

量子化磁束径より大きなナノ析出物ピンを含む (RE)BCO 薄膜の $J_c(H, \theta, T)$ に関する考察

Consideration to $J_c(H, \theta, T)$ of (RE)BCO films containing nanoprecipitates that are larger than the diameter of quantized fluxes

産総研¹ ○山崎 裕文¹

AIST¹ Hirofumi Yamasaki¹

E-mail: h.yamasaki@aist.go.jp

はじめに 筆者らは、YBCO 薄膜の臨界電流密度の磁界角度依存性 $J_c(H, \theta)$ 測定と透過電顕 (TEM) 観察による磁束ピン止め機構の解明を進めてきた。量子化磁束径より大きなナノ析出物が、中磁界領域 $B = 0.5\text{--}2\text{ T}$ で c 軸中心のブロードな $J_c(\theta)$ ピークをもたらすことを見出すとともに、要素的ピン力密度 f_p の直接和によってピン止め力密度 F_p と J_c を計算して合理的な説明を与えた [1]。このようなブロードピークは高磁界領域でつぶれてきて、いわゆるバタフライ形状の $J_c(\theta)$ 曲線が出現する。今回、その起因について考察した。

実験結果と考察 TEM 観察で高濃度のナノ析出物が観測された3つの (RE)BCO 薄膜 (PLD 法で成膜した薄膜 A, C、TFA-MOD 法による薄膜 B) について、それらの諸元と、ナノ析出物の実体、典型的なサイズ、濃度とその形状を表1に、77 K または 60 K における $J_c(H, \theta)$ を図1に示す [1–4]。直径 $a > 2\xi$ (ξ : コヒーレンス長) の球状ピンの場合、ピン止めによる系のエネルギー低下 $U_p = (\mu_0/2)H_c^2\pi\xi_{ab}^2\alpha(\theta)a$ を、磁束がピンから外れるときの特性距離 $r_c = a/2$ で除して f_p が得られる (H_c : 熱力学的臨界磁界、 $\alpha(\theta) = (\cos^2\theta + \sin^2\theta/\gamma^2)^{1/2}$, $\gamma \approx 5$: (RE)BCO の異方性)。 $f_p = (\mu_0/2)H_c^2\pi\xi_{ab}^2\alpha(\theta)a/(a/2) = \mu_0H_c^2\pi\xi_{ab}^2\alpha(\theta)$ (1) となるが、ナノ析出物のような強いピンの場合、 f_p の直接和モデルで $J_c \propto f_p$ となるため、(1) 式の $\alpha(\theta)$ がブロードピークをもたらす。即ち、ピン止めエネルギー U_p が $\alpha(\theta)$ に比例し、 $H \parallel c$ で大きくなることが J_c 向上の要因である。ところが、高磁界では逆に $H \parallel c$ 付近で J_c が低下し、ブロードピークがつぶれてきて、バタフライ形状の $J_c(\theta)$ 曲線が観測される (図1)。これは、ナノ粒子ピンの効果が薄れてくる高磁界では、異方性のため $H \parallel c$ に近いほど熱励起による磁束運動が大きくなることが、その原因である。ピンの少ない YBCO 試料で観測される磁束メルティング磁界 $H_m \propto 1/\alpha(\theta)$ であることが、その傍証となる [5]。

参考文献 [1] H. Yamasaki et al: Supercond. Sci. Tech. (SuST), **21** (2008) 125011. [2] K. Nakaoka et al: SuST, **30** (2017) 055008. (未公表データ含む) [3] J. Nie et al: SuST, **17** (2004) 845; Physica C, **412–414** (2004) 1272. [4] H. Yamasaki & H. Yamada: Physica C, **542** (2017) 46. [5] A. Schilling et al: Phys. Rev. B, **65** (2002) 054505.

表1 比較的大きなナノ析出物を含む (RE)BCO 薄膜の諸元と析出物のサイズ・濃度・形状

	成膜法	膜厚 (nm)	T_c (K)	析出物の実体	サイズ (nm)	濃度 (10^{21} m^{-3})	形状	文献
A	PLD	250	90.9	—	7.1–10.1	>5.3	球を仮定	1, 4
B	MOD	~600	—	BaZrO ₃	13±4	(~6.8)	楕円球	2
C	PLD	200	88.2	大 (Y ₂ Cu ₂ O ₅ 等) 小 (不明)	大: 40–50 小: 5–7	大: 0.57 小: 8.5	楕円球	3

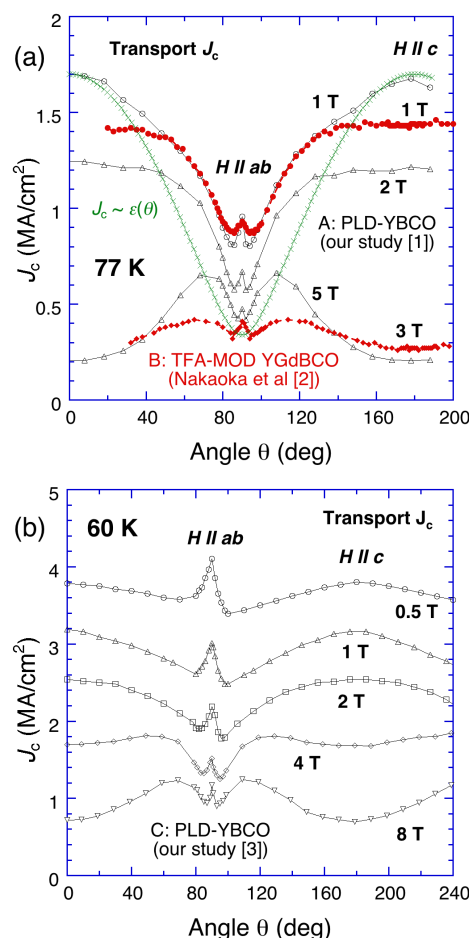


図1 量子化磁束径より大きなナノ析出物を含む (RE)BCO 薄膜の $J_c(H, \theta)$

図1 量子化磁束径より大きなナノ析出物を含む (RE)BCO 薄膜の $J_c(H, \theta)$ 曲線を示す。 (a) 77 K における PLD-YBCO (A) と TFA-MOD YGdBCO (B) のデータ。 (b) 60 K における PLD-YBCO (C) のデータ。各曲線は異なる磁束密度 (0.5 T, 1 T, 2 T, 4 T, 8 T) での測定結果を示す。 $H \parallel ab$ と $H \parallel c$ の方向を示す。