

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01478

研究課題名(和文) 超高性能超伝導線材開発に向けたポスト人工ピン技術の創生

研究課題名(英文) Post-Artificial-Pinning Technology for High Performance Superconducting Tape

研究代表者

堀出 朋哉 (Horide, Tomoya)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70638858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：YBa₂Cu₃O₇超伝導テープ線材の臨界電流密度向上のための構造設計指針を示すことを目的に研究を行った。ナノロッドを有するYBa₂Cu₃O₇膜において特性の異方性を解析し、ピンニング、線張力、磁束間相互作用が磁束配置に及ぼす影響を明らかにした。ナノロッドに加えてナノ粒子(人工的導入/自己組織化)を導入することにより磁束挙動を制御した。さらに積層欠陥による界面原子配置の変化とそれによる特性向上の機構を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導応用に向けYBa₂Cu₃O₇超伝導テープ線材の臨界電流密度向上が求められている。ナノロッドをYBa₂Cu₃O₇膜に導入することが効果的であり、これまでナノロッドの形状や分布が制御されてきた。本研究では磁束間相互作用・線張力・界面にも着目し新たなナノ構造設計指針を示した。本成果により超伝導応用に向けて重要な磁束ピンニングの理解と制御が進む。また現在飽和しつつある超伝導線材性能の向上が加速し、より高性能な超伝導応用機器(マグネット等)が開発されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Nanostructure control is required to improve critical current density for superconductor application of YBa₂Cu₃O₇ coated conductors. In the YBa₂Cu₃O₇ containing nanorods, the pinning anisotropy was analyzed and influence of vortex pinning, vortex line tension, and vortex interaction on vortex configuration was discussed. The hybrid pinning of nanorods and artificial/self-organized nanoparticles controlled the vortex behavior. Influence of the stacking faults across the nanorods on the atomic configuration of interface and the vortex pinning was clarified.

研究分野：超伝導材料

キーワード：超伝導 薄膜 磁束ピンニング ナノ構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ケーブル、MRI、リニアモーターカー、モーター、核融合などの超伝導応用に向けて、高性能 YBa₂Cu₃O₇(YBCO)超伝導線材の開発が進められている。YBCO 超伝導テープ線材の高性能化には臨界電流密度(J_c)向上が必要である。超伝導体に磁場を印加すると量子化磁束が侵入する。この状態で電流を流すとローレンツ力が発生し磁束が運動しようとする。ピンニングセンターが存在すると、磁束がピンニングされて磁束運動が抑制され、 J_c が向上する。YBCO はもともと高い J_c 特性を有しているが、ピンニングセンターが導入されることにより J_c がさらに向上する。

ピンニングセンターとして BaMO₃(M=Zr, Sn, Hf)ナノロッドやナノ粒子が導入されてきた。特に自己組織化によって導入されるナノロッドは高いピンニング特性を示すことが知られており、本研究ではナノロッドに着目する。ナノロッドのピンニング特性を最適化するうえで、まずナノロッドの形状が議論される。ナノロッドと磁束の交差体積がピンエネルギーを決めるので、磁場が YBCO の c 軸に平行な時($B//c$)の J_c に注目するのであればまっすぐなナノロッドが望ましい。そこで $B//c$ の J_c を上げるためにまっすぐなナノロッドを作るという指針のもと研究が進められてきた。さらにナノロッド間隔(d)は J_c 特性に強く影響するパラメータの一つで、マッチング磁場(ϕ_0/d^2 ; ϕ_0 は磁束量子)をもとに J_c 特性が議論されている。 $B_0=1.5$ T が報告されており、磁場が B_0 になると J_c の挙動が変化する。高磁場特性を向上させるために B_0 を大きくする、つまりナノロッド間隔を減少させることが有効で、高密度ナノロッドの作製が進められてきた。このように YBCO マトリックスだけでなく、ナノ介在物の形状や密度を制御することにより J_c 向上が行われてきた。しかし J_c 向上は飽和しつつあり、飛躍的な J_c 向上には新しいピンニング構造制御指針が必要である。

磁束系のエネルギーはピンポテンシャル、磁束間相互作用、線張力によって決まる。さらに J_c はピンニングセンターから離れる際の際の力によって決まり、ピン上とマトリックス上に磁束が存在するときのエネルギー差を界面幅で除したものが要素ピン力(f_p)である。これまでは磁束ピンニング項の制御が主に議論されてきたが、磁束間相互作用項、線張力項、 f_p (界面)にも着目することで高度な磁束挙動制御が可能になることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、 J_c を向上させることを目的として、従来のピンニング項を中心にしたピン設計を進展させ、磁束間相互作用、線張力、界面をも組み込んだ構造設計を提案する。基本構造としてナノロッドをまっすぐに成長させ、 J_c 特性や磁束配置について議論する。そのうえで磁束間相互作用項と線張力項を制御するためにナノロッドとナノ粒子の 3 次元分布に着目した構造制御を行う。さらに界面効果を制御するためにナノロッド界面の原子スケール構造を議論する。このような構造が磁束挙動におよぼす影響を詳細に議論し、 J_c 向上の可能性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

パルスレーザー蒸着(PLD)により YBCO 膜の作製を行った。ナノロッドを導入するために BaHfO₃(BHO)、BaSnO₃(BSO)、Ba₂YbNbO₆(BYbNO)、Ba₂LuNbO₆(BLuNO)を添加した混合ターゲットをレーザーアブレーションした。また Y₂O₃ を導入する際はターゲット上に Y₂O₃ セクターを貼り付けてレーザーを照射した。構造については、透過電子顕微鏡(TEM)、走査透過電子顕微鏡(STEM)によりナノ構造の観察を行った。STEM において Energy Dispersive X-ray(EDX)により元素マッピングを行った。特性については、Physical Property Measurement System(PPMS)を用いて、臨界温度(T_c)を測定した後、0-9 T、20-77 K の J_c 特性の評価を行った。さらに東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターの強磁場マグネットを用いて 0-16 T の強磁場での J_c 特性を評価した。界面の構造やナノ介在物の熱力学安定性を解析するために Vienna Ab-initio simulation package(VASP)を用いて第一原理計算を行った。界面を含むスーパーセルにおいて構造緩和を行うことにより界面構造を計算した。

4. 研究成果

(1) 高いピンニング特性を示すナノロッドの作製

BMO を添加した YBCO 膜の最適化が主目的ではないが、中心となるプロセス条件の解明という観点から高い J_c 特性を得るための成膜条件最適化を行う必要がある。まず YBCO+BHO において添加量と成膜温度の最適化を行った。

YBCO+BHO において BHO 添加量が増えるにしたがって T_c が減少した。77 K、1 T では 3% 程度の添加で J_c が最大となったが、温度 65 K、磁場 5 T、9 T では 4.7% で J_c が最大となった。高温では T_c の効果が大きく、 T_c が高い 3.1% で J_c が高くなった。一方、65 K では T_c の効果が弱くなり、ピンニングセンター密度の効果が大きくなったため 4.7% で J_c が大きくなった。BHO 添加量を 6.2% とすると添加量が大きすぎるため、YBCO マトリックスの構造が劣化し、 J_c が減少し始めたと考えられる。

また YBCO+BHO(4.7 vol%)の試料を 830-890°C で作製したところ、880-900°C では高い J_c 値を

示したが、成膜温度が 830°C になると J_c が小さくなった。890-900°C の試料が巨視的ピン力 $F_p = J_c B$ の最大値 $F_{p,max}$ が最も高く 77 K で 19-26 GN/m³ となった。 $F_{p,max}$ が観察された磁場がマッチング磁場に相当する。890°C から 850°C に変化させると、 $F_{p,max}$ が観察された磁場は 4 T から 6 T に増加した。このように YBCO+BHO では添加量 4.7%、成膜温度 890-900°C で高い特性が得られることが分かった。

(2) YBCO+BHO の磁束ピンニング異方性の解析

図 1(a)-(d) に YBCO+BHO (1.6 vol%) の 1 T、3 T、5 T、9 T における ρ - θ (抵抗率-磁場角度) の温度依存性を示す。1 T、3 T では $\theta=180^\circ$ つまり $B//c$ で大きなディップが見られたが、5 T、9 T ではディップは小さくなった。さらに 5 T では 110° 近傍でも軸外ディップが観察された。図 1(e)、(f) に 1 T、5 T の J_c - θ カーブの温度依存性を示す。1 T、5 T とともに c 軸ピークと ab 面ピークが見られ、さらに 70° 近傍と 110° 近傍で軸外ピークが見られた。軸外のピークとディップはほぼ同じ角度に見られた。

図 2 に J_c のピーク幅および抵抗率のディップ幅から得られたトラッピング角の温度依存性を示す。(a) は低磁場、(b) は高磁場の結果である。磁束系のエネルギーは以下の式で与えられる。

$$E = \int \frac{K}{2} u^2 + U_p(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \epsilon_l \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 dz \quad (1)$$

K 、 U_p 、 a 、 u はケージポテンシャル、ピンポテンシャル、線張力、磁束変位である。低磁場では磁束間相互作用は大きくないためナノロッドと線張力のみを考慮すると、トラッピング角は

$$\tan \theta_t = \sqrt{\frac{2U_{p,nanorod}}{\epsilon_l}} \quad (2)$$

のように求められる。図 2(a) に示した通り、式(2)から求めたトラッピング角と実験値がよく一致することがわかった。低磁場ではナノロッドによって決まるトラッピング角 (θ_s) が磁束挙動を決めており、低磁場では広い角度範囲においてナノロッドにトラップされた階段状磁束が存在することがわかる。このような階段状磁束では、マトリクス上の磁束成分の運動を制御することが J_c 向上に有効である。

図 2(b) には高磁場のトラッピング角の温度依存性を示す。高磁場ではナノロッド密度が磁束密度に対して小さいため、ナノロッドはトラッピング角に支配的ではない。ここでは双晶、ナノロッドにトラップされた磁束からの磁束間相互作用、線張力を考慮し、トラッピング角 (θ_w) を以下の式で求める。

$$-U_{p,twin} + \frac{1}{2} \epsilon_l \tan^2 \theta - \frac{1}{2} \frac{B_\Phi \phi_0}{16\pi\mu_0\lambda^2} u^2 = 0 \quad (3)$$

μ_0 、 λ は透磁率と侵入長である。この式で得られた θ_w は図 2(b) で低温側の実験値を記述できている。高温では磁束線張力が失われるため式(3)から外れた挙動を示した。高磁場では $B//c$ に近い比較的狭い範囲で双晶にピン止めされた階段状磁束が特性を支配する。一方、それ以外の角度範囲では、ナノロッドによりトラップされた階段状磁束からの磁束間相互作用と線張力が磁束配置を支配する。さらに詳細を述べると、軸外の J_c ピーク及び抵抗ディップ (角度 θ_t) が傾斜磁場に対するマッチング磁場効果を示しており、 θ_t より高角ではすべての c 軸磁束成分がナノロッドにトラップされる。 θ_w よりも高角の角度領域では線張力、磁束間相互作用、マトリクスピンニングを組み合わせ、磁束配置を制御することが磁束運動抑制には効果的である。

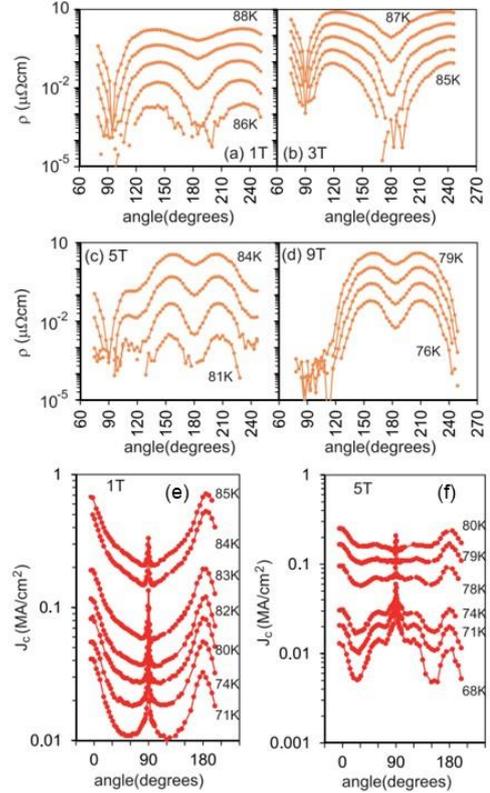


図 1 YBCO+BHO の(a)1 T、(b)3 T、(c)5 T、(d)9 T における ρ - θ の温度依存性。(e)1 T、(f)5 T における J_c - θ の温度依存性。

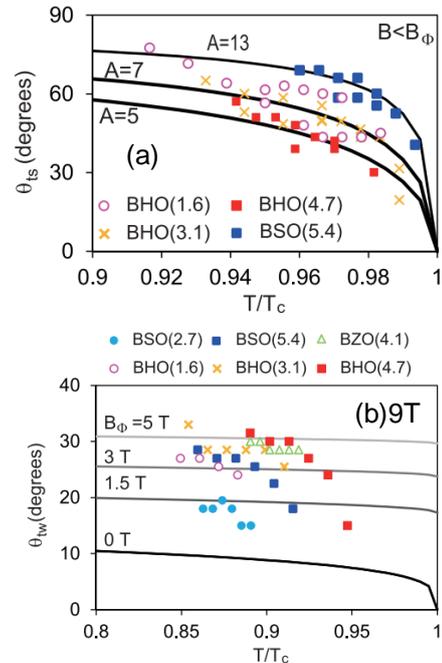


図 2 (a) B_Φ 以下の磁場、(b) 9 T (> B_Φ) におけるトラッピング角。実線は磁束エネルギー式(2)、(3)から導出したトラッピング角。

(3) ハイブリッドピンニング制御

ナノロッドのみがピンニングセンターであれば、磁束が運動する際にはダブルキック等の励起機構によってマトリックス上磁束成分が容易に運動する。また(2)の議論より磁場を c 軸から傾けると、広い角度範囲においてマトリックス上の磁束成分が現れる。ここではマトリックス上の磁束成分をナノ粒子によりピンニングし、磁束配置を制御することで J_c を向上させる。そこでナノロッドに加えナノ粒子を添加した YBCO+BHO+ Y_2O_3 膜を作製し、ハイブリッドピンニング構造を実現した。

図 3 に YBCO+BHO+ Y_2O_3 の STEM 像を示す。まっすぐに伸びたナノロッドが観察され、直径約 4 nm、間隔約 20 nm であることがわかる。図 3 には EDX 結果を示す。Hf はナノロッド上に局在しており、BHO ナノロッドが形成されていることが確認できる。さらに Y リッチな領域が観察され、 Y_2O_3 ナノ粒子の形成が示唆される。このように高密度ナノロッドとナノ粒子を導入したハイブリッドピンニング膜が作製できた。

図 4 にハイブリッドピンニング(HB)と従来ナノロッド(NR)の J_c - B 特性と F_p - B 特性を示す。77 K で従来ナノロッドの方がハイブリッドピンニング膜よりも大きかった。ハイブリッドピンニング膜では $F_{p,max} = 11 \text{ GN/m}^3$ であり、この値自体は大きな値ではない。一方 20 K で $F_{p,max} = 800 \text{ GN/m}^3$ 、4.2 K で $F_{p,max} = 1.57 \text{ TN/m}^3$ となり、低温では高い $F_{p,max}$ が得られた。これまで 4.2 K での $F_{p,max}$ の最高値として 1.6-1.7 TN/m^3 が報告されており、ハイブリッドピンニングはこれに匹敵する値である。このようにハイブリッドピンニングは低温高磁場で高いピンニング特性を示した。従来ナノロッド膜と比較して低温で J_c が向上したことはナノ粒子の寄与を示唆している。

図 4(e),(f)ではハイブリッドピンニング膜とナノロッド膜の J_c 角度依存性を比較する。ナノロッドにより c 軸相関ピン特性が得られ、 c 軸ピークが観察された。 c 軸から傾いた磁場でハイブリッドピンニングにより J_c が向上している。20 K ではハイブリッドピンニングにより磁場方位によらず J_c が向上しており、 J_c 角度依存性の形状も変化している。このように c 軸から磁場を傾けても J_c が向上しており、ナノ粒子により階段状磁束のマトリックス上磁束成分の配置と運動を制御することができた。階段状磁束におけるマトリックス上磁束成分は線張力と磁束間相互作用の影響を強く受け、ナノ粒子と組み合わせることで運動を抑制できることがわかる。

(4) 積層欠陥による界面構造制御

ナノロッドを導入した YBCO 膜を PLD で作製した後、450°C、酸素フロー中で 1.5 時間アニールを行った。アニールによらずナノロッドが存在していたが、アニールを行った膜のみ ab 面方向に長さ 500 nm 以上の長い積層欠陥が形成された。図 5 に YBCO+BSO の J_c の温度依存性を示

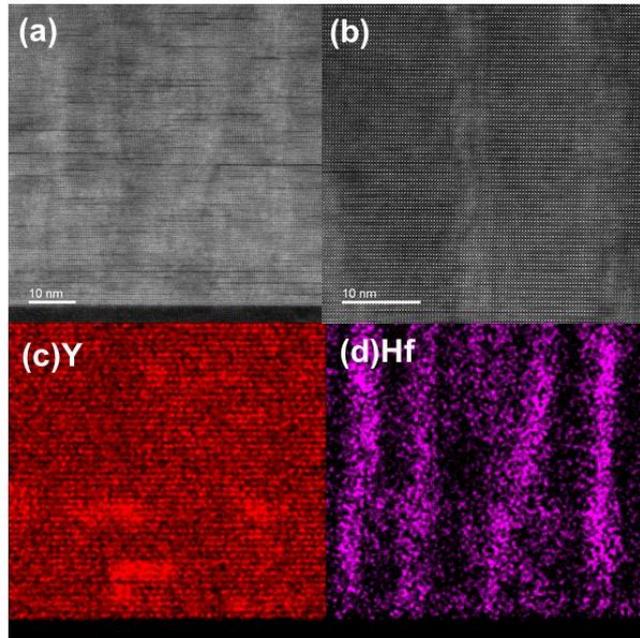


図 3 (a)、(b)YBCO+BHO+ Y_2O_3 の STEM 像、(a)の領域に対する EDX による(c) Y、(d) Hf の元素マッピング

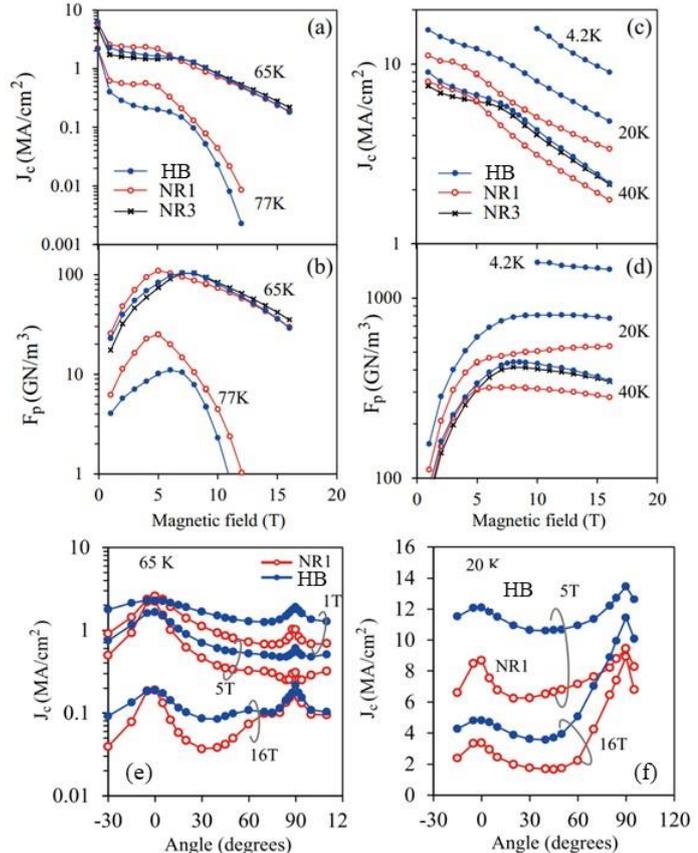


図 4 YBCO+BHO+ Y_2O_3 の(a) 77K、(c) 65K における J_c - B 曲線、(b) 77K、(d) 65K における F_p - B 曲線。(e) 65K、(f) 20 K における J_c の角度依存性。 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 90^\circ$ は $B//c$ 、 $B//ab$ に対応している。

す。9 T ではアニールしても J_c が変化しなかったが、1 T ではアニールにより J_c が向上し、低温ほどその傾向が顕著になった。この機構を理解するために、第一原理計算および構造観察を行い、界面構造とその J_c への影響を議論した。

第一原理計算とひずみ計算の結果、積層欠陥形成はナノロッド界面におけるひずみ緩和を駆動力としていることが分かった。積層欠陥はナノロッドを横切っているため、ナノロッドの界面構造にも影響を及ぼすと考えられる。これを明らかにするために YBCO/BHO 界面の高分解能 STEM 観察を行った結果を図 6 に示す。(a) は YBCO の a 軸に平行な界面、(b) は YBCO の b 軸に平行な界面である。積層欠陥では $1/2$ ユニットセル b 軸方向に原子面が移動する。そのため図 6 (a) では界面で原子配列が乱れ原子結合が切断される。これにより界面での強い結合が切断されひずみが緩和されている(ひずみの起源がなくなっている)。一方、図 6 (b) では界面に平行な方向に原子面が移動し、原子配列の乱れは見られない。積層欠陥近傍では YBCO に CuO 鎖が 2 枚分存在するのに対し、BHO 側では原子面が 1 枚存在するのみであり、積層欠陥にミスフィット転位が形成される。このように積層欠陥に格子ミスフィットが集中することになり、YBCO マトリックス中のひずみが減少する。

第一原理計算により積層欠陥を有する YBCO/BHO 界面の構造の計算を行った。図 6 (c)、(d) はそれぞれ YBCO の a 軸、 b 軸に平行な界面である。STEM で観察された結果と同じように a 軸に平行な界面では界面原子配置が乱れ、 b 軸に平行な界面では原子位置の乱れは観察されない。A、B の領域での格子定数を評価したところ、 a 軸に平行な界面では原子配列の乱れにより BHO と YBCO の格子定数がそれぞれのバルク値に近づく。一方 b 軸に平行な界面では積層欠陥の位置にミスフィット転位が形成されており、界面での積層欠陥形成(それによるミスフィット転位形成)によりひずみが緩和される。このように STEM 観察結果と同様の結論が得られ、積層欠陥は界面構造に大きな影響を及ぼすことがわかった。このような界面でのひずみ緩和は要素ピン力の向上に寄与したと考えられる。

界面の効果はナノロッドのピンニングを強くするため、マッチング磁場以下の低磁場で積層欠陥による J_c 向上がみられた。高温では積層欠陥の形状効果により磁束フローが加速されるが、温度を下げるにつれて積層欠陥による界面緩和効果が顕著になり J_c が大きく増加した。このように高温ではコヒーレンス長が長いことや熱揺らぎにより界面の効果が見えにくい、低温では界面効果が顕著になってくる。このように低温における積層欠陥に由来する界面緩和効果による J_c 向上の機構を明らかにすることができた。

(5) ダブルペロブスカイトを添加した YBCO 膜の作製

界面状態およびハイブリッドピンニングを制御するために YBCO 膜に BYbNO および BLuNO を導入した。BYbNO、BLuNO とともに膜厚方向に成長したナノロッドを観察することができた。またどちらの膜でも Y リッチなナノ粒子が自己組織化することを EDX により明らかにした。ナノロッドとマトリックスの組成、ナノ粒子の形状や分布は BYbNO と BLuNO で異なっていた。第一原理計算により BLuNO と BYbNO の安定性、LuBNO と YbBCO の安定性が異なっており、この違いによりナノ構造が変化したと考えられる。 J_c 特性を比較すると、添加量(体積分率)とマッチング磁場どちらを固定して比較しても BLuNO の方が BYbNO よりも高い特性を示した。体積分率を一定とすると BYbNO の方が高いマッチング磁場を示していたにもかかわらず、BLuNO の方が高磁場で高い J_c 特性を示した。YBCO+BMO ではマッチング磁場が高いほうが、高磁場特性が高い傾向にある。しかし BYbNO と BLuNO の比較では異なる傾向となった。これはナノ粒子の分布や密度が異なるためだと考えられる。このように Ba_2RENbO_6 の RE を変えることで構造や特性が変化することを示した。RE 選択やマトリックス RE 組成を変えることでマトリックス、界面、ハイブリッドピンニング構造が制御できると期待され、今後の研究が必要である。

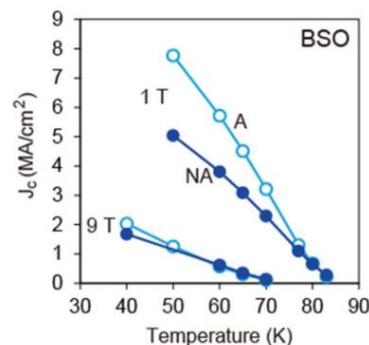


図 5 1 T、9 T における YBCO+BSO(アニールあり(A)/なし(NA))の J_c の温度依存性。

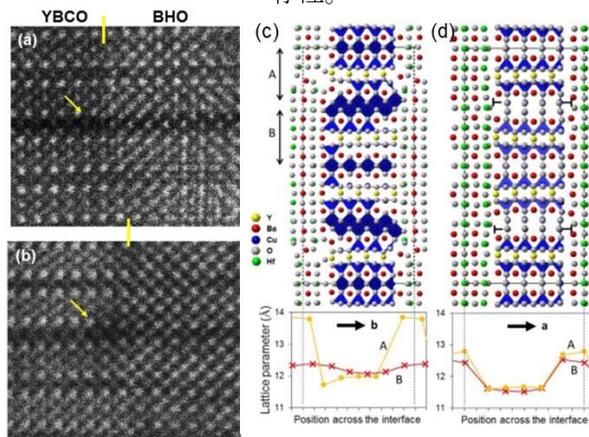


図 6 (a)、(b)アニールした YBCO+BHO 膜の STEM 像。(c)、(d) 第一原理計算により得られた YBCO/BHO 界面の構造。(a)、(c)は界面// a 、(b)、(d)は界面// b 。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Horide Tomoya, Yoshida Yuga, Kita Ryusuke, Gondo Masaya, Ishimaru Manabu, Matsumoto Kaname	4. 巻 -
2. 論文標題 Self-Organized Nanocomposite Structure Controlled by Elemental Site Occupancy to Improve Vortex Pinning in $\text{YBa}_{2-x}\text{Cu}_{3-y}\text{O}_{7-x}$ Superconducting Films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsaem.2c00438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Gondo Masaya, Yoshida Masashi, Yoshida Yuga, Ishimaru Manabu, Horide Tomoya, Matsumoto Kaname, Kita Ryusuke	4. 巻 129
2. 論文標題 Nanostructures and flux pinning properties in $\text{YB}_2\text{Cu}_{307-y}$ thin films with double perovskite $\text{Ba}_2\text{LuNbO}_6$ nanorods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 195301 ~ 195301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0048693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horide Tomoya, Ichino Yusuke, Matsumoto Kaname	4. 巻 34
2. 論文標題 Angular vortex phase diagram in $\text{YB}_2\text{Cu}_{307}$ films with c-axis correlated pinning centers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 085015 ~ 085015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6668/ac0953	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horide Tomoya, Torigoe Kenta, Kita Ryusuke, Awaji Satoshi, Matsumoto Kaname	4. 巻 60
2. 論文標題 Overcoming optimization constraint for J_c by hybrid pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_{307}$ films containing nanorods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 023001 ~ 023001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abdc32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horide Tomoya, Torigoe Kenta, Kita Ryusuke, Nakamura Ryota, Ishimaru Manabu, Awaji Satoshi, Matsumoto Kaname	4. 巻 61
2. 論文標題 Deposition-Temperature Dependence of Vortex Pinning Property in YBa2Cu3O7+BaHfO3 Films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 449 ~ 454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-M2019303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horide Tomoya, Torigoe Kenta, Ishimaru Manabu, Kita Ryusuke, Awaji Satoshi, Matsumoto Kaname	4. 巻 33
2. 論文標題 Simultaneous achievement of high Jc and suppressed Jc anisotropy by hybrid pinning in YBa2Cu3O7 three-phase-nanocomposite film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105003 ~ 105003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aba544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horide Tomoya, Ishimaru Manabu, Sato Kazuhisa, Matsumoto Kaname	4. 巻 33
2. 論文標題 Combined effect of nanorod and stacking fault for improving nanorod interface in YBa2Cu3O7-nanocomposite films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115001 ~ 115001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abaebf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Horide, Manabu Ishimaru, Kazuhisa Sato, Kaname Matsumoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Nonlocal self-organization of long stacking faults from highly strained nanocomposite film of complex oxide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Mater.	6. 最初と最後の頁 13403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.013403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tomoya Horide
2. 発表標題 Control of nanocomposite structure for improving vortex pinning in YBCO films: hybrid pinning and interface structure
3. 学会等名 virtual 2021 joint 23rd Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoya Horide, Kaname Matsumoto
2. 発表標題 Vortex pinning improved by stacking faults in YBCO films containing nanorods
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoya Horide, Kaname Matsumoto, Fumitake Kametani
2. 発表標題 Atomic scale design of YBCO nanocomposite films for improving Tc and fp factors in Jc
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石丸 学 (Manabu Ishimaru) (00264086)	九州工業大学・大学院工学研究院・教授 (17104)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------