

REBCO コート線材におけるひずみ印加アニールによる J_c の向上 Improvement of J_c for GdBCO Coated Conductors by Annealing under Strain

鈴木 匠¹, 淡路 智¹, 小黒 英俊¹, 渡辺 和雄¹, 菅野 未知央², 町屋 修太郎³,
佐藤 眞直⁴, 和泉 輝郎⁵

¹ 東北大・金研, ² KEK, ³ 大同大, ⁴ JASRI, ⁵ SRL.

T. Suzuki¹, S. Awaji¹, H. Oguro¹, K. Watanabe¹, M. Sugano², S. Machiya³, M. Sato⁴, T. Izumi⁵

¹ Institute for Materials Research, Tohoku University

² KEK, ³ Daido University, ⁴ JASRI, ⁵ SRL

1. はじめに

希土類酸化物高温超伝導体REBa₂Cu₃O_y (REBCO, REは希土類元素)はコート線材と呼ばれる、テープ状の多層膜構造の線材として利用され、高い臨界電流密度 J_c を持つコート線材の長尺化が進んでいる。また、高強度の金属基板による優れた機械特性を持つことから、強磁場マグネット応用に向けた研究開発が行われている。コート線材を強磁場マグネットとして用いる場合、コイルに加工する場合や通電時のフープ応力が印加される場合など、様々な応力によるひずみが印加される。そのため、コート線材のひずみ依存性の理解は応用において非常に重要な要素となる。超伝導体はひずみにより、超伝導転移温度 T_c 、不可逆磁場 B_{irr} 、 J_c が変化する。単結晶においては、これらの圧力依存性はすでに様々な研究が行われている[1-2]。しかし、コート線材は超伝導層が双晶界面を形成し2軸配向していることにより、複雑なひずみ依存性を示すことが報告されている[3-4]。この双晶の存在により、単結晶の圧力効果との比較では理解できず、ひずみ効果の詳細な理解が難しくなっている。これまで、単結晶においては、圧力を印加してアニールを行うことにより、双晶が消失することが分かっている[5]。我々は、コート線材においてもひずみを印加してアニールすることにより双晶と残留ひずみが同時に制御できることを報告した[6]。しかし、そのひずみ印加アニールによる超伝導特性については不明である。一方で、マグネット応用等においてひずみが印加される場合に、線材の残留歪みを制御できれば更なる超伝導特性の向上が期待できる。本研究ではひずみ印加アニールにより双晶と残留ひずみを制御した試料における制御法と超伝導特性について議論する。

2. 実験方法

試料線材はPLD(Pulse Laser Deposition)法によって作製した GdBCO コート線材であり、基板はIBAD(Ion-Beam Assisted Deposition)法により作製されたMgOバッファ層を持つHastelloy基板である。また、最表面には保護層として20 μm のAgを用いた。

この試料に対して、ひずみを印加しながら、酸素雰囲気中で400 $^{\circ}\text{C}$ 、100時間アニールを行った。ひずみはSUSの円柱型ジグに巻きつけることで印加した。このひずみ量は、ジグの曲率を変化させることにより制御した。また、コート線材を巻きつけるときに超伝導層を外側にして巻きつけることにより、引っ張りのひずみを、超伝導

層を内側にして巻きつけることにより、圧縮のひずみを印加することができる。このひずみ印加アニールをそれぞれ引っ張りアニール、圧縮アニールとする。残留ひずみの測定はSPring8、BL46XUの放射光を用いて透過法により測定した。

臨界電流密度は試料をフォトリソグラフィ及びウェットエッチング技術を用いて、幅約100 μm 、長さ、約1 mmのブリッジ形状に加工し、直流四端子法を用いて通電法にて測定した。試料温度は、ヘリウムガスフローと試料ホルダー上のヒーターにより、精密にコントロールし、臨界電流決定の電界基準は1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。

3. 実験結果と考察

Fig.1 に線材長手方向における、(200)、(020)ピークのX線回折パターンを示す。as-received の線材のそれぞれのピーク強度はほぼ等しくなった。しかし、ひずみ印加アニールによりピーク強度とピーク位置がそれぞれ変化した。まず、ピーク強度は、圧縮アニールにより、(200)のピーク強度が増加した、これは、線材長手方向に a 軸を持つドメインが増加したことを示唆している。このドメインをAドメインとする。逆に、引っ張りアニールでは(200)のピーク強度が減少した。よって Bドメインが増加している。また、ピーク位置は、圧縮アニールによって低角度側へ、引っ張りアニールでは高角度側へ変化した。

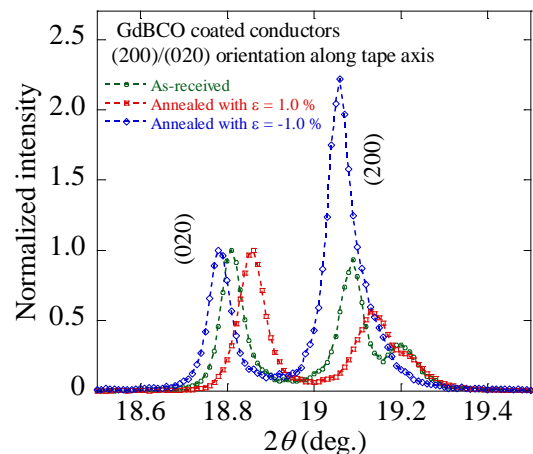


Fig.1. (200) and (020) reflections along the longitudinal direction after the annealing under the strains in the GdBCO coated conductors. Intensity was normalized by that of the (020) reflection for comparison.

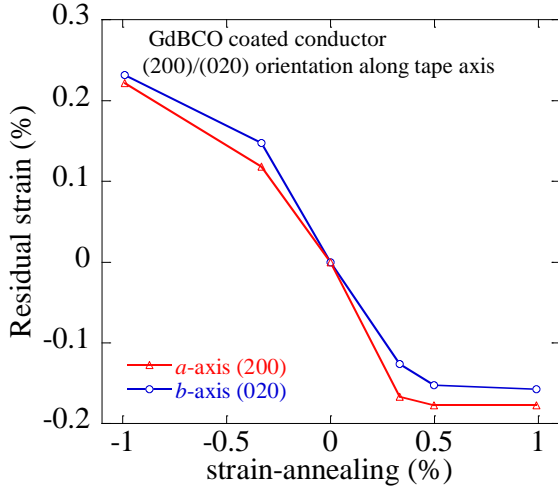


Fig. 2. Effective internal strains of GdBCO coated conductor after the annealing under the strains. Zero strain data is for the as-received sample.

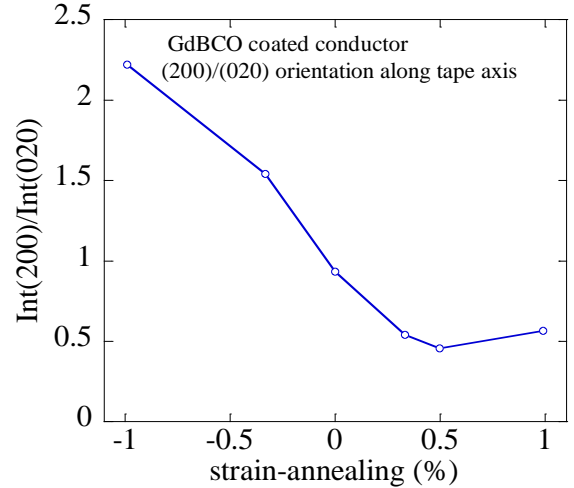


Fig. 3. Intensity ratio of (200) to (020) reflections of GdBCO coated conductor after the annealing under the strains. Zero strain data is for the as-received sample.

た。これは残留ひずみの変化に起因して、格子定数が変化していると考えられる。また、この格子定数の変化を有効残留ひずみとして、以下の式を用いて決定した。

$$\varepsilon_{(hkl)}^* = (d_{(hkl)} - d_{0(hkl)})/d_{0(hkl)}$$

ここで、 $\varepsilon_{(hkl)}^*$ は有効残留ひずみ、 $d_{(hkl)}$ は格子定数、 $d_{0(hkl)}$ は as-received の格子定数とした。Fig. 2 に有効残留ひずみ $\varepsilon_{(200)}^*$ 、 $\varepsilon_{(020)}^*$ の熱処理時ひずみ依存性を示す。図から、 $\varepsilon_{(200)}^*$ と $\varepsilon_{(020)}^*$ はどちらも -0.2 から 0.2 まで変化したことが分かる。しかし、その変化は 0.5% 以上のひずみを印加した場合に飽和傾向を示した。次に、Fig. 3 に (200)、(020) ピークの強度比 $\text{Int}(200)/\text{Int}(020)$ を示す。As-received の試料はこの強度比が 0.93 となり、線材長手方向にほぼ等しく A ドメインと B ドメインが存在していた。図に示した用に、この強度比は、ひずみ量の増加に伴い減少する。しかし、有効残留ひずみと同様に 0.5% 以上では飽和した。このひずみの飽和はクラックが入る等、超伝導層に実際に印加されるひずみが減少しているためだと考えられる。これらの結果から、ひずみ印加アニールにより残留ひずみと双晶の制御が可能であることが示唆された。

Fig. 4、5 に 0.5% 引張りアニールと as-received の試料における $B//c$ 方向の 3 T の J_c の温度依存性と J_c の磁場依存性を示す。磁場依存性は、77.3 K では $B//c$ 方向で J_c が低下しているが、 $B//ab$ 方向では高磁場領域以外では J_c が向上した。また、60 K においては磁場方向によらず、すべての磁場範囲で J_c が向上することが分かった。一方、 J_c の異方性も上昇した。温度依存性は、引張りアニールの試料は温度依存性が as-received の試料に比べて大きく、高温においてはアニールにより J_c が低下しているが、低温で大幅に J_c が向上した。また、0.5% 引張りアニールと as-received の試料における T_c がそれぞれ、92.1 K と 88.2 K である。これらの変化はアニールによりキャリア量が増加したと考えられる。

Fig. 6 に 0.5% 引張りアニールと as-received の試料に

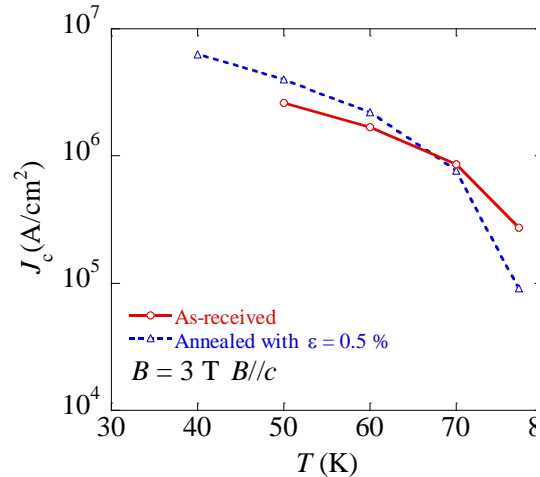


Fig. 4. Temperature dependence of J_c after the annealing under the strains and the as-received in the GdBCO coated conductors at 3 T for $B//c$.

における 77.3 – 40 K の J_c の磁場印加角度依存性を示す。 $\theta = 90^\circ$ 方向にイントリンジックピンや積層欠陥などの ab 相関ピンによるシャープなピークが存在した。さらに $\theta = 0^\circ$ 方向にブロードなピークが存在した。このブロードなピークは双晶や刃状転位などの c 軸相関ピンによるものである。ひずみ印加アニールの試料においては as-received の試料に比べ、ブロードなピークが小さくなり、77.3 K では消失している。また、 $\theta = 90^\circ$ 方向のピークが大きくなっていることから結晶性が向上した可能性も示唆された。

これらの結果から、ひずみ印加アニールによる超伝導特性の変化は、 T_c が減少していることを考慮すると、キャリア量が増加していることが要因の一つとして考えられる。また、低温で J_c が向上していることから、オーバードープ状態となり不可逆磁場が向上したためと考えられる。また、磁場印加角度依存性の結果からも双晶の割

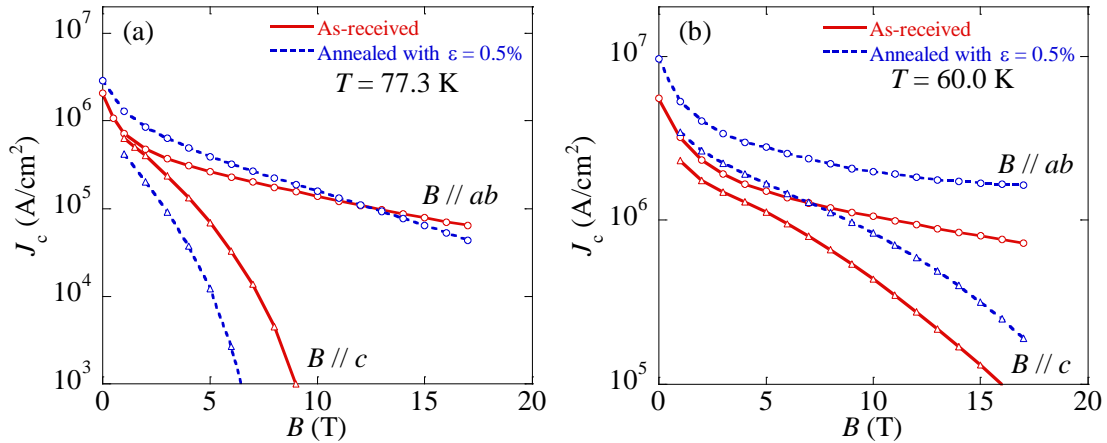


Fig. 5. Magnetic field dependence of J_c after the annealing under the strains and as-received in the GdBCO coated conductors. (a) 77.3 K and (b) 60.0 K.

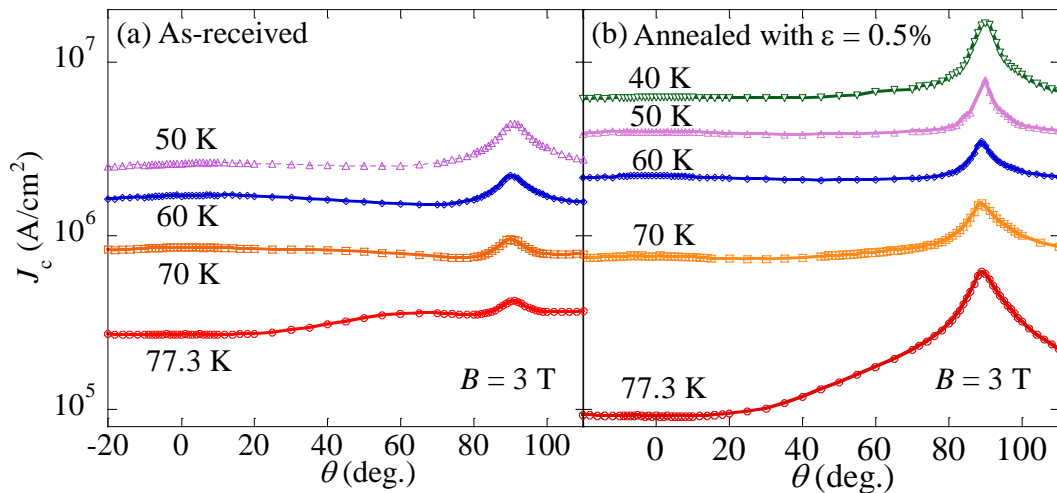


Fig.6. Magnetic field angle dependence of J_c after the annealing under the strains and as-received in the GdBCO coated conductor at 40-77.3 K. (a)As-received sample and (b) Tension-annealing sample.

合が減少していることが分かった。

4. まとめ

GdBCO コート線材にひずみ印加アニールを行い、双晶と残留ひずみを制御した。放射光による (020)、(200) 回折ピークはピーク位置とピーク強度がひずみ印加アニールにより変化し、ピーク位置の変化により残留ひずみを、ピーク強度の変化により A、B ドメインの割合を制御できることが分かった。また、0.5% 引張りアニールにより 77.3 K では as-received の試料に比べて J_c が低下したが、低温領域では J_c が大幅に向上することが分かった。また、双晶が減少したことにより、磁場印加角度依存性における $\theta = 0^\circ$ 方向のピークが減少することが分かった。これらの変化は、キャリア量の変化し、オーバードープ状態になったことにより B_{irr} が向上し、双晶の減少により結晶性が向上したなどに起因すると考えられる。

5. 謝辞

本研究の一部は、超電導応用基盤技術研究開発業務

の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。また、JST 戦略的創造研究推進事業ALCAの一環として行われたものである。

参考文献

- [1] Walter H Fietz, Klaus-Peter Weiss and Sonja I Schlachter, Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 332
- [2] D. Babic, J. R. Cooper, J. W. Hodby, C Changkang, PHYSICAL REVIEW B **60** (1999) 698
- [3] D C van der Laan, J W Ekin, J F Douglas, C C Clickner, T C Stauffer, L F Goodrich, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 072001
- [4] M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 085013
- [5] J. Z. Liu, M. D. Lan, P. Klavins, R. N. Shelton, PHYSICS LETTERS A **144** (1990) 265
- [6] T. Suzuki, S. Awaji, H. Oguro, K. Watanabe, M. Sugano, S. Machiya, M. Sato, T. Izumi, IEEE Trans. Appl. Supercond., **23** 8000104 (2013)