

実用超伝導線材の臨界電流の不可逆性と
引張／圧縮性局所ひずみとの相関
**Correlation of Irreversibility and Local Tensile/Compressive Strain of the
Critical Current for Practical Use Superconducting Wire**

長村 光造^a, 町屋 修太郎^b, 土屋 佳則^c, 藤井 宏樹^c, 葉 術軍^c,
西島 元^c, 菖蒲 敬久^d, 梶原 堅太郎^e
Kozo Osamura^a, Syutaro Machiya^b, Yoshinori Tsuchiya^c, Hiroki Fujii^c, Shujun Ye^c,
Gen Nishijima^c, Takahisa Shobu^d, Kentaro Kajiwara^e

^a(財)応用科学研究所, ^b大同大学, ^c(独)物質・材料研究機構, ^d(独)日本原子力研究開発機構,
^e(公財)高輝度光科学研究センター
^aRIAS, ^bDaido Univ., ^cNIMS, ^cJAEA, ^eJASRI

BSCCO 実用超伝導線材の臨界電流の不可逆なひずみ依存性の解明のため、超伝導層に加わる引張／圧縮性の局所ひずみを実測し臨界電流との相関を調べることを目的として、超伝導線材に対して機械的に引張／圧縮のひずみを与えた状態で、線材内部の超伝導体の結晶格子ひずみを放射光による白色 X 線を用いて測定した。引張／圧縮のひずみを線材に与えるために今回新たに導入したスプリングボードは当初の想定通りに機能し、反復負荷条件で局所的な格子ひずみの X 線測定が可能であることが示された。本研究において、圧縮ひずみの印加により BSCCO 超伝導フィラメントに生起する局所ひずみの緩和と臨界電流の減少の正の相関が見いだされた。

キーワード： 超伝導線材、BL28B2 白色 X 線、局所ひずみ測定

背景と研究目的：

人類が直面するエネルギー危機の解決のため、超伝導技術は最重要キーテクノロジーのひとつであり、これまで大容量送電ケーブル、エネルギー貯蔵、超伝導発電機等のプロトタイプが作製され、熱核融合炉 ITER 計画では原型炉の建設が今まさに開始されたところである。しかしこのような状況においても、超伝導技術の真の実用化にはまだ克服すべき広範でかつ共通する材料科学的技術課題が立ち塞がっている。その根本は高臨界電流、低交流損失、高強度等の全体の機能を最大化した高性能・低コスト超伝導複合体の設計とその実用化を図ることである。特に実用化が期待されている BSCCO ((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀) 複合テープ線材ではセラミックスである脆弱な超伝導層の保持のため金属基材と複合した線材の形がとられるが、熱誘起残留応力、フープ力による臨界電流の劣化の問題が十分には解決されていない。このように臨界電流のひずみ問題は実用上大きな問題となっているが、学問的見地からも、可逆領域における臨界電流のひずみ依存性について理論的にまだ未解明のまま残されている。なぜなら線材内部のひずみ評価が困難であるためである。我々は非破壊の内部ひずみ評価方法として、放射光、中性子による結晶格子ひずみ測定に着目し、測定環境の整備を行うとともに種々の線材のひずみ評価を実施してきた[1-10]。本研究はこれまでの成果を踏まえ、新たに引張／圧縮ひずみの反復負荷を印加する機構を導入し、実用状態に近い環境でひずみ測定を試みた。すなわち、BSCCO 超伝導線材の臨界電流の不可逆なひずみ依存性の解明のため、超伝導層に加わる引張／圧縮性の局所ひずみを実測し臨界電流との相関を調べ、その成果を超伝導線材の高性能化に反映させることを目的とする。

実験：

試料は住友電気工業から支給された BSCCO 複合テープ線材 - DI-BSCCO を用いた。試料サイズは幅 4.5 mm、厚さ 0.3 mm、長さ 80 mm で、銀シースの BSCCO 線材を厚さ 50 μm のステンレステープでラミネートしたものである。これを Fig.1 に示す機構を持つスプリングボードに低温半田で接着し試験に供した。スプリングボード本体は橋げたような形状をしており、引張軸と試料面をオフセットして負荷をかけることで試料をたわませ、安定して繰り返しひずみを与えるこ

とが可能である。スプリングボードによる引張/圧縮ひずみ付加状況を Fig.2 に示す。スプリングボードに引張/圧縮の負荷を与えることで試料の長手方向に対して引張または圧縮のひずみがかかる。本課題ではこれをビーム実験で使用するため試料中央のビーム通過位置に開口部を設け、試料を露出させている。試料表面にはひずみゲージを貼付し、試料全体に加わる負荷ひずみをモニタした。

X線ひずみ測定は BL28B2 の白色 X 線を用いて実施した。試料ステージに設置した小型引張試験機に試料を接着したスプリングボードを取り付け、試料に外部から引張/圧縮の種々のひずみを加えた状態を保持してその都度回折を測定した。Fig.3 に側面から見た実験装置の配置を示す。スプリングボードに貼付した試料を縦位置に設置し、散乱ベクトルを試料長手方向とした。測定には試料透過配置に設置した Ge 半導体検出器を用いた。検出器のフルスケールは 4096 チャンネル (0.0540 keV/ch) である。散乱角 2θ は 8° 、スリットサイズは回折方向 0.1 mm、回折角に垂直な方向 0.5~1.0 mm に設定した。超伝導体の格子ひずみ A_{appl} は負荷状態の面間隔 d_{loading} の無負荷状態 d_{initial} からのシフトで評価した。すなわち $A_{\text{appl}} = (d_{\text{loading}} - d_{\text{initial}}) / d_{\text{initial}}$ として算出した。評価に用いた回折は Bi2223(220) である。以上により試料に加わる負荷ひずみと線材内部の超伝導体にかかる格子ひずみの関係を調べた。

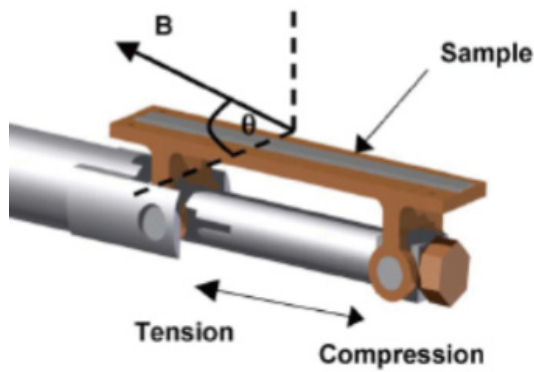


Fig.1. スプリングボードの機構

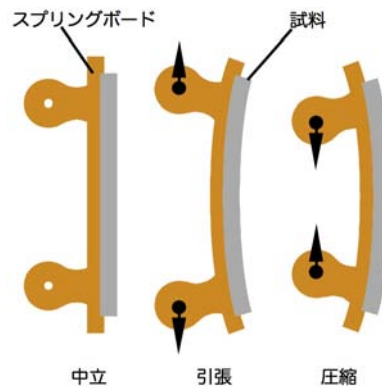


Fig.2. スプリングボードによる引張/圧縮ひずみ付加状況

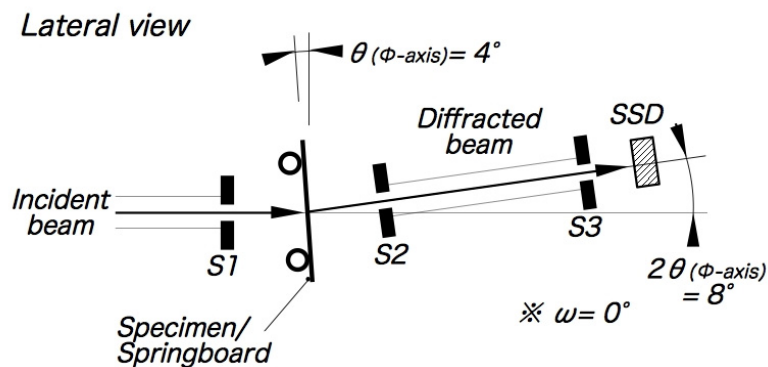


Fig.3. 側面から見た実験装置配置

結果および考察：

実験では試料に対して引張/圧縮の繰り返しひずみを段階的に連続して与え、その過程で回折ひずみ測定を実施した。一連の負荷過程は 1) 無負荷→0.2%引張→除荷 (A1 過程)、2) 0.2%圧縮→除荷 (A2 過程)、3) 0.2%引張→除荷 (A3 過程)、4) 0.4%圧縮→除荷 (A4 過程) とした。

Fig.4 に本測定で得られた負荷ひずみと超伝導層の結晶格子ひずみの関係を示す。引張ひずみを 0.2%まで印加し、再び無負荷状態に戻す初めの負荷過程 (Fig.4 左図 A1 過程) で格子ひずみは直線

的に増加し初期値に復帰する。それに続く 0.2%の圧縮ひずみから無負荷状態に戻す過程 (Fig.4 左図 A2 過程) では、0.1%の圧縮量を超えると負荷ひずみと格子ひずみの関係は直線関係からずれ、格子ひずみの変化量がやや小さくなることが確認された。すなわち 0.1%を超える圧縮ひずみで緩和が生じることが示された。

その後の反復負荷過程 (Fig.4 右図 A3-A4 過程) でも付加ひずみと格子ひずみの関係は最初の引張-圧縮過程と同様の挙動を示し、0.2%の引張から 0.1%の圧縮の間は直線関係を保ち、0.1%を超える圧縮ひずみで緩和が生じる結果となった。この圧縮ひずみ領域での緩和現象は BSCCO フィラメントの損傷によるものと推定される。

臨界電流は回折測定と同様 A1~A4 の負荷条件で別途測定し、負荷ひずみに対して Fig.5 に示す臨界電流の変化を得た。A1 過程でひずみ量増加により臨界電流は減少し、ひずみを減少させるとほぼ可逆的に増加する。続く A2 過程で臨界電流はわずかに増加し、圧縮ひずみ 0.08~0.1%付近から減少し始める。これは回折で測定した結晶格子ひずみの変化とよく合致する。すなわち圧縮による臨界電流の減少は BSCCO フィラメントに生起するひずみの緩和によるものと示唆される。

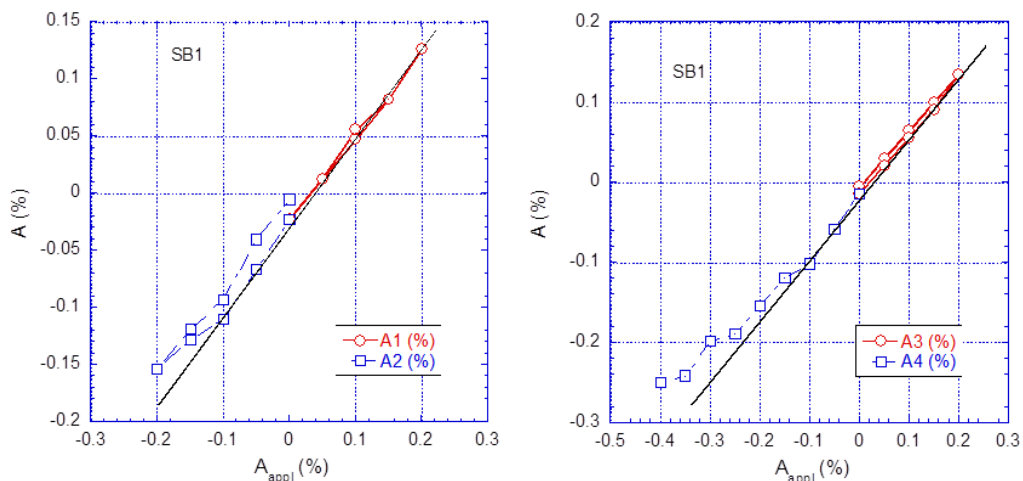


Fig.4. BSCCO フィラメントに生起した結晶格子ひずみの引張/圧縮反復ひずみ依存性 (左：引張-圧縮過程 1 回目 A1-A2、右：引張-圧縮 2 回目反復過程 A3-A4)

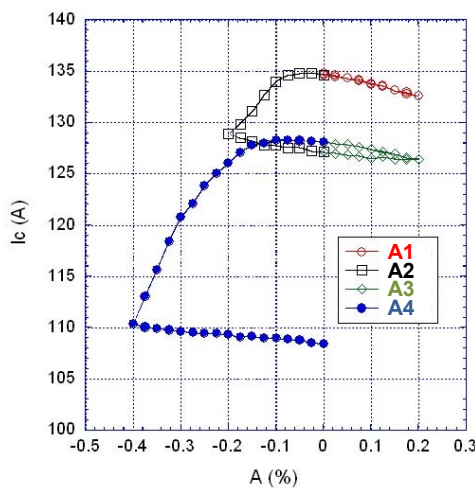


Fig.5. 負荷過程 A1-A4 における臨界電流の引張/圧縮反復ひずみ依存性 (77K)

参考文献：

- [1] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.* (submitted).
- [2] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 054010(9pp), (2012).
- [3] K. Osamura, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **22**, 8400809(9pp), (2012).
- [4] K. Osamura, et al., *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, **21**, 3090-3093, (2011).
- [5] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **22**, 065001-065006, (2009).
- [6] K. Osamura, et al., *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, **19**, 3026-3029, (2009).
- [7] S. Machiya, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **21**, 054007-054012 (2008).
- [8] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **21**, 054010-054018 (2008).
- [9] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **20**, S211-S216, (2007).
- [10] K. Osamura, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **20**, 202-210, (2007).