

# RE123 線材の臨界電流密度におけるひずみ効果

## Strain effect of critical current density for RE123 coated conductors

東北大・金研 峯岸 一博, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄  
物材機構 西島 元  
超電導工学研究所 和泉 輝郎, 塩原 融

K. Minegishi<sup>1</sup>, H. Oguro<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>1</sup>, K. Watanabe<sup>1</sup>, G. Nishijima<sup>2</sup>, T. Izumi<sup>3</sup>, Y. Shiohara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

<sup>2</sup> National Institute for Materials Science

<sup>3</sup> Superconductivity Research Laboratory

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(REBCO)コート線材は磁場中での高い臨界電流密度( $J_c$ )特性に加えて、基板材料のHastelloy(Ni 基合金)の高い機械強度により大きな電磁力に耐えることができる。この高い機械強度のため、コート線材は従来の金属系超伝導線材のように、補強材と複合したり外部補強を行ったりする必要が無い[1]。これはマグネットにおける空間電流密度を下げることに伴い、マグネットをコンパクトに設計できるという非常に大きなメリットとなる。

マグネット設計においては、電磁力により線材にHoop力が印加された状態を想定して、線材の引張り歪下での $I_c$ 変化のデータが必要になる。しかし、コート線材の $I_c$ の引張り歪依存性のデータの多くは液体窒素温度77 K近傍のものであり[1]、強磁場マグネットにおける使用条件である4.2 K、磁場中のデータは、測定の問題さなどの問題からほとんど得られていないという問題点がある。

その他の未解決な問題として、コート線材の $I_c$ に対する歪効果のメカニズムが分かっていないことが挙げられる。コート線材のひずみ効果は、結晶粒内における効果と粒界における効果が複雑に組み合わされて生じていると考えられている[2]。この他にも、成膜法やREの種類などによる超伝導層の組織の違いと $I_c$ の歪依存性との関係について、定性的な理解は得られていない。

また、77 K近傍で測定されたYBCOコート線材の磁場中での $I_c$ は、磁場によりピーク位置が移動していくなどの複雑な歪依存性を示し[3]、 $I_c$ に対する歪効果に磁場が及ぼす影響については理解されていない。さらに、これら磁場中測定の結果は、磁場をテープ面に垂直すなわち超伝導層の $c$ 軸に平行方向に印加した場合のものがほとんどである。ところが、マグネットにおける使用環境では、磁場はテープ面に平行、すなわち $c$ 軸に垂直に印加される。このため、磁場角度による $I_c$ の歪依存性の変化についても調べる必要がある。

加えて4.2 Kの低温において、上記のような $I_c$ の歪依存性に対する磁場効果が、どう変化するかについても未解明である。このことから、77 Kでの測定結果から、4.2 Kでの $I_c$ の歪依存性を推察することはできない。

そこで本研究では、YBCO及びGdBCOコート線材の4.2 K、磁場中における $I_c$ の引張り歪・応力依存性を調べた。さらに、磁場が $c$ 軸に平行方向に印加された場合と、 $c$ 軸に垂直方向に印加された場合における $I_c$ の引張り歪依存性の変化を調べ、その特性を比較した。

### 2. 実験方法

#### 2-1. 試料線材

試料として用いたREBCOコート線材の諸元をTable 1に示す。YBCO線材はCVD(Cheical Vapor Deposition)法、GdBCO線材はPLD(Pulse Laser Deposition)法によりそれぞれ作製されている[5]。基板には厚さ100  $\mu\text{m}$ のHastelloyが用いられ、IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法によりGd-Zr-OおよびMgO配向中間層が作製されている。これら2種類の線材を比較することで、REの違いによる $I_c$ の歪依存性の変化を調べた。

コート線材においては、磁場中での $J_c$ 特性を改善するための人工ピンが $I_c$ の歪依存性に及ぼす影響を調べるため、人工ピン入りの試料も用意した。その試料は、PLD-GdBCOと同じ断面構造を持ち、超伝導層にBaZrO<sub>3</sub>(BZO)ナノロッドが導入された試料(PLD-GdBCO+BZO)であり、その結果をPLD-GdBCOと比較した。

77 K、自己臨界下における $I_c$ はCVD-YBCOで $I_c \sim 200$  A/cmであり、PLD-GdBCOで $I_c \sim 400$  A/cm、PLD-GdBCO+BZOで $I_c \sim 230$  A/cmである。

Table 1 Specification of the GdBCO coated conductor.

	YBCO	GdBCO
Stabilizer	Ag 24 $\mu\text{m}$	Ag 10 $\mu\text{m}$
Superconducting layer	CVD-YBCO 1 $\mu\text{m}$	PLD-GdBCO 1.2 $\mu\text{m}$
Buffer	CeO <sub>2</sub> 0.2 $\mu\text{m}$	CeO <sub>2</sub> 0.5 $\mu\text{m}$
		LaMnO <sub>3</sub> 19 nm
	IBAD-GZO 0.5 $\mu\text{m}$	IBAD-MgO 4 nm
		GZO 110 nm
Substrate	Hastelloy 100 $\mu\text{m}$	Hastelloy 100 $\mu\text{m}$

これらの線材は 10 mm 幅で作製されたものだが、10 mm 幅の試料をそのまま測定に用いると、 $I_c$  が大きいと測定が困難になる。そこで 10 mm 幅の試料をレーザーカットにより 5 等分し、2 mm 幅にしたものを試料として用いた。

## 2.2 $I_c$ の引張り歪依存性の測定

線材の磁場中における  $I_c$  の歪依存性の測定は、Fig. 1 のようなカム式の引張り装置を用いて行った[6]。マグネット外の室温部から負荷ロッドを引き上げることで、カムが回転し、負荷レバーに力を伝える。線材は、その一端が負荷レバー先端の可動電極、もう一端が固定電極にハンダ付けされており、負荷レバーから引張り力を受ける。線材に加わる引張り力はマグネット外のロードセルによって測定する。試料をハンダ付けする電極面を変えることで、線材に印加する磁場方向を  $B \parallel c$  と  $B \perp c$  に変えることができる。

線材の引張り歪測定は、Fig. 2 のように試料の両面に接着した 2 枚の歪ゲージによって測定した。2 枚の歪ゲージの測定値を平均した値を、線材に加わる引張り歪とすることで、歪におけるたわみ成分を除去した。

$I_c$  測定の際は、プログラマブル直流電源を用いて、試料にパルス状の電流を通电しながら試料電圧を測定し、通电電流値を除々に大きくしていくことで、試料の電流-電圧特性を測定した。電圧端子間距離は 10 mm、 $I_c$  決定の電界基準は  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  とした。

77 K での測定は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの 10 T 無冷媒超伝導マグネットを用いて、液体  $\text{N}_2$  浸漬冷却下で行った。4.2 K での測定は、同センターの 18 T 超伝導マグネットを用いて、液体 He 浸漬冷却下で行った。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 3 に 77 K において、1 T の磁場を  $c$  軸に平行に印加した時の、CVD-YBCO 線材と PLD-GdBCO 線

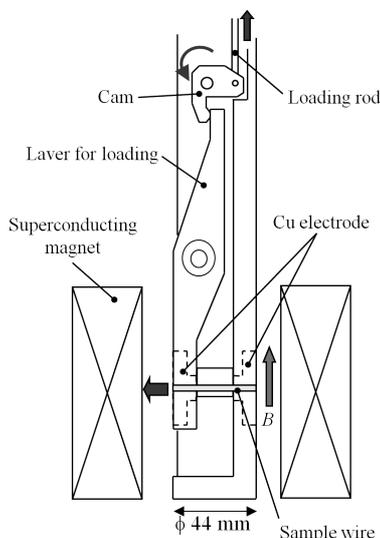


Fig. 1 Schematic view of the apparatus for  $I_c$ -strain measurement.

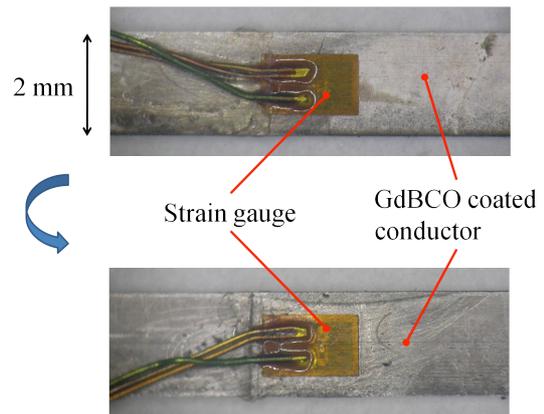


Fig. 2 Strain gauges for the tensile strain measurement of GdBCO coated conductor. Two gauges are glued symmetrically on both sides of the sample.

材の  $I_c$  の歪依存性を合わせて示す。 $I_c$  は、引張り歪を加えていないときの  $I_c$  の値 ( $I_{c0}$ ) で規格化している。結果として、GdBCO 線材も含め全て単調に減少するが、減少率は PLD-GdBCO+BZO が最も大きく、CVD-YBCO が最も小さくなった。PLD-GdBCO+BZO の  $I_c$  減少率が大きくなったことから、 $I_c$  のひずみ依存性に対して、本質的に人工ピンが影響を与えることが分かった。YBCO 線材の  $I_c$  減少率が最も小さいことは、弱磁場下で報告されているピーク効果[4]が影響している。YBCO 線材の  $J_c$  のひずみ依存性におけるピーク効果は、77 K 近傍の温度領域で報告されている現象で、ゼロ磁場では現れず、1 T 以下などの弱い磁場中で現れる。ピーク効果は磁場の変化に対して緩やかに変化するため、Fig. 3 の 1 T での結果に影響を与えたと考えられる。

Fig. 4 に、77 K において 1 T の磁場を  $c$  軸に垂直に印加した時の、CVD-YBCO 線材と PLD-GdBCO 線材の  $I_{c0}$  の歪依存性を示す。どの線材も  $I_c$  は単調減少しており、その違いも見られなかった。これは、 $B \parallel c$  においては磁束ピンニング特性が異なるが、 $B \perp c$

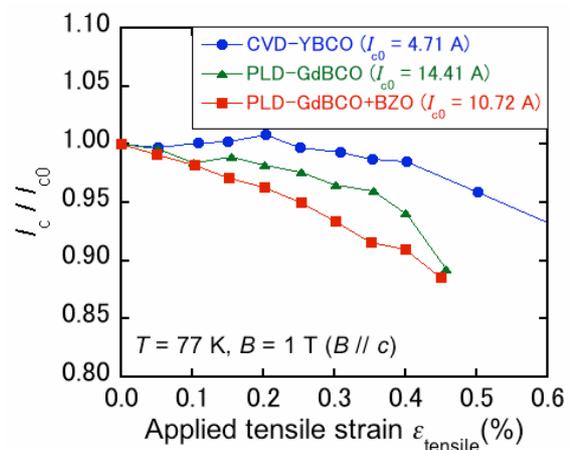
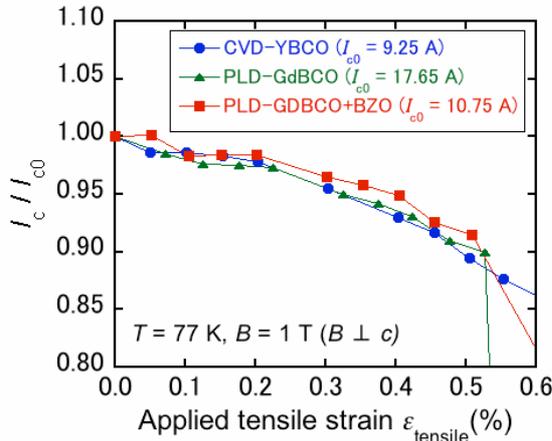


Fig. 3 Tensile strain dependence of normalized  $I_c$  for the CVD-YBCO wire and PLD-GdBCO wires at 77 K in 1 T ( $B \parallel c$ ).



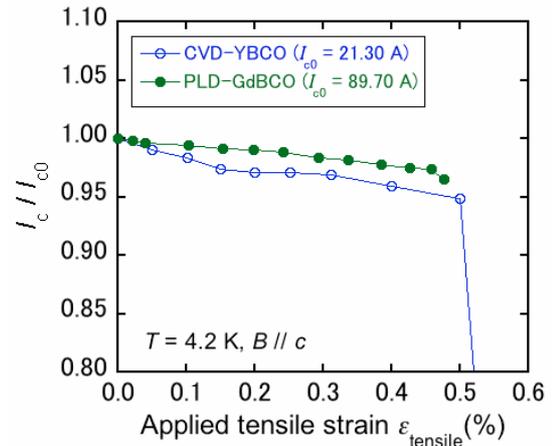
**Fig. 4** Tensile strain dependence of normalized  $I_c$  for the CVD-YBCO wire and PLD-GdBCO wires at 77 K in 1 T ( $B \perp c$ ).

においては、固有ピンニングの効果が支配的となる。このため、試料によるピンニング特性の差が無くなり、 $I_c$  のひずみ依存性にもそのピンニング特性が影響している可能性がある。

**Fig. 5** に 4.2 K における規格化  $I_c$  の引張りひずみ依存性を示す。PLD-GdBCO+BZO は  $I_c$  が大きく、電圧発生と同時に焼損してしまったため、測定が出来なかった。測定できた 2 つの試料ともに、4.2 K での  $I_c$  の引張り歪依存性は単調減少しており、 $I_c$  低下率は 77 K の場合と比較して小さくなった。不可逆磁場に対する相対的な磁場によって、歪依存性が決まっているために、 $I_c$  低下率が減少したと考えられる。2 つの試料を比較すると、4.2 K では 77 K とは逆に、CVD-YBCO 線材の方が  $I_c$  の低下率が大きかった。これは 4.2 K では CVD-YBCO 線材のピーク効果が見られなくなったことと関連していると考えられる。つまり、4.2 K での REBCO 線材の応用には、GdBCO 線材の方が適していることが分かった。

#### 4. まとめ

実用長尺高温超伝導線材として開発されている CVD 法 YBCO コート線材、及び、PLD 法 GdBCO コート線材の、77 K および 4.2 K における磁場中での  $I_c$  の引張り歪依存性を、歪ゲージ法によって測定した。GdBCO 線材に関しては、人工ピンとして BZO ナノロッドを導入した試料の測定も行った。この結果、全ての結果において  $I_c$  は単調減少した。77 K で磁場を  $c$  軸平行方向に印加した場合、 $I_c$  のひずみによる減少率は YBCO 線材が最も小さく、GdBCO+BZO 線材が最も大きかった。また、77 K で磁場を  $c$  軸に垂直に印加した場合には、3 つの試料で差が見られなかった。4.2 K の測定では、 $I_c$  が大きいため  $c$  軸に平行方向に磁場を印加した場合の YBCO 線材と GdBCO 線材(人工ピン無し)のみ測定可能であった。このとき、77 K に比べて  $I_c$  のひずみによる減少率が小さくなった。測定した 2 種類の線材では、GdBCO 線材の方がひずみによって劣化しに



**Fig. 5** Tensile strain dependence of normalized  $I_c$  for the CVD-YBCO wire and the PLD-GdBCO wire at 4.2 K in 18 T ( $B \parallel c$ ).

くることが分かった。これは、4.2 K で運転するマグネットへの応用には、GdBCO 線材の方が適していることを示している。

#### 参考文献

- [1] H. Sakamoto, S. Endoh, Y. Nagasu, K. Wada, A. Kimura, S. Meguro, S. Awaji, K. Watanabe, and M. Motokawa: "(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn Superconducting Wire with CuNb Reinforcing Stabilizer", IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 1067-1070
- [2] M. Sugano, K. Osamura, W. Prusseit, R. Semerad, K. Itoh and T. Kiyoshi: "Intrinsic strain effect on critical current and its reversibility for YBCO coated conductors with different buffer layers", Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 369-372
- [3] K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, S. Harjo, H. Suzuki, T. Shobu, K. Kiriyama, and M. Sugano: "Internal Strain Behavior Exerted on YBCO Layer in the YBCO Coated Conductor", IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 3090
- [4] M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: "The reversible strain effect on critical current over a wide range of temperatures and magnetic fields for YBCO coated conductors", Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 085013
- [5] A. Ibi, S. Miyata, R. Kuriki, H. Kobayashi, H. Fukushima, A. Kinoshita, T. Kato, T. Hirayama, Y. Yamada, Y. Shiohara: "Development of long REBCO coated conductors with artificial pinning centers by using MPMT-PLD method", Physica C **468** (2008) 1514-1517
- [6] G. Nishijima, K. Minegishi, K. Watanabe, K. Ohata, K. Nakagawa, and G. Iwaki: "Effect of ODS-Cu Composition for Mechanical-Electromagnetic Property of Bronze-Processed Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Wire", IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 1391