

超電導機器応用を指向した実用超伝導線材の内部ひずみ測定技術の開発 Development of internal strain measurement technique for practical superconducting composites for application to superconducting devices

菅野 未知央^a, 町屋 修太郎^b, 長村 光造^c, 淡路 智^d, 西島 元^d, 小黒 英俊^e, 菖蒲 敬久^f,
式町 浩二^g, 花井 哲^h, 杉本 昌弘ⁱ, 藤上 純^j, 高畑 一也^k, 坂井 直道^l, 松井 元英^m,
小泉 徳潔^f, ステファヌス ハルヨ^f, 鈴木 裕士^f, 土屋 佳則ⁿ
M. Sugano^a, S. Machiya^b, K. Osamura^c, S. Awaji^d, G. Nishijima^d, H. Oguro^e, T. Shobu^f,
K. Shikimachi^g, T. Hanai^h, M. Sugimotoⁱ, J. Fujikami^j, K. Takahata^k, N. Sakai^l, M. Matsui^m,
N. Koizumi^f, S. Harjo^f, H. Suzuki^f, Y. Tsuchiyaⁿ

^a京都大学, ^b大同大学, ^c応用科学研究所, ^d東北大学,
^e茨城大学, ^f日本原子力研究開発機構, ^g中部電力(株), ^h(株)東芝,
ⁱ古河電気工業(株), ^j住友電気工業(株), ^k自然科学研究機構, ^l国際超電導産業技術研究センター,
^m鉄道総合研究所, ⁿ物質・材料研究機構
^aKyoto University, ^bDaido University, ^cRIAS, ^dTohoku University,
^eIbaraki University, ^fJAEA, ^gChubu Electric Power, ^hToshiba,
ⁱFurukawa Electric, ^jSumitomo Electric Industries, ^kNIFS, ^lISTEC,
^mRailway Technical Research Institute, ⁿNIMS

複合材料である超伝導線材に曲げ変形を与えたときの超伝導体の内部ひずみ変化を実測した。本期間では、多層膜構造を有するイットリウム系高温超伝導酸化物 (YBCO) 線材を用いて、負荷曲げひずみ量と YBCO 膜の(020)面の格子定数変化から評価した内部ひずみ変化を比較した。その結果、一般によく用いられている、応力のつり合い式から求められる中立軸の位置を基に算出される式では曲げひずみの絶対値は評価できず、マクロな負荷ひずみと複合材料内部の YBCO 膜結晶のひずみの関係を考慮して曲げひずみを求める必要があることが明らかになった。

キーワード： 超伝導線材、YBCO、内部ひずみ、曲げひずみ

背景と研究目的：

超伝導体は電氣的、熱的、機械的安定化を目的として金属成分と複合化された複合材料として実用に供される。このような超伝導複合材料は、応用機器の製造段階で曲げ変形を経験するため機械的特性の把握は重要である。従来は、許容曲げ径の予測として複合則が用いられてきたが、金属成分の降伏や最大曲げひずみを経験する超伝導フィラメントの破断により、中立軸の移動が起こり得るため、これらを含めて中立軸の位置を予測する手法の確立が求められている。さらに、曲げ変形の解析を行う上で、実際に複合材料内部で超伝導体に発生しているひずみを測定することが重要であるが、これまで実測によるデータはほとんど報告されていない状況であった。本期間では、超伝導体内で曲げによるひずみ分布が無視できると考えられる多層膜構造を有するイットリウム系高温超伝導酸化物 (YBCO) 線材を用いて、曲げ変形状態で超伝導体の内部ひずみを測定する実験手法の確立を目的として実験を行った。

実験：

YBCO 線材に曲げ変形を与えた状態で YBCO 膜の格子定数を測定するために、一定曲率を有する D 型のアルミ製治具を用意した。測定に用いた YBCO 線材は、表面側から Ag 安定化層 (10 μ m) / YBCO (1 μ m) / CeO₂/Gd₂Zr₂O₇ 中間層 (1.4 μ m) / Hastelloy 基板 (100 μ m) という非対称な構造を有している。YBCO 膜は臨界電流を向上させるため、二軸配向構造を有している。すなわち、基板法線方向に c 軸が配向しており、面内では線材長さ方向および幅方向に a、b 軸が混在して配向している。そこで、YBCO 膜に引張または圧縮のひずみが負荷されるように曲げ方向を反転させた場合を含めて、およそ -0.8%~0.8%の範囲で曲げひずみを変化させて YBCO 膜の格子定数測定を行った。測定状況の写真を

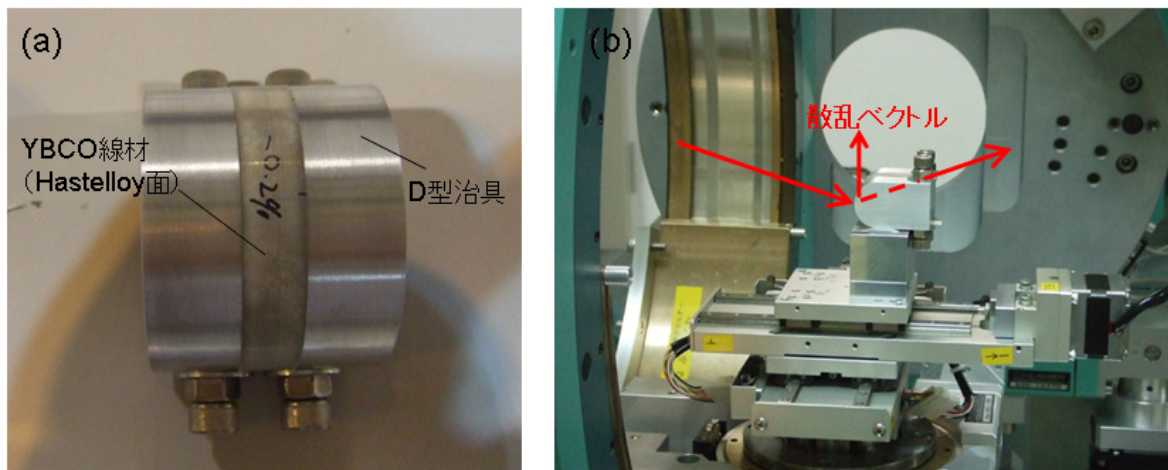


図 1. YBCO 線材の曲げひずみ測定。(a)曲げひずみ負荷用 D 型治具。(b)ゴニオメータ上に D 型治具を配置した状態。

図 1 に示す。透過配置で十分な回折強度を確保するため、D 型治具にはスリットが設けられている。散乱ベクトルは線材長さ方向のひずみ測定に適した方向に配置されている。このような曲げ測定に加えて一軸引張状態の内部ひずみ測定も行った。このときに用いた引張治具の写真を図 2 に示す。負荷ひずみは伸び計により測定している。これらの YBCO 線材の測定には、エネルギーとして 19.5 keV を用いた。格子定数の測定には、YBCO 膜の b 軸に相当する(020)面を用いた。ここで、YBCO 膜の a 軸長は直下の CeO₂ 層の(220)面の格子定数にかなり近いので、回折プロファイルからのピーク分離が不可能であり、今回の解析には用いなかった。

YBCO 膜の無ひずみ状態での格子定数 (d_0) を求めるために、線材から膜をはく離した。はく離膜には、Ag 層と YBCO 層が主に含まれているため、ケミカルエッチングにより Ag を除去した後、膜を粉砕し粉末の回折測定から d_0 を決定した。

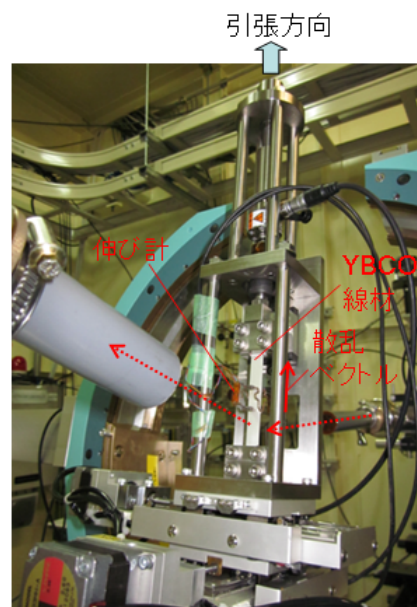


図 2. YBCO 線材の引張ひずみ測定

結果および考察：

図 3 に曲げ変形による回折プロファイルの変化を示す。図中で左側が(020)面からの回折ピークであり、右側のピークは(200)面と CeO₂ の(220)面が重なっている。また、縦軸の強度は右側のピーク強度で規格化している。圧縮、引張曲げひずみ負荷により回折角がそれぞれ高角、低角側にシフトしている様子が観察されている。曲率半径の逆数と YBCO 膜の内部ひずみの関係を図 4 に示す。内部ひずみは次式で定義する。

$$\varepsilon_i = \frac{d(\varepsilon_a) - d_0}{d_0} = \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta(\varepsilon_a)} - 1 \quad (1)$$

ここで、 $d(\varepsilon_a)$ 、 $\theta(\varepsilon_a)$ は負荷ひずみ ε_a での格子定数、回折角を、 d_0 、 θ_0 は無ひずみでのそれらを表している。ただし、 $1/R=0$ 、すなわち直線状態での YBCO 膜のひずみは後で述べる引張ひずみ測定の結果から求めた値である。引張側の最大ひずみの測定点を除くと、測定点は直線で良く近似できることがわかる。一般に、曲げひずみは式(2)で表される。

$$\varepsilon = \frac{y}{R} \quad (2)$$

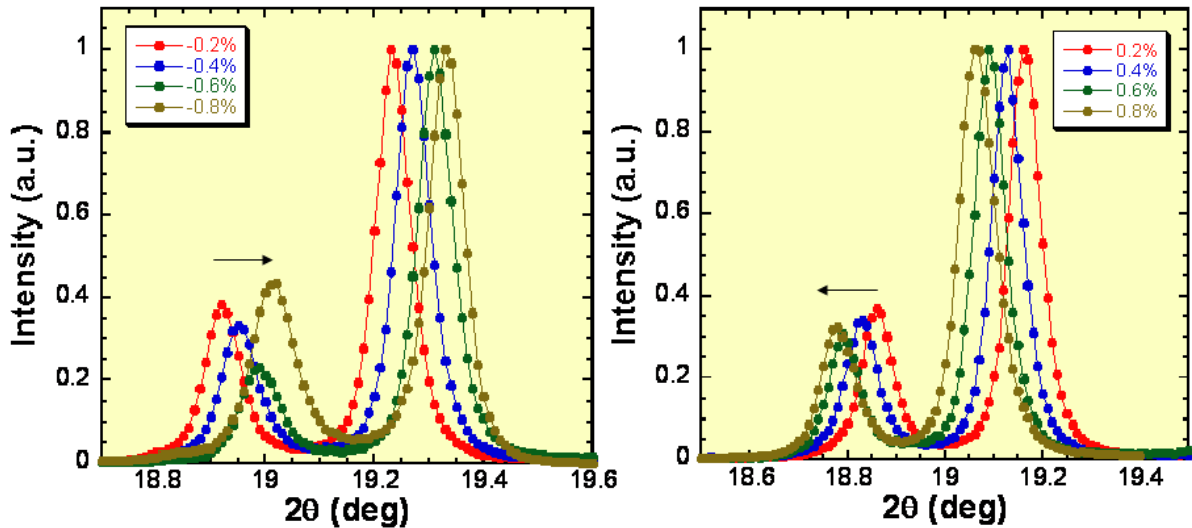


図 3. YBCO 曲げ変形による YBCO 膜の(020)ピークのシフト。各図で左側のピークが(020)面に相当し、右側のピークは YBCO 膜の(200)面と中間層である CeO₂ の(220)面のピークが重なっている。

ここで、 R は曲げ半径を y は中立軸からの距離を表す。中立軸からの距離は、複合材全体の応力つり合い式から求められる。今回測定に用いた線材は、Ag、YBCO、CeO₂、Gd₂Zr₂O₇、Hastelloy から構成されており、これら全要素が弾性変形状態にあると仮定して計算すると、中立軸から YBCO 層までの距離は 47.9 μm と算出された。ここで、Ag のヤング率を 87 GPa、それ以外の要素のヤング率を 200 GPa としている。一方、図 4 で青線で表した直線の傾きから求められる中立軸からの距離は 41.7 μm となり、このことは式(2)で計算される曲げひずみは実測された内部ひずみよりも 13%小さいことを表している。

このような計算値と実験値の差の原因について考察する。曲げ変形時の中立軸の位置を決定する場合には、各層の弾塑性解析が必要であるが、そのためにはヤング率や降伏応力などの物性値が必要である。今回行った計算は全要素を弾性変形のみと考えているため、これが原因で計算と実験結果が一致しなかった可能性がある。また、上記考察ではマクロな負荷ひずみと X 線回折により測定される結晶粒の平均ひずみが一致するという仮定を置いている。そこで、この仮定が妥当であるかどうかを確認するために、線材に一軸引張ひずみを負荷して、内部ひずみ測定を行った。負荷ひずみと内部ひずみの関係を図 5 に示す。負荷ひずみ 0~0.8% の範囲で線形関係が成り立っていることがわかる。この範囲のデータを直線近似した結果を青線で表している。この直線の y 切片が負荷ひずみゼロでの YBCO 膜のひずみ、つまり残留ひずみに相当する。また、直線の傾きは約 0.87 であり、負荷ひずみに対して内部ひずみの増加は 87%であることがわかる。

このように引張負荷においては、YBCO 膜結晶のひずみがマクロな負荷ひずみよりも小さいことが明らかになった。そこで、同様の関係が曲げ変形においても成り立っていると仮定して、曲げひずみの実験結果を再度考察する。上述した線材の全構成要素が弾性変形すると仮定した場合

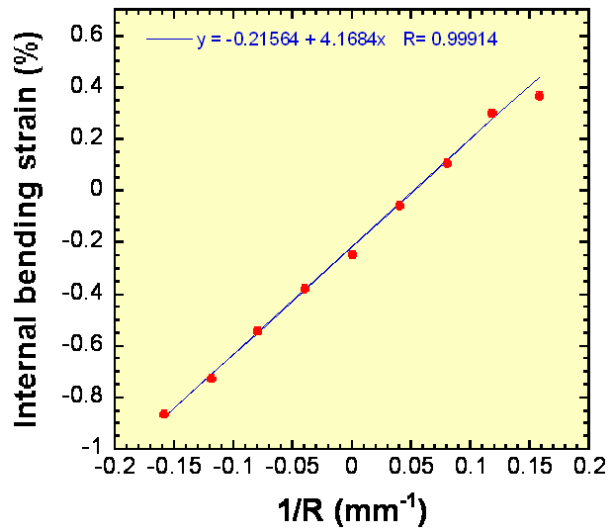


図 4. 曲げ半径の逆数と YBCO 膜の内部ひずみの関係

の中立軸から YBCO 層までの距離 $47.9 \mu\text{m}$ に、引張ひずみの測定結果から得られた係数 0.87 をかけると、 $41.8 \mu\text{m}$ となり、これは図 4 から得られた値 ($41.7 \mu\text{m}$) と非常に良く一致する。このことは、計算値と測定値の差が塑性変形を考慮していないことにあるのではなく、マクロな負荷ひずみと YBCO 膜結晶のひずみが等しくないことを表している。したがって、YBCO 線材において曲げひずみの絶対値は引張負荷の場合と同様にマクロな負荷量とは一致しないことが明らかになった。

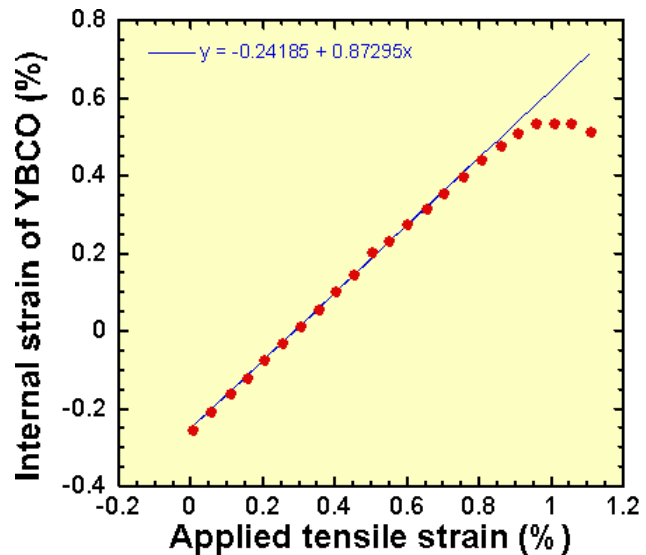


図 5. 引張負荷ひずみと YBCO 膜の内部ひずみの関係

今後の課題：

本期間では、超伝導線材の曲げひずみ測定手法を確立することができ、

YBCO 線材において曲げ変形を見積もる際の問題点が明らかになった。しかし、引張の場合も含めて結晶のひずみが負荷ひずみよりも小さくなる理由については未解明のままである。今回の測定においては、YBCO 膜の b 軸のみの測定にとどまっていたが、同方向に a 軸も配向しているため、 a 軸も含めた測定が必要である。ただし、今回採用した透過配置では、中間層に YBCO 膜の a 軸と極めて格子定数が近い CeO_2 を含んでいる場合にはピーク分離が困難であり、YBCO の a 軸の測定は難しい。そこで、線材表面に浅い角度で X 線を入射し、YBCO 膜の面内で回折をとることにより、下地の影響を除いたひずみ測定を行う必要があると考えている。