

実用高温超伝導体薄膜の3次元内部ひずみ評価に 基づく高耐ひずみ線材の開発

Development of Coated Conductor with High Strain Tolerance on 3-Dimensional Internal Strain Evaluation for Practical High Temperature Superconducting Film

菅野 未知央^a, 町屋 修太郎^b, 小黒 英俊^c, 菖蒲 敬久^d, 式町 浩二^e
Michinaka Sugano^a, Shutaro Machiya^b, Hidetoshi Oguro^c, Takahisa Shobu^d, Koji Shikimachi^e

^a高エネルギー加速器研究機構, ^b大同大学, ^c東北大学, ^d日本原子力研究開発機構, ^e中部電力
^aKEK, ^bDaido University, ^cTohoku University, ^dJAEA, ^eChubu Electric Power

高磁場マグネット応用が期待されている GdBa₂Cu₃O₇ 薄膜高温超伝導線材について、放射光を用いた超伝導薄膜の内部格子ひずみその場測定を行った。基板に対して結晶方位の異なる3種類の線材を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格子ひずみを結晶の a、b、c 軸の全てについて測定した。これにより、負荷引張ひずみに対する複合線材中の超伝導薄膜膜の三軸ひずみ変化を実測することに初めて成功した。

キーワード： GdBCO 超伝導線材、X線回折、内部ひずみ

背景と研究目的：

本研究で対象としている超伝導体 REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REは希土類金属)では、その発見当初から単結晶を用いた圧力効果の研究が行われており、斜方晶構造の結晶軸によって一軸圧力の臨界温度への影響が異なることが報告されている[1]。例えば、REがYであるYBCOにおいては、a軸に圧力を印可すると臨界温度が低くなるが、b軸方向では高くなるなど、異方的な振る舞いが観察されている。臨界電流に関して同様の実験例は報告されていないが、臨界電流の変化も圧力印可方向によって異方性を持つことが予想される。

我々のグループではこれまでに様々な薄膜超伝導線材に対して、臨界電流の線材長さ方向の引張負荷ひずみ依存性の評価を行ってきた。この方向の負荷ひずみ依存性の理由は、この材料が超伝導磁石への応用が期待されており、その場合電磁力により線材の長さ方向に引張応力が発生するためである。これまでの我々の実験の結果、引張負荷ひずみの負荷/除荷とともに臨界電流が可逆的に変化する現象が確認されている。さらに、同じGdBa₂Cu₃O_{7-δ} (以下GdBCO)という超伝導体でも臨界電流の負荷ひずみに対する応答が線材メーカーによってかなり異なっていることが明らかになった[2]。一般的には、臨界電流は2次関数的な負荷ひずみ依存性を示すが、その曲率(これをひずみ感受性と呼ぶ)がある線材メーカーの線材では極めて小さいことを見出している。さらに、特定のメーカーの線材ではほぼ線形の負荷ひずみ依存性を示す場合もある。我々は、このひずみ依存性の違いが超伝導体膜の配向方向の違いに起因して結晶格子の各軸に生じるひずみ成分が異なることによるものと考え、

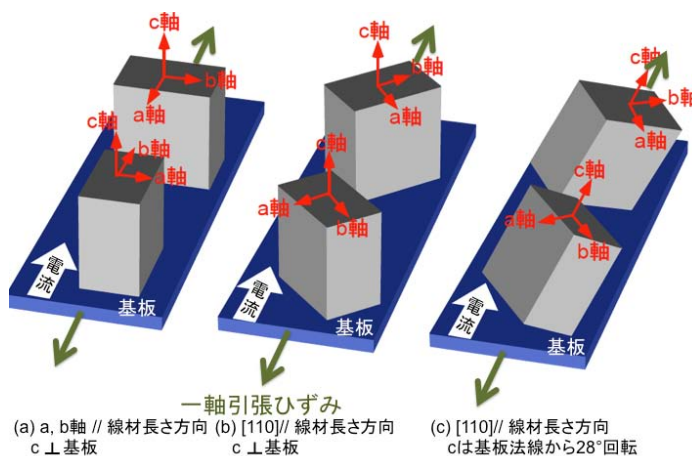


図1. 異なる3種類の配向方位を有するGdBCO線材。直方体が超伝導膜の単位胞を表している。膜中には、双晶により2つのドメインが存在する。

これを積極的に利用すれば高耐ひずみ線材が実現できるのではないかと考えている。そのためには、まず結晶軸方向のひずみが臨界電流に及ぼす寄与を明らかにする必要がある。

我々のグループでは第一段階として、SPring-8 の過去の実験で基板に平行な面内での二軸内部ひずみを決定することを試み、これに成功している[2][3]。3つの結晶軸方向のひずみの臨界電流に及ぼす影響を明らかにするためには、斜方晶構造を有する GdBCO 超伝導体の、[100]または[010]が線材軸方向に配向し、c軸が基板法線方向に配向している場合(図1(a))と[110]が線材軸方向に配向し、c軸が基板法線方向に配向している場合(図1(b))について、外部から負荷された長さ方向の引張ひずみに対して a 軸、b 軸方向に発生する内部ひずみを比較した。その結果、前者に対して後者は結晶軸方向に発生する格子ひずみが 1/3 と小さいことが明らかになった。さらに、臨界電流のひずみ依存性を測定した結果から、格子ひずみが小さい線材では臨界電流のひずみ感受性も小さいという対応関係が確認された。これにより、2次関数的なひずみ依存性を示す線材における、ひずみ感受性の違いについては結晶軸方向のひずみ量の違いで説明することができた。

一方、線形な臨界電流のひずみ依存性は、これまでの二軸格子ひずみの測定からは説明できていない。その最大の理由として、c軸の格子ひずみを考慮していないことが考えられる。そこで、本実験では、全結晶軸方向の内部ひずみを評価することを初めて試みた。

実験方法：

本実験で用いたのは全て GdBCO 膜を超伝導体として含むテープ状の複合線材である。線材構造を図2に示す。超伝導膜は、Hastelloy 基板テープの上に中間層を介してエピタキシャル成長させることにより、高度に2軸配向した組織を実現している。実験には、図1に示した異なる方位の線材を用意した。図1(a)と(b)は面内で45°回転している点が異なっており、図1(c)では(b)からさらにc軸が28°回転している。

これらの線材を BL46XU の多軸回折計の試料ステージに設置した小型引張試験機に取り付け、線材長さ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、入射側のスリット(S1)の間隔は幅方向 0.2 mm x 高さ方向 0.5 mm とした。透過配置を採用し、散乱ベクトルの方向に GdBCO 膜の a、b、c 軸が向くように ϕ 、 χ 軸を調整した。図3に装置のセットアップを示す。これは、図1(b)の配向を持つ線材について、a、b 軸の回折測定を行うために、 χ 軸を 45°回転させた状態に相当する。一定の間隔で負荷ひずみを変化させつつ、各負荷ひずみ条件に対して a、b、c 軸方向の結晶面間隔を測定した。また、同じ線材から超伝導膜をはく離、粉砕することにより得られた粉末から無ひずみ状態の格子面間隔(d_0)を決定した。測定結果の一例として、図1(c)の線材の(006)面の引張負荷ひずみによるピークシフトを図4に示す。各ピーク位置から算出したひずみ e での格子定数 $d(e)$ と d_0 から格子ひずみを評価した。

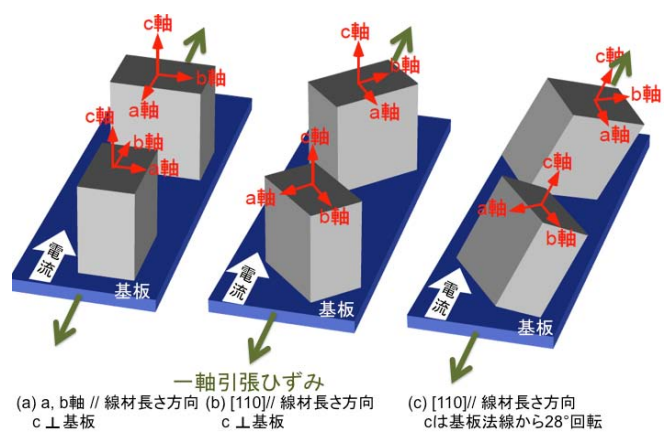


図2. GdBCO 線材の構造

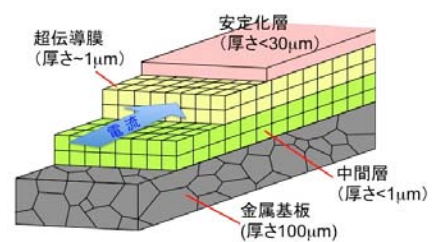


図3. 内部ひずみ測定の設定アップ。多軸ゴニオメータ上に設置した小型引張試験機により GdBCO 線材に引張ひずみを負荷した状態で格子面間隔の変化を測定する

実験結果および考察：

図 1(c)の結晶方位の線材の負荷ひずみに対する格子ひずみ変化の結果を図 5 に示す。a、b、c 軸の格子ひずみは、それぞれ GdBCO の(200)、(020)、(006)面の面間隔の変化から評価した。負荷ひずみで 0~0.2%までは、全ての軸で負荷ひずみと格子ひずみの間に線形関係が成り立っている。すなわち、GdBCO 膜の弾性変形範囲内に相当する。一方、それ以上の負荷ひずみでは格子ひずみ変化の傾向が飽和するが、これは酸化物超伝導膜が破断したことによるひずみ解放が原因であると考えられる。

図 5 のデータの線形部分を最小二乗法で近似し、その y 切片から室温における超伝導薄膜の複合線材中での残留ひずみを、また傾きからひずみ変化率(格子ひずみ/負荷ひずみで定義)を求めた。3 種類の線材についての結果を表 1 に示す。図 1(a)の配向方位の場合は、双晶の存在によって線材軸方向に a 軸が向いたドメインと b 軸が向いたドメインが混在しており、それぞれのドメインの結果を表 1 に併記している。残留ひずみに関しては、すべての線材で c 軸と比較して a、b 軸方向にはより圧縮側のひずみ状態にあることがわかる。ひずみ変化率に注目すると、図 1(a)では、ポアソン効果によって軸方向と幅方向、厚さ方向で逆符号となっている。a、b 軸が引張軸から 45°回転している図 1(b)(c)に関しては、a、b 軸方向には正の値、c 軸方向には負の値となっている。すなわち、引張負荷ひずみの増加に従って、a、b 軸には引張ひずみ、c 軸には圧縮ひずみが増加していることを示している。さらに、図 1(b)では、ひずみ変化率の絶対値が a、b 軸に対して、c 軸方向で明らかに小さいのに対して、図 1(c)では絶対値はほぼ等しいという結果になった。二軸配向したテープ状の超伝導線材についてこのように三軸ひずみ変化を直接測定した例は、これまで全く報告がない。格子ひずみを直接その場測定できる放射光ひずみ測定技術の利点を活かした研究の成果といえる。過去にわれわれが二軸格子ひずみを測定したのは、図 1 の(a)(b)と結晶方位が同じ線材である[2]。今回の実験でもこれと同じ結晶方位の線材を測定したが、超伝導膜の厚さや結晶配向度が以前の線材と全く同じではなく、これらのパラメータが臨界電流に影響する。内部ひずみと臨界電流の関係を明らかにするために、今回用いた線材について臨界電流のひずみ依存性を今後測定し、三軸ひずみ変化によって統一的に整理できるかどうかを確認する予定である。

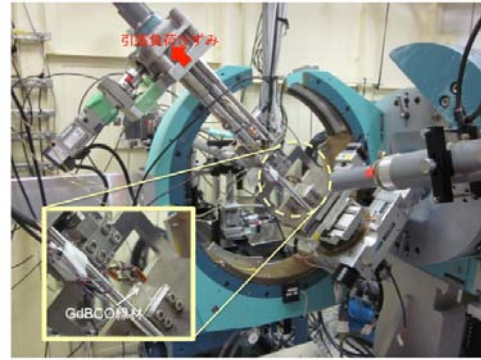


図 4. 図 1(c)の線材の(006)ピークの引張負荷ひずみによるピークシフト

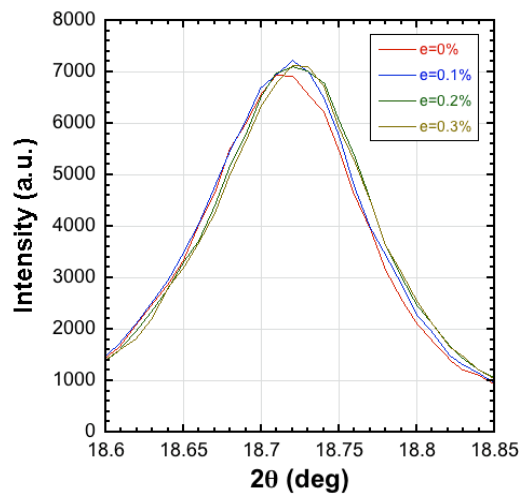


図 5. 負荷ひずみに対する a、b、c 軸方向の格子ひずみの変化。グラフは、図 1(c) についての結果を示す。

表 1. 異なる結晶配向を有する GdBCO 膜の残留ひずみとひずみ変化率

使用した格子面	残留ひずみ (RT)			ひずみ変化率		
	(200)	(020)	(006)	(200)	(020)	(006)
図 1(a)	長さ-0.19% 幅 -0.18%	長さ-0.17% 幅 -0.16%	0.20%	長さ 0.976 幅 0.908	長さ-0.335 幅 -0.314	-0.211
図 1(b)	-0.20%	-0.16%	-0.0052%	0.361	0.322	-0.237
図 1(c)	-0.0047%	-0.017%	0.0026%	0.233	0.225	-0.222

参考文献：

[1] U. Welp, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 2130 (1992).

[2] M. Sugano, et al., *Supercond. Sci. Technol.*, **25**, 054014(2012).

[3] H. Oguro, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (2011) accepted.