

GdBCO コート線材における I_c のひずみ依存性に与える結晶方位の効果

Effect of crystal orientation on strain dependence of I_c for GdBCO coated conductor

諏訪 友音¹, 小黒 英俊¹, 淡路 智¹, 渡辺 和雄¹, 町 敬人², 吉積 正晃², 和泉 輝郎²
東北大・金研¹, 超伝導工研²

T. Suwa¹, H. Oguro¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, T. Machi², M. Yoshizumi², T. Izumi²,

¹Institute for Materials Research, Tohoku University,

²Superconductivity Research Laboratory, International Superconductivity Technology Center

1. はじめに

希土類酸化物高温超伝導($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, RE = Rare Earth または Y ; 以後 REBCO と略記)線材は、磁場中において高い臨界電流密度を維持することができる。さらに、Hastelloy 基板に由来する優れた機械特性を持つ。これらの特徴は、強磁場マグネット作製の際に有利に働き、現在では 30 T 級超伝導マグネットへの応用などに期待されている。しかし、REBCO 線材における臨界電流 I_c のひずみ依存性はまだ完全には理解されていないため、マグネット応用に向けた特性評価が重要である。さらに、ひずみ下における超伝導特性は、以下に述べるような複雑な振る舞いを見せる。

線材長手方向に配向している超伝導層の結晶方位が異なると、 I_c のひずみ依存性が異なるという結果が報告されている[1, 2]。具体的には、(Y, Gd)BCO 線材において、ひずみを印加する超伝導層の結晶方位を $[100]/[010]$ から $[110]$ へ変化させた際に、 I_c のひずみ依存性が小さくなることが報告されている[1]。また、放射光を用いて引張りひずみ下における PLD-GdBCO 線材の内部ひずみを測定した結果、超伝導層の配向方位が異なると GdBCO ドメインのひずみ状態が異なることがわかっている。これに REBCO の異方性が加わることで、 I_c のひずみ依存性はひずみを加える REBCO の結晶方位に対して変化していると考えられている[2]。

そこで、本研究では PLD-GdBCO 線材の 77 K、磁場中における、 I_c のひずみ依存性とひずみを加える GdBCO の結晶方位の関係を調べることを目的として実験を行った。

2. 実験方法

試料は ISTEK により提供を受けた、PLD-GdBCO 線材を用いた。試料の諸元を Table 1 に示す。任意の結晶方位にひずみを印加するために、試料は Fig. 1 のように長手方向に $[100]/[010]$ 配向している線材から、レーザー切断によって取り出した。試料の幅は 2 mm とした。切断方向と線材長手方向の間の角度を ϕ とする。 ϕ は 0° , 15° , 30° , 45° とし、それぞれの試料を Gd-0, 15, 30, 45 と呼ぶ。Gd-0 において、ひずみ印加方向は GdBCO の $[100]/[010]$

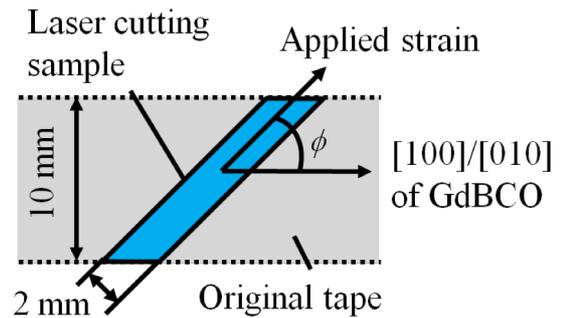


Fig.1 The schematic view of the sample. ϕ is defined as an angle between the original tape axis ($[100]/[010]$ of GdBCO) and the direction of applied strain (laser cutting).

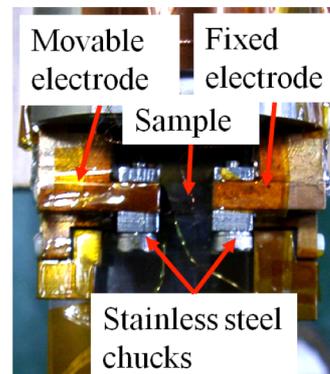


Fig. 2 The sample stage of the apparatus. The sample was soldered to Cu electrodes and gripped by stainless steel chucks.

Table 1 Specifications of the Samples.

Width	2 mm
Capped layer	Ag (10 μm)
Superconducting layer	PLD-GdBCO (1 μm)
Buffer layer	CeO ₂ (500 nm)
	LaMnO ₃ (30 nm)
	IBAD-MgO (5 nm)
	Gd ₂ Zr ₂ O _y (110 nm)
Substrate	Hastelloy (100 μm)

となり、Gd-45 においては[110]となる。

I_c -ひずみ測定は、低温強磁場中引張り装置を用いて測定した。この装置において、試料は電極以外と接触しておらず、その電極が熱収縮によって自由に動くことができる構造であるため、余計な熱応力を加えずに I_c -ひずみ測定を行うことができる。また、試料に加えるひずみと通電方向は平行となる。Fig. 2 に示すように、試料は電極にはんだ付けされ、ステンレスの板で固定されている。LN₂ 浸漬冷却により、測定温度を 77 K とした。磁場は c 軸に平行に 0-3 T まで印加した。試料電圧を 4 端子法によって測定し、電界基準を 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ として I_c を決定した。ひずみは試料表面に接着したひずみゲージによって測定した。ひずみゲージを試料両面に貼ることでたわみ成分を除去して正確なひずみを測定した。

3. 実験結果

Fig. 3 に、ひずみ印可方向を変化させた GdBCO 線材の、1 T における I_c のひずみ依存性を示す。 I_c はひずみの増加とともに、放物線状に減少した。実線は Power law [3] によるフィッティング結果である。Power law によって、 I_c のひずみ依存性は次式で表わされる。

$$\frac{I_c(\varepsilon)}{I_c(\varepsilon_{\max})} = 1 - a(\varepsilon - \varepsilon_{\max})^u \quad (1)$$

ε は印加ひずみ、 ε_{\max} は I_c が最大となるひずみを表す。 a と u はひずみ依存性の大きさを表すフィッティングパラメータである。本研究では $u = 2$ 、 $\varepsilon_{\max} = 0\%$ と仮定した。また、 a をひずみ感受性と呼ぶ。Fig. 4 に、各試料におけるひずみ感受性の磁場依存性を示す。ひずみ感受性は、磁場の増加に伴い増加していることがわかった。また、ひずみ印可方向を GdBCO の [100]/[010] から [110] へと変化させると、

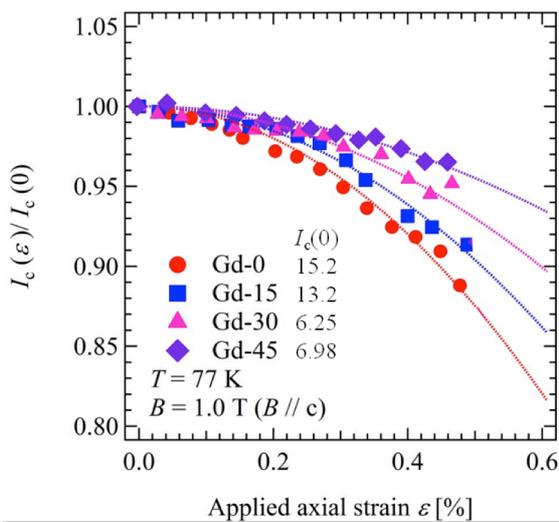


Fig. 3 The strain dependence of the normalized I_c at 77 K and 1 T for GdBCO coated conductors. The solid lines are the fitted results by the power law [3].

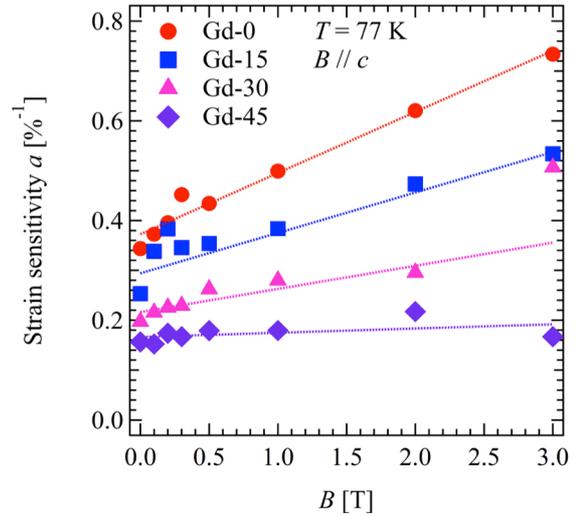


Fig. 4 The magnetic field dependence of the strain sensitivity a for the samples with various ϕ . The strain sensitivity for each sample increases with the increasing the magnetic field. The magnetic field dependence of the strain sensitivity becomes smaller with larger ϕ .

ひずみ感受性の磁場依存性が小さくなることがわかった。

4. ひずみ感受性と GdBCO 結晶方位の関係

ここでは、GdBCO ドメインのひずみ状態を考慮して、 I_c のひずみ依存性を議論する。まず、ドメインのひずみ状態を議論する。Fig. 5 に、試料中の GdBCO ドメインの概略図を示す。以下では、レーザー切断前の試料をオリジナル線材と定義する。GdBCO 線材は 2 軸配向しているため、超伝導層には線材長手方向に a 軸か b 軸が配向したドメインが存在する。ここで、a 軸が線材長手方向に配向したドメインをドメイン A、b 軸が線材長手方向に配向したドメインをドメイン B と定義する。ドメイン A、B における a、b 軸のひずみを ε_{ij} とする。ここで、i は a または b 軸を表し、j はドメイン A または B を表す。[100]/[010] 配向した線材を用いた放射光による内部ひずみ測定より、ドメインの a、b 軸方向の

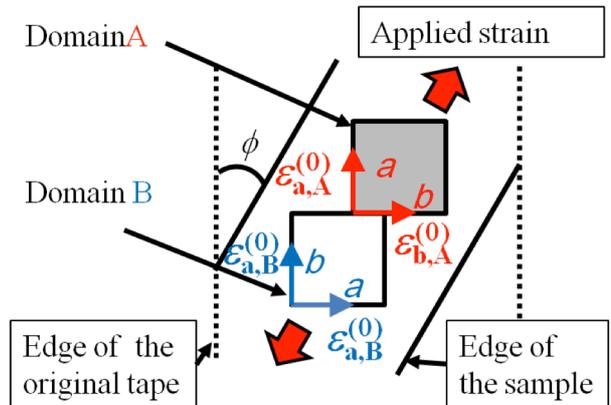


Fig. 5 The schematic view of the domains in the samples. The a-(b-) axis of the domain A(B) is oriented along the longitudinal direction of the original tape.

ひずみは印加ひずみに対して直線的に変化することがわかっている[2]. その関係は,

$$\varepsilon_{i,j} = \alpha_{i,j} \varepsilon \quad (2)$$

と表わされる. α_{ij} は印加ひずみとドメインのひずみの比を表し, strain ratio と呼ばれる. 我々のグループにおける測定では, $\alpha_{a,A} = 0.978$, $\alpha_{b,A} = -0.333$, $\alpha_{a,B} = -0.313$, $\alpha_{b,B} = 0.931$ ということがわかっている[4]. $\alpha_{a,A}$ と $\alpha_{b,B}$ が異なるということは, 印加ひずみが同じでもドメインの配向している結晶方位が異なると, 各ドメインのひずみ状態が異なるということを示している. また, ϕ を変化させた時の, ドメインのひずみと印加ひずみの関係は幾何学的に求めることができ,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a,A}^{(0)} &= \varepsilon_{b,B}^{(0)} = (\cos^2 \phi + \nu \sin^2 \phi) \varepsilon \\ \varepsilon_{b,A}^{(0)} &= \varepsilon_{a,B}^{(0)} = (\sin^2 \phi + \nu \cos^2 \phi) \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

と表わされる. 区別のため, 上付き文字として(0)をつけた. ν はポアソン比であるが, 超伝導体の横方向のひずみ変化は Hastelloy に従うため[4], この値は Hastelloy のポアソン比となる.(3)式ではドメイン A とドメイン B のひずみ状態は等しくなってしまう. 従って, 実験結果と一致するように strain ratio を用いて次のような補正を行った.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a,A}(\phi) &= (\alpha_{a,A} \cos^2 \phi + \alpha_{a,B} \sin^2 \phi) \varepsilon = S_{a,A}(\phi) \varepsilon \\ \varepsilon_{b,A}(\phi) &= (\alpha_{b,B} \sin^2 \phi + \alpha_{b,A} \cos^2 \phi) \varepsilon = S_{b,A}(\phi) \varepsilon \\ \varepsilon_{a,B}(\phi) &= (\alpha_{a,A} \sin^2 \phi + \alpha_{a,B} \cos^2 \phi) \varepsilon = S_{a,B}(\phi) \varepsilon \\ \varepsilon_{b,B}(\phi) &= (\alpha_{b,B} \cos^2 \phi + \alpha_{b,A} \sin^2 \phi) \varepsilon = S_{b,B}(\phi) \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

印加ひずみ ε の係数を $S_{ij}(\phi)$ とし, ϕ によって変化する strain ratio を表す.(4)式によって 4 つのひずみを区別することができ, ε_{ij} は ϕ と ε の関数として表わすことができる.

次に試料全体のひずみ依存性を議論する. ここで, I_c の一軸ひずみ依存性は power law に従うと仮定する. この時, ドメインの a または b 軸にひずみを印加した際の, ドメイン j における I_c は,

$$\frac{I_{c,j}(\varepsilon_{i,j})}{I_{c,j,\max}} = 1 - a_i \varepsilon_{i,j}^2 \quad (5)$$

と変化する. $I_{c,j,\max}$ はドメイン j における I_c の最大値を表し, a_i は一軸ひずみ効果の大きさを表すパラメータである. 全微分と偏微分の関係から, ドメイン j における I_c は(5)式より,

$$\frac{I_{c,j}(\varepsilon_j)}{I_{c,j,\max}} = 1 + \frac{\partial I_{c,j}(\varepsilon_{a,j})}{\partial \varepsilon_{a,j}} \varepsilon_{a,j} + \frac{\partial I_{c,j}(\varepsilon_{b,j})}{\partial \varepsilon_{b,j}} \varepsilon_{b,j} \quad (6)$$

$$= 1 - 2a_a \varepsilon_{a,j}^2 - 2a_b \varepsilon_{b,j}^2$$

と計算できる. ここでは, c 軸方向のひずみとせん断ひず

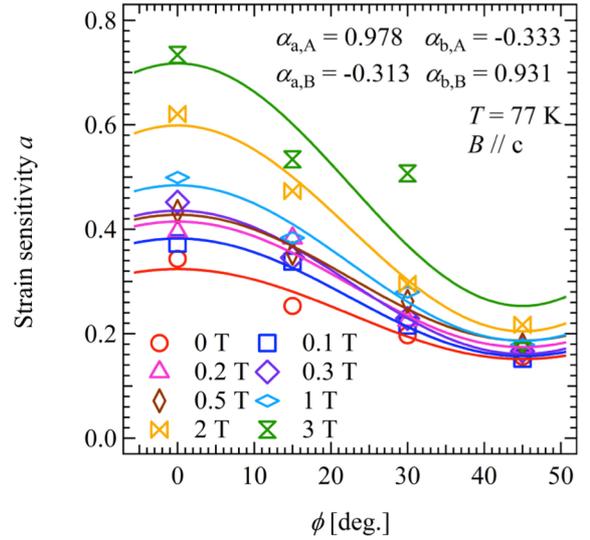


Fig. 6 The angular dependence of the strain sensitivity at various magnetic fields. The solid lines are fitted results by the equation (8).

みは無視した. さらに, 試料中を流れる電流の総和とドメイン A とドメイン B の存在比を考慮すると, 試料全体の I_c のひずみ依存性は,

$$\frac{I_c}{I_{c,\max}} = 1 - a_a \varepsilon_{a,A}^2 - a_b \varepsilon_{b,A}^2 - a_a \varepsilon_{a,B}^2 - a_b \varepsilon_{b,B}^2 \quad (7)$$

と表わされる.(7)式に(4)式を代入することで, 試料全体のひずみ感受性 a を,

$$a = a_a \{S_{a,A}^2(\phi) + S_{a,B}^2(\phi)\} + a_b \{S_{b,A}^2(\phi) + S_{b,B}^2(\phi)\} \quad (8)$$

と, ϕ の関数として表わすことができる.(8)式を用いて, 実験値に対してフィッティングを行った結果を Fig. 6 に示す. 内部ひずみ感受性 a_a , a_b をフィッティングパラメータとしてフィッティングを行った. フィッティング結果は実験値とよく一致した. Table 2 に各磁場における a_a と a_b の値を示す. 文献値[2]と比較すると, 絶対値が 1 桁違うことがわかる.

Table 2 The fitting parameters a_a and a_b at various magnetic fields

Magnetic field [T]	a_a	a_b
Self field	3.26	-3.19
0.1	3.07	-2.93
0.2	3.48	-3.33
0.3	2.88	-2.66
0.5	3.85	-3.71
1.0	3.47	-3.25
2.0	3.37	-3.02
3.0	4.31	-3.92
Self field [2]	0.329	-0.257

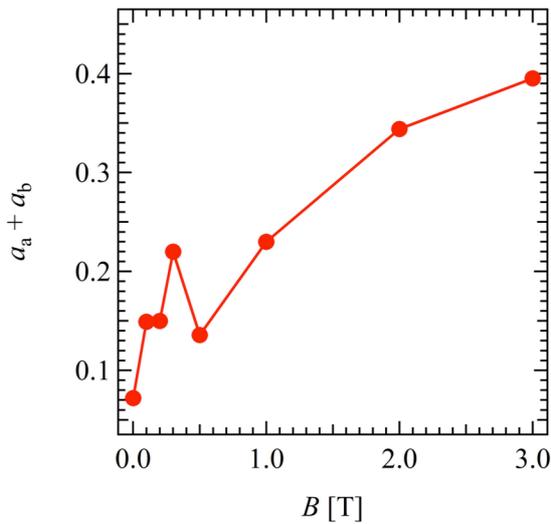


Fig. 7 The relation between the sum of internal strain sensitivity and the magnetic field. The sum of a_a and a_b increases with the increasing a magnetic field.

しかし、 a_a と a_b の絶対値の差は文献値とほぼ等しくなった。Fig. 7に a_a と a_b における絶対値の差と磁場との関係を示す。内部ひずみ感受性の絶対値の差は磁場増加に伴い増加する傾向が見られた。これらのことから、内部ひずみ感受性の絶対値よりその差が重要であると考えられる。

5. まとめ

GdBCO 結晶に加えるひずみの方向を変えた状態で、

GdBCO 線材における I_c のひずみ依存性を 77 K, 磁場中で測定した。ひずみを加える方向 ϕ を 0° から 45° ([100]/[010]から[110])へ変化させると、 I_c のひずみ感受性が小さくなることがわかった。また、全ての ϕ において、磁場増加に伴いひずみ感受性が大きくなることがわかった。 I_c の一軸ひずみ効果が power law に従うという仮定の下で、GdBCO ドメインのひずみ状態を考慮して計算したひずみ感受性は、実験値とよい一致を示した。また、内部ひずみ感受性の a 軸方向と b 軸方向の値に関して、その絶対値の差は、磁場増加に伴って増加する傾向が見られた。このことから、 I_c のひずみ依存性においてはこの和が重要であると考えられる。

謝辞

本研究はイットリウム系超電導応用基板技術研究開発業務の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] D. C. van der Laan, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **24** (2011) 115010.
- [2] M. Sugano, *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 054014.
- [3] D. C. van der Laan, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **90**. (2007) 052506.
- [4] H. Oguro, *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 840034.