

重イオンビームを用いた高性能高温超伝導材料の設計

Material design for high-performance high- T_c superconductors by using heavy-ion irradiation

末吉 哲郎¹⁾, 千星 聡²⁾, 尾崎 壽紀³⁾, 坂根 仁⁴⁾, 西寄 照和¹⁾, 石川 法人⁵⁾

Tetsuro SUEYOSHI, Satoshi SEMBOSHI, Toshinori OZAKI, Hitoshi SAKANE, Terukazu NISHIZAKI,
Norito ISHIKAWA

¹⁾九州産業大学 ²⁾島根大学 ³⁾関西学院大学 ⁴⁾住重アテックス ⁵⁾原子力機構

(概要)

c 軸配向した高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜において、膜面(ab 面)方向に流れる電流に対して平行に磁場を印加した縦磁場下での臨界電流密度 J_c 特性を改善するために、 c 軸に対する重イオンビームの照射角度を $\phi = 87.5^\circ$ まで傾けて縦磁場方向に近い角度の照射欠陥の導入を試みた。透過型電子顕微鏡を用いた試料の断面像観察から、80 MeV Xe イオンにより $\phi = 87.5^\circ$ の角度で柱状の照射欠陥が試料全体にわたって形成していることを確認した。 $\phi = 87.5^\circ$ の角度で柱状の照射欠陥を導入した試料では、未照射試料と比較して縦磁場下の J_c が高い値を示した。ただし、縦磁場下の J_c は柱状欠陥の傾斜角度に非常に敏感であり、 $\phi = 85^\circ$ 以下の傾斜角度では低下の傾向を示した。以上の結果より、高温超伝導薄膜を貫通する柱状欠陥の導入はその体積分率が大きいために縦磁場下では電流パスに対する障害物として主に作用するが、縦磁場方向に対して柱状欠陥の傾斜角度を 5° 未満にすることで有効なピン止め点として作用することを初めて明らかにした。

キーワード:

高温超伝導線材, 臨界電流密度, 縦磁場効果, 磁束ピンニング, 照射欠陥

1. 目的

超伝導体に流れる電流に対して平行に磁場を印加した縦磁場下では、超伝導体に侵入する量子化磁束に対して原理的にローレンツ力が作用しない、いわゆる force-free 状態であるため、電流の方向に対して垂直な磁場(横磁場)下より J_c の増加を見込むことができる。これを、縦磁場効果と呼ぶ[1]。この縦磁場効果は、超伝導ケーブル構造において内側導体と外側導体にツイストを施すことで、自己磁場を利用して縦磁場を積極的に作り出す、force-free ケーブルを用いることで応用することができ、通常の超伝導ケーブルより大電流を流せる直流送電ケーブル応用が現在検討されている[2]。ただし、縦磁場下の超伝導体の量子化磁束においては、Lorentz 力の代わりに電流による自己磁場により歪みが生じ、この歪みを緩和する方向に force-free トルクが作用し、回転運動が生じる。このため、縦磁場下での高い J_c をさらに有効に利用するためには、量子化磁束の回転運動を抑制するための磁束ピン止めが、横磁場の場合と同様に必要とされる[3]。これまで、縦磁場下ではナノ粒子が有効なピン止め点として作用することが報告されているが[4-6]、一方横磁場下で有効なピン止め点である柱状欠陥の影響についてはほとんど調べられていない[7]。

本研究では、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜に対して重イオンビームの入射角度を膜面に低角度 ($2.5^\circ \sim 5^\circ$) に制御することで、縦磁場方向に近い向きとなるように柱状欠陥の導入を試み、縦磁場下の J_c 特性に対する柱状欠陥のピン止めの影響について調べた。

2. 方法

PLD 法で作製した c 軸配向 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜に対し、原子力機構のタンデム加速器にて Xe イオンを用いて照射を行った。 c 軸に平行な方向な柱状欠陥の導入においては、照射エネルギーは 200 MeV として、照射量 4.84×10^{10} ions/cm² (マッチング磁場 $B_\phi = 1$ T) にて照射を行った(試料 C00)。一方 ab 面に対して低角度での柱状欠陥の導入においては、照射エネルギーは 80 MeV として、 c 軸とブリッジ方向がなす面内で、 c 軸に対して $\phi = 87.5^\circ$ および $\phi = \pm 85^\circ$ & $\pm 87.5^\circ$ の照射角度にて、2つの試料を用意した(試料 C87, S87)。照射

量は $\phi = 87.5^\circ$ の試料で 4.84×10^{10} ions/cm², $\phi = \pm 85^\circ$ & $\pm 87.5^\circ$ では総照射量は 9.72×10^{10} ions/cm² (マッチング磁場 $B_\phi = 2$ T) とした. 臨界電流密度 J_c は, 四端子法により電界基準 10^{-4} V/m を用いて定義した.

3. 結果及び考察

図1に, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の c 軸に対して $\phi = \pm 85^\circ$ & $\pm 87.5^\circ$ で 80 MeV Xe イオンを照射した試料 S85 の透過型電子顕微鏡の断面像を示す. 薄膜表面から約 2/3 の断面領域にわたって, 連続した柱状の照射欠陥の存在を確認することができる (白い矢印). 柱状の照射欠陥の径は約 5 nm で, その向きはイオンビームの照射角度 $\phi = \pm 87.5^\circ$ に近い. このことより, 80 MeV Xe イオンにより, 膜面に沿った方向に近い角度で高温超伝導薄膜中に柱状欠陥を形成されたことを確認できる. 一方, 薄膜の表面から膜厚方向に遠い基板側では, イオンの入射角度より大きい向きの線状の照射欠陥が存在している. これは, 入射イオンが試料の膜厚方向に進むにしたがってエネルギーを失うことで, イオンパスが散乱したためと考えられる.

図2に, 未照射試料と照射試料 C00 および C87 の J_c の磁場角度依存性の比較を示す. ここで, 磁場の角度 ϕ は c 軸となす角度であり, c 軸と電流の方向がなす面内で磁場の傾きを変えている. 磁場と c 軸の方向が平行となる $\phi = 0^\circ$ では, C00 の J_c が高い値を示すが, 磁場が電流の方向に近づくとき, 未照射試料および C87 の J_c が急激に増加し C00 より高い値を示す. C00 では, c 軸方向の柱状欠陥の存在により電流パスの局所的な迂回が生じることで, 電流と磁場の平行な関係が崩れるために, 縦磁場効果が生じ難いことが考えられる[5]. 一方, 縦磁場下 ($\phi = 90^\circ$) での C87 の J_c は, 縦磁場下で未照射試料とほぼ同じ値を示す. 以前, 我々は $\phi = \pm 80^\circ$ の柱状欠陥を導入した場合, 縦磁場下での J_c が減少することを報告している[7]. このことから, 柱状欠陥の存在が縦磁場効果の妨げとならないためには, 柱状欠陥の傾きを縦磁場方向に近づける必要があることが示唆される.

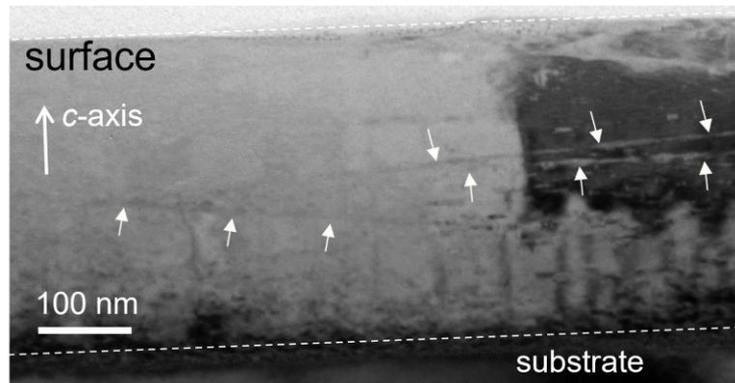


図1 c 軸に対し $\phi = \pm 85^\circ$ & $\pm 87.5^\circ$ で 80 MeV Xe イオンを照射した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の透過型電子顕微鏡による断面観察像.

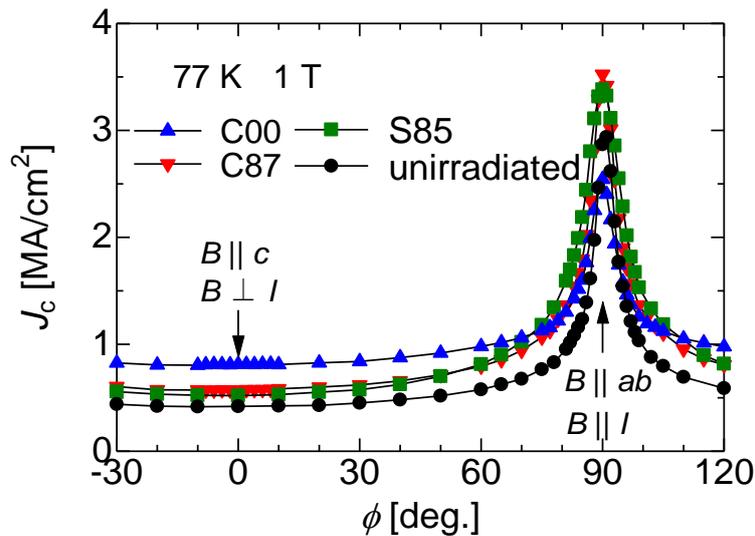


図2 77 K, 1 T における J_c の磁場角度依存性 (磁場角度 ϕ は c 軸と電流 I のなす面内の角度, $\phi = 0^\circ$ で $B \perp I$, $\phi = 90^\circ$ で $B \parallel I$).

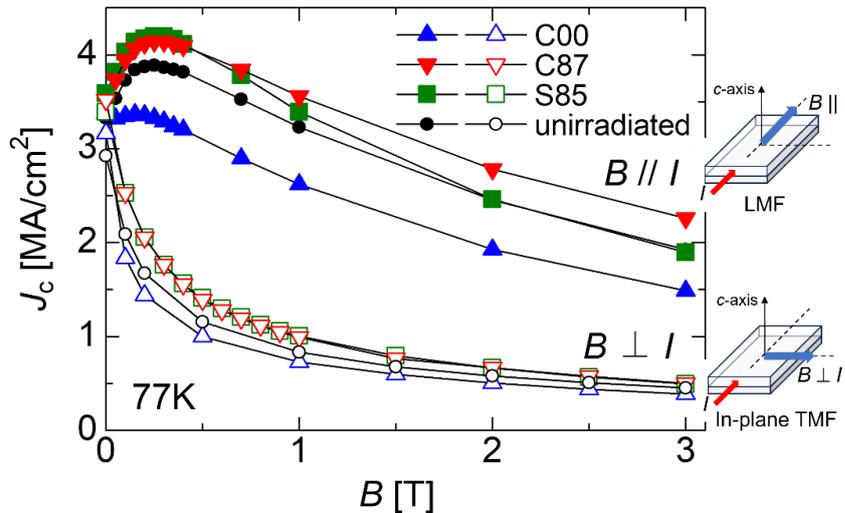


図3 面内垂直磁場($B \perp I$)および縦磁場 ($B \parallel I$)における J_c の磁場依存性 (77 K) .

図3に、 ab 面に平行な横磁場 (In-plane transverse magnetic field, In-plane TMF) および縦磁場 (Longitudinal magnetic field, LMF) における 77 K での J_c の磁場依存性を示す。全ての試料において、横磁場より縦磁場の J_c が高い値を示している。これより、縦磁場効果が明らかに現れていることを確認できる。また、横磁場では磁場に対して単調に J_c が減少しているのに対し、縦磁場では 0.2-0.3 T でピークを示し、更に高い J_c を示す振る舞いがみられる。このピークは、縦磁場特有の J_c 特性として知られている[1, 5]。 ab 面に近い角度で柱状の照射欠陥を導入した C87 と S85 において、縦磁場の J_c は未照射試料より高い値を示している。これは、膜面方向に近い角度に導入した柱状欠陥が、縦磁場におけるピン止め点として作用している可能性が考えられる。また、縦磁場下の C87 の J_c は高磁場においても S85 と比較して高い値を示している。

C87 においては、膜面方向に対して 2.5° の小さな傾角で柱状欠陥が導入されているために、縦磁場下で膜面方向に侵入する量子化磁束に対して有効なピン止め点として作用し、縦磁場中の J_c の増加を促したと考えられる。これに対し、S85 では膜面に対して大きな傾角 $\pm 5^\circ$ (c 軸に対しては $\phi = \pm 85^\circ$) の柱状欠陥を含むために、ピン止め効果が弱い。さらに、一般にピン止め点として作用する不純物や結晶欠陥は、縦磁場においては電流と磁場の平行関係を崩すような電流の迂回を誘導するため、縦磁場効果が弱められたと考えられる。

一方、C00 の縦磁場下の J_c は、未照射試料より低い値を示し、縦磁場下で特徴的な低磁場での J_c のピークの高さも低い。これは、C00 において c 軸に沿って導入した柱状欠陥は縦磁場に対して垂直であるために、ほとんどピン止め作用を示さないこと、さらには c 軸に沿った柱状欠陥は電流の迂回も誘導するため、縦磁場効果が未照射試料より弱くなったためと考えられる。

4. 引用(参照)文献等

- [1] Yu F. Bychikov, V. G. Cereshchagin, M. T. Zuev, V. R. Karasik, G. B. Kurganov, and V. A. Mal'tsev, JETP Lett. vol. 9 (1969) 404.
- [2] T. Matsushita, M. Kiuchi, and E. S. Otabe, Supercond. Sci. Technol. vol. 25 (2012) 125009.
- [3] T. Matsushita, J. Phys. Soc. Jpn. vol. 54 (1985) 1054.
- [4] A. Tsuruta, S. Watanabe, Y. Ichino, and Y. Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 53 (2014) 078003.
- [5] K. Sugihara, Y. Ichino, and Y. Yoshida, Supercond. Sci. Technol. vol. 28 (2015) 104004.
- [6] R. Kido, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita, A. K. Jha, and K. Matsumoto, Phys. Proc. vol. 81 (2016) 117.
- [7] T. Sueyoshi, Y. Iwanaga, T. Kai, T. Izumi, T. Fujiyoshi, and N. Ishikawa, J. Phys. Conf. Ser. vol. 871 (2017) 012043.