人エピンを導入した REBCO コート線材における低温 J<sub>c</sub> 特性 J<sub>c</sub> property of PLD-Gd123 coated conductors with APC at low temperature

鈴木 匠<sup>1</sup>, 淡路 智<sup>1</sup>, 渡辺 和雄<sup>1</sup>, 吉積 正晃<sup>2</sup>, 衣斐 顕<sup>2</sup>, 和泉 輝郎<sup>2</sup>, 塩原 融<sup>2</sup> <sup>1</sup>東北大学•金研, <sup>2</sup>ISTEC-SRL

T. Suzuki<sup>1</sup>, S. Awaji<sup>1</sup>, K. Watanabe<sup>1</sup>, M. Yoshizumi<sup>2</sup>, A. Ibi<sup>2</sup>, T. Izumi<sup>2</sup>, Y. Shiohara<sup>2</sup> <sup>1</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University

<sup>2</sup>Superconductivity Research Laboratory, International Superconductivity Technology Center

### 1. はじめに

希土類高温酸化物超伝導体REBa2Cu3Ov(REBCO, RE は Y を含む希土類元素)のテープ線材は強磁場中で 高い臨界電流密度特性を示すことや、機械特性に優れ た基板を用いていることなどから、低温強磁場応用への 適用も期待されている。しかし、一方で依然大きな異方 性の克服が重要な問題の一つとして認識され、磁場をc 軸方向に印加した時の低い磁場中 J。を向上させる c 軸 相関ピンとしての人工ピンの導入などがなされ一定の成 功を収めている。しかし、低温強磁場下における相関ピ ンの効果は未だ不明のままである。これは、低温では Jc が大幅に向上することにより通電電流が増加することか ら測定が困難となるためである。しかし、人工ピンを導入 した REBCO コート線材を用いたマグネット設計を行う場 合に低温強磁場中での J。特性は必要である。現在、 BaZrO<sub>3</sub>(BZO)を導入した YBCO コート線材の 4.2 K に おける 31 T までの J。特性はすでに評価されている[1]。 低温では Jcの磁場印加角度依存性の高温領域で見ら れた c 軸相関ピンの  $\theta = 0^{\circ}$ のピークが消失する。加えて、 J.の磁場依存性は人工ピンなしの線材では広い磁場領 域でJ。∝B<sup>-0.5</sup>となった人工ピン入りの試料ではJ。の磁場 依存性の傾きが大きくなり J<sub>c</sub>∝B<sup>-0.7</sup> となった。このような 振る舞いに対する人工ピン入りの線材の磁束ピンニン グ機構は未だ不明である。また、詳細な J。の温度依存 性もあまり測定されていない現状にある。そこで、本研 究では、c 軸相関ピンとして人工ピンのであるノロッドを 導入した長尺 REBCO コート線材の低温での J。の磁場 依存性、磁場印加角度依存性を測定することにより、ラ ンダムピンと c 軸相関ピンが競合した複雑な系における 低温での磁束ピンニング機構を解明することを目的とす る。

## 2. 試料緒元および実験方法

試料線材の緒元をTable 1に示す。PLD(Pulse Laser Deposition)法によって作製したGdBCOテープ線材であ り、基板はIBAD(Ion-Beam Assisted Deposition)法によ り作製されたMgOバッファ層を持つHastelloy基板である。 また、最表面には保護層として10 μmのAgを用いた。こ の試料に対して、フォトリン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 μm、長さ約1 mmのブリッ ジ形状に加工した。

測定は四端子法を用いて臨界電流密度を通電法に て測定した。試料温度は、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、精密にコントロールし、臨界 電流決定の電界基準は1  $\mu$ V/cm とした。また、B//c軸方 向を $\theta = 0^{\circ}$ とした。

Table 1 Specification of GdBCO coated conductor with APC

	Material	Thickness
Stabilizer	Ag	10 mm
Superconducting layer	PLD-GdBCO	1.2 mm
Buffer	CeO <sub>2</sub>	0.5 mm
	LaMnO <sub>3</sub>	19 nm
	IBAD-MgO	4.0 nm
	Gd-Zr-O	110 nm
Substrate	Hastelloy	100 mm



Fig. 1 Magnetic field angle dependence in the GdBCO coated conductor with BZO at 4.2-77.3 K..
(a) Angular dependence of J<sub>c</sub>,
(b) Normalized angular dependence of J<sub>c</sub>.



Fig. 2 Magnetic field dependence of J<sub>c</sub>/J<sub>c</sub>(1 T) at various temperatures in a log-log scale.
(a) GdBCO coated conductors with BaZrO<sub>3</sub>,

# (b) GdBCO coated conductors without BaZrO<sub>3</sub>

### 3. 実験結果と考察

### 3-1 臨界電流密度の磁場印加角度依存性

Fig.1 (a)、(b)にそれぞれ、J<sub>c</sub>とJ<sub>c</sub>/J<sub>c</sub><sup>ab</sup>の 4.2 – 77.3 K における磁場印加角度依存性を示す。J<sub>c</sub>は温度の減少 に伴い、全ての角度領域でJ<sub>c</sub>は増加した。4.2 K におけ るJ<sub>c</sub>の値は 77.3 K に比べて、1 桁大きくなった。Fig.1(b) より、 $\theta$  = 90°に積層欠陥やイントリンジックピン等の ab 面 相関ピンに由来したシャープなピークが見られた。加え て、BZO ナノロッドの長手方向である $\theta$  = 0°に大きくブ ロードなピークが高温で見られた。ピークの高さは 60 K で最大となり、それ以下の温度では、温度の減少に伴 いピークは小さくなった。さらに、20 K 以下の低温では ピークが消失した。60 K でピークを持つ振る舞いはこの 温度でナノロッドのサイズとコヒーレンス長が等しくなる 事によりピンニング力が最大となると事に起因すると考 えられる。これらの c 軸相関ピンの効果は更に系統的な 研究が必要である。

#### 3-2 臨界電流密度の磁場依存性

Fig.2 に J<sub>c</sub> / J<sub>c</sub> (1 T)の 4.2 – 77.3 K における B//c 軸方向 の磁場依存性を示す。ここで、ナノロッド導入薄膜にお



Fig. 3 Magnetic field dependence of  $J_c/J_c(1 \text{ T})$  at various temperatures in a log-log scale, calculated by the cooperative model of the random and correlated pinning centers.



Fig. 4 Angular dependence of  $J_c$  is also calculated by using the same model taking into account the distribution of the nanorod direction.

いて議論されているα値について考える。α値とは、J。 の磁場依存性を表す指数パラメーターであり、J<sub>c</sub>(B)∝  $B^{\alpha}$ で与えられる。 $\alpha$  値は、 $J_{c}$ の磁場依存性を両対数プ ロットしたときの直線フィッティングできる低磁場領域で 決められる。図 2(a)より人工ピンなしの線材では温度に 依らずα値はおよそ-0.5となる。また、4.2Kでは広い磁 場領域で B<sup>-0.5</sup>の直線に従う。図 2(b)より人工ピン入りの 線材では低磁場領域で B<sup>-0.5</sup>より小さくなるがマッチング 磁場よりも高磁場では急激にJ。が減少する。この振る舞 いは人工ピンなしの線材と比べても顕著である。この事 から、マッチング磁場を境にピンニング状態が異なって いると考えられる。よって、この磁場依存性の結果は磁 場印加角度依存性に見られた、ピークが消失する 20K 以下の低温においても c 軸相関ピンの効果が存在する ことを示唆している。しかし、その効果は低温で小さく なっていると考えられる。

3-3 ランダムピンと相関ピンの共存モデル[2]

これらの結果を解析するために相関ピンとランダムピンの共存モデルを用いる。ここで、ランダムピンと相関ピンのそれぞれのピン力密度 *F*<sub>p</sub> = *J*<sub>c</sub>*B* を考える。まず、ランダムピンのピン力密度 *F*<sub>p</sub><sup>rand</sup> は経験的に以下の式で記述される。

 $F_{p}^{rand} = A_{rand} b_{rand}^{p} (1 - b_{rand})^{q}$ , (1) ここで、 $A_{rand}$ はピンニングパラメーター、 $b_{rand} = B / B_{i}^{rand}$ は規格化磁場、p, qはスケーリングパラメータである。次に、相関ピンのピン力密度  $F_{p}^{corr}$ の磁場依存性はマッチング磁場前後で振る舞いが異なり以下の式で記述される。

$$F_{\rm p}^{\rm corr} = \begin{cases} \left(A_{\rm corr}f_{\rm p}\right) \cdot b_{\rm corr} & \left(b_{\rm corr} < b_{\phi}\right) \\ \frac{A_{\rm corr}b_{\phi}}{\left(1 - b_{\phi}\right)} \left(1 - b_{\rm corr}\right)^2 & \left(b_{\rm corr} > b_{\phi}\right)^{\prime} \end{cases}$$
(2)

ここで、 $A_{corr}$ はピンニングパラメーター、 $b_{corr} = B / B_i^{corr}$ は 規格化磁場、 $b_{\varphi} = B_{\varphi} / B_i^{corr}$ は規格化マッチング磁場で ある。マッチング磁場は分布を有している。その分布を ガウス分布で仮定し、ガウス分布の分散は 0.2 とした。そ れぞれのパラメーターは  $B_i^{corr} / B_i^{rand} = 0.9$ 、 $A_{rand} / A_{corr}$ = 0.2、p = 0.5、q = 2 とした。このモデルでは、c 軸相関ピ ンの寄与は規格化磁場でスケーリングしていることから ランダムピンに対して、 $1 / B_i$ となる。そのため、 $B_i$ が増加 すると相関ピンの寄与が小さくなる。また、 $B_i$ の温度依 存性は  $B_i = 74.87(1 - (T / T_c)^2)^{3/2}$ とした。

ここで、ランダムピンによるピン力密度  $F_p^{rand} \ge c$  軸相 関ピンによるピン力密度  $F_p^{corr}$ の2つの力の競合を考え る。(1)、(2)式はそれぞれランダムピンと相関ピンのみが 存在する場合であり、ランダムピンと相関ピンのみが 存在する場合であり、ランダムピンと相関ピンそれぞれ にピン止めされた場合の磁束間の相互作用が考慮され ていない。しかし、実際はランダムピンと相関ピンの磁束 間相互作用を通じた相関も存在する。このため、競合し た系で得られる  $F_p$ は単なる  $F_p^{corr}$ の和より小さく なると予想できる。しかし、相関ピンとランダムピンの磁 束間相互作用を厳密に計算することは難しい。そこで、 統計学的で最も広く利用される二乗和を用い、 ( $F_p^{rand}$ )<sup>2</sup>+( $F_p^{corr}$ )<sup>2</sup>のようになると推測した。すなわち全体 のピン力密度  $F_p$ は、二乗平均を用いて

$$F_{\rm p} = \sqrt{\left(F_{\rm p}^{\rm rand}\right)^2 + \left(F_{\rm p}^{\rm corr}\right)^2}, (3)$$

の形になると考えられる[4]。この考え方は、弱いランダ ムピンが多数存在する場合の、集合的ピンニングモデ ルにおいて、すでに用いられている手法である。

Fig.3にこのモデルを用いた J<sub>c</sub>の磁場依存性を示す。 マッチング磁場以下の低磁場領域では B<sup>-0.5</sup>の直線より 傾きが小さくなっている。これは、相関ピンの磁場依存 性が小さい影響である。しかし、マッチング磁場よりも高 磁場の領域では急激に J<sub>c</sub>が減少する。これは、(1b<sub>corr</sub>)<sup>2</sup>の項による影響であると考えられる。温度が減少 すると不可逆磁場が増大するため c 軸相関ピンの寄与 が小さくなり J<sub>c</sub>の磁場依存性が B<sup>-0.5</sup> に近づく。一方、 マッチング磁場以上の J<sub>c</sub>の磁場依存性は温度の減少 に伴い小さくなる。

Fig.4 にこのモデルを用いた J。の磁場印加角度依存 性を示す。c 軸相関ピンはわずかに傾いている等の分 布がある。それらを考慮して c 軸相関ピンの J の磁場印 加角度依存性に対する寄与は,ガウス分布で広がりを 持つと仮定した。また、有効質量モデルをランダムピン に対するJ。の磁場印加角度依存性として用いた。この 結果、低温でピークが消失している振る舞いを示した。 ナノロッドの成長方向に分布があることからこの項を磁 場印加角度依存性に取り入れることにより低温で相関ピ ンの寄与が弱くなるとブロードにJ。に影響を与える。この ことから、低温でピークが消失する振る舞いを定性的に 説明できた。また、低温でピークが消失しても相関ピン の寄与により異方性が低下している。一方で、B//c方向 のピークの大きさは 60 K で最大となる。しかし、このモ デルの計算からは70Kから温度が減少するにつれて ピークは小さくなった。磁場印加角度依存性の結果は Jc<sup>ab</sup>で規格化していることから B//ab 方向のイントリンジッ クピンの温度依存性や要素ピンカfnの温度依存性、ま た、有効質量モデルの磁場印加角度依存性において 異方性パラメーターが一定であるとしているが、同じ磁 場においても温度によって異方性が変化すると考えら れるのでその温度依存性も考慮する必要がある。

#### 4. まとめ

BZOを導入した GdBCO コート線材における  $J_c$ の磁場 依存性と磁場印加角度依存性をから c 軸相関ピンの  $J_c$ に対する効果について解析を行った。 $J_c$ の磁場印加角 度依存性の測定の結果、B//c 軸でのピーク高さが B =3 T において 60 K で最大となり、それ以下の低温では 温度と共に減少し 20 K 以下で消失した。しかし、 $J_c$ の磁 場依存性の結果から 20 K 以下の低温においても c 軸相 関ピンの効果があることが示唆された。また、低温にお いては c 軸相関ピンの効果が小さくなる。これらの結果 を c 軸相関ピンを導入した磁束ピンニングモデルを用い ることにより定性的に説明することができた。このモデル が相関ピンを導入した超伝導線材の磁束ピンニング機 構の理解へと繋がると考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究は、超電導応用基盤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。

### 6. 参考文献

[1] V Braccini, A Xu, J Jaroszynski, Y Xin, D C Larbalestier, Y Chen, GCarota, J Dackow, I Kesgin, Y Yao, A Guevara, T Shi and V Selvamanickam, Supercond. Sci. Technol. 24 035001 (2011)
[2] S. Awaji, M. Namba, K. Watanabe, S. Ito, E. Aoyagi, H. Kai, M. Mukaida, and S. Okayasu, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 3192 (2011).
[3] S. Awaji, M. Namba, K. Watanabe, H. Kai, M. Mukaida, and S. Okayasu, J. Appl. Phys. 111, 013914 (2012)