

実用超伝導線材および構成材料の機械－電磁気的特性評価

The evaluation of mechanical and electro-magnetic behaviour of practical superconducting wire and its composition

富山大・工 笠場孝一
岩手大・工 廣内 悟, 藤川 剛生
東北大金研・強磁場センター 小黒 英俊, 淡路 智

K. Kasaba^A, S. Hirouchi^B, T. Fujikawa^B,
H. Oguro^C and S. Awaji^C

^A Faculty of Engineering, University of Toyama

^B Faculty of Engineering, Iwate University

^C Institute for Materials Research, Tohoku University

1. 緒言

ビスマス系酸化物超伝導線材である DI-BSCCO (Drastically Innovate BSCCO) は、加圧雰囲気下での焼成により超伝導フィラメントの密度を高め、酸化物超伝導体に避けられない内部欠陥の発生を極限にまで防いだテープ線材である。それにより高臨界電流密度が実現し、77K での使用を想定した様々な超伝導機器への応用はもちろんのこと、4.2K 高磁界下での Nb₃Sn 線材の代替使用も可能な程の特性を有している。

本研究では、交流損失を抑える目的でツイスト加工を施している、交流用途の DI-BSCCO テープ線材、住友電工製 TypeAC の臨界電流の応力/ひずみ依存性を、軸引張試験、横圧縮試験によって測定した。

2. 実験

Type AC 線材の諸元は、幅 2.6mm、厚さ 0.21mm で、77K での臨界電流は約 55A である。強度を補う上で厚さ 50 μ m の Cu 合金を表裏にラミネートした線材も存在し Type ACT と呼んでいる。

DI-BSCCO 線材は基本的には 77K での使用を想定しているが、4K では既存の Nb₃Sn に匹敵する特性を有しており、また 77K では評価しにくい磁場依存性を考察するために、4.2K、14.5T の環境中で試験を行った。これらの試験では、臨界電流 I_c は 4 端子法で、1 μ V/cm の規準で測定した。

今回のような、剛性が小さく、単線では簡単に曲げ変形が生じるテープ線材では、軸引張りでのその方向の変位測定は、極力慎重に行う必要がある。テープ材の測定標準化を目指す上では、Nyilas 型伸び計を用いて、テープ線材表裏の非対称的な変位を平均化処理することが推奨されている。一方、磁場環境下では、ローレンツ力による線材の表裏方向の変形を抑えるために、装置には GFRP 製の試料台を設けなければならないが、その試料台と Nyilas 型伸び計との干渉が避けられず、この方法での測定は不可能である。著者らはこれまで、線材の応力ひずみ効果の実験に、負荷レバー間の変位を、狭い空間用の特殊形状クリップゲージで間接的に測定する方法を採用してきた。この方法は、それなりの曲げ剛性を有する Nb₃Sn などの丸線では有効であっ

たが、BSCCO テープ線材の測定では、精度上問題があることが分かってきた。精度向上を目指したひずみ測定を今後の課題として検討しているが、一方で、本報では、77K での特殊クリップゲージでの検出値の弾性成分を、同じ条件、線材の Nyilas 型伸び計の検出値と比較し、その差を補正分として 4K での測定値に反映させた結果を報告する。

3. 結果と考察

Fig.1 に AC, ACT 線材の 4K・14.5T 下、引張り試験で得た引張り応力-ひずみ曲線、Fig.2 に I_c / I_{c0} -引張りひずみ曲線を示す。比較のため、77K、および 4K・自己磁界下における結果をそれぞれ破線、白抜き記号で併記する。ひずみは前節で示した補正を行っている。

Fig.1 には AC, ACT 線材のそれぞれで、30MPa 以前の初期勾配を平均化した傾きを 0.2%ひずみ分オフセットした直線を、線材間で耐力相応の値を比較するために引いている。AC 線材の 77K での結果を、4K・自己磁界のものと比較すると、温度低下に伴う耐力相応値(オフセット線との交点)の向上が見られるが、それを 4K・14.5T と比較すると、その向上分はなくなり 77K のものと同等になっている。また ACT 線材については、4K・14.5T の耐力が 77K 自己磁界以下になっている。これらの原因として、引張りによる軸方向応力に、ローレンツ

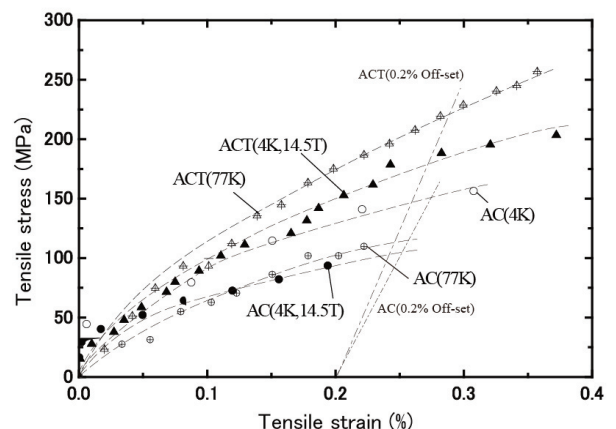


Fig.1 Stress-Strain Curves of Type AC, ACT

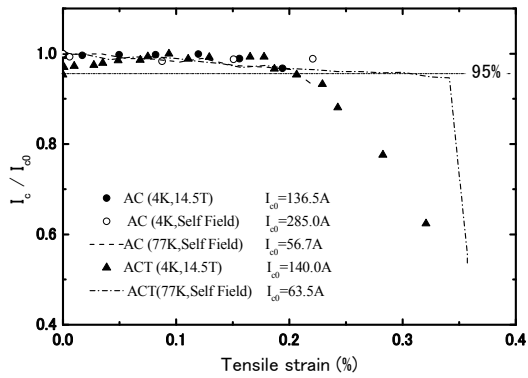


Fig.2 I_c / I_{c0} vs. Tensile strain of Type AC, ACT

力の作用による応力が加わり、線材へ作用する応力が2軸的になる効果が含まれていると思われるが、磁場の印加によって耐力に影響があることを示唆している可能性もある。この確認には、さらなるデータの蓄積が必要である。

BSCCO テープなどの酸化物超電導体テープ線材では I_c の劣化に可逆的な領域は少なく、線材の力学的損傷とほぼ時を同じくして I_c が劣化することが多かった。よって劣化曲線は 2 直線近似が可能なものになっていた。ただしそれらのデータはほとんどが 77K、自己磁界で取得されたものである。Fig.2 での 4K, 14.5T の結果によると、AC 線材は実験点が少ないもののひずみ 0.16% あたりから 4K 自己磁界のものより劣化が進み、また ACT 線材はひずみ 0.2% を超えるあたりから徐々に劣化が進んでいる。このような徐々の劣化は磁場を印可した Nb_3Sn などでは普通に見られる挙動である。また BSCCO テープでも以前測定した TypeS 線材の 4K・14.5T で確認している[1]。線材にある程度の大きさの負荷を与えると、 Nb_3Sn と同様の、応力/ひずみと磁場との相乗作用による I_c 劣化が、自身の力学的損傷に先行して起こる。

Fig.3, Fig.4 にそれぞれ 77K, 4K・14.5T 下で得た AC 系線材の I_c / I_{c0} - 横圧縮応力曲線を示す。除荷後の I_c 値を白抜き記号で示す。77K では、ACT 線材は 90MPa に至るまで I_c 劣化はないが、今回の実験の AC 線材は 90MPa で約 7% の劣化を示していた。圧縮試験では常に圧子の片当りに注意し、理想の均一圧縮に近づけることが必要である。横方向の力に対し、ACT 線材は線材表裏のラミネート層が緩衝領域となって、Bi フィラメントへの応力分布を均一化させる。一方そのような効果のない AC 線材は片当りに敏感であり、実際の Bi フィラメントへは局所的に 90MPa を超える応力が作用していたかもしれない。よって、この結果で表れている程の劣化はない可能性がある。

4K・14.5T の ACT 線材は応力の増加に伴って I_c が上昇している。 Nb_3Sn 超伝導体の長方形断面テープの場合、異方性によって冷却で生じた横方向の残留引張りひずみを、横圧縮を作用したときに解放することでこのような I_c の増加が生じることがあるが[2]、BSCCO テープでは考えにくい。そのため、これは実験時の電圧

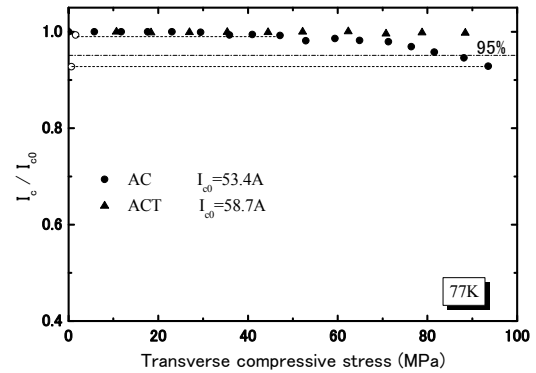


Fig.2 I_c / I_{c0} vs. Transverse compressive stress of Type AC, ACT at 77 K

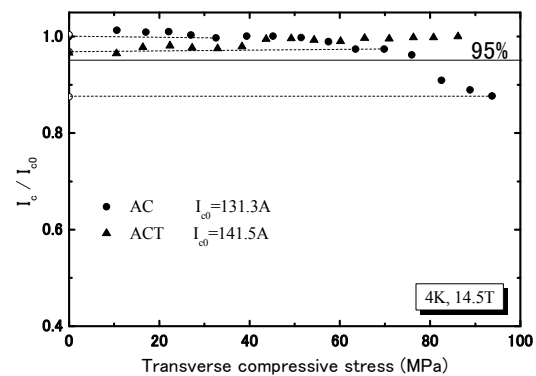


Fig.3 I_c / I_{c0} vs. Transverse compressive stress of Type AC, ACT at 4 K, 14.5 T

端子不良や接触抵抗等の影響で、 I_c 検定のためのベースライン電圧が下がっていたことが原因として考えられる。しかし、この範囲内で顕著な I_c の劣化挙動がないことは確認出来ていることから、横圧縮への耐性は十分に確保されていると考えている。

4. まとめ

BSCCO テープ線材の 4K・14.5T での耐力が、77K 自己磁界のそれと同等かそれ以下となった。また I_c の劣化の要因のほぼすべてが線材の力学的損傷にある後者と異なり、前者はむしろ Nb_3Sn で見られるような徐々の劣化を示した。これらの原因として、引張りとローレンツ力で、線材へ作用する応力が2軸的になる効果が含まれていると思われるが、現時点で詳細は不明である。

なお、軸引張り、横圧縮どちらの試験環境においても Cu 合金箔のラミネートがとても有効であった。

参考文献

- [1] 笠場孝一, 佐藤雅史, 廣内悟, 山田雄一: 第 79 回 2008 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 1A-a06
- [2] J W Ekin: Journal of Applied Physics 62 (1987) 4829-4834