

# 実用 PLD-GdBCO コート線材の低温・強磁場での臨界電流密度特性と $n$ 値特性

Critical current density and  $n$  value properties of practical PLD-GdBCO coated conductor in low temperature and high magnetic field.

菊池吉展<sup>1</sup>, 淡路智<sup>1</sup>, 鈴木匠<sup>1</sup>, 渡辺和雄<sup>1</sup>, 藤田真司<sup>2</sup>, 大保雅載<sup>2</sup>, 飯島康裕<sup>2</sup>, 齊藤隆<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>東北大・金研, <sup>2</sup>フジクラ.

Y. Kikuchi<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>1</sup>, T. Suzuki<sup>1</sup>, K. Watanabe<sup>1</sup>, S. Fujita<sup>2</sup>, M. Daibo<sup>2</sup>, Y. Iijima<sup>2</sup>, T. Saito<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, <sup>2</sup>Fujikura.

## 1. はじめに

希土類酸化物超伝導  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (RE は希土類元素, REBCO) コート線材は, 強磁場中で高い臨界電流密度  $J_c$  特性を持ち, 機械特性に優れているため, 低温における強磁場応用などが期待されている. しかし, 二次元的な結晶構造による磁場中  $J_c$  特性の大きな異方性が解決すべき重要な問題の一つとなっており, 人工的な  $c$  軸相関ピンの導入などによる改善がなされている. REBCO の磁場印加方向による磁束ピンニングは,  $c$  軸に垂直に磁場を印加した場合に特別な振る舞いを持つことが明らかになっている. これはブロック層が相関ピンとして働くイントリンジックピンニングによるもので, 磁場に依存しない高い  $J_c$  と, 高磁場における  $n$  値の減少として超伝導特性に現れる[1]. これに対し  $c$  軸に平行に磁場を印加した場合, 結晶欠陥や転移, 常伝導析出物など従来と変わらないピンニング機構と考えられている. そのため, 人工的に導入された  $c$  軸相関ピンの議論は数多くあるが, それらを議論する上で明確にしなければならぬ元来の磁束ピンニング特性と  $J_c$  特性,  $n$  値特性との関係は詳しく議論されていない.

そこで本研究では, 実用 GdBCO コート線材の  $B//c$  方向の  $J_c$  特性と  $n$  値特性を広い温度, 磁場範囲で測定し, 磁束ピンニングの観点を踏まえて議論する.

## 2. 試料緒言および実験方法

本研究で使用した試料はフジクラ製の実用 GdBCO コート線材である. 試料は,  $\text{PLD-CeO}_2$  (約 500 nm) /  $\text{IBAD-MgO}$  (約 10 nm) /  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (約 20 nm) /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (約 150 nm) / Hastelloy (100  $\mu\text{m}$ ) / 配向基板の上に, PLD (Pulse Laser Deposition) 法によって膜厚 2  $\mu\text{m}$  の GdBCO 薄膜が成膜されている. また, 安定化層として 2  $\mu\text{m}$  の Ag 層を用いている. この試料に対してフォトリソグラフィー及びウェットエッチング技術を用いて幅約 100  $\mu\text{m}$ , 長さ 1 mm のブリッジ状に加工した.

試料の電流-電圧特性は四端子法を用いて, 通電法により測定した. このとき, 臨界電流  $I_c$  の電解基準は 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  とした. 温度はヘリウムガスフローと試料ホルダー上のヒーターにより 10 K まで精密に制御し, 磁場は 17 T まで印加して測定した.

## 3. 実験結果と考察

### 3-1. 臨界電流密度および $n$ 値の温度依存性

Fig.1 と Fig.2 に  $B//c$  印加磁場 1-17 T における臨界電流密度  $J_c$  および  $n$  値の温度依存性を示した. 温度の低下に従い,  $J_c$  は単調に増加しているのに対して,  $n$  値は高磁場では同様に増加しているが, 低磁場では約 30 K 以上の温度において 20 程度で抑制されている. これはこの温度領域において何らかの  $n$  値を制限するメカニズムが存在していることを示唆している. この現象は,  $B \perp c$  におけるイントリンジックピンニングによる  $n$  値の減少とは磁場に対する振る舞いが反対であり, 全く異なる現象であることが分かる. また, 30 K 以下の温度では  $n$  値は磁場の変化

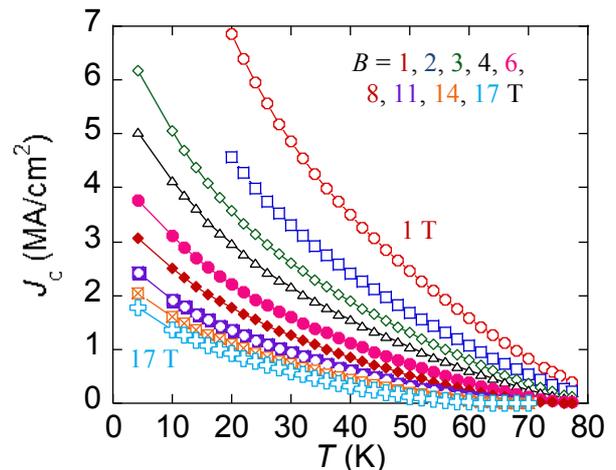


Fig.1 Temperature dependence of  $J_c$

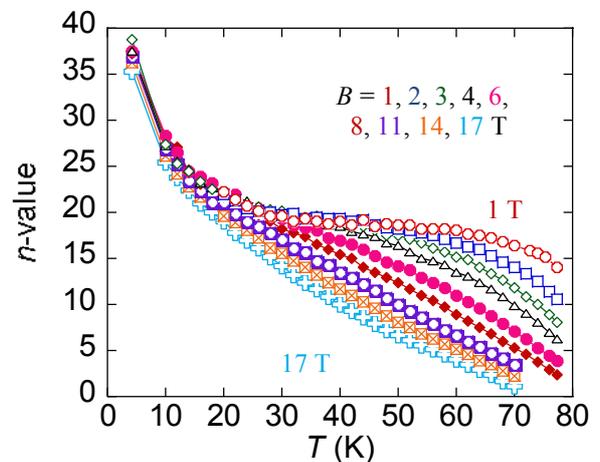


Fig.2 Temperature dependence of  $n$ -value

に対してほとんど依存せず、温度の減少と共に  $n$  値は急激に上昇している。

### 3-2. パーコレーションモデルによる特性解析

これら結果を解析するために、T. Kiss らが提唱しているパーコレーションモデルによる電流-電圧特性解析を行った[2]。これは、REBCO の局所  $J_c$  分布がワイブル分布であると仮定し、デビニング現象をパーコレーション転移と見なしたモデルである。電流-電圧特性の解析式は(1)式のように与えられる。

$$E(J) = \frac{\rho_{FF}}{m+1} J \left( \frac{J}{J_0} \right)^m \left( 1 - \frac{J_{cm}}{J} \right)^{m+1}$$

For  $J \geq J_{cm}$  (1)

$$= \frac{\rho_{FF}}{m+1} |J_{cm}| \left( \frac{|J_{cm}|}{J_0} \right)^m \left\{ \left( 1 - \frac{J}{|J_{cm}|} \right)^{m+1} - 1 \right\}$$

For  $J < J_{cm}$

ここで、 $\rho_{FF}$  は一様磁束フロー抵抗、 $m$  は  $J_c$  分布の形を与えるパラメータ、 $J_{cm}$  は  $J_c$  分布の最小値、 $J_0$  は分布の幅の指標である。今回は  $m=6.5$  とし、 $J_{cm}$  と  $J_0$  をフィッティングパラメータとして、電流-電圧特性から抽出した。Fig.3 と Fig.4 にそれぞれのパラメータの温度依存性を示した。 $J_{cm}$  は、ほぼ  $J_c$  と同様の温度依存性を示しており、全体的に下凸の図になっているのに対して、 $J_0$  は低温で上凸の図に変化しており、10 K 以下の温度で減少している。

この変化をより明確に表すため、 $J_{cm}$  に対する相対的な  $J_0$  の変化、 $J_0/J_{cm}$  を Fig.5 に示した。Fig.2 において  $n$  値が抑制されていると同様の領域において、 $J_0/J_{cm}$  がほぼ一定である。これは、局所  $J_c$  分布=要素的ピン力分布の概形が  $J_{cm}$  に対してほとんど変化しておらず、 $J_{cm}$  に対して分布の幅が飽和していることを示している。また、30 K 以下では低温になるに従い、分布の幅が狭くなっており、これは要素的ピン力が均一化していることを示している。 $n$  値の低磁場、低温での温度依存性は、これらのピン力分布の幅の振る舞いのためであると考えられる。

### 4. まとめ

フジクラ製の商用 GdBCO コート線材を広い温度、磁場領域において 臨界電流密度および  $n$  値の温度依存性を測定した。その結果、 $B//c$  低磁場において  $T > 30$  K では  $n$  値が 20 程度まで抑制されるが、さらに低温では急激に上昇することが分かった。パーコレーションモデルによる電流-電圧特性解析の結果、この  $n$  値の振る舞いはピン力の分布の幅が  $J_{cm}$  に対して飽和し、低温では要素的ピン力が均一化することに起因していると考えられる。

### 参考文献

[1] L. Civale, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., 15 (2005) 2808.

[2] T. Kiss, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., 13 (2003) 2607.

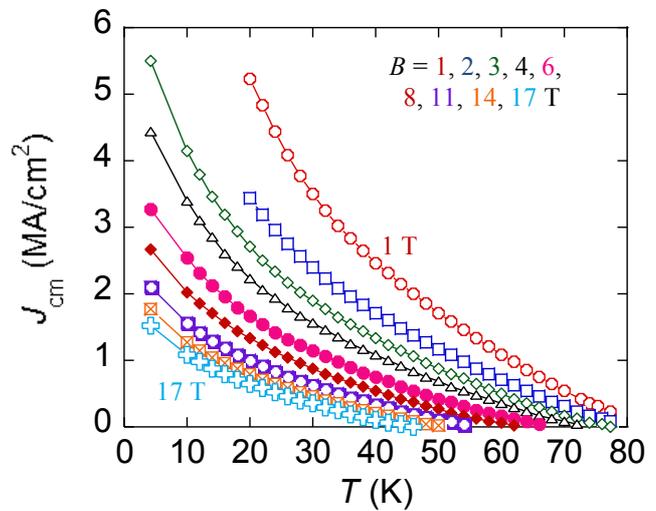


Fig.3 Temperature dependence of  $J_{cm}$

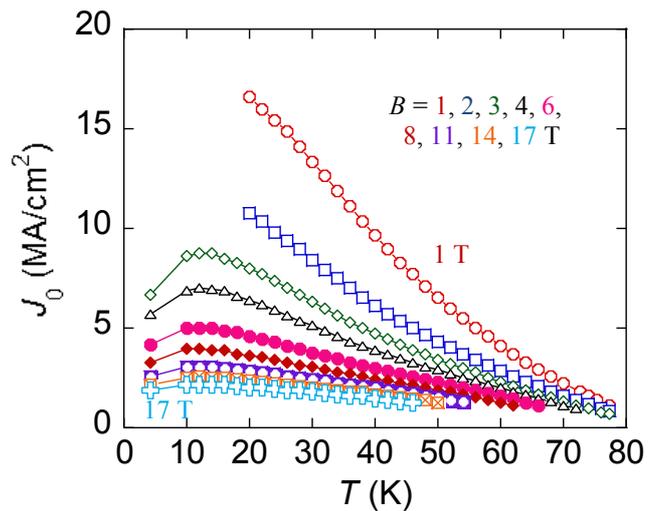


Fig.4 Temperature dependence of  $J_0$

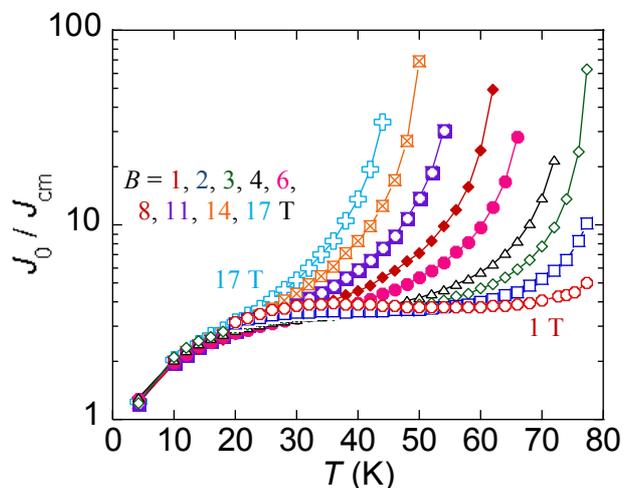


Fig.5 Temperature dependence of  $J_0/J_{cm}$