認することが出来る。

図 11 には別の箇所の拡大写真を示す。

この写真からは黒丸で囲んである箇所からフィラメントが破断していることが確認できる。

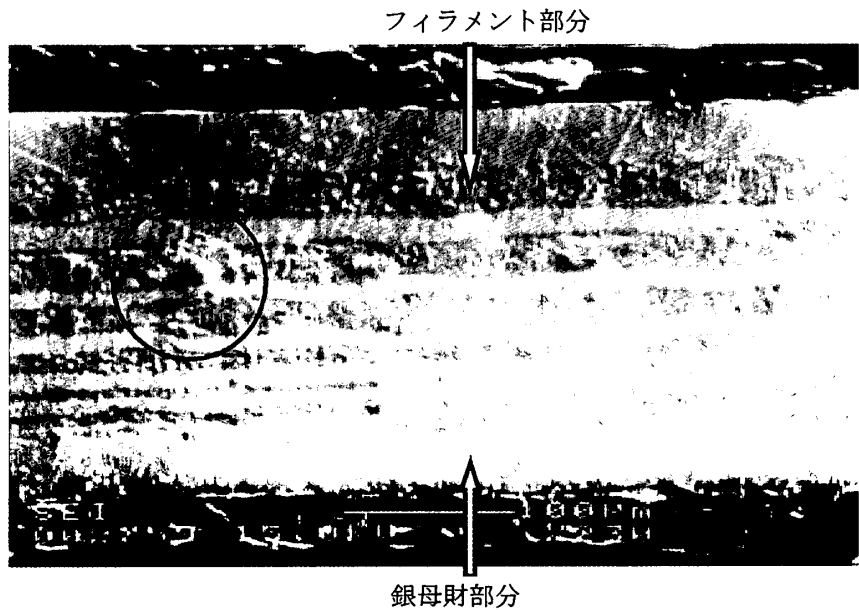


図 9. 破断した線材の EPMA 写真 1

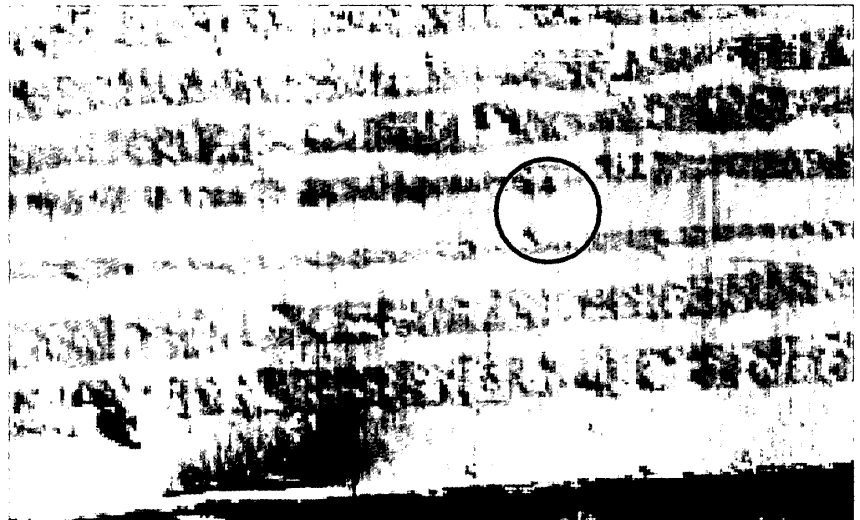


図 10. 破断した線材の EPMA 写真 2



図 11. 破断した線材の EPMA 写真 3

## 6. まとめ

(Bi,Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>(Bi-2223)銀シーステープ線材を使用して、臨界電流の引張応力依存性の実験を行った。

臨界電流は伸びが 0.3mm(歪み率 0.23%)付近、引張荷重 120N(応力 127MPa)付近まではほとんど低下しないが、その後急激に低下が始まり、伸びが 0.5mm(0.39%)付近、引張荷重が 140N(149MPa)で臨界電流はほとんど零となった。そして、その後にテープは破断した。

また、破断したテープの断面を顕微鏡や EPMA で観察したところ、フィラメントの断線部分を確認することが出来た。

以上のことから、テープ線材に引張荷重を加えた際の臨界電流の低下は、超電導フィラメント部分の破断が原因と考えられる。

## 参考文献

- 1) 田中光雄：福井工業大学研究紀要 第31号 (2001)p77
- 2) 田中光雄、横川弘樹：福井工業大学研究紀要 第32号 (2002)p51
- 3) 田中光雄、横川弘樹：福井工業大学研究紀要 第33号 (2003)p71

## 謝辞

本研究を実施するに当たり、引っ張り試験においては機械工学科、羽木研究室の引っ張り試験機をお借りするとともに、羽木教授から種々の貴重なご助言を頂いた。また、超電導フィラメントの破断部の観察を行なうに当たっては機械工学科北山教授に光学顕微鏡および電子線マイクロアナライザーの使用について種々ご指導いただいた。

両教授に心からの謝意を表したい。

(平成16年12月2日受理)