

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760522

研究課題名（和文） イットリウム系高温超伝導薄膜の臨界電流-ひずみ特性を支配する微視的  
的要因の解明研究課題名（英文） Microscopic mechanism to determine strain dependence of critical  
current for Yttrium-based high Tc superconducting film

研究代表者

菅野 未知央 (SUGANO MICHINAKA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教

研究者番号：30402960

研究成果の概要（和文）：Y系高温超伝導薄膜においては、ひずみにより臨界電流が可逆的に変化することが知られているが、これまでにその起源についてはほとんど明らかになっていない。本研究では、単結晶 SrTiO<sub>3</sub> 基板上に成長させた粒界を含まない YBCO 薄膜について、4点曲げ法により超伝導膜に圧縮ひずみを負荷し、磁場中で臨界電流のひずみ依存性を測定することに初めて成功した。その結果、単結晶膜においても配向多結晶状態にある実用超伝導線材と同様に、あるひずみで臨界電流が最大になる振る舞いが確認された。これにより、線材におけるひずみ効果に粒界だけではなく結晶粒内の格子の弾性変形も関与していることを明らかにした。さらに、ひずみ感受性は高磁場ほど大きくなることも見出した。さらに、ひずみ依存性が異なる2種類のGd系超伝導薄膜について、放射光X線回折により外部から引張りひずみを負荷したときの超伝導膜の内部ひずみの変化をa、b軸について評価した。その結果、ひずみ感受性が小さい薄膜はひずみ負荷方向に[110]が配向しており、結晶軸方向に発生するひずみの絶対値が小さいことが明らかになった。これにより、結晶の配向方位の違いもひずみ依存性を決定する微視的要因の一つとなることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Yttrium-based superconducting film exhibits reversible effect of strain on critical current. However, the origin of this phenomenon has not been clarified. In this study, we succeeded in evaluating strain dependence of critical current in magnetic field for YBCO film without grain boundaries grown on SrTiO<sub>3</sub> single crystal substrate by means of a 4-point bending method. As a result, the peak of the critical current at a certain applied strain was confirmed for a single-crystalline film similar with the practical biaxially-textured polycrystalline film. This suggests that lattice deformation within a grain contributes to the reversible effect of strain on critical current as well as strain at the grain boundaries. In addition, change in internal strain under tensile loading was directly evaluated along a- and b-axes for Gd-based superconducting films with different strain sensitivity to critical current using synchrotron radiation based on X-ray diffraction technique. This experiment reveals that GdBCO film with small strain sensitivity orients its [110] direction parallel to the loading axis and induced strain along the a- and b-axes is smaller than the other film in which a- and b-axis orients to the conductor axis and width. As a result, it was clarified that difference in crystal orientation of superconducting film can be one of the microscopic origins to determine strain dependence of critical current.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、複合材料・物性

キーワード：臨界電流、ひずみ効果

### 1. 研究開始当初の背景

Y系高温超伝導線材は金属基板上に中間層を介して超伝導薄膜をエピタキシャル成長させた多層膜構造を有しており、薄膜ゆえに実現できる高い結晶配向に起因して高い臨界電流密度が実現されている。この材料は特に高磁場で高い臨界電流を維持できることから、強磁場磁石応用に期待が持たれている。一方、Y系超伝導薄膜では臨界電流がひずみ状態に依存して可逆的に変化するひずみ効果が存在することが知られている。高磁場応用では高電磁力下での使用に耐える必要があり、超伝導特性のひずみ依存性の振る舞いとその起源を明らかにすることが重要である。

超伝導薄膜は二軸配向薄膜であり、結晶粒界と粒内で残留ひずみ状態が異なることが報告されている。また、臨界電流も粒界と粒内で異なる値を持つことが知られている。ひずみ効果の起源を議論する上では、両者の寄与を切り分けることが必要であった。

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (RE は希土類金属、以下REBCO と略する) では、RE 金属の種類によって臨界電流のひずみ感受性が異なることが報告されている。しかし、同じ GdBCO 線材でも、超伝導層直下の中間層膜の種類によってひずみ依存性が異なるとの報告もあり、このことは、超伝導体の種類以外にもひずみ感受性を決定している微視的要因が存在することを示唆している。

### 2. 研究の目的

本研究では、REBCO 薄膜超伝導体において、臨界電流のひずみ依存性を決定している支配要因を明らかにすることを目的とした。具体的には以下の2点を目指した研究を行った。

- (1) 磁場中ひずみ効果に対する粒界の結晶変形の寄与の解明。
- (2) 同じ超伝導体でありながら異なるひずみ感受性を示す原因の解明。

### 3. 研究の方法

(1) 粒界の寄与を排除したひずみ効果を評価するために、SrTiO<sub>3</sub>単結晶基板上にYBCO薄膜をパルスレーザー蒸着法により成膜した。さらに、臨界電流を測定するために、フォトリソグラフィにより膜をブリッジ形状に加工した。脆性的な超伝導薄膜/単結晶基板にひずみを負荷する方法として、4点曲

げ法を採用した。基板をCu-Beのベース板に接着し(図1)、このベース板ごと4点曲げ変形させることで-0.6%までの圧縮ひずみを超伝導薄膜に負荷することに成功した。臨界電流の測定条件は、ヘリウムガスフロー型の温度可変クライオスタット中で77 Kの温度で、また外部磁場を0~5 Tの範囲で印可して測定した。

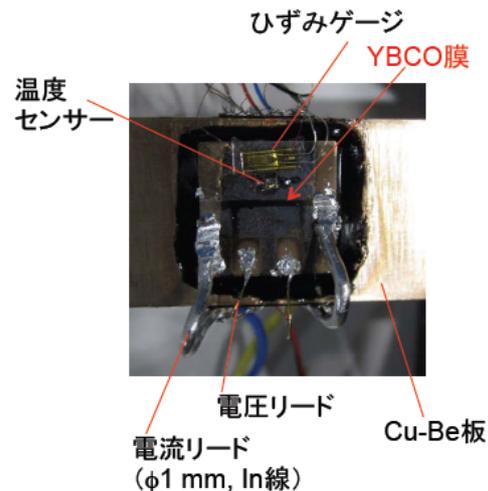


図1 YBCO 薄膜/SrTiO<sub>3</sub> 基板サンプル

(2) Spring-8のビームライン(BL46XU)において、放射光を用いた超伝導膜の内部ひずみ測定を行った。小型の引張試験装置をグノオメーター上に設置し、超伝導線材に引張ひずみを負荷した状態で回折測定を行うことで、複合材料である超伝導線材内部の超伝導膜の内部ひずみを評価することができる。放射光の特徴である高エネルギーの光を利用することにより、透過配置で回折測定を行うことが可能になり、GdBCO線材の長さ方向に引張ひずみを負荷したときに負荷方向と同じ方向の格子ひずみを直接測定することができる。また、本実験では薄膜の2次元ひずみを測定するため、引張方向と直行する方向の格子ひずみ測定も合わせて行った。実験には、図2のように引張軸方向に超伝導膜の[100]または[010]が配向した線材(Gd-I)と[110]が配向した線材(Gd-F)の2種類を用いた。内部ひずみは超伝導膜のa、b軸に相当する(200)と(020)の2つの結晶面について、ブラッグピークのシフトから求めた。ひずみの計算に必要なゼロひずみ状態での格子定数は、線材からはく離膜を粉碎した粉末を線材と同じセットアップで測定した結

果を用いた。

これらの線材の臨界電流のひずみ依存性を 77 K、自己磁場で測定し、内部ひずみの測定結果を考慮して結晶軸方向のひずみで整理した。

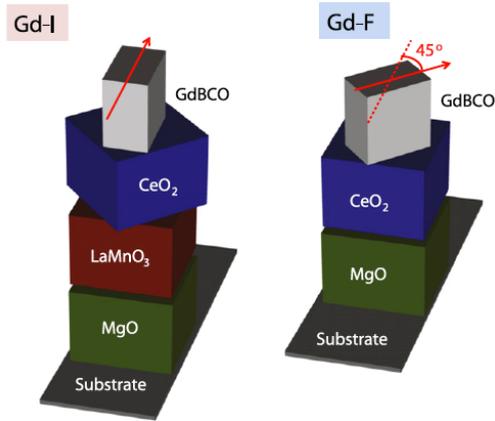


図 2 2 種類の GdBCO 膜の結晶方位

#### 4. 研究成果

(1) 図 3 に YBCO 単結晶薄膜の臨界電流のひずみ依存性を自己磁場で測定した結果を示す。この図で縦軸は、臨界電流をその最大値で規格化した値を、横軸は負荷ひずみを取っている。臨界電流の最大値は-0.15%で観察され、-0.3%以下で膜の脆性破壊による臨界電流の急激な低下が観察された。また、0 ~ -0.3%の範囲を 2 次関数で近似することにより評価したひずみ感受性 (a 値) は 0.242 と求められた。

さらに、膜に垂直に磁場を印可した状態で同様の実験を行った結果を図 4 に示す。このグラフでは、ひずみ感受率の違いを比較しやすくするために各磁場における臨界電流最大のひずみ ( $\epsilon_p$ ) を横軸のゼロに平行移動してプロットしている。図から高磁場ほどひずみ感受性が大きくなるのがわかる。YBCO 単結晶薄膜について磁場中でひずみ依存性を測定したのはこれが初めての結果である。これまで、粒界を含む二軸配向薄膜である線材中の超伝導膜で図 4 のような結果が報告されているが、それが粒界、粒内のいずれの寄与によるものかは明らかになっていなかった。本研究のように単結晶膜について測定を行った結果、粒内のみでもひずみ効果を示すことを初めて明らかにした。

(2) 図 5 に Gd-I 線材の X 線回折プロファイルの負荷ひずみによる変化を示した。GdBCO 膜の (200)、(020) ピーク位置が負荷ひずみとともにシフトしていることがわかる。ピーク位置から GdBCO 膜の格子ひずみを求めた結果を図 6 に示す。GdBCO 膜には双晶が含まれるため、線材の軸方向には [100]

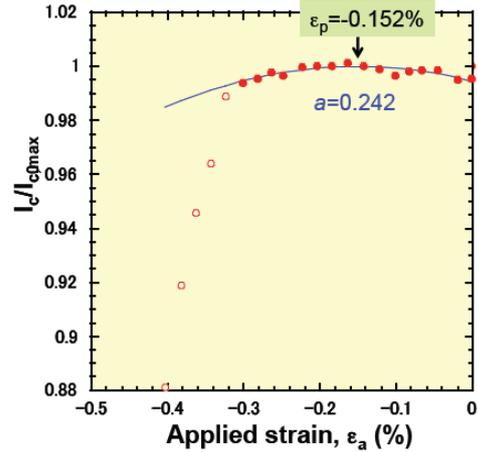


図 3 YBCO 単結晶薄膜の自己磁場における臨界電流のひずみ依存性

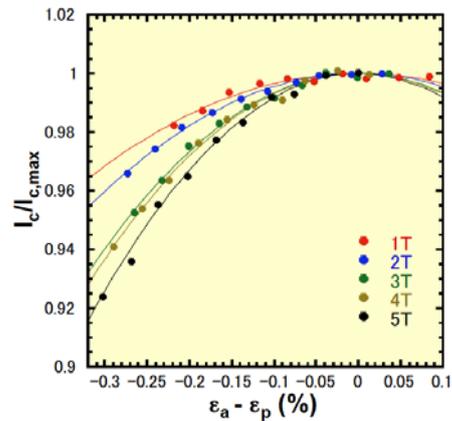


図 4 YBCO 単結晶薄膜の印可磁場と臨界電流のひずみ依存性の関係

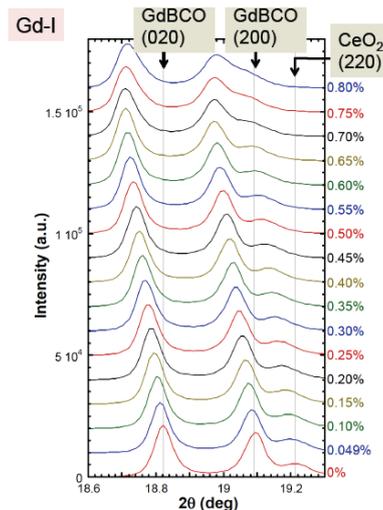


図 5 Gd-I 線材の X 線回折プロファイルの負荷ひずみ依存性

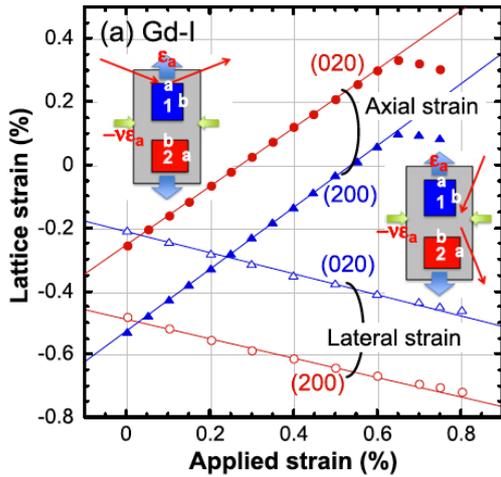


図6 Gd-I線材中のGdBCO膜の負荷ひずみによる格子ひずみ変化

表1 Gd-I と Gd-F のひずみ変化率

	Axial ( $\phi = 90^\circ$ )		Lateral ( $\phi = 0^\circ$ )	
	$a$ -axis ( $\alpha_{a1}$ )	$b$ -axis ( $\alpha_{b2}$ )	$a$ -axis ( $\alpha_{a2}$ )	$b$ -axis ( $\alpha_{b1}$ )
Gd-I	0.981	0.927	-0.309	-0.333
Gd-F2	Axial ( $\phi = 90^\circ$ )		$(\phi = 45^\circ)$	
	(200)		$a$ -axis ( $\alpha_a$ )	$b$ -axis ( $\alpha_b$ )
	0.973		0.325	0.271

と[010]の両方のドメインが含まれている。また、面内の2次元ひずみを測定するため、軸方向と幅方向の両方の格子ひずみ変化を測定した。図中の実線は、膜が破断する前の弾性変形範囲を最小二乗近似した直線を示している。この直線の傾きは、格子ひずみと負荷ひずみの比を示している。この値をひずみ変化率と呼ぶ。

同様の測定をGd-F線材についても行った結果を合わせて表1に示す。Gd-I線材では、軸方向の格子ひずみは負荷ひずみとほぼ等しく、一方幅方向はその約1/3であった。さらに、両者は符号が逆であることから、GdBCO膜は異方的なひずみ状態であることがわかる。Gd-F線材では、線材長さ方向に[110]が配向しており、それと45°の方向にa、b軸が配向している。そこで、ゴニオメーター上で、引張試験機を回転させて回折測定を実施した。表に示す通り、Gd-F線材ではa、b軸でひずみ変化率の絶対値の差は小さく、また同符号であることから、ほぼ等方的なひずみ状態であることがわかる。

図7に臨界電流のひずみ依存性を示す。このグラフから、同じGdBCO線材でありながら、Gd-F線材の方がGd-I線材よりも明らかにひずみ感受性が小さいことがわかる。このことは、表1に示すようにa、b軸方向に発

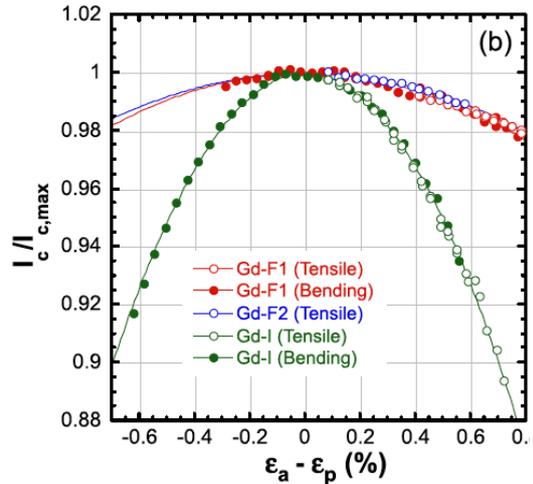


図7 GdBCO線材の臨界電流の77 Kにおけるひずみ依存性

生している格子ひずみが小さいことから定性的に理解できる。

以上の結果から、結晶方位の違いによりGdBCO膜の結晶軸方向に発生するひずみが異なり、それがひずみ感受性の違いにつながっていることが明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. Sugano (ほか9名、第一著者), "The effect of the 2D internal strain state on the critical current in GdBCO coated conductors", Superconductor Science and Technolog, 査読有, Vol. 25 (2012) 054014(10pp).

[学会発表] (計5件)

- ① M. Sugano, "2-dimensional internal strain measurement using synchrotron radiation for REBCO coated conductor", 2011.12.6, Okinawa.
- ② 菅野未知央, "REBCO線材のひずみ特性に及ぼす超伝導膜結晶方位の影響", 秋季低温工学・超電導学会, 2011.11.9, 金沢.
- ③ M. Sugano, "Influence of crystal orientation of REBCO film on strain effect on critical current", 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors, 2011.10.28, Osaka.
- ④ M. Sugano, "Reversible Strain Effect on Critical Current in GdBCO Coted Conductor with Different Orientations",

International Symposium on  
Superconductivity, 2011.10.25, Tokyo.

- ⑤菅野未知央, “STO 単結晶基板上の YBCO  
薄膜の輸送特性に及ぼすひずみの影響”,  
春季低温工学・超電導学会, 2010.5.12, 川  
崎.

6. 研究組織

(1)研究代表者

菅野 未知央 (SUGANO MICHINAKA)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・超伝導低温工学センター・助  
教

研究者番号 : 30402960

(2)研究分担者

(3)連携研究者