

実用超伝導複合線材の曲げによる特性劣化の解明 Degradation of Properties Due to Excess Bending Strain in Practical Superconducting Composite Wires

町屋 修太郎^a, 長村 光造^b, 金 新哲^c, 菖蒲 敬久^d
S. Machiya^a, K. Osamura^b, X. Jin^c, T. Shobu^d

^a大同大学, ^b応用科学研究所, ^c理化学研究所, ^d日本原子力研究開発機構
^aDaido University, ^bReserch Institute of Applied Sciences,
^cThe Institute of Physical and Chemical Research(RIKEN),
^dJapan Atomic Energy Agency

超伝導特性が応力/ひずみに敏感であることはよく知られている。このことが超伝導を実用化するうえで大きな障害となっている。これらの問題の共通する学問的、技術的課題は実際に超伝導フィラメントに生起する局所ひずみを正確に評価し、制御することである。しかし実用超伝導線は複合材料であるため局所ひずみと負荷ひずみが一致しないため問題を複雑にしている。すなわち回折法により非破壊で局所歪を計測することが不可欠である。

特に超伝導線材は実用において、コイル形状にして用いられることが多く、そのため曲げひずみ特性の限界を把握しておくことが急務となっている。本実験では、BSCCO コイルの実体でのひずみ測定および、スプリングボードと呼ばれる特殊な曲げ治具を用いて、任意のひずみ下でのひずみ測定を行って結果を得たので報告したい。

キーワード： BSCCO、Bi2223、ReBCO、超伝導線材、X線回折、残留ひずみ

背景と研究目的：

DI-BSCCO は $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ を用いた超伝導材料で、最も実用的応用レベルに達しているテープ状の形状を持った高温超伝導線材である。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。実用コイルでは、一定曲率に曲げられたうえ、線膨張係数が大きく異なるエポキシによる含浸での一体化が行われることが多く、これらによる熱応力やエポキシ含浸時に導入されるひずみが実用上の大きな関心点となっている。

昨年度の実験においては、BSCCO 線材について、特殊な曲げ変形治具であるスプリングボードを用いた引張と圧縮ひずみを連続的に印加した状態で BSCCO テープ線材中の BSCCO フィラメントに生起する局所歪を引張から圧縮までの過程を連続に計測することに初めて成功した。本研究では、薄膜系の線材である ReBCO [$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+d}$, RE=Y, Gd, Sm, Dy] 線材について、同様の実験を行った。

実験方法：

まず、第一に Bi2223 マルチフィラメントを持つ銀シース超伝導コイルのひずみ測定について説明する。本実験では、内径 50 mm のモデルコイルを準備した。ターン数は部位にもよるが最大 19 ターンであり、ある程度の予荷重をかけて巻いたものである。1 つは、エポキシ樹脂の含浸がないもので、もう 1 つは、エポキシ樹脂で含浸したものである。超伝導コイルは、励磁した際に発生する力により超伝導線が動くとき磁場特性が変化するため樹脂による含浸が一般的に行われている。

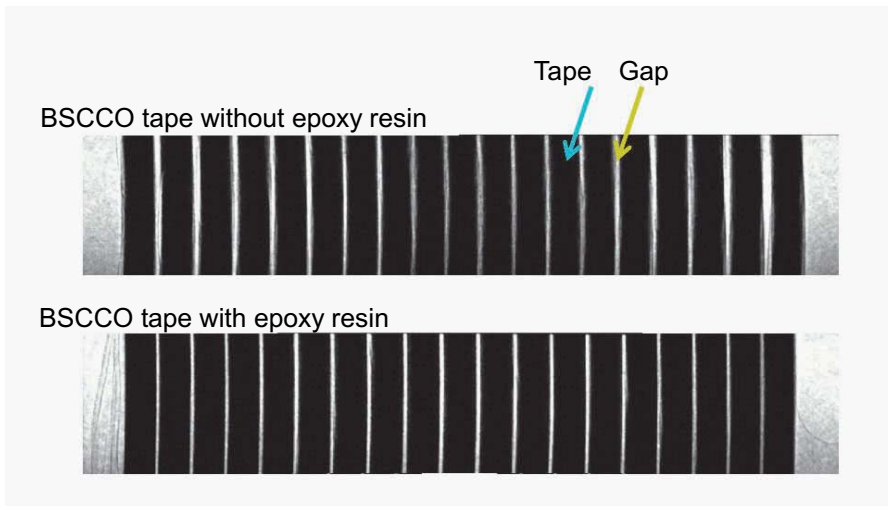
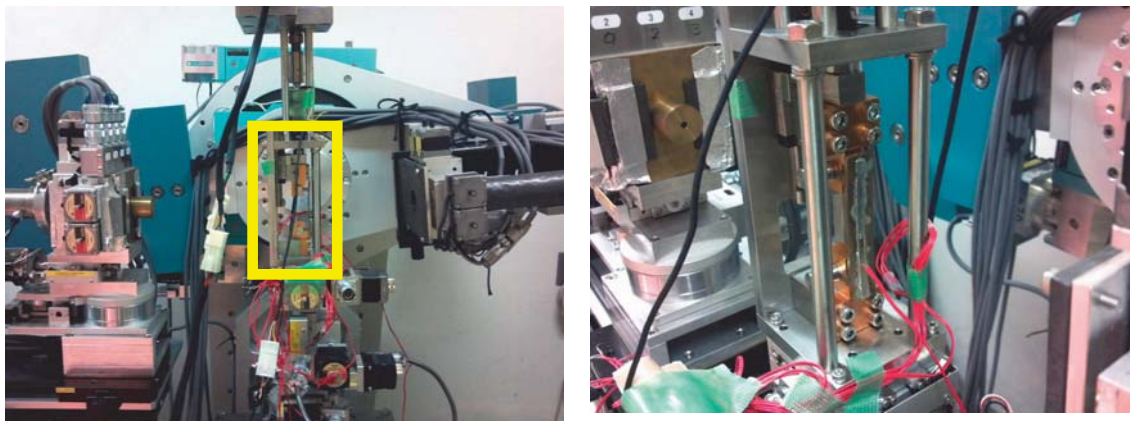


図1. 白色 X 線を用いた BSCCO コイルの透過 X 線像
(19 ターン：左側が内周部、右側が外周部)



(a)全体図(左側が入射側)

(b)スプリングボード詳細

図2. スプリングボードと負荷装置

図1に白色 X 線を用いて撮影した透過 X 線像を示す。銀が 2/3 程度含まれている重い素材でありコントラストは十分に取れている。ここで白く見えているのは巻線時の隙間であり、この隙間から抜けてくるインプレーンの回折を用いてフープ方向(巻線方向)のひずみ測定を行うこととした。

次に ReBCO 線材の引張・圧縮下でのひずみ測定について説明する。一般に薄い材料の圧縮実験では、座屈の影響があるため直接の圧縮実験は難しい。そこで、ダラム大が開発した特殊な「曲りはり(スプリングボード)」を用いて連続的に引張・圧縮ひずみを与えひずみ測定を行った(図2)。ひずみは無負荷から 0.2%までまず引張、その後圧縮側の-0.35%まで圧縮し、次に 0%まで戻すシーケンスとした。その間、0.05%刻みで白色 X 線による測定を行った。なおスプリングボードをそのまま透過するのは困難であるため、X 線透過部位のみ放電加工により 0.25 mm まで薄くなるよう加工を行っている。試料は SuNAM 社(SmBCO)と SuperPower(YBCO)社製の 2 つを準備した。

入射ビームはスリットで 0.3×0.3 mm とした。受光側は、第一スリットを 0.3 mm とし、検出器前の第二スリットは十分開け、実質的なシングルスリット系である。回折角は 6 deg とした。

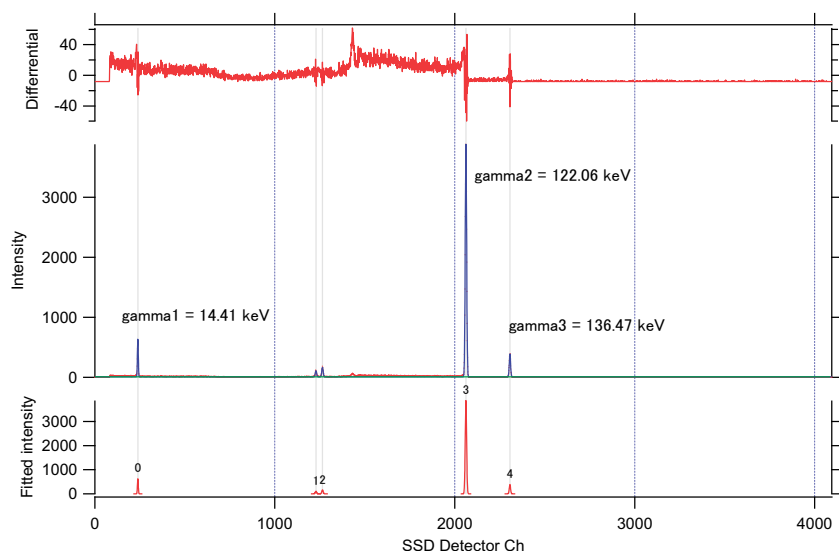


図 3. Co57 を用いた検出器のエネルギー校正

実験結果および考察：

まず、検出器の校正について、SSD 検出器はエネルギー分散型の検出器であるが、冷却するたびにエネルギーと Ch の係数が変化することが知られている。そこで、Co57 を用いてエネルギー校正を行った。結果を図 3 に示す。これより、エネルギー校正式 $E(\text{keV})=0.05904\text{ch}+0.3065$ を得た。

BSCCO コイルの測定においては、87.1 keV 付近にみられる Bi2223 の 220 のピークと、無ひずみのフィラメントの値からひずみを求めた結果、コイル中のテープ平均引張方向(フープ方向)に 0.04%の残留ひずみが確認された。ターンごとのひずみ分布は、ほぼ見られなかった。急冷却時には、エポキシと線材での線膨張係数差が大きいため、サーマルショックが発生することが知られているが、室温において非破壊で測定する手法が確立できた意義は大きい。今後、冷却過程を経た試料でのひずみ測定を行う必要がある。

次に、ReBCO のスプリングボードの結果を示す。61 keV 付近の ReBCO の 200 を用いて、負荷したひずみと格子面間隔の変化についてまとめた図を図 4(SuperPower)、図 5(SuNAM)に示す。与えた、外部ひずみは、試料表面に貼付したひずみゲージの値とした。どちらの図も、外部ひずみに対して線形関係が得られた。BSCCO では圧縮時の非線形が見られたが、薄膜を用いた ReBCO では本質的に座屈の発生がなく、圧縮に対しての耐ひずみ性が確認できた。

まとめ：

本実験により、BSCCO Bi2223 銀テープ線材の実コイルを透過したひずみ測定に成功した。これにより各ターンごとのひずみを定量的評価する技術が確立することができた。現状の室温での BSCCO フィラメントのひずみ分布はほぼないことが明らかとなった。今後は、液体窒素に暴露させた後のひずみ分布の測定を行っていききたい。

また、ReBCO については、SuperPower 社ならびに SuNAM 社の引張・圧縮の連続したひずみシークェンス下でのひずみ測定を行った。外部の負荷ひずみに対し、超伝導相のひずみはほぼ線形に対応しており、BSCCO のような、圧縮領域での座屈的な挙動は見られなかった。

今後は、核融合実証炉に用いられる円断面形状を持つ Nb3Sn 線材でも同様な実験を行っていききたい。

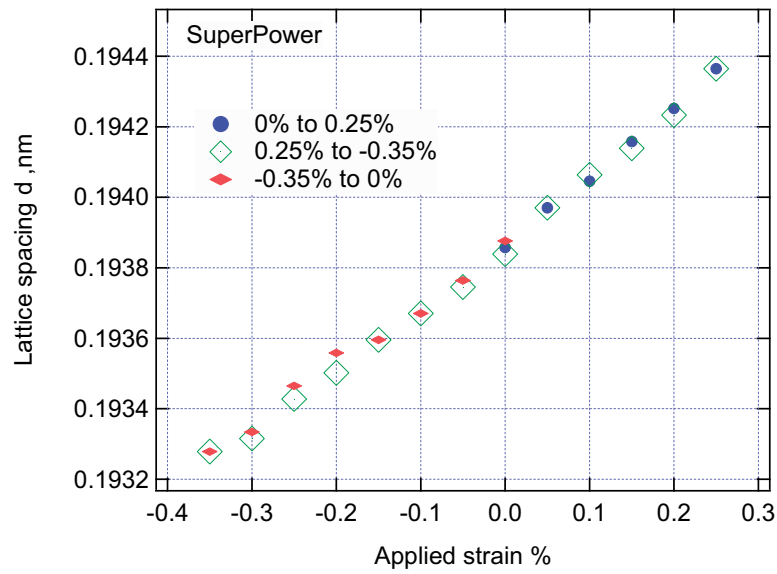


図 4. 負荷ひずみと格子面間隔の関係(SuperPower 社)

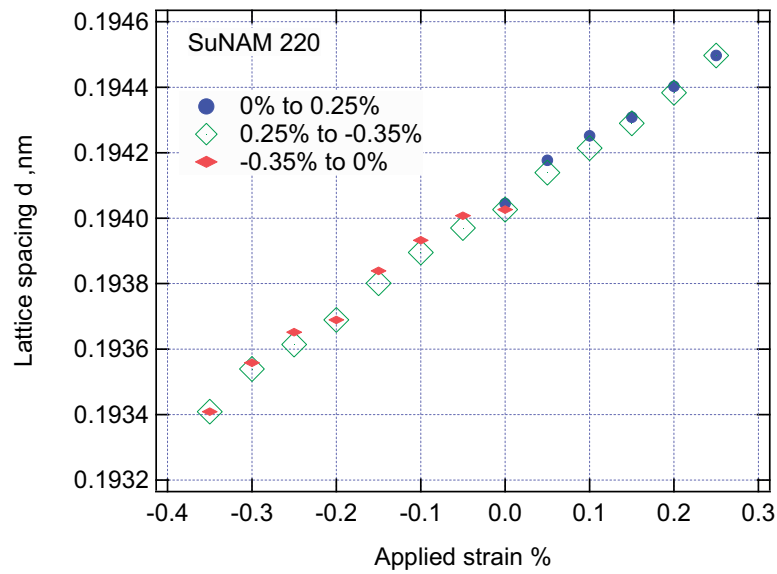


図 5. 負荷ひずみと格子面間隔の関係(SuNAM 社)