

# アンダードーピング YBCO 単結晶における上部臨界磁場の測定

## Measurement of the Resistive Upper Critical Field in Underdoped YBCO Single Crystals

小田垣 智也, 淡路 智, 西崎 照和, 渡辺 和雄, 小林 典男  
 東北大・金研

T. Odagaki, S. Awaji, T. Nishizaki, K. Watanabe and N. Kobayashi  
 Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

上部臨界磁場  $B_{c2}$  は超伝導現象を理解する上で重要なパラメータである。特に銅酸化物高温超伝導体に代表される  $d$  波超伝導体においては、従来の低温超伝導体などの  $s$  波超伝導体に見られる上凸の温度依存性とは劇的に異なる下凸の振る舞いを示す[1-3]。銅酸化物高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (YBCO) において、アンダードーピングでは他の  $d$  波超伝導体と同様の振る舞いを示す[4]が、最適ドーピングでは上凸の振る舞いを示す[5]という報告がある。このことは、他の  $d$  波超伝導体における数々の報告と矛盾している。

YBCO は、最適ドーピングでは  $B_{c2}$  が非常に大きく、アンダードーピングでは良質な単結晶を作製する事が困難なために  $B_{c2}$  の報告はほとんどない。そこで本研究ではアンダードーピングから最適ドーピングまでの試料の  $B_{c2}$  を測定し、そこから  $B_{c2}$  の温度依存性におけるキャリア量依存性を明らかにする事を目的とした。

### 2. 実験方法

#### 2-1. 試料の準備

本研究で使用した YBCO 単結晶は東北大金研西崎助教により提供していただいたものである。キャリア量の異なる試料は熱処理による酸素量の調節を行う事で作製した。Tab. 1 に示したように、最適ドーピング付近の試料は酸素雰囲気中、600、620°C、5、7 日間、アンダードーピングの試料は窒素雰囲気中、470、480°C、3、5 日間熱処理を行う事で作製した。

#### 2-2. 磁場中電気抵抗測定

電気抵抗の測定には直流四端子法を用い、磁場範囲 0 - 17 T、温度範囲 4.2 - 300 K までで測定を行った。磁場は 20T 超伝導マグネットを使用して  $c$  軸に平行方向に印加し、温度はヘリウムガスフローによ

Table 1 Annealed conditions of YBCO single crystals.

	熱処理 温度(°C)	熱処理 時間(日)	雰囲気	臨界温度 (K)
#1	470	5	N <sub>2</sub>	43.0
#2	480	5	N <sub>2</sub>	41.3
#3	470	5	N <sub>2</sub>	45.5
#4	470	5	N <sub>2</sub>	51.7
#5	480	3	N <sub>2</sub>	55.4
#6	470	5	N <sub>2</sub>	56.5
#7	480	5	N <sub>2</sub>	65.4
#8	600	7	O <sub>2</sub>	81.9
#9	620	5	O <sub>2</sub>	85.3
#10	600	7	O <sub>2</sub>	93.6

り調整した。

#### 2-3. 上部臨界磁場 $B_{c2}$ の決定方法

本研究では常伝導抵抗を直線で外挿し、その傾きと切片を 50% にした直線と電気抵抗の温度依存性との交点を臨界温度  $T_c$  とした。また、その時印加していた磁場をその温度における  $B_{c2}$  とした。

#### 2-4. 解析

解析には小山-立木によるモデル[6]を用いた。このモデルでは  $d_{x^2-y^2}$  対称性と  $d_{xy}$  対称性の位相をずらして混成する事で、 $B_{c2}$  の低温での急激な増大を説明しており、 $B_{c2}$  は下式のように与えられる。

$$B_{c2}(t) = C \left[ \frac{1-t}{2(1-v_p)} \left\{ 1 - \frac{\alpha}{1-t} + \sqrt{\left(1 + \frac{\alpha}{1-t}\right)^2 - 4v_p \left(\frac{\alpha}{1-t}\right)} \right\} \right] \dots (1)$$

ここで  $C = \phi_0 / 2\pi \xi^{(+)}(0)^2$ 、 $v_p = m^{(+)} m^{(-)} \gamma_p^2 / g^2 \hbar^4$ 、 $\langle \xi^{(+)}(0) \xi^{(-)} \rangle^2$  であり、 $\phi_0$  は磁束量子、 $\xi$  はコヒーレンス長、 $m$  は有効質量、 $g$  は  $e/\hbar c$  で  $e$  は電子の電荷、 $\hbar$  はプランク定数、 $c$  は光速である。(±) はそれぞれ  $d_{x^2-y^2}$  と  $d_{xy}$  対称性に対応している。また、 $\alpha$  は混成の度合いを表している。

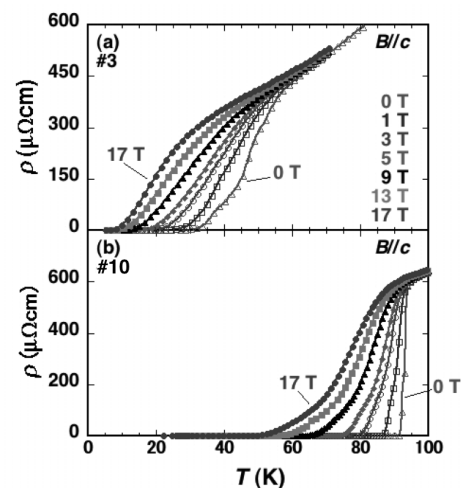


Fig. 1 The temperature dependence of the resistivity in the magnetic fields. (a) Underdoped YBCO (#3). (b) Optimal YBCO (#10).

### 3. 実験結果

Fig. 1(a)にアンダードープ (#3)、Fig. 1(b)に最適ドープ (#10) の各磁場中における電気抵抗率の温度依存性を示した。アンダードープにおいて9 T程度までは最適ドープと同様にブロードニングが観測されたが、13 T以上では転移の幅が小さくなることが観測された。これは磁場によって転移が低温側へとシフトしたために、熱ゆらぎによる寄与が減少したことによるものと考えられる。

電気抵抗率の温度依存性から決定した  $B_{c2}$  の温度依存性を Fig. 2 に示した。アンダードープ領域の試料では、 $d$  波超伝導体に見られる下凸の振る舞いが観測されたが、最適ドープ付近の試料では  $B_{c2}$  が非常に大きいため 17 T までの磁場では明確な変化が観測されず、ほぼ直線、あるいは若干上凸の傾向が観測された。このことに関しては  $T_c=70-80$  K 程度の試料において 28T ハイブリッドマグネットを使用した更なる高磁場までの実験が必要である。

$B_{c2}$  の温度依存性について、小山-立木モデルを用いてフィッティングを行った。#3、#10 におけるフィッティング結果と実験結果の比較を Fig. 3 に示した。この結果から、実験の範囲内に置いてフィッティング結果が良く一致していることがわかる。Fig. 4 にフィッティングから得られたパラメータ  $\alpha$ 、 $\nu_p$  と  $T_c$  の関係を示した。 $\alpha$  は  $T_c$  が高くなるにつれて指数関数的に減少していくことが分かり、 $\nu_p$  は  $T_c$  の違いに依らずほぼ 1 程度の値を示していることが分かった。このことから  $d$  波対称性である  $d_{x^2-y^2}$  と  $d_{xy}$  の混成の度合いがキャリア量によって変化し、キャリア量が最適ドープへと近づいていくに従い  $d_{xy}$  の寄与が相対的に減少していくことが分かった。

### 4. 考察

キャリア量の違いにおける、 $B_{c2}$  の温度依存性における振る舞いや  $d_{x^2-y^2}$  と  $d_{xy}$  の混成の度合いの変化は  $ab$  面内の異方性から解釈することができる。YBCO は斜方晶であり、アンダードープから最適ドープまでキャリアをドープしていくと  $b$  軸長が伸び、 $a$  軸長が縮む。そのため、キャリア量が増えると  $a$ 、 $b$  軸の比が増大していく傾向がある。同じ Y 系である  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  では  $T_c=80$  K であるが立方晶であり、 $B_{c2}$  の温度依存性は下凸の振る舞いを示す[7]。また、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$  や  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  も下凸の振る舞いを示し、これらの物質の結晶構造もまた立方晶である[3]。これらのことから、超伝導面内の異方性が  $d_{x^2-y^2}$  と  $d_{xy}$  の混成に対して何らかの影響を与えていることが考えられる。

### 5. まとめ

本研究ではキャリア量の異なる YBCO 単結晶を製作し、磁場中電気抵抗測定の結果から  $B_{c2}$  を決定した。また、 $B_{c2}$  の温度依存性に関して小山-立木モデルを用いて解析を行った。このモデルにおける  $B_{c2}$

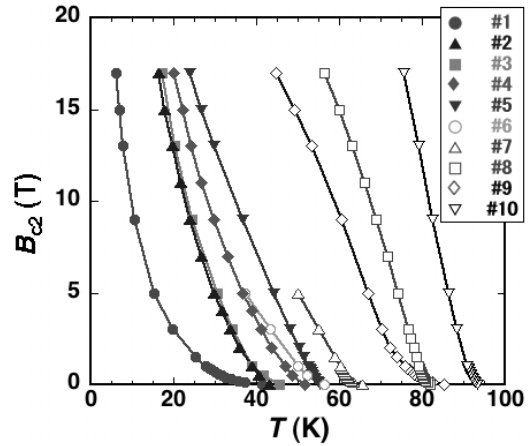


Fig. 2 The temperature dependence of the upper critical field in YBCO single crystals.

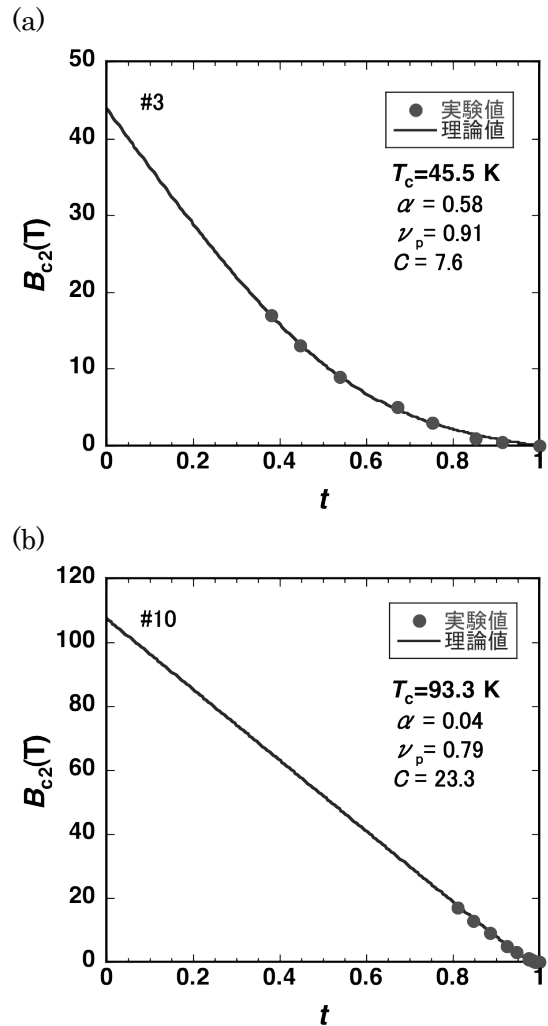


Fig.3 Measured values for the temperature dependence of upper critical field ( $B \parallel c$ ) in YBCO single crystals and the theoretical Koyama-Tachiki curves. (a)#3, (b)#10.

の式を用いたフィッティングから  $d_{x^2-y^2}$  と  $d_{xy}$  の混成のパラメータである  $\alpha$  が最適ドープに近づくにつれ指数関数的に減少していくことが分かった。このことから、YBCO の最適ドープ付近の領域では  $d_{xy}$  の寄与が抑制されていることが分かる。この原因としては超伝導面内の異方性が考えられる。

参考文献

- [1] A. P. Mackenzie *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**(1993) 1238.
- [2] M. S. Oshfisky *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**(1993) 14.
- [3] Y. Ando *et al.*, Phys. Rev. B **60**(1999) 12475.
- [4] V. F. Gantmakher *et al.*, JETP **88**(1999) 148.
- [5] T. Sekitani *et al.*, Physica B **346-347**(2004) 319.
- [6] T. Koyama, M. Tachiki, Physica C **263**(1996) 25.
- [7] G. Triscone *et al.*, Physica C **168**(1990) 40.

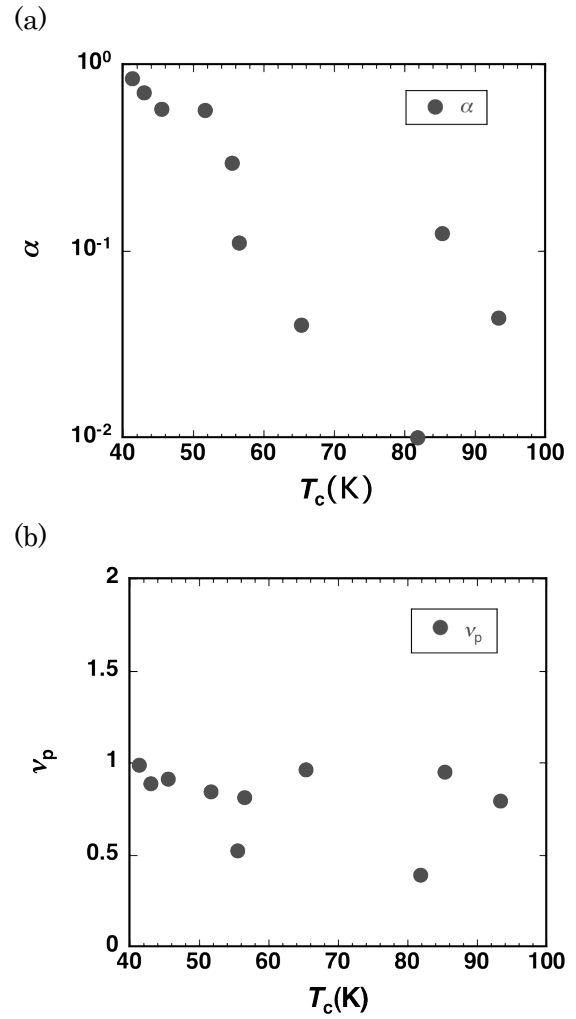


Fig. 4 The fitted parameters in eq. (1) as a function of critical temperature. (a) $\alpha$ , (b) $\nu_p$ .