

整理番号	2021-J-083	報告者氏名	作間 啓太
------	------------	-------	-------

研究課題名

ナノ組織制御技術を用いた高 J_c -銅酸化物高温超伝導薄膜の創製

<代表研究者> 機関名：山梨大学大学院 総合研究部工学学域 電気電子情報工学系(電気電子工学)
職名：助教 氏名：作間 啓太

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：
機関名： 職名： 氏名：
機関名： 職名： 氏名：
機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

本研究では、エネルギー・電子情報・医療分野への応用に向けて、高温超伝導体の一つである REBa₂Cu₃O_y (REBCO, RE: Rare-Earth) 薄膜の臨界電流密度(J_c)の飛躍的な向上を目指す。「超伝導」はある温度(転移温度: T_c)まで冷やすと電気抵抗がゼロとなり、大電流を流すことができる。そのため、金属材料では不可能な非常に強い電磁石を作製でき、エネルギー機器(発電機、核融合装置など)や医療機器(重粒子線がん治療、磁気共鳴画像診断(MRI)など)に既に実用化されている。加えて、電子情報機器に利用される高周波フィルタでは、金属材料では不可能な遮断特性および低損失を実現できるため、超伝導フィルタを用いた移動体通信システムが実用化されている。このように超伝導を用いた機器は、脱炭素・省エネ、健康寿命の延伸に寄与し、SDGs・Society 5.0 社会の実現の一端を担っている。超伝導を使用したエネルギー機器(発電機、核融合装置など)、医療機器(重粒子線がん治療、MRI など)、電子情報機器(高周波フィルタ)の性能は、共通して J_c に比例して向上する。そのため、高 J_c -REBCO 薄膜が創製されれば、様々な超伝導機器の性能を向上させることが可能であり、SDGs・Society 5.0 社会への寄与が期待できる。超伝導を用いたエネルギー機器、医療機器、電子情報機器は大電流を流すため、その大電流により非常に大きな磁場が発生する。超伝導体は磁場中では J_c が急激に低下することが知られている。これは超伝導体内に侵入した磁束がローレンツ力を受け、磁束が動くためである。そのため、結晶性および粒界結合の改善や磁束の運動を抑制する人口欠陥の導入などのナノ組織制御が重要となる。

そこで本研究では、磁束運動を抑制する磁束ピン止め点を導入した REBCO 薄膜の創製を行う。そのために、ナノ組織制御技術によりナノ粒子 BaZrO₃(BZO)の REBCO 薄膜への導入を行い、 J_c の向上を試みる。本助成により、飛躍的に高い J_c を有する REBCO 薄膜が創製され、超伝導を用いたエネルギー機器(発電機、核融合装置など)、医療機器(重粒子線がん治療、MRI など)、電子情報機器(高周波フィルタ)の性能が向上し、SDGs・Society 5.0 社会への寄与が期待できる。

BZO ナノ粒子の導入量が異なる REBCO 薄膜を作製した。BZO 導入量が増加しても結晶性・ T_c は変化がなく、REBCO 薄膜の組織を破壊せずに、ナノ粒子の導入に成功した。BZO 導入 REBCO 薄膜の J_c は 9 MA/cm²を超え、磁場中 J_c も非常に高い値を示した。以上から、この高 J_c -REBCO 薄膜を用いた超伝導機器は、飛躍的な性能向上が期待できる。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

「口頭発表」 2報

1. **作間啓太**, 伊藤慶信, 村上純, 齊藤敦, 關谷尚人 “低 R_s ・高 J_c -REBa₂Cu₃O_y薄膜を用いた高耐電力送信用フィルタの設計” 低温工学・超電導学会 1B-p03, 2022年6月20日
2. **作間啓太**, 藤田貴紀, 大嶋重利, 關谷尚人 “高品質高温超伝導薄膜を用いた高感度NMRピックアップコイルの開発 (1)” 電子情報通信学会マイクロ波研究会 MW-2022-17 2022年5月20日

「誌上」 1報

1. **作間啓太**, 藤田貴紀, 大嶋重利, 關谷尚人 “高品質高温超伝導薄膜を用いた高感度NMRピックアップコイルの開発 (1)” 信学技報, vol. 122, MW-2022-17, pp. 13-17

<研究の目的、経過、結果、考察（5000 字程度、中間報告は 2000 字程度）>

研究の目的

本研究では、エネルギー・電子情報・医療分野への応用に向けて、高温超伝導体の一つである $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO, RE: Rare-Earth) 薄膜の臨界電流密度(J_c)の飛躍的な向上を目指す。

「超伝導」はある温度(転移温度: T_c)まで冷やすと電気抵抗がゼロとなり、大電流を流すことができる。そのため、金属材料では不可能な非常に強い電磁石を作製でき、エネルギー機器(発電機、核融合装置など)や医療機器(重粒子線がん治療、磁気共鳴画像診断(MRI)など)に既に実用化されている。加えて、電子情報機器に利用される高周波フィルタでは、金属材料では不可能な遮断特性および低損失を実現できるため、超伝導フィルタを用いた移動体通信システムが実用化されている。このように超伝導を用いた機器は、脱炭素・省エネ、健康寿命の延伸に寄与し、SDGs・Society 5.0 社会の実現の一端を担っている。しかし、超伝導機器の大規模応用や普及には、冷却コストの低減(T_c 向上)および性能向上(J_c 向上)が必要となる。

REBCO($T_c \sim 90$ K)は、現在超伝導機器に広く使用されている超伝導体[NbTi ($T_c = 10$ K)など]よりも T_c が高い。そのため、NbTi ($T_c = 10$ K)などでは冷却に液体ヘリウム(3000 円/l)を使用するが、REBCO($T_c \sim 90$ K)では液体窒素(100 円/l)による冷却が可能のため、冷却コストの大幅な低減が可能である。超伝導を使用したエネルギー機器(発電機、核融合装置など)、医療機器(重粒子線がん治療、MRI など)、電子情報機器(高周波フィルタ)の性能は、共通して J_c に比例して向上する。そのため、図 1 に示すように高 J_c -REBCO 薄膜が渝製されれば、様々な超伝導機器の性能を向上させることが可能であり、SDGs・Society 5.0 社会への寄与が期待できる。



図 1 高 J_c -REBCO 薄膜の様々な分野への貢献

研究の経過、結果、考察

(Y, Gd)Ba₂Cu₃O₇ [(Y,Gd)BCO]薄膜の原料溶液として Y-, Gd-, Ba-trifluoroacetates および Cu-octylic acid salt を使用し、CeO₂/R-Al₂O₃ 基板上にスピコートを使用し、塗布を行った。仮焼成、本焼成の順に焼成した。仮焼成条件は大気圧、純酸素中、基板温度 500°C、本焼成条件は 300 Torr (Ar+1%O₂ 混合ガス)、基板温度 750°C である。結晶構造、結晶性は X 線解析を、電気特性は Quantum Design Physical Properties Measurement System (PPMS) を用いて測定した。

初めに、(Y,Gd)BCO 薄膜に磁束ピン止め点として BaZrO₃ (BZO) ナノ粒子の導入を行い、BZO ナノ粒子の密度を制御することにより、高磁場においても高い超伝導特性を有する (Y,Gd)BCO 薄膜の作製を試みた。BZO ナノ粒子の密度は体積分率 (4, 8, 12 vol.%) を変化させることにより制御した。申請時研究計画では、BaSnO₃ や BaNbO₃ などを使用する計画であったが、予備実験から BZO ナノ粒子のサイズが超伝導機器の使用環境に適していることが確認されたため、BZO ナノ粒子に着目し研究を行った。加えて、断面 TEM 像から、(Y,Gd)BCO 薄膜中に ϕ 15 nm の BZO ナノ粒子が均一に分散していることが分かっている。図 2 に 4, 8, 12 vol. % - BZO を導入した (Y,Gd)BCO 薄膜の out-of-plane および in-plane の結晶性を示す。図 2 から (Y,Gd)BCO 薄膜に BZO ナノ粒子を導入しても、薄膜の結晶性が変わらないことが分かった。図 3 に 4, 8, 12 vol. % - BZO を導入した (Y,Gd)BCO 薄膜の超伝導転移温度 (T_c) を示す。図 3 から、(Y,Gd)BCO 薄膜に BZO ナノ粒子を導入しても、 T_c も変わらないことが分かった。以上図 2, 3 から BZO ナノ粒子、つまり、不純物を導入しても、母相 [(Y,Gd)BCO] の特性が維持されていることが分かった。

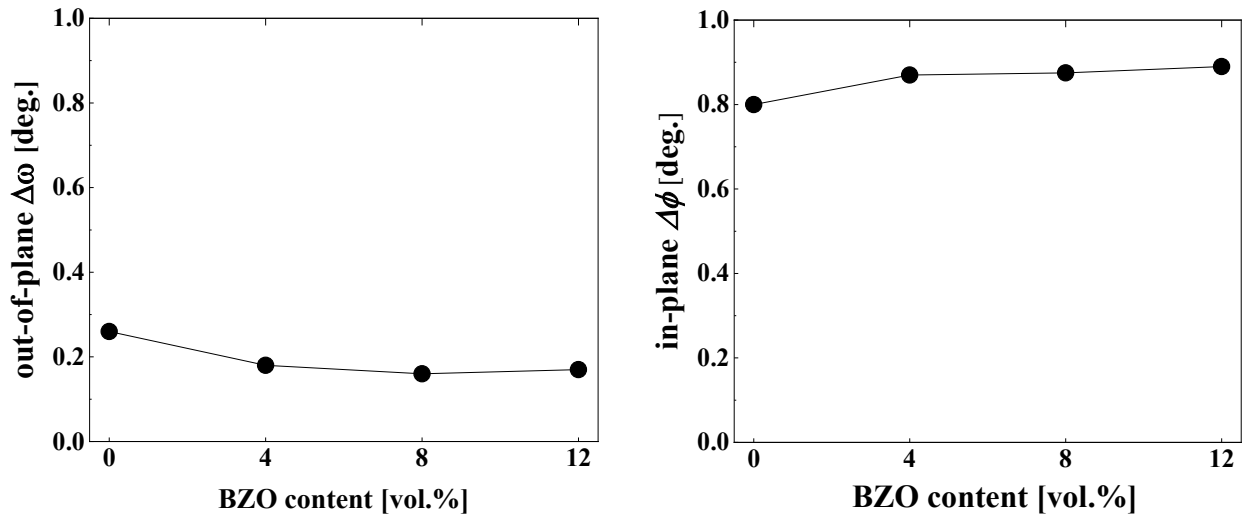


図2 BZO を導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の out-of-plane および in-plane 結晶性

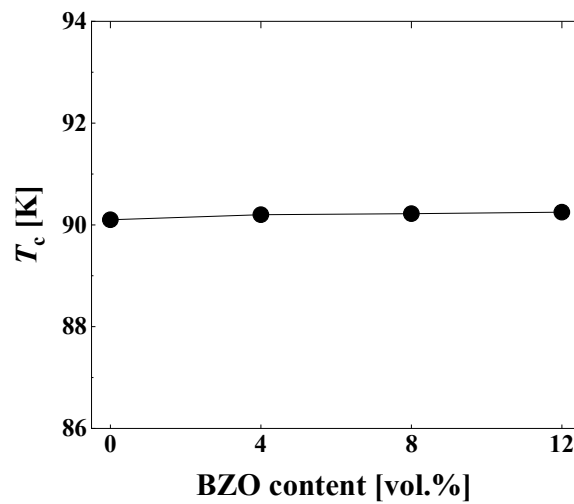


図3 BZO を導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の超伝導転移温度(T_c)

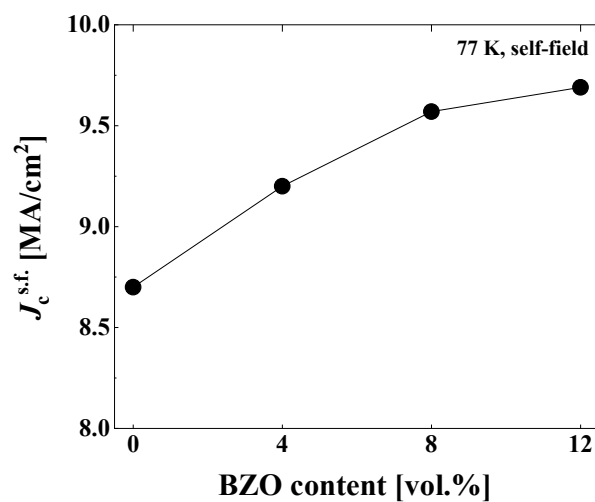


図4 BZO を導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の自己磁場臨界電流密度($J_c^{s.f.}$)

図4に BZO を導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の自己磁場臨界電流密度($J_c^{s.f.}$)を示す。図4から BZO ナノ粒子密度の増加に伴い、 $J_c^{s.f.}$ が増加していることが分かった。これは、BZO ナノ粒子が磁束のピン止め点として有効に機能していることを示唆している。

BZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の磁場中超伝導特性の測定を行った。図5にBZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の臨界電流密度(J_c)の磁場依存性を示す。図5からBZO ナノ粒子密度の増加に伴い、高磁場においても高い J_c を示し、特に、12vol.%BZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜は最も高い J_c を示した。図6にBZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の J_c の磁場印加角度依存性を示す。図6から12vol.%BZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜はあらゆる磁場印加角度においても高い J_c を示した。これは、BZOがナノ粒子として(Y,Gd)BCO中に均一に分散しており、あらゆる磁場印加角度においても磁束ピン止め点と有効に機能していることを示唆している。以上から(Y,Gd)BCO 薄膜にBZOナノ粒子を導入することにより高磁場中においても高い超伝導特性を有する(Y,Gd)BCO 薄膜の創製に成功した。

今後は、今回得られた(Y,Gd)BCO 薄膜を用いて医療機器(NMR ピックアップコイル)や電子情報機器(フィルタ)を作製し、性能の向上を実証する。

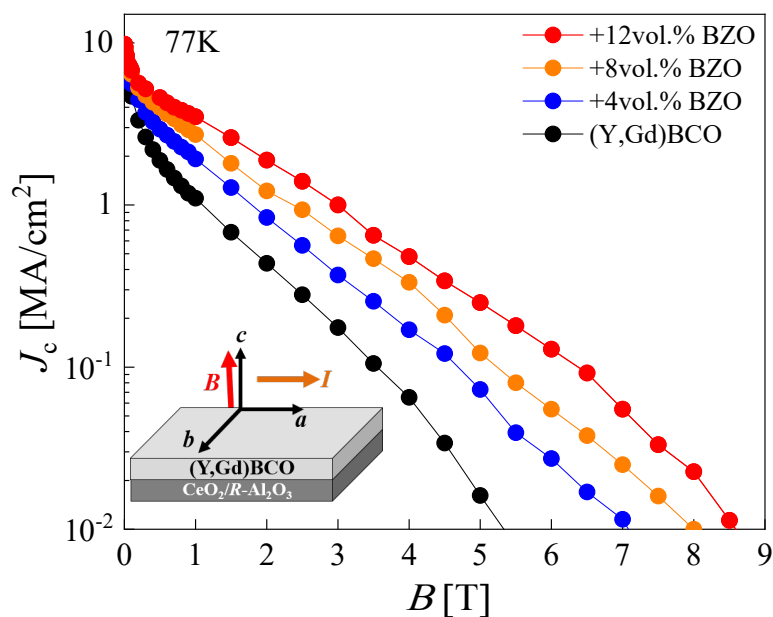


図5 BZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の臨界電流密度(J_c)の磁場依存性

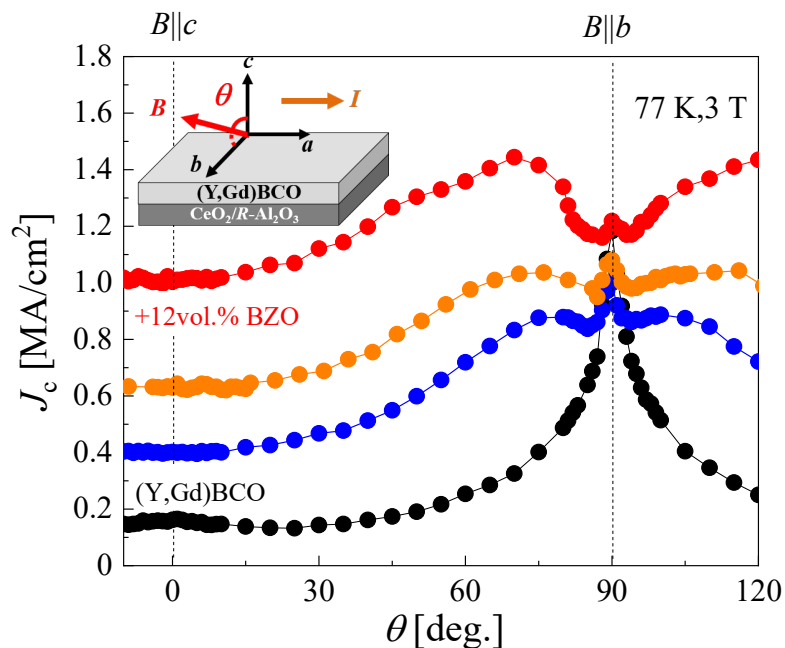


図6 BZOを導入した(Y,Gd)BCO 薄膜の J_c の磁場印加角度依存性