

REBCO 超伝導薄膜の電圧-電流特性と磁束ピンニング

Flux pinning and E - J characteristics of REBCO superconducting thin film

菊池 吉展¹, 淡路 智¹, 渡辺 和雄¹, 鶴田 彰宏², 吉田 隆², 松本 要³

¹東北大・金研, ²名古屋大・工, ³九工大・工

Yoshinobu Kikuchi¹, Satoshi Awaji¹, Kazuo Watanabe¹, Akihiro Tsuruta²,
Yutaka Yoshida², Kaname Matsumoto³

¹Institute for Materials Research, Tohoku University

²Graduate School of Engineering, Nagoya University

³Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

1. はじめに

REBCOなどの高温超伝導線材は、近年の技術の発展により、長尺化、高 J_c 化、高強度化など急速に発達し、工学的応用がされ始めている。しかし、高温酸化物超伝導は、従来の応用されてきたNb系などの低温超伝導と異なり緩やかな E - J 特性を持っており、さらに温度や磁場によって複雑な様相を示す。この E - J 特性の振る舞いは、高い T_c を持つことによる熱擾乱の影響と、結晶構造が複雑で均一なピンの導入ができないことに起因し、 E - J 特性に磁束ピンニングによる影響が深く表れている結果である。そのため、応用する上で E - J 特性と磁束ピンニングの関係を理解することが重要となるが、REBCOを初めとする高温超伝導体は二次元的な構造により超伝導特性が異方的であり、さらにランダムピン、相関ピンといった様々なピンが複雑に絡み合ったピンニング特性により、その理解は容易ではなく、十分な理解は得られていない。

本研究では、高温超伝導体の E - J 特性と磁束ピンニングの関係性を理解するため、広い温度、磁場、電界において、様々な試料の E - J 特性を測定し、 n 値を用いて E - J 特性とピンニング機構の関係性を調べた。

2. 実験方法

本研究で測定した試料は株式会社フジクラから購入した実用 GdBCO コート線材と名古屋大学から提供して頂いた SmBCO 薄膜である。

試料はブリッジ状に成形し、測定は四端子法を用いて通電法により E - J 特性を測定した。臨界電流決定のための電界基準は $1\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

GdBCO コート線材は無配向 Hastelloy 基板に IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition) 法により MgO

バッファを中間層として作成し、その上に PLD (Pulse Laser Deposition) 法によって Gd-BCO 薄膜を成膜した試料である。この試料は広い電界領域で測定するために高電界用として通常のショートブリッジ (測定限界約 10^7 V/cm)、低電界用としてミアンダ状のブリッジを用いてブリッジ長を長くしたロングブリッジ (測定限界約 10^9 V/cm) を用いた。

SmBCO 薄膜試料は、LaAlO 単結晶基板上に直接成膜している。試料は、不純物を導入していないものと、ターゲット交換法により人工相関ピンとして BHO (BaHfO) を 4.9vol.% 添加したものを測定した。

これらの測定試料を Table 1 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 GdBCO コート線材

Fig.1 に short-GdBCO の $B//ab$ 方向の J_c と n 値の温度依存性を、Fig.1 では温度低下に伴う J_c 向上に対し、 n 値は 60 K 程度まで低下する負の相関を示した後、増加に転じた。また、17 T の n 値の温度依存性では、低温になるにしたがって、 n 値が磁場に対して急激に増加した。この n 値の低下はイントリンジックピンが 60K 以下で強く働くことで磁束ピンの磁束リンク対励起が起これ、磁束クリープにより緩やかな E - J 特性が現れるためである[1]。次に、Fig.2 に long-

Table 1 Specifications of samples

Sample	Material	Bridge length [mm]	T_c [K]
short-GdBCO	GdBCO	1	93
long-GdBCO	GdBCO	125	93
Pure-SmBCO	SmBCO	0.7	92.5
4.9BHO-SmBCO	SmBCO	0.4	91.5

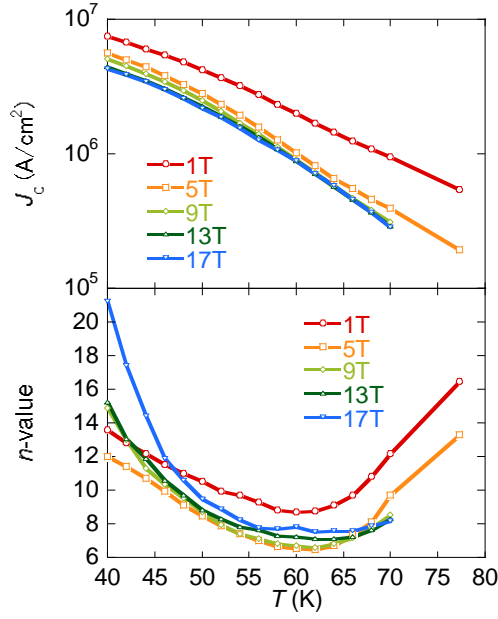


Fig. 1 Temperature dependence of J_c and n -value in short-GdBCO for $B//ab$

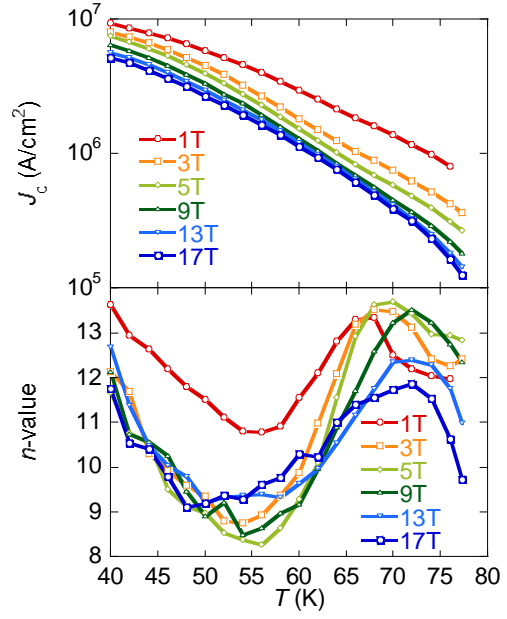


Fig. 2 Temperature dependence of J_c and n -value long-GdBCO for $B//ab$

GdBCO の温度依存性を示す. Short-GdBCO と比較すると、低温における定性的な振る舞いは変わらなかったが、高温で温度の低下に従って n 値が上昇する振る舞いを見せた. この特性は、 $B//ab$ 方向での温度の変化によるランダムピンからイントリンジックピンへの支配的なピンのクロスオーバーから次のように考察できる. 高温ではランダムピンが支配的なピンとして働き、温度の低下と共に n 値が上昇する. その後温度の低下と共に支配的なピンのクロスオーバーが起こり、 J_c はイントリンジックピンの強いピン力により上昇するが、磁束キック対励起の影響で n 値は低下する負の相関を示す. その後、イントリンジックピンが支配的になり、温度の低下と共に磁束キック対の熱的励起が抑制され、 n 値は増加する.

次に Fig.3 に short-GdBCO の磁場依存性を示す.

70K では J_c の低下と共に n 値も低下しているが、低温において磁場の増加に伴う J_c の現象に対し、 n 値が向上する負の相関を示した. この振る舞いが磁束のキック対励起に起因すると仮定する. 磁束のキック対励起ポテンシャル $U(j)$ は G. Blatter らによれば次式で表せる [2].

$$U(j) = \frac{d^2 L H_{c2} (H_{c2} - B)}{8\pi} \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{j}{j_c^{\text{in}}} \right) & j \leq j_c^{\text{in}} \\ \frac{4\sqrt{2} j_c^{\text{in}}}{\pi^2 j} & j \ll j_c^{\text{in}} \end{cases}$$

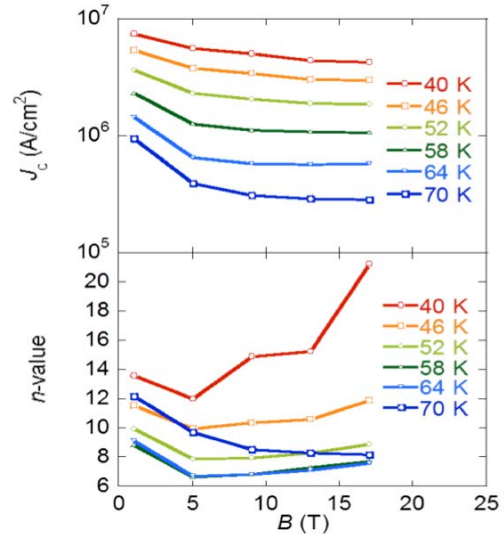


Fig. 3 Magnetic field dependence of J_c and n -value short-GdBCO for $B//ab$

ここで、 κ は GL パラメータ、 j_c^{in} はイントリンジックピンによる臨界電流密度でほとんど磁場に依存しない値である.

高温超伝導体の H_{c2} は非常に高いため、外部磁場 B の影響を無視すると、 $j < j_c^{\text{in}}$ において、 j と $U(j)$ は負の相関を持っていることが分かる. この式から、低温で支配的なピンのクロスオーバーが起こりイントリンジックピンが支配的になると、磁場の上昇に伴

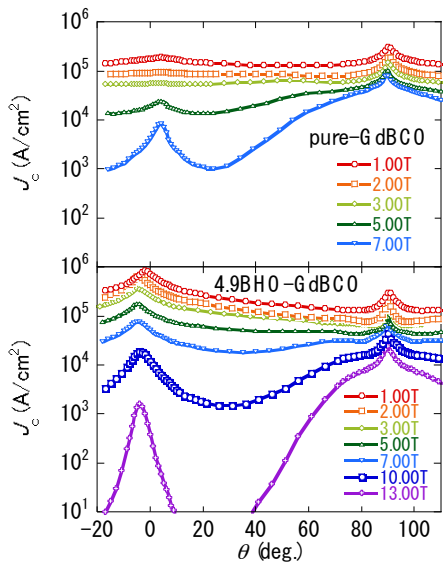


Fig. 4 Magnetic field angle dependence of J_c at 77.3 K in SmBCO thin film

う J_c の低下によって磁束キック対励起ポテンシャルが増加し、磁束クリープによる緩やかな E-J 特性が抑制されるため n 値が向上すると考えられる。

このように $B//ab$ 方向の E-J 特性の挙動は支配的なピンのクロスオーバーによって説明できることが分かった。

3.2 SmBCO 単結晶基板

Fig.4 に pure-SmBCO と 4.9BHO-SmBCO の磁場印加角度依存性を示す. $B//c$ 近傍において Pure-SmBCO と比較し、4.9BHO-SmBCO は $B//c$ 方向の J_c が向上していることが分かる. Fig.5 に示した $B//c$ の J_c と n 値の磁場依存性では、低磁場において 2 T 近傍 J_c にテラスができ、 n 値ではピークが現れている. これら特性は非常に強い c 軸関連ピンが導入されていることを示している. Pure-SmBCO と 4.9BHO-SmBCO を比較すると、低磁場において 4.9BHO-SmBCO のほうで J_c が大きく n 値が低くなっている. この結果は、人工ピン導入の効果はピンが増えて J_c が向上する反面、不純物導入されるため n 値が低下することを示している. 高磁場において n 値の大小関係は逆転しているが、これは J_c 向上に伴う n 値の増加の効果によって説明できる.

4 まとめ

GdBCO コート線材と単結晶基板上 SmBCO 薄膜を広い温度、磁場、電界において測定した. GdBCO コート線材の $B//ab$ 方向において、 J_c と n 値に現れた振る舞いは支配的なピンのクロスオーバーによっ

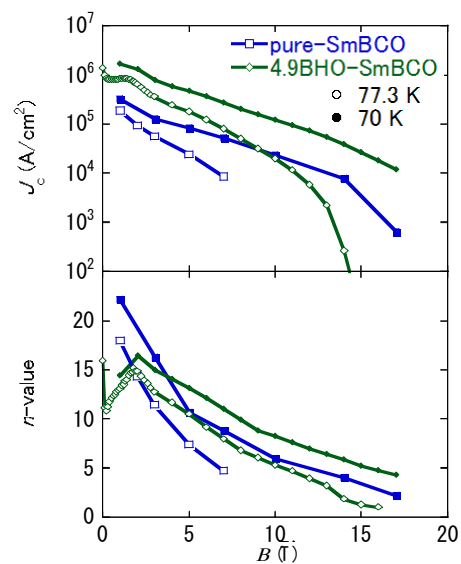


Fig. 5 Magnetic field dependence of J_c and n -value in SmBCO thin film

て説明できた. 単結晶基板上 SmBCO 薄膜において 関連ピンを導入することによりピン力の向上により J_c は増加するが、不均一性の導入により n 値は低下することが分かった.

参考文献

- [1] L. Civale, *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond.,15 (2005) 2808.
- [2] G. Blatter, *et al.*: Rev. Mod. Phys. 66 (1994) 1125