

YBCO 薄膜中ナノ析出物による磁束ピン止めサイズ効果 (2)－要素的ピン止め力の直接和によるピン止め力密度 F_p の計算と考察

Effect of nanoprecipitate size on the flux pinning of YBCO thin films (2)–calculation of pinning force density F_p based on the direct summation of elementary pinning forces

産総研¹, 大島商船高専² [○]山崎 裕文¹, 山田 博²

AIST¹, Nat. Inst. Tech., Oshima College², [○]Hirofumi Yamasaki¹, Hiroshi Yamada²

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

はじめに 前報では、高濃度のナノ析出物を含み、そのサイズが異なる4つの YBCO 薄膜 (粒子サイズが $A < B < C < D$) について中磁界領域 $\mu_0 H = 0.5\text{--}2\text{ T}$ ($\parallel c$) における J_c の温度依存性を調べて、ナノ粒子サイズが小さいほど $J_c(T) \sim (1 - T/T_c)^m (1 + T/T_c)^2$ の指数 m が大きく、温度による J_c の変化が大きいことを明らかにした (表 1)。その起因を解明するため、理論的な解析を行った。この報告では、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 を計算することにより、観測された現象を合理的に説明できることを述べる。

表 1 指数 m の変化

	0.5 T	1 T	2 T
A	2.6	2.9	3.3
B	2.4	2.4	2.9
C	2.3	2.3	2.4
D	2.0	2.1	2.3

要素的ピン止め力の直接和に基づく考察 まず、Ginzburg-Landau (GL) のコヒーレンス長を ξ として、直径が 2ξ 以下の微細ナノ粒子 (体積 V) について、コアピン止め相互作用による要素的ピン止め力 f_p を計算する [1, 2]。量子化磁束の常電導コアが粒子を含むことによって、 $(\mu_0/2)H_c^2 V$ だけ系のエネルギーが低下する (H_c : 熱力学的臨界磁界)。このエネルギーを、ローレンツ力で磁束がピンから外れるときのエネルギー変化が生ずる特性距離で除することによって f_p が得られるが、この場合、特性距離が ξ であって、 $f_p = \mu_0 H_c^2 V / 2\xi$ となる。次に、要素的ピン力 f_p からピン止め力密度 F_p を計算するが、ナノ析出物のような強いピンの場合、単純な足し合わせである直接和モデルが良い近似となる [3]。 N_p をピン濃度、 η を磁束ピン止め効率として、 $F_p = \eta f_p N_p = \mu_0 \eta H_c^2 V N_p / 2\xi$ となるが、 $H \parallel c$ では、

$J_c = F_p / B = \eta H_c^2 V N_p / 2\xi_{ab} H$ (1) と J_c が計算される。

比較的サイズの大きな、直径 $a > 2\xi$ の球状ピンの場合は、特性距離が $a/2$ で $f_p = (\mu_0/2)H_c^2 \pi \xi^2 a / (a/2) = \mu_0 H_c^2 \pi \xi^2$ となる。 c 軸に平行な円筒ピン (直径が 2ξ より大で高さが a) の場合、特性距離が 2ξ で $f_p = (\mu_0/2)H_c^2 \pi \xi^2 a / 2\xi = (\mu_0/4)H_c^2 \pi a \xi$ となる。直接和モデルでは、球状ピン、円筒ピンの場合、それぞれ、

$J_c = \pi \eta H_c^2 \xi_{ab}^2 N_p / H$ (2), $J_c = \pi \eta a H_c^2 \xi_{ab} N_p / 4H$ (3)

を得る。磁束ピン止め効率 η が温度に依存しないと仮定すると、 $H_c(T) \sim 1 - (T/T_c)^2$ 、 $\xi_{ab}(T) \sim (1 - T/T_c)^{-1/2}$ であるため、微細ナノ粒子の場合は $J_c(T) \sim (1 - T/T_c)^{2.5} (1 + T/T_c)^2$ となる。同様に、サイズの大きな球状ピンでは $J_c(T) \sim (1 - T/T_c) (1 + T/T_c)^2$ 、円筒ピンでは $J_c(T) \sim (1 - T/T_c)^{1.5} (1 + T/T_c)^2$ となる。この結果は、粒子サイズの違いによる $J_c(T)$ の違いを定性的に説明する。磁界依存性について、70 K 以上の高温で $J_c \propto 1/H$ となり (図 1)、 η が磁界に依存せず一定 (≈ 1) であると解釈される。低温では $J_c \propto 1/H^{1/2}$ となるが、磁束線の直径が小さくなってピン効率が悪くなり、 η が磁束格子間隔 $a_0 = 1.07(\phi_0/B)^{1/2}$ に反比例するからと考えられる。

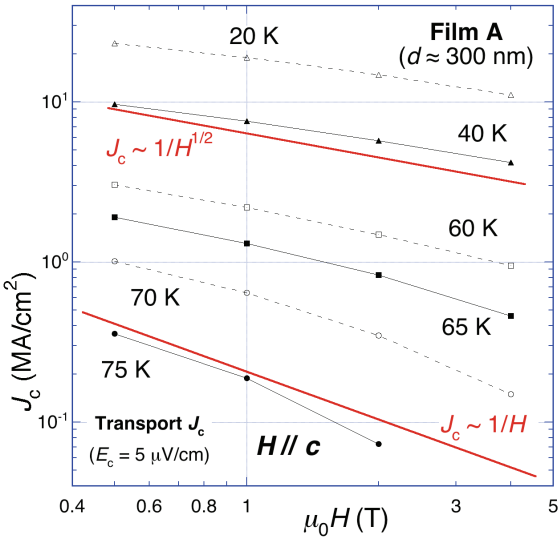


図 1 YBCO 薄膜 A の J_c の磁界依存性

文献 [1] H. Yamasaki et al: Supercond. Sci. Tech., **21** (2008) 125011. [2] H. Yamasaki: ibid. **29** (2016) 065005. [3] C. Meingast & D. C. Larbalestier, J. Appl. Phys. **66** (1989) 5971.