

予ひずみ効果を付与したラミネーション法による高強度・高耐ひずみ
DI-BSCCO 高温超伝導材テープの開発
Development of Practical High Stress/Strain Tolerance DI-BSCCO High
Temperature Superconducting Tape on Internal Strain Evaluation
with Pre-Loaded Lamination Technic

町屋 修太郎^a, 長村 光造^b, 菅野 未知央^c, 土屋 佳則^d, 藤上 純^e
Shutaro Machiya^a, Kozo Osamura^b, Michio Sugano^c, Yoshinori Tsuchiya^d, Jun Fujikami^e

^a 大同大学, ^b 応用科学研究所, ^c 高エネルギー加速器研究機構,

^d 日本原子力研究開発機構, ^e 住友電工

^a Daido University, ^b RIAS, ^c KEK, ^d NIMS, ^e SEI

様々な実用的な超伝導応用が期待されている BSCCO Bi2223 高温超伝導線材について、放射光を用いた超伝導フィラメントの内部ひずみの評価を行った。異なる 4 種類の予荷重を与えた補強材を張り合わせた線材と補強前の線材を準備した。BL46XU の多軸ゴニオメータ上に設置した小型引張試験機に取り付け、線材軸方向に引張ひずみを負荷したときに発生する軸方向格子ひずみを測定した。これにより、ゼロ負荷時の結果より、予荷重により導入された、フィラメントへの圧縮ひずみを評価することができ、またフィラメント破断の限界ひずみを評価することができた。

キーワード： BSCCO、Bi2223、超伝導線材、X 線回折、残留ひずみ

背景と研究目的：

DI-BSCCO は、最も実用的応用レベルに達している高温超伝導材でありテープ状の形状を持った線材である。しかしながら単体の組成の約 2/3 が銀から成っており、強度の確保が難しい問題があった。しかし、このテープ形状を生かし、両面から他の金属をラミネーションする技術により、飛躍的に耐ひずみ特性を向上させてきた。さらなる耐ひずみ、耐応力を得るために、テープをラミネートする際にラミネートする側のテープに予荷重をかけるテクニックが開発された。これによりラミネートされる側の超伝導テープには、圧縮の残留ひずみが導入される。そもそも超伝導相のフィラメントはセラミックスであり、形状も複雑であることから引張に弱いことが問題とされており、これにより圧縮のひずみが導入されれば、引張側の限界ひずみの改善が期待できる。

我々のグループが過去に SPring-8 で行った実験により、BSCCO Bi2223 銀テープ線材の残留ひずみ測定に成功している。また、自動化された引張試験機を導入したことで、ひずみのステップごとに手動で行っていた逐次測定が自動化できるようになっており、高効率で測定することが可能となった。今回は、予荷重の効果を確かめるため、4 種類の異なる予荷重を与えてラミネートしたテープ線材を準備した。また、ラミネートなしのベア材も含めると、5 種類であり、これらをフィラメントが破断するまで引張を行い、限界ひずみを確認したい。また同時に、フィラメントに導入される圧縮ひずみを確認すると共に、その改善効果を X 線的な手法を用いて確認したい。

実験方法：

本実験で用いたのは全て Bi2223 マルチフィラメントを持つ銀シース超伝導テープである。1 つは、銀シースのみであり、残りはラミネート時にラミネート材に 4 種の異なる予荷重を与えたテープ状の複合線材である。試料は、ラミネート材への予荷重により区別し、PT1 から PT4 までの予荷重を与えた試料を準備した。PT1 の予荷重が一番小さく、PT4 の予荷重が最も大きかった。

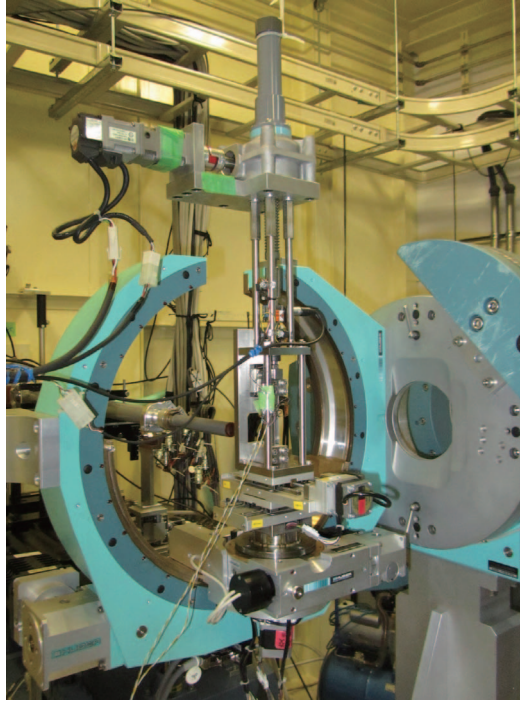


図 1. ひずみ保持型自動引張試験装置
(線材の両端を固定し、上端部を上へ動かすことで引張ひずみ/応力を与える。
ひずみは伸び計で測定しフィードバック制御により、実験中はひずみ一定を保持している。)

ラミネーションに用いたテープはオーステナイト系ステンレスである。

これらの線材を BL46XU の多軸ゴニオメータステージに設置した小型自動引張試験機に取り付け、線材軸方向に一定の引張ひずみを負荷した状態で X 線回折測定を行った。ビームエネルギーは 19.5 keV、スリット間隔は幅方向約 0.2 mm x 高さ方向約 0.3 mm とした。透過配置を採用し、散乱ベクトルの方向にテープの長手方向 (ab 面が測定できる向き) が向くようなセットアップとした。図 1 に装置のセットアップを示す。試料は、慎重に取り付けを行い、無負荷時のひずみをゼロひずみとした。このテープ線材は配向しているが、配向度はさほど高くないため、コーテッドコンダクターのようなピーク値をスキャンするようなロックング測定は行っていない。

実験結果および考察：

図 2 に負荷ひずみと回折角の関係を示し、図 3 に回折各を格子面間隔に変換した図を示す。負荷ひずみにしたがって、線形に変化するが、ある領域で変化が起こらなくなっているのがわかる。これらの図では、マクロな負荷ひずみと観測された回折による結晶のひずみの変化を対比させており、線形性が失われたところでフィラメントが多重破断していると考えることができる。

次に、図 4 に回折から求めた Bi フィラメントの結晶ひずみと負荷ひずみの関係を示す。また負荷ひずみが 0 の点のひずみを評価することで、室温での残留ひずみを評価することができる。

Bare 材ではやや圧縮の残留ひずみを持っておりその値は -0.0439% であった。予荷重をかけることで PT1 では -0.137% と圧縮ひずみがおおきくなる。ついで、PT2 で -0.158%、PT3 で -0.178%、一番大きな予荷重をかけた PT4 では -0.219% の大きな圧縮ひずみが、フィラメントにかかっていることが明らかとなった。実際の低温時は、さらに圧縮側にシフトすると考えられるが、室温の段階での圧縮効果が定量的に評価できた意義は大きい。また図 4 に上部に示した線は、おおよそのフィラメントの破断ひずみである。フィラメントは、どの予荷重でもおおよそ 0.11% の引張ひずみで破断しているように見える。実フィラメントのみの引張試験は難しいが、ぜい性材料であるフィラメントの破壊挙動を in-situ で見るには X 線は大変優れたツールである。一方ラミネーションなしの Bare 材では、約 0.06% で破断しており、ラミネーションによる耐ひずみの強化は、約 +0.05% である。これは、金属テープによる BSCCO 線の均質化による強化であると考えられている。

まとめ：

本実験により、BSCCO Bi2223 銀テープ線材へのラミネート材への予荷重による、超伝導相フィラメントへの圧縮ひずみの導入効果を定量的に確認することができた。また、Bi フィラメントの破断ひずみは、おおよそ 0.11%であることが示された。Bi フィラメントはぜい性でもともとあまり強度がなく、いかに圧縮ひずみを与えておくかが、引張り方向の強度および信頼性確保に重要であるかが理解できる。今後は、ラミネーション材の厚さやなども考慮に入れ、予荷重とフィラメントへの圧縮ひずみの関係を明らかにしていきたい。

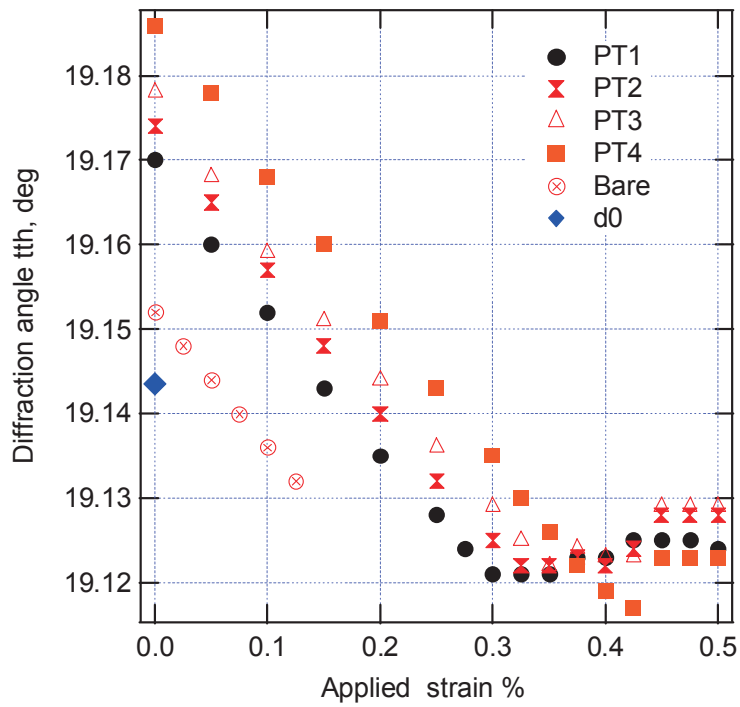


図2. 負荷ひずみと回折角の関係
(d0 は BSCCO 粉末の値で、無ひずみの回折角である)

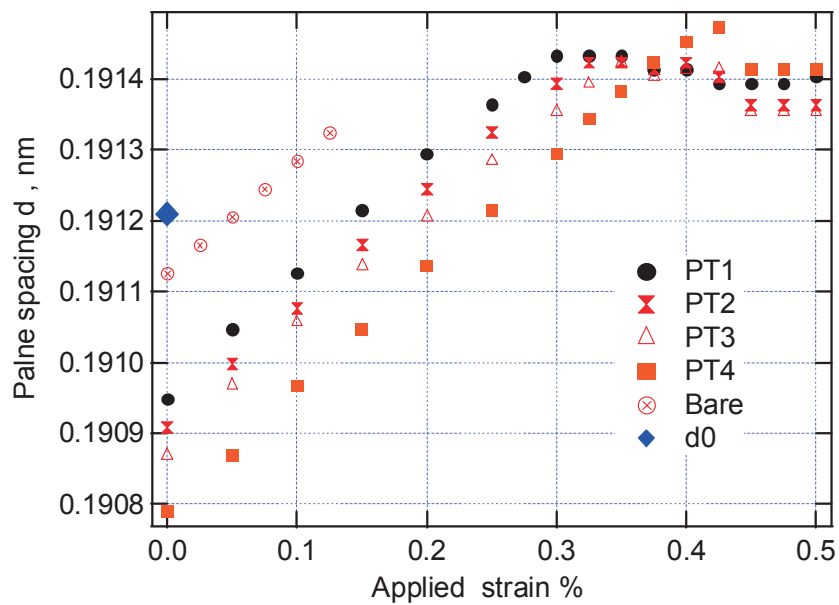


図3. 格子面間隔と負荷ひずみの関係

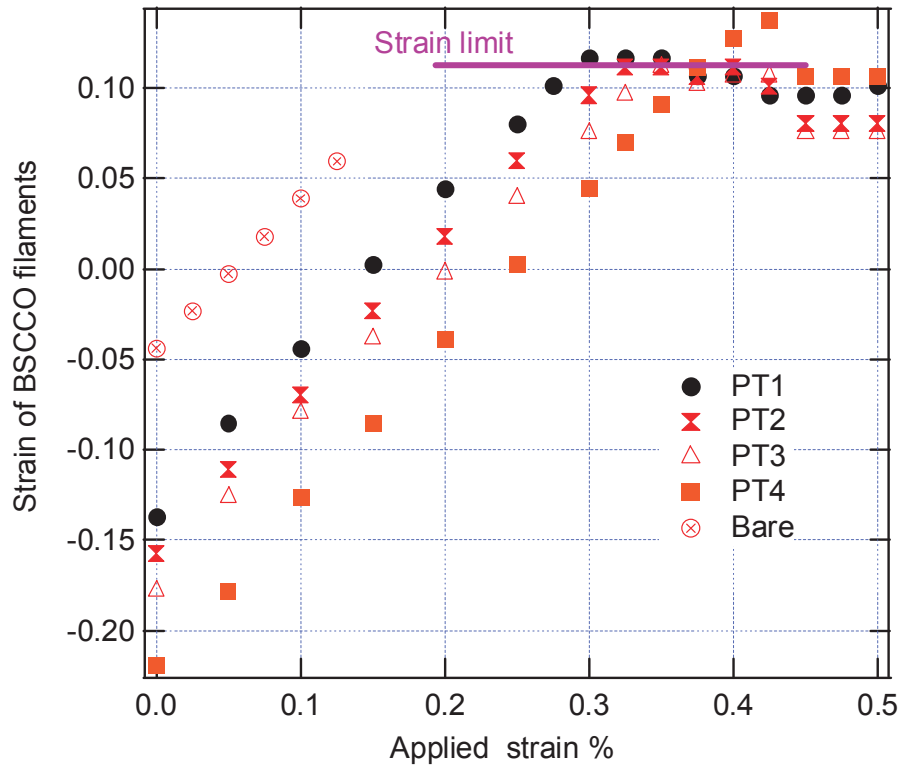


図4. 回折から求めた Bi フィラメントの結晶ひずみと荷重ひずみの関係