

精密化学組成制御した RE123 超伝導体のピンニング機構解明

Mechanisms of the Flux Pinning in RE123 Superconductors with Precisely Controlled Chemical Composition

東京大学・大学院総合文化研究科、物性研 石井 悠衣

東京大学・大学院工学系研究科 荻野 拓, 下山 淳一

東北大学・金属材料研究所 淡路 智

Yui Ishii^{1,2}, Hiraku Ogino³, Jun-ichi Shimoyama³ and Satoshi Awaji⁴

¹Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

²The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

³Graduate School of Engineering, University of Tokyo

⁴IMR, Tohoku University

1. はじめに

希土類 123 ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; RE123) 超伝導体は液体窒素冷却応用のほか、冷凍機冷却による低温・高磁場応用も期待されている。こうした低温応用においては、77 K で Y123 より J_c の高い Gd123 の利用が検討されてきている。しかし、RE123 における J_c の温度依存性を定量的に比較した例はこれまでなく、 J_c の温度依存性の決定因子は明らかではない。一方、本研究ではこれまでに希薄濃度でドーブした Co などの不純物イオンが有効なピンニングセンターとなり、RE123 の J_c 特性を大きく改善することを、系統的な研究を通じて明らかにしてきた¹⁾。そこで本研究では支配的なピンニングセンターがそれぞれ少量の酸素欠損、ドーブした Co イオン、Gd 過剰領域となっている RE123 単結晶および Gd123 バルクを用い、それらの J_c の温度依存性を幅広い磁場下において比較した。

2. 実験

BaZrO_3 坩堝を用いた自己フラックス法により空気中で undoped Y123, Co-doped Y123 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{Co}_z\text{O}_{7-\delta}$; $z = 0.008$) および undoped Gd123 単結晶を作製した。これらの Y123, Gd123 単結晶についてそれぞれ最終的に 375°C, 300°C で酸素アニールし、undoped Y123, Co-doped Y123 および Gd123 単結晶における支配的なピンニングセンターがそれぞれ少量の酸素欠損、ドーブした Co イオン、Gd123 過剰領域となるように酸素欠損量を十分に減らした。一方、Gd123 バルクについては、Gd123, Gd211 を 7 : 3 のモル比で混合し、このとき Pt を 0.5 wt% 添加した。一軸プレスよって 20 mm ϕ \times 10 mm のペレットに成型後、Nd123 単結晶を用いた cold seeding 法により空気中で熔融凝固を行った。熔融凝固時の冷却速度は 0.6°C h⁻¹ とした。得られたバルク体から種結晶直下方向に 1 mm の部分を切り出し、400°C で酸素アニールした。超伝導特性は SQUID 磁束計 (< 5 T), 引き抜き法 (< 9 T) および VSM (< 27 T) による磁化測定から評価し外部磁場は結晶の *c* 軸と平行に印加した。

3. 結果と考察

従来から J_c の温度依存性に対して、凝縮エネルギーの温度依存性と磁束クリープが支配的であると考えられてきたが、酸素欠損およびドーブした Co イオンと Gd 過剰領域がそれぞれ支配的なピンニングセンターとなっている undoped Y123, Co-doped Y123, undoped Gd123 結晶のピンニング特性においては、それらだけでは説明困難な相違点があることが明らかになった。すなわち、高温で有効であった Gd 過剰領域のピンニングが低温においてはあまり有効でないことがわかった。Fig. 1(a), (b) および(c)はそれぞれ undoped, Co-doped Y123 単結晶および undoped Gd123 バルクの磁気相図上における J_c の等高線であるが、undoped, Co-doped いずれの Y123 単結晶においても undoped Gd123 バルクより等高線間隔が狭く、温度の低下に伴う J_c の増加がより急峻であることがわかる。さらに、これらの undoped および Co-doped Y123 単結晶では、 J_c の高い領域が高磁場まで広がっているのに対し、Gd123 バルクにおいてはこの J_c の高い領域が低磁場付近に限られていることが明らかになった。この傾向は、より低温で酸素アニールし、キャリアのより強いオーバードープ状態に調節した Gd123 単結晶においても確認された。液体窒素温度下で高い特性を示すことから、これまで Gd123 は冷凍機を用いた低温高磁場応用に対しても期待されてきたが、以上の結果は RE 固溶の起こりやすい Gd123 などの中軽希土類 123 はそれらには適さないことを示唆している。

ドーブした不純物イオンや少量の酸素欠損は、ピンニングセンターとしての実効的なサイズの極めて小さい点欠陥とみなすことができる。一方で Nd123 や Gd123 などの中軽希土類 123 において観察される RE 過剰領域は、数 10 nm 程度の大きさを持つと考えられている^{4,6)}。そこで、温度の低下によりコヒーレンス長が短縮すれば、不純物イオンや少量の酸素欠損が、Gd 過剰領域より効率的に磁束線をピンニングできるようになると考えられ、これらの試料が広い磁場領域において Gd123 より強い J_c の温度依存性を示すことを説明できる。

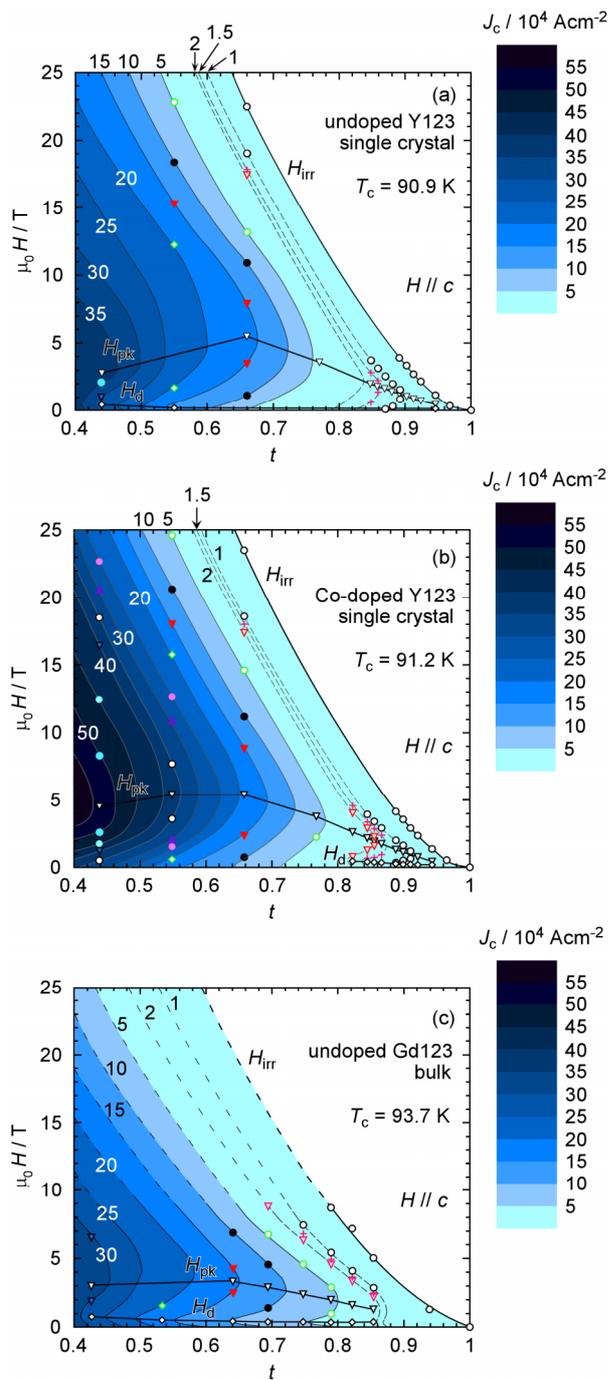


Fig. 1 J_c contours in H - T phase diagram of (a) undoped and (b) Co-doped Y123 single crystals ($z = 0.008$) annealed at 375°C and (c) Gd123 bulk annealed at 400°C . t is the normalized temperature ($= T / T_c$).

Fig. 2 は、様々な単結晶の J_c の温度依存性を 40 K における J_c でそれぞれ規格化し、比較している。この図から明らかのように、RE 固溶の起こっている Nd123 単結晶や Gd123 単結晶と、Y123 単結晶はそれぞれ異なるマスターカーブで表すことができることが明らかになった。これは、RE 固溶領域の示す J_c の温度依存性と、より小さなピンニングセンターである酸素欠損や不純物イオンの示す J_c の温度依存性が異なることを裏付ける結果である。

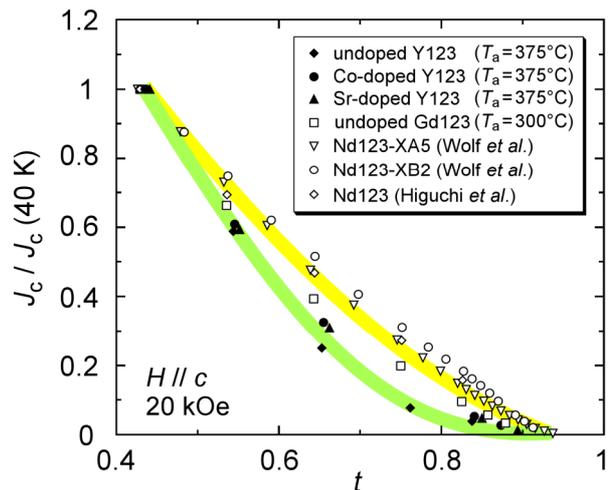


Fig. 2 The normalized temperature dependences of J_c normalized by $J_c(40 \text{ K})$ for various RE123 single crystals prepared in this study and reported in several references²⁻³⁾. T_a means the oxygen annealing temperature. The applied magnetic field was 20 kOe. t is the normalized temperature ($= T / T_c$).

4. まとめ

本研究により、RE123 材料を用いた高磁場応用に対しては、現在注目を集めている固溶の起こりやすい中軽希土類 123 ではなく、固溶の起こりにくい重希土類 123 へ開発の指針を再転換することが必要であり、広い温度範囲で強いピンニング力を示す不純物ドーパが、RE123 の有す高いポテンシャルを最大限に引き出すための鍵であることが明らかになった。これらの不純物イオンは c 軸方向へ流れる J_c に対しても原理的に改善可能である。また本研究により得られた知見は、低温応用に大きなシェアのある Bi2212 丸線導体に対しても、点欠陥の示す強い J_c の温度依存性を利用することによって飛躍的な超伝導特性や通電特性の向上が可能であることを示唆している。

本研究で得られた全ての知見は、RE123 のみならず、コヒーレンス長の本質的に短い銅酸化物全般や最近発見された鉄系超伝導体などにも共通するものであると思われ、これら異方的な超伝導体の磁束ピンニング機構の発展や材料設計への有用な知見として今後活用されることを期待している。

参考文献

- [1] Y. Ishii, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 202514.
- [2] T. Higuchi *et al.*, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 1514.
- [3] Th. Wolf *et al.*, *Phys. Rev. B* **56** (1997) 6308.
- [4] T. Egi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **67** (1995) 2406.
- [5] W. Ting *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 770.
- [6] M. Nishiyama *et al.*, *Physica C* **335** (2000) 251.