

低角度で重イオン照射した高温超伝導体の照射欠陥構造とピン止め特性

Morphology of irradiation defects and flux pinning properties in high- T_c superconductors irradiated with a low angle incidence heavy-ion beam

末吉 哲郎¹⁾, 榎畑 龍星²⁾, 山口 裕史²⁾, 石川 法人³⁾

Tetsuro SUEYOSHI, Ryusei Enokihata, Hiroshi YAMAGUCHI, Norito ISHIKAWA

¹⁾九州産業大学 ²⁾熊本大学 ³⁾原子力機構

(概要)

高温超伝導体 c 軸配向 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜に対して複数回の重イオン照射により、 c 軸方向 ($\theta = 0^\circ$) と ab 面に対して低角度方向 ($\theta = \pm 80^\circ \sim \pm 85^\circ$) へ段階的に線状の照射欠陥 (線状欠陥) を導入し、臨界電流密度 J_c および磁束クリープに関するパラメータである n 値の磁場角度依存性への影響について調べた。照射方向に対する照射の順に関係なく、2回の照射によって両照射方向における J_c と n 値は未照射試料より増加を示した。特に、 n 値においては1回目の照射方向で増加した n 値を維持しながら、2回目の照射方向において n 値の増加が追加された。この結果は、互いに大きく方向が異なる線状欠陥は磁束のチャネルフローを引き起こすことなく、他の柱状欠陥の磁束ピン止めを妨げずに、それぞれの線状欠陥方向の磁束ピン止めを増加できることを示唆している。ただし、 J_c においては1回目の照射方向で増加した J_c は、2回目の照射により減少する傾向を示した。この原因は、2回目の異なる方向への線状欠陥の追加導入は、1回目の照射方向においてはピン止めほとんど寄与せず、超伝導電流経路の減少のみ引き起こしているためと考えられる。

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

結晶構造に異方性のある高温超伝導体においては、磁界方向に依存しない臨界電流密度 J_c 特性を示す材料開発が求められる。このため、 c 軸方向の磁界に対する量子化磁束のピン止め点の導入と同時に、 ab 面方向にも磁束ピン止め構造を構築することがポイントになる。ここで、重イオン照射により高温超伝導体中に形成される線状の照射欠陥 (線状欠陥) は、磁界中で試料内に生じる量子化磁束に対して効率的にピン止め作用し、磁界中の臨界電流密度 J_c を大きく改善するピン止め点として知られている¹⁾。特に、線状欠陥に沿って磁界が印加されたときにピン止め効果は最大となり、 J_c が大幅に向上する。この線状欠陥を c 軸方向の磁界に対するピン止め点として、現在 c 軸方向での J_c は実用レベルの値まで向上するに至っている^{2,3)}。一方、 ab 面方向の磁界における J_c の改善については、(i) 異方性に起因して c 軸方向に比べて高い J_c を示していること⁴⁾、(ii) 薄膜形状の試料において線状欠陥の導入が困難であることのために、これまでに積極的な試みはなされていないのが現状である。

本研究では、高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜において、 c 軸および ab 面の両方向の磁界での J_c を同時に増加できるピン止め構造を明らかにするために、複数回の重イオン照射により c 軸方向 ($\theta = 0^\circ$) と ab 面に対して低角度方向 ($\theta = \pm 80^\circ \sim \pm 85^\circ$) へ段階的に線状の照射欠陥 (線状欠陥) を導入し、互いに異なる向きの線状欠陥のピン止めの重ね合わせ効果について J_c および磁束クリープに関するパラメータである n 値の磁場角度依存性への影響から調べた。

2. 方法

c 軸配向の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜は、KrF エキシマレーザを用いたパルスレーザ蒸着法により SrTiO_3 基板に作製した。試料の膜厚は、約 300 nm である。この薄膜を幅約 40 μm 、長さ 1 mm のブリッジ状にフォトリソグラフィ加工した後、重イオン照射、そして臨界電流密度の測定を行った。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜に対する重イオン照射は、原子力機構のタンデム加速器にて 80 MeV および 200 MeV の Xe を用いて行った。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の c 軸に対して、入射イオンの角度 θ を変えることで、 c 軸方向および ab 面方向に近い角度に 2 回に分けて線状欠陥を導入した。ここで、照射エネルギー 200 MeV では、入射角度に依らずに試料を貫通する連続な線状欠陥を形成する⁵⁾。一方、80 MeV の Xe イオンでは、 c 軸方向には短く、不連続な線状欠陥を

形成し、入射角度が ab 面方向に近付くと連続な線状欠陥を形成することが報告されている⁶⁾。1 回目の照射では、200 MeV の Xe イオンにより、試料 A においては入射角度 $\theta = \pm 80^\circ$ にて、試料 B においては $\theta = 0^\circ$ 方向に照射を行った。2 回目の照射においては 80 MeV の Xe イオンを用いて、試料 A では $\theta = 0^\circ$ 、試料 B には $\theta = \pm 85^\circ$ でビームを入射した。照射量は、各回の照射において 6.78×10^{10} ions/cm² であり、これは形成される線状欠陥と磁束線の密度が一致する磁場、マッチング磁場 B_{ϕ} に換算すると 0.7 T に相当する照射量となる。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。 J_c 特性の測定では、磁場は電流方向と常に垂直に印加し、 J_c の磁場角度依存性の測定では磁場と c 軸のなす角度を θ として評価した。ここで、磁場の方向は照射方向が作る面内で変えて測定を行った。

3. 結果及び考察

図 1 (a) に、照射 1 回目で $\theta = \pm 80^\circ$ 、2 回目に $\theta = 0^\circ$ でイオンビームを入射した YBa₂Cu₃O₇ 薄膜 (試料 A) の J_c の磁場角度依存性を示す。1 回目の照射によって形成される線状欠陥のピン止め効果により、 $\theta = 80^\circ, 100^\circ$ に J_c のピークが出現している。同様に、 n 値においてもその照射方向においてピークが生じているのを確認できる (図 1(b))。 $\theta = 0^\circ$ での 2 回目の照射後においては、1 回目の照射と同様に、その照射方向、すなわち $\theta = 0^\circ$ において J_c および n 値において増加を確認できる。ただし、1 回目の照射方向である ab 面方向付近においては、 J_c と n 値で 2 回目の照射による影響が異なる。すなわち、 J_c においては 1 回目の照射によって増加した ab 面方向付近の J_c は、2 回目の照射によって減少するが、 ab 面方向付近の n 値は 2 回目の照射の影響をほとんど受けずに、それぞれの照射による増加が単純に加算された振る舞いを示している。この照射欠陥の追加導入の効果は、1 回目の照射を $\theta = 0^\circ$ に、2 回目に $\theta = \pm 85^\circ$ と照射の順を変えた試料 B においても同様に確認された。磁界に対して大きく傾いた線状欠陥は、その線状欠陥に沿った量子化磁束のスライド運動を誘起し、ピン止め効果が低下することが報告されている⁷⁾。このスライド運動は、 J_c および n 値の減少に現れると考えられるが、図 1(b) および (d) において線状欠陥の導入方向である c 軸および ab 面近くの磁界で n 値の減少がみられないことから、互いに大きく方向が異なる線状欠陥の組み合わせにおいては、磁束のチャンネルフローを引き起こすことなく、他の柱状欠陥の磁束ピン止めを妨げないことが示唆される。一方、1 回目の照射で増加した J_c が 2 回目の照射によって低下したことについては、2 回目の照射欠陥は 1 回目の照射欠陥と大きく方向が異なるためにピン止めとして寄与せず、超伝導電流経路の減少のみ引き起こしていることによるものと考えられる。

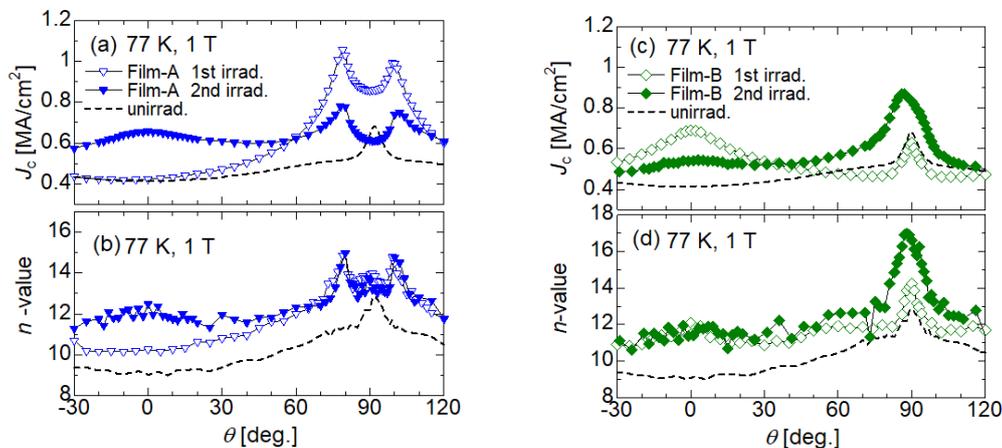


図 1. c 軸方向および ab 面方向近くに線状欠陥を順次導入した YBa₂Cu₃O₇ 薄膜の J_c の磁場角度依存性 (試料 A における (a) J_c と (b) n 値, および試料 B における (c) J_c と (d) n 値)。

4. 引用 (参照) 文献等

- [1] L. Civale, A. D. Marwick, T. K. Worthington, M. A. Kirk, J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, Y. Sun, J. R. Clem, F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* 67 (1991) 648.
- [2] A. Tsuruta, Y. Yoshida, Y. Ichino, A. Ichinose, K. Matsumoto, and S. Awaji, *Supercond. Sci. Technol.* 27 (2014) 065001.
- [3] S. Miura, Y. Tsuchiya, Y. Yoshida, Y. Ichino, S. Awaji, K. Matsumoto, A. Ibi, T. Izumi, *Supercond. Sci. Technol.* 30 (2017) 084009.
- [4] G. Blatter, M. V. Feigelman, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* 66 (1994) 1125.
- [5] T. Sueyoshi, Y. Furuki, T. Fujiyoshi, F. Mitsugi, T. Ikegami, A. Ichinose, N. Ishikawa, *Supercond. Sci. Technol.* 31

(2018) 125002.

[5] Tetsuro Sueyoshi, Tetsuya Kotaki, Yuichi Furuki, Takanori Fujiyoshi, Satoshi Semboshi, Toshinori Ozaki, Hitoshi Sakane, Masaki Kudo, Kazuhiro Yasuda, and Norito Ishikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 59 (2020) 023001.

[6] A. Petrean, L. Paulius, V. Tobos, H. Cronk, W. K. Kwok, *Physica C* 505 (2014) 65.

[7] T. Schuster, M. V. Indenbom, H. Kuhn, H. Kronmüller, *Phys. Rev. B* 50 (1994) 9499.