銀シース Bi (2212) 7 芯超伝導線材の臨界電流の 引張ひずみおよび横圧縮応力依存性

片桐 一宗, 申 亨 燮, 正路 良孝
蛭沢 直哉, 渡辺 和雄*, 能登 宏七
岡田 東一**, 平岡 誠***, 祐谷 重徳***

岩手大学工学部 盛岡市上田 4-3-5

*東北大学金属材料研究所 仙台市青葉区片平 2-1-1

**大阪大学産業科学研究所 茨木市美穂ヶ丘 8-1

***三菱電線工業㈱中央研究所 尼崎市東向島西之町 8

(1995 年 1 月 6 日受理)

Tensile Strain/Transverse Compressive Stress Dependence of Critical Current
in Ag Sheathed Bi (2212) 7-Core Superconducting Wires

Kazumune KATAGIRI, Hyung Seop SHIN, Yoshitaka SHOJI, Naoya EBISAWA,
Kazuo WATANABE,* Koshichi NOTO, Toichi OKADA,**
Makoto HIRAOKA*** and Shigenori YUYA***

Faculty of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka 020

*Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-2-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki 567**

***Central Research Laboratory, Mitsubishi Cable Industries Ltd., 8 Nishinocho Higashimukaijima, Amagasaki 660

(Received January 6, 1995)

Synopsis :

The mechanical properties and the axial tensile strain/transverse compressive stress dependence of the critical current, I_c , in Ag sheathed Bi (2212) 7-core superconducting wires with different construction were evaluated at a temperature of 4.2 K and a magnetic field of 14 T. Increase of the superconductor volume fraction shifted the stress-strain curves upward. The tensile strain for I_c degradation onset was in the range of 0.14–0.27%. It depended on the residual compressive strain and the thickness of the superconductor layer. On the other hand, the transverse compressive stress for I_c degradation onset was in the range of 9–20 MPa. The wires with thin Ag sheath layer showed a remarkably large degradation in the onset stress. There was no correlation between the onset stress for degradation of I_c caused by the tensile stress and that caused by the transverse compressive stress.

Keywords : Ag sheathed Bi (2212), 7-core superconducting wire, tensile strain, transverse compressive stress

1. 緒 論

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (2212) 酸化物超伝導線材は 4.2 K で高い臨界磁界 H_{c2} および臨界電流 I_c を有するため、高磁界超伝導マグネットへの応用が検討されている。

マグネットの運転時には巻線に垂直方向に電磁力が加わるが、このためフープ力すなわち線材の長さ方向に引張応力が作用し、また、直径方向の変位が拘束される場合は横方向圧縮応力が作用する。酸化物超伝導体は、従来型化合物系超伝導線材と同様に機械的に脆い

ため、上に述べたような応力やひずみによる超伝導特性とくに I_c の劣化が問題となる。通常、酸化物超伝導体は銀のチューブあるいはテープと複合化して用いられる^{1,2)}。線材の特性劣化を抑制するために多芯化などの芯線構成を変える^{3~5)}、あるいは酸化物中に銀粒子を導入して応力集中を軽減する^{1,6)} ほか、超伝導体の体積率を低下させて残留圧縮ひずみを増加させる⁷⁾、あるいはより直接的に、銀シースの機械的強度を上げる⁸⁾ などの方法が開発されつつある。

本研究では7芯の銀シース Bi(2212) 酸化物超伝導丸線について、応力-ひずみ特性、 I_c の引張ひずみおよび横方向圧縮応力依存性を4.2 K, 14 Tで評価し、それらに及ぼす銀比 (Ag/超伝導体体積比) および芯線の形状・配置の影響を調べた。

2. 実験方法

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{0.64}\text{Cu}_{1.64}\text{O}_x$ 粉末を銀チューブに充填し約1/50の断面減少率まで線引きした後、部分熔融徐冷熱処理をして作製された銀比および芯線形状・配置の異なる4種類の銀シース Bi(2212) 酸化物超伝導7芯丸線試料 (A, B, C, D) を用意した。これらの線材の諸元を Table 1 に、断面を Fig. 1 に示す。応力とひずみの関係およびその際に同時に行う I_c の引張ひずみ依存性ならびに I_c の横方向圧縮応力依存性の測定は東北大学金研の超伝導マグネット中に既報の2種類の評価装置^{9,10)} を挿入して4.2 K, 14 Tの磁場中で行った。四端子法による I_c は5 mmの電圧端子間の $1\text{ }\mu\text{V/cm}$ の電圧発生により定義した。横圧縮応力効果の測定には幅3 mmの圧力ブロックを用い、応力の算定は便宜的に圧縮荷重方向に投影した試料面積で荷重を除して行った。測定は試料のばらつき等を考慮し、試料の各種類につき2本ずつ行った。

Table 1 Specification of Ag sheathed Bi (2212) 7-core wires.

	A	B	C	D
Wire diameter(mm)	1.0	1.0	1.0	1.0
Ag/Superconductor volume ratio	5.5	3.2	3.3	3.3

3. 結果および考察

3.1 応力-ひずみ関係

Fig. 2 に Bi(2212) 7 芯丸線の4.2 K, 14 Tにおける引張応力-ひずみ曲線を示す。線材Aの曲線はB, C, Dに比べて下に位置している。これは銀と比べ縦弾性係数 (54.1 GPa)⁷⁾ は低いものの銀の降伏応力より破断応力の高い脆性材料である超伝導体の体積がAはB, C, Dの70%と小さいためであると考えられる。一方, B, C, Dはほぼ同一の曲線を示しており、芯線形状や配置の影響はほとんどみられない。

3.2 臨界電流の引張ひずみ依存性

Fig. 3 に Bi(2212) 7 芯丸線の臨界電流の最大値 I_{cm} で規格化した I_c の引張ひずみ依存性を示す。ひずみの微小な領域では I_c は一定で変化がないが、線材A, Dでは約0.27%, Bでは約0.18%, Cでは約0.14%の引張ひずみで I_c が急激に低下している。前述のように線材Aは他の線材と体積率が異なり、超伝導体 ($13.6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$)¹¹⁾ より熱収縮率の大きい銀 ($21.6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$)¹¹⁾ の体積が大きいので、4.2 Kまで冷却した時に生じる残留圧縮ひずみが大きくなり、耐引張ひずみ特性が向上したものと考えられる。Fig. 3 中に銀の降伏 (0.2%耐力: 11.2 MPa)¹¹⁾ を考慮した並列モデルの複合則を用いて算出した4.2 Kにおける超伝導体の圧縮熱ひずみを矢印で示している。線材B, C, Dはほぼ同じ超伝導体の体積率すなわち残留圧縮ひずみが同程度であるが耐ひずみ特性が異なっている。これには超伝導層厚さなどが関係しているものと考えられ、

Fig. 1 Cross-sectional view of samples.

Fig. 2 Stress vs. strain curves at 4.2 K, 14 T.

Fig. 3 Tensile strain dependence of I_c normalized to its maximum, I_{cm} .

線材B, Dの比較から超伝導層の薄いものほど耐引張ひずみ特性がよい傾向がうかがわれる。

Bi(2212) 酸化物線材の I_c は Fig. 3 に示しているように低下開始前は一般的な化合物系線材とは異なりひずみによってほとんど変化がない。また、劣化後の I_c の変化は非可逆的、すなわち除荷によって I_c が回復しないことから劣化は超伝導体に生じたき裂により生じるものと考えられる。同様な挙動は 25 T という高磁界においても認められており¹⁾、その高い上部臨界磁界と測定磁界の比を考慮しても超伝導体が弾性変形している領域におけるひずみ依存性が通常の化合物系超伝導線材のそれに比べて著しく小さい。

微小ひずみ領域における I_c 測定値のばらつきを考慮し、また、実用的な見地から I_c の劣化開始点を $I_c/I_{cm}=0.90$ と見なして、そのときのひずみと超伝導体体積率の関係を Fig. 4 に示す。この図にはこれまでに発表されている Bi(2212) 丸線材についての結果¹⁾ および我々の他の実験結果³⁾ も示している。これらの結果から参考のために示した Bi(2223) テープ材についての長村らの結果⁷⁾ にみられるような超伝導体体積率の減少に伴う耐ひずみ性向上という一般的な傾向がみ

Fig. 4 Strain for 90% degradation of I_c/I_{cm} vs. volume fraction of superconductor. Fig. 5 Transverse compressive stress dependence of I_c normalized to its maximum, I_{cm} .

られる。しかし、線材作製技術上まだ十分に制御できていない空洞の大きさや分布のばらつきの効果が混入している可能性もあるが、芯線形状・配置やそれに伴って生じる超伝導層の密度や配向の変化などの効果も少なくないことを示しているものと考えられる。

3.3 臨界電流の横方向圧縮応力効果

Fig. 5 に 7 芯 Bi(2212) 丸線の I_c/I_{cm} の横圧縮応力依存性を示す*。 I_c の引張ひずみ依存性と同様に応力の小さい領域では I_c は一定である。 I_c の急激な劣化開始の応力は線材Bでは約 12 MPa、Cでは約 20 MPa、Dでは約 9 MPa である。劣化後の I_c は除荷によって全く回復していないことから、引張ひずみによる I_c 劣化と同様に超伝導体部のき裂あるいは破壊が I_c 劣化の原因と考えられる。本研究の I_c 測定においては、圧力ブロックによる線材の圧縮部分の外側に電圧端子を取り付けているので、圧力ブロックの端部における線材の損傷の効果がとくに著しいものと考えら

* 線材Aについては、測定に失敗したため残念ながら結果が欠落している。

Table 2 Stress for 90% degradation of critical current.

	A	B	C	D
Axial tensile stress (MPa)	65	49	27	97
Transverse compressive stress (MPa)	—	12	20	9

れる。耐引張ひずみ特性の良い線材Dは横圧縮応力による劣化が他の線材と比較して低い応力で生じている。これは外周部近くに超伝導層を配置した線材Dではシース材である銀層が薄いため、圧力ブロック近傍での高い実応力が銀の塑性変形によって緩和される程度が小さいためと推察される。一方、引張ひずみ特性の良い線材Cは横圧縮応力に対して良い特性を示している。

3.4 臨界電流の低下開始時の引張応力と横方向圧縮応力との関係

Fig. 3 から求めた I_c の低下開始ひずみには残留圧縮ひずみが含まれているため複合則により求めた残留圧縮ひずみを低下開始ひずみから差し引くことにより超伝導層固有の低下開始引張ひずみを求め、前に示した超伝導体の縦弾性係数を掛け合わせるにより低下開始時の引張応力を求めた。その値と低下開始横方向圧縮応力との比較を Table 2 に示す。横圧縮応力が粗い近似による平均値であるので、両者を比較する定量的な議論はできないが、低下開始時の引張応力と横方向圧縮応力の間には相関のないことがわかる。これはこれまでに述べてきたように応力負荷方向、応力集中などの違いによって構成の異なる線材中で、マトリックスの銀の変形と関係して生じる超伝導層の永久劣化開始応力が変化したためと考えられる。

4. 結 論

線材構成の異なる銀シース Bi (2212) 7 芯酸化物超伝導丸線の引張ひずみおよび横方向圧縮応力依存性を評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 応力-ひずみ曲線は超伝導体体積率の増加に伴い上昇した。

2) 臨界電流の引張ひずみによる劣化は熱収縮差により超伝導体に生じる残留圧縮ひずみおよび超伝導層厚さに依存した。

3) 外周近くに超伝導体が配置された線材では臨界

電流の横方向圧縮応力による劣化が顕著であった。

4) 構成の異なる線材の引張応力による臨界電流の低下開始応力と横方向圧縮によるそれとは相関がなかった。

高磁界における線材の臨界電流の引張ひずみおよび横方向圧縮応力依存性の測定には東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料センターの 15 T 超電導 マグネットを利用させていただいた。また岩手大学大学院瀬戸肇君には実験に協力いただいた。試料は三菱電線工業㈱から提供を受けた。研究の遂行の一部に、財団法人岩谷直治記念財団科学技術助成金の援助を受けた。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) J.W. Ekin, D.K. Finnemore, Q. Li, J. Tenbrink and W. Carter: Appl. Phys. Lett. **61** (1992) 858
- 2) K. Togano, H. Kumakura, J. Kase, Q. Li, J.E. Ostenson and D.K. Finnemore: J. Appl. Phys. **70** (1991) 6966
- 3) 片桐一宗, 駒林直哉, 正路良孝, 能登宏七, 渡辺和雄, 岡田東一, 平岡 誠, 山本啓介, 甲斐純一: 第49回春季低温工学・超電導学会講演概要集 (1993) 22
- 4) T. Kuroda, M. Yuyama, K. Itoh and H. Wada: Adv. Cryog. Eng. **38** (1991) 1045
- 5) K. Sato, T. Hikata, H. Mukai, M. Ueyama, N. Shibuta, T. Kato, T. Masuda, M. Nagata, K. Iwata and T. Mitsui: IEEE Trans. Magn. **27** (1991) 1231
- 6) Q. Li, J.E. Ostenson and D.K. Finnemore: J. Appl. Phys. **70** (1991) 4392
- 7) K. Osamura, S. Ochiai and K. Hayashi: Adv. Cryog. Eng. **38** (1992) 875
- 8) 佐藤正子, 山田 穰, 野村俊自, 村瀬 暁, 神定良昌, 小泉 勉: 第51回春季低温工学・超電導学会講演概要集 (1994) 38
- 9) K. Katagiri, M. Fukumoto, K. Saito, M. Ohgami, T. Okada, A. Nagata, K. Noto and K. Watanabe: Adv. Cryog. Eng. **36** (1990) 69
- 10) K. Kamata, K. Katagiri, T. Okada, T. Takeuchi, K. Inoue, K. Watanabe, Y. Muto, T. Ogata and T. Tsujii: Proc. 11th Int. Conf. Magnet Tech. **2** (1989) 1231
- 11) S. Ochiai, K. Hayashi and K. Osamura: Cryogenics **32** (1992) 799