

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：34303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03235

研究課題名(和文) 高Ic高温超伝導線材の創出のための磁気科学的材料エンジニアリング

研究課題名(英文) Magneto-scientific approach for high Tc cuprate superconductors with high Ic

研究代表者

堀井 滋 (Horii, Shigeru)

京都先端科学大学・工学部・教授

研究者番号：80323533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題で、回転変調磁場下における希土類系高温超伝導(RE123)材料の配向挙動やRE123粒子の双晶組織を明らかにし、物質側・磁場発生側の両側面からRE123材料の高度配向化を実現する指針を得た。また、磁場配向法を連続製造プロセスとして利用できるリニア駆動型回転変調磁場発生装置を用いてDy123の2軸配向体の作製に成功した。粒間結合などの問題があり臨界電流特性は不十分であり課題が残っているが、磁場配向法が高温超伝導線の理想形である「高配向性」と「大断面積」を両立した希土類系高温超伝導材料の製造基盤技術として有用であることを実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2軸磁場配向法は室温で行えるエピタキシーフリープロセスであり、粉末原料を擬似単結晶に変換する技術である。本研究課題は材料科学と磁気科学を融合した新しい学理を構築し、高度な電気・電子材料を創出しようとするこれまでにない研究である。

超伝導分野では、従来技術では実現できない高温超伝導線の理想形である「高配向性」と「大断面積」を両立した高い送電能を有する高温超伝導線の新製造法となりうる。低磁場配向技術など安価な製造プロセスの開発により実用金属超伝導線レベルの性能コストにつながる可能性があり、超伝導送電線や医療用・磁気浮上列車用ソレノイド磁石への展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research project, orientation behaviors of REBa₂Cu₃O_{7-y} superconductor particles under modulated rotating magnetic fields (MRFs) and their twin microstructures were clarified. Based on these, Directions to fabricate REBa₂Cu₃O_{7-y} superconducting materials with higher orientation degrees were obtained in both aspects from the crystallochemistry and MRF conditions. Moreover, a sintered sheet of biaxial oriented DyBa₂Cu₃O_{7-y} has been successfully fabricated and, however, its critical current density was low due to insufficient intergrain connection. Although there are issues to overcome, we found the magnetic alignment was a good candidate of production process of superconducting materials with both of high orientation degrees and large cross sections.

研究分野：電子材料工学

キーワード：磁場配向 回転変調磁場 磁気異方性 双晶

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子機能材料の中でもバルク材・厚膜材として供されることが望ましい物質もある。このとき、機能を最大化できる単結晶を育成する技術(エピタキシー技術)の確立が実用化につながるが多い。一方で、単結晶の大型化や結晶育成が困難であること、非調和溶解の問題、高い製造コストなどエピタキシャル成長技術が適用できない物質も存在する。高温超伝導においても例外ではない。希土類(RE)系では薄膜型が、ビスマス系

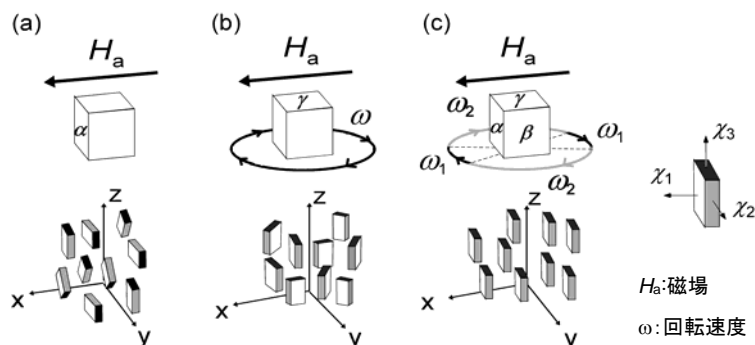


図 1. 3 種類の異なる磁場配向と結晶配向形態の模式図。この場合、 $\chi_1 > \chi_2 > \chi_3$ および $\omega_1 < \omega_2$ の関係にある。(a) 静磁場(χ_1 軸)配向、(b) 回転磁場(χ_3 軸)配向、(c) 回転変調磁場(χ_1 と χ_3 軸の 2 軸)配向。なお、(a) および (b) は「1 軸」配向、(c) が「3 軸」配向。

では圧延型が超伝導線材として市販されているが、大きな課題が依然として存在する。その課題とは、性能コストが高い(臨界電流 I_c が低い)ことである。両タイプの市販線材においても大容量送電に必要な「高配向性」と「大断面積」の両立が実現できていないことが理由の一つである。液体窒素(沸点:77K)での冷却を想定しても、普及(性能コストの低減)には送電性能の大容量化(高 I_c 化)が不可欠である。

1990 年代に液体ヘリウムを要しない冷凍機冷却方式の10テスラ級超伝導磁石が開発された。この普及により、「非磁性」と呼ばれてきた磁化率(χ)および磁気異方性(各結晶軸間の χ の差)の小さい弱磁性物質も磁場配向の対象物質として、強磁場による結晶配向制御の有効性が示された。さらに、磁化容易軸の1軸配向(静磁場、図 1(a))や「磁化困難軸」の1軸配向(回転磁場、図 1(b))に加えて、図 1(c)のような回転変調磁場を利用した3結晶軸方向のすべてが揃った「3軸結晶配向」技術が近年開発された。つまり、磁場配向法は、高配向性テンプレートが不要となるエピタキシーフリーの(擬似)単結晶作製技術と位置づけられる。

また、磁場配向には、室温プロセス、非真空プロセス、粉末試料が利用可能、高い形状自由度といった利点もある。このことは、磁場配向法がエピタキシー技術にはない特長をもつ2軸結晶配向制御法であることを意味する。さらに、強磁場の利用で対象が弱磁性(常磁性・反磁性)物質にも大きく広がる。しかし、回転変調磁場の特長を生かした材料化の実証事例はなく、実験的なアプローチが重要である。

2. 研究の目的

研究代表者は多様な磁場配向法と磁場中コロイドプロセスに着目し、配向組織の形成が機能性向上に直結する層状酸化物を対象に、材料作製プロセスとしての磁場配向について、本研究課題の開始時点までに以下の成果を得ている。

- ・静磁場下コロイドプロセスによる熱電変換素子の製作
- ・回転変調磁場を利用した高温超伝導物質(斜方晶)の2軸磁場配向の原理証明
- ・斜方晶対称場中の希土類イオンの三軸結晶磁気異方性の解明

これらの研究を踏まえ、高温超伝導線の理想である「高配向性」と「大断面積」を両立した希土類系高温超伝導材料の創出を磁場配向法で実現するフェーズにあると判断した。高温超伝導線として長尺化も考慮に入れると、回転変調磁場下でのシート成形が考えられる。このように磁場プロセスと親和性の高いコロイドプロセスと融合させると、原理的には高配向度と大断面積の両立と長尺化が可能となる。つまり、従来技術で成し得ない高 I_c 化を実現する製造プロセスとなるが、実証事例はない。そこで、本研究では、高 I_c 化した高温超伝導材料創出の基盤技術の構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、高温超伝導線の理想である「高配向性」と「大断面積」を両立した RE123 高温超伝導材料創出の基盤技術を RE123 粒子の双晶組織制御法を確立し磁場中コロイドプロセスを用いて確立する。具体的な研究課題および研究項目は以下の通りである。なお、研究代表者の他、2名の研究分担者と1名の研究協力者を配置し、5年の研究期間で進めた。

1. RE123 の結晶粒レベルの磁気異方性増強を実現する双晶制御・粒径制御
2. 回転変調磁場中コロイドプロセスによる 2 軸結晶配向性 RE123 バルク・厚膜の作製
3. 高ガス圧熱処理による配向 RE123 バルク・厚膜の粒間結合強化(緻密化)と送電性能評価

4. 研究成果

4-1. RE123 の結晶粒レベルの磁気異方性増強を実現する双晶制御・粒径制御

まず、酸素アニール温度による双晶組織の変化を明らかにした。Dy123 粉末を通常の固相反応法により合成した。仮焼成した粉末を圧粉成型し空气中 950°Cでの本焼成、酸素アニールを行った。酸素アニールは、下記の 4 種類の条件を適用した。具体的な温度プロファイルは下記の通りであり、最終的な酸素量は $y \sim 7$ である。

①800°Cまで 4 h で昇温、次に 350°Cまで 90 h で降温、その後 350°Cで 24 h 保持し炉冷、

②450°Cに加熱した炉に予め還元アニールした試料を入れ 350°Cまで 10 h で降温、その後 350°Cで 24 h 保持し炉冷、

③還元アニールした試料を 4 h で 300°Cまで昇温し 96 h 保持した後炉冷、

④還元アニールしていない試料を 4 h で 300°Cまで昇温し 96 h 保持した後炉冷。

酸素アニール後の Dy123 粉末の XRD パターンから、すべてのピークは 123 相として指数付けされ、粉末は 123 相であることを確認した。また、 $2\theta = 30 \sim 35^\circ$ に観測された(013)ピークと(103)ピークが分かれていること、および $2\theta = 45 \sim 50^\circ$ に観測された(020)ピークと(200)ピークが分離していることから、酸素アニールした Dy123 粉末はすべて斜方晶構造を有していることを確認した。

例として、図2にアニール①～②を施した Dy123 粉末配向体(MRF、1、3、5、10 T)の(103)極点図を示す。なお、測定面は c 軸が配向する α 面である。まず、アニール条件ごとに配向度の磁場強度依存性を見ると、いずれのアニール条件で作製した粉末をどの磁場強度で配向させた試料においても 4 回対称性のピークが得られていることが確認でき、2 軸配向していることがわかる。また、本研究の印加磁場範囲では、磁場強度の変化に伴って 4 回対称性のピークの形状がほとんど変化していないことから、磁場強度に伴う配向度の顕著な変化は見られない。次に、磁場強度ごとにおける配向度のアニール依存性に着目すると、条件①(800°C → 300°C)でアニールした Dy123 粉末配向体の(103)極点図 [(a)(c)(e)(g)]において、4 回対称ピークに対するリング状のピークの強度が、比較的強く検出されていることが見て取れる。このことから、アニール①を施した Dy123 粉末の配向体は、条件②～④でアニールした Dy123 粉末の配向体と比べ、 c 軸のみ 1 軸配向している Dy123 粉末の割合が多いと考えられる。

アニール①～④で作製した Dy123 粉末配向体の(103)極点図から、Dy123 においても配向割合(F)を算出した。これらの Dy123 粉末配向体の F と印加磁場の関係から、(A)全体的な傾向として同じ条件でアニールした Dy123 粉末であれば、1 T 以上の印加磁場では配向割合(F)の大きな変化は見られないこと、(B)全ての磁場強度において、高温から徐冷アニール(800°C → 350)した試料(条件①)に比べて、低温でアニール(300~450°C)した試料(条件②~④)の方が高い配向割合を示すこと、が明らかとなった。すなわち、酸素アニール実施前に正方晶構造を維持するための還元雰囲気での急冷プロセスの有無が双晶構造のドメイン比に影響を与えている可能性がある。

上記の結果から、正方晶から斜方晶への急激な変化を加えると双晶構造に変化を加えられる可能性を見出したことから、酸素分圧を考慮したアニール条件を検討した。図3(a)-(c)のように、Dy123 を初期状態として 800°C、酸素濃度 0.1%の熱平衡状態で得られる正方晶構造 ($y \sim 6.25$) にしてから、3種類の温度・酸素分圧プロファイルでアニールした。これらのアニールで得た Dy123 粉末の配向度を調べた。アニール後の Dy123 粉末配向体(10T の間欠回転磁場)の X 線回折強度の比から、酸素分圧の急激な変化を加えた Dy123 でドメイン比増強に効果的である可能性を見いだした(表1)。この結果については詳細に検討する必要があるものの、仮にドメイン比が 2.5 から 3.1 に高まれば、配向磁場は 1.0 テスラから 0.9 テスラに 10%低減できる。配列永久磁石の設計に余裕が生まれることを意味する。

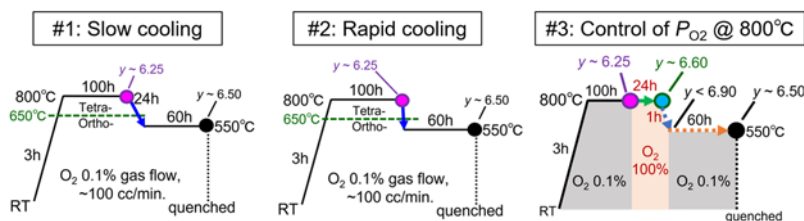


図3. アニール実験の温度及び酸素分圧プロファイル。それぞれ、(a) Ortho-Tetra 転移近傍をゆっくり転移させるためのアニール、(b)急冷によって迅速に転移させるためのアニール、(c)酸素分圧の劇的な変化を利用して瞬間的に転移させるためのアニール条件。

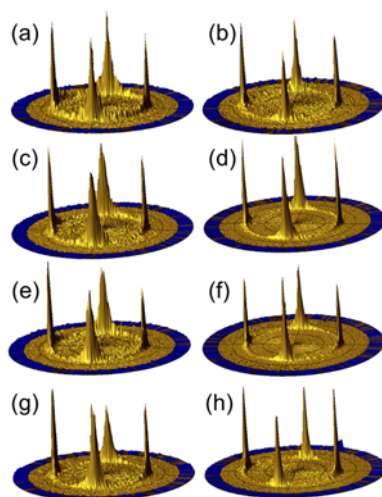


図2 Dy123 粉末配向体の(103)極点図の 3 次元表示[左列の(a)(c)(e)(g)はアニール①、右列の(b)(d)(f)(h)はアニール②、磁場強度は(a)(b)1 T、(c)(d)3 T、(e)(f)5 T、(g)(h)10 T]。

表1. 3種類のアニール条件で得た Dy123 配向体の γ 面における 020 ピークと 200 ピークの強度比。なお、3種類のアニール条件で得た Dy123 粉末の c 軸長と臨界温度 T_c も併せて示した。 T_c および c 軸長から、所望の酸素量である $y \sim 6.5$ に制御されていることがわかる。

Annealing	Peak intensity ratio of (I_{020} / I_{200})	T_c (K)	c -axis length (Å)
#1: Slow cooling	2.50	57.5	11.764
#2: Rapid cooling	2.61	55.5	11.771
#3: Control of P_{O_2} @ 800°C	3.10	58.0	11.766

次に、斜方晶構造をもち双晶構造が導入された Dy123 粉末の双晶組織の直接観察を試みた。適当な双晶組織観察方法として透過型電子顕微鏡 (TEM) を選択した。しかし、粉末をそのまま TEM 観察すると、電子線入射に対する観測面がランダムとなるので、所望の c 面が観察面として得られるかどうかは運もしくは観測検体数に依存する。そこで、RE123 粉末の双晶組織を確実に観察できるようにするために、結果として、既存の作製手法であるアラルダイト (スタンダード) を媒体として使い、粉末を 2 軸配向させることで、 c 面を探すことなく双晶組織を観察できるようになった。

図4(a) ~ (d)には、十分に酸化させた Dy123 ($y \sim 7$) 微結晶の磁場配向実験(a)と FIB による試料加工の模式図(b)、そして磁場配向させた Dy123 粒子の ab 面内の STEM 像(c)と電子線回折結果(d)を示した。図4(a)のようにエポキシ樹脂中で磁場配向させた微結晶粒は、所望の方向に配向していることを極点図測定から確認した。即ち、図4(a)中の α 、 β 、および γ 面は、それぞれ磁化容易軸 (\perp 静磁場)、第二磁化容易軸、磁化困難軸 (\perp 回転磁場) に垂直な面であった。磁場配向した Dy123 微結晶粒の ab 面を観察するために、まずは図4(b)のように α 面方向からイオンビームによってエポキシ樹脂を削った。そのようにして作製した観察用試料の STEM 結果が図4 (c)である。図4 (c)で色の薄い領域と濃い領域がそれぞれメインドメインとサブドメインに対応しており、STEM 像からそのドメインを直接導出したところ、およそ 1.4:1 であった。また、別の粒子では 1.8:1 であった。すなわち、磁場配向させた双晶を含む酸素量 $y \sim 7$ の Dy123 微結晶粒は、不均質な面内のドメイン構造の存在に起因して有限の面内配向エネルギーを持つことが強く示唆され、これが2軸磁場配向の駆動力となっていると考えられる。

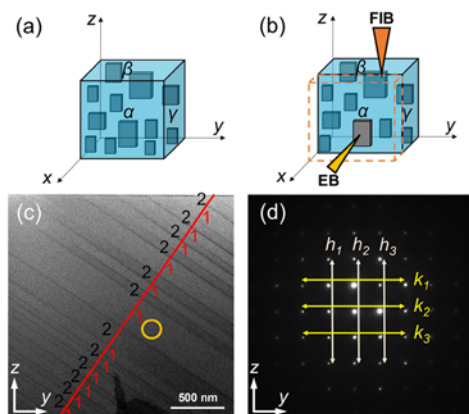


図4. (a) エポキシ樹脂で磁場配向させた (平板上の) Dy123 粒結晶の概略図。図中の α 、 β 、および γ 面は、それぞれ磁化容易軸、第二磁化容易軸、磁化困難軸に垂直な面である。(b) FIB でエポキシ樹脂を削った後の二軸配向させた Dy123 粒子の α 面の表面の概略図。電子線 (EB) は、図中 x 軸と平行に (α 面に垂直に) 照射した。(c) 二軸配向させた Dy123 微結晶粒の ab 面に平行な面の STEM 画像。赤線は双晶境界 ($// [1\ 1\ 0]$) を示す。メインドメインとサブドメインには、それぞれ「1」と「2」とラベル付けした。(d) (c) 内でのマークされた円内領域の電子線回折スポット。各スポット間長を表す矢印 h_1 , h_2 , および h_3 は、それぞれ z 軸に平行であり、 k_1 , k_2 , および k_3 は y 軸に平行であった。

4-2 回転変調磁場中コロイドプロセスによる 2 軸結晶配向性 RE123 バルク・厚膜の作製

4-2-1 首振り回転磁場を用いた Er123 配向厚膜の作製

超伝導磁石と試料回転機構の実験的な配置の関係上、望ましい磁化軸を持つのが Er123 相 (第一容易軸: b 軸、第二容易軸: a 軸、困難軸: c 軸) である。回転変調磁場のうち、ここでは首振り回転磁場を用いた。これにより、同じ試料回転方式でも間欠回転磁場に比べ、回転速度を低下させることが期待できる。また、小さい首振り回転角度でも配向できる物質選択を行うことで、回転によって生じる遠心力による配向の乱れを抑えることができる可能性がある。これを踏まえて、異なる初期粘性および異なる分散媒のスラリーについて磁場中シート成形法を用いて Er123 厚膜配向体を作製した。なお、市販の Er123 粉末を配向体作製の原料粉末とした。SEM から決定した平均粒径は 1.5 ミクロン (個数平均) であり、粒子の性状としては、粒子のほとんどはファセットが見られ、シングルグレインからなる粒子であると判断した。

ここでは、エタノールもしくはエタノール-ブタノール混合溶液を分散媒、PVB を粘性増強剤 (5 wt%)、

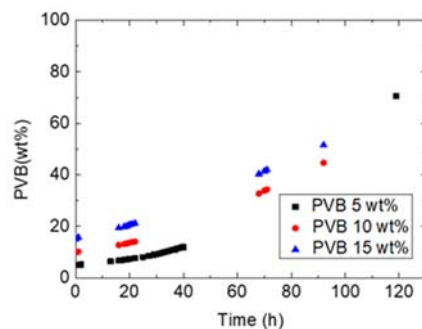


図5 無磁場下における Er123 スラリー (ブタノール混合) の PVB 濃度の時間変化。

10 wt%、15 wt%)としたスラリーを用いて、磁場強度 1, 3, 5 T、試料台の回転速度 20 rpm、首振り回転角度 $\phi = 45^\circ$ の条件で 2 軸配向実験を行った。エタノール、ブタノール、PVB および Er123 粉末を混合したスラリーを作製し、粘性の時間変化に着目して配向度の向上を目指した。

これらのスラリーに対して、PVB 濃度の時間変化を調べた。これらの結果を図 5 に示す。エタノールの一部をブタノールに置換したスラリーを用いることで、PVB 濃度の時間変化を抑えられた。すなわち、定性的にはブタノール添加により、粘性の時間変化を緩やかにする効果が得られることがわかった。上記の結果をもとに、PVB 濃度の時間変化を抑制したエタノール・ブタノール混合溶液を含む Er123 スラリーを用いて厚膜作製を行った。印加磁場条件は回転速度 20 rpm、首振り回転角度 $\phi = 45^\circ$ とし、磁場強度は、 $\mu_0 H_a = 3$ T および 5 T とした。Er123 厚膜の底面における (103) 極点図を測定したところ、いずれにおいても 4 回対称性のピークが確認でき、Er123 配向厚膜は 2 軸配向していた。また、(103) 極点図から、配向割合 F (%) を算出したところ、PVB 濃度 5 wt% を除き、ブタノールを含むスラリーで作製すると配向度が上昇した。特に、 $\mu_0 H_a = 5$ T、PVB 濃度 15 wt% のスラリーを用いて作製した厚膜においては、これまで作製した厚膜の中で最大の配向割合を示し、 $F = 38.1\%$ となった。これらの結果から、これまでのスラリーでは乾燥が早すぎたため、配向に必要な時間が十分に確保できずに配向度が低下していたことがわかった。

4-2-2 配列永久磁石を備えたりニア駆動型回転変調磁場発生装置を用いた Dy123 配向厚膜の作製

PVB 初期濃度と配向度との関係を知るため、PVB 初期濃度を変化させた PVB エタノール溶液を調製し、これらを用いて配向厚膜作製を行った。全ての実験で配向対象として市販 Dy123 粉末を用いた。印加磁場は、全ての実験で同一配列磁石(磁束密度は約 0.8 T の配列磁石 Ver.2)とそのリニア駆動装置による間欠回転磁場であり、磁石往復速度は 3 往復/秒(磁場回転速度約 300 rpm)とした。紙面の都合上詳細は省略するが、一連の探索的研究から、結晶粒同士の接触による配向への影響をできるだけ小さくするため、懸濁液中の Dy123 粉末の初期体積分率は全て 1.5 vol% とし、PVB5 wt% エタノール溶液を分散媒とした。

これらの結果を踏まえて、Dy123 の 2 軸配向焼結体を作製し、超伝導特性を評価した。具体的な作成方法は以下の通りである。PVB5 wt% エタノール溶液をスラリーとし、上記の配列磁石 (Ver.2) を用いて Dy123 厚膜 (約 10mm 角、厚さ 2mm 程度) を作製した。この配向グリーンシートについて、大気中、500°C、12h の条件で熱処理することで PVB を脱媒し、室温での中間 1 軸プレスを経て大気中、960°C、24h の焼結処理を施し、Dy123 配向焼結体を得た。図 6 に、配向グリーンシート (乾燥後) および配向焼結体 (焼結後) の上面・底面の (103) 極点図を示す。配向グリーンシート (乾燥後) と配向焼結体 (焼結後) の間の工程として、中間一軸プレスが含まれているので、底面の配向度が中間一軸プレスにより乱れた可能性があるが、基本的に 2 軸配向は維持されている。この配向焼結体の臨界電流密度 (J_c) を明らかにするために、残留磁化法を用いて粒間 J_c を 20K で決定した。比較として、同一の配向焼結体から 2 片切り出したものを評価するとともに、無磁場で作製したランダム配向焼結体についても評価した。図 7 に残留磁化法で測定した上記 3 試料の残留磁化と外部印加磁場の関係を示す。粒間結合が極めて強く試料全体で外部磁場を超伝導の反磁性で排除している場合には、原理的に残留磁化はゼロである。この残留磁化ゼロの状態が維持される磁場の上限を超えたときに粒間に磁束が侵入するが、このときの残留磁化が粒間 J_c に相当し、拡張ビーンモデルを使って粒間 J_c を求めることができる。結果として、20K において、ランダム配向体の粒間 J_c は 25 A/cm² であり、2 軸配向焼結体の粒間 J_c は 170 A/cm²、および 270 A/cm² であった。ランダム配向体の約 10 倍の J_c が得られたが、絶対値で見れば薄膜超伝導では $J_c = 10^6 \sim 10^7$ A/cm² であることから、明らかに粒間結合が弱く焼結が不十分であることを意味する。これは磁場配向法で高温超伝導材料を製造する上での今後の大きな課題である。

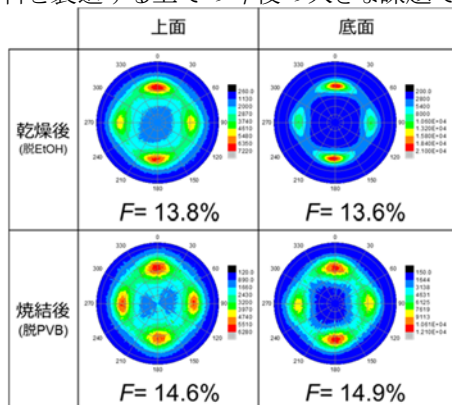


図6 配向グリーンシート (乾燥後) および配向焼結体 (焼結後) の上面・底面の(103)極点図。

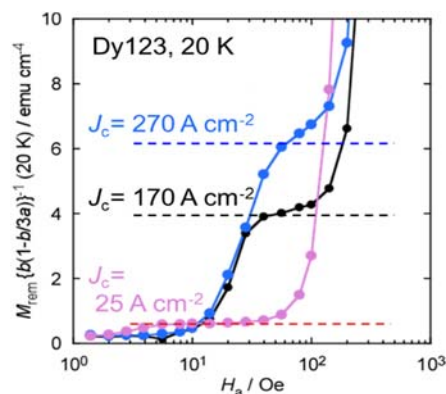


図7 残留磁化法で測定した Dy123 試料の残留磁化と外部磁場の関係。ピンク:ランダム配向焼結体。黒および青:2 軸配向焼結体。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7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 T. Kimura, H. Kashiwagi, F. Kimura, S. Horii, K. Takeda, T. Doi	4. 巻 22
2. 論文標題 Orientation loss of microcrystals of DyBa ₂ Cu ₃ O _y in polymer composite during curing of the medium under an external magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cryst. Eng. Comm.	6. 最初と最後の頁 5606-5612
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d0ce00795a	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 堀井滋	4. 巻 67
2. 論文標題 実用的3次元結晶配向法としての回転変調磁場配向への取り組みの現状	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 粉体および粉末冶金	6. 最初と最後の頁 213-219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2497/jjspm.67.213	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 堀井滋	4. 巻 89
2. 論文標題 三軸結晶配向手法としての磁場配向法の最近の進展	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 715-718
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.89.12_715	査読の有無 無
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 (1)F. Kimura, S. Horii, I. Arimoto, D. Notsu, T. Doi, M. Wada and T. Kimura	4. 巻 21
2. 論文標題 X-ray diffraction study on the orientation dynamics of biaxial microcrystals under static and rotating magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cryst. Eng. Comm.	6. 最初と最後の頁 4221-4226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/C9CE00599D	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 S. Horii, S. Fujioka, and T. Doi	4. 巻 57
2. 論文標題 Relationship between biaxial orientation degrees and grain in magnetically aligned (Y1-xErx)Ba2Cu3Oy powders with twin microstructures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 93101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.093101	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 S. Horii, I. Arimoto, and T. Doi	4. 巻 126
2. 論文標題 Linear drive type of modulated rotating magnetic field for a continuous process of three-dimensional crystal orientation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Cer. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 885-888
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2109/jcersj2.18128	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 F. Kimura, S. Horii, I. Arimoto, T. Doi, M. Yoshimura, M. Wada, and T. Kimura	4. 巻 122
2. 論文標題 Determination of the Anisotropic Rotational Diffusion Constant of Microcrystals Dispersed in Liquid Medium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. A	6. 最初と最後の頁 9123-9127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.8b08895	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 堀井滋	4. 巻 65
2. 論文標題 リニア駆動型回転変調磁場発生装置の開発と3次元結晶配向	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 粉体および粉末冶金	6. 最初と最後の頁 634-639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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34件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 堀井 滋、柏木勇人、足立 伸太郎、木村史子、土井俊哉
2. 発表標題 低い3軸磁気異方性をもつYBa ₂ Cu ₃ O _y の永久磁石を用いた2軸磁場配向
3. 学会等名 2021年春季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柏木勇人、木村史子、堀井 滋、川山巖、土井 俊哉
2. 発表標題 in situ X線回折測定による変調回転磁場下のDyBa ₂ Cu ₃ O ₇ 高温超伝導体微結晶の2軸磁場配向挙動の検討
3. 学会等名 2021年春季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村恒久、柏木勇人、木村史子、堀井 滋、竹田一旗、土井俊哉
2. 発表標題 磁場下硬化過程における微結晶の配向損失
3. 学会等名 2021年春季応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀井 滋、一瀬中
2. 発表標題 材料プロセスとしての磁場配向～磁場発生および材料的側面からの取り組み～
3. 学会等名 2020年日本磁気科学会、分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀井 滋、一瀬中、木村史子
2. 発表標題 二軸磁場配向体を用いたDyBa ₂ Cu ₃ O _y 焼結粉の双晶組織観察およびそのドメイン構造
3. 学会等名 2020年秋季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村史子、堀井 滋、土井 俊哉、吉村 政人、長谷川 和也、和田 昌久、木村 恒久
2. 発表標題 高温超伝導粒子の磁化率異方性に関する研究II
3. 学会等名 2020年秋季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Horii, H. Kashiwagi, F. Kimura, T. Doi
2. 発表標題 Biaxial aligned Dy ₁₂₃ by linear-drive type of modulated rotating magnetic field
3. 学会等名 European Conference on Applied Superconductivity 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀井、柏木、木村、土井
2. 発表標題 リニア駆動型回転変調磁場を用いたREBa ₂ Cu ₃ O _y 粉末の三次元結晶配向(2)
3. 学会等名 2019年春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀井、柏木、木村、土井
2. 発表標題 首振り回転磁場下で作製した2軸配向ErBa ₂ Cu ₃ O ₇ 厚膜の配向度と磁場・スラリー条件の関係
3. 学会等名 2019年秋季応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木、堀井、木村、土井
2. 発表標題 リニア駆動型変調回転磁場下で配向したDyBa ₂ Cu ₃ O _y 厚膜の配向度
3. 学会等名 2019年秋季応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀井
2. 発表標題 連続プロセスに対応した回転変調磁場の発生方法
3. 学会等名 2019年日本磁気科学会 年会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀井
2. 発表標題 リニア駆動型回転変調磁場の配列磁石設計および希土類系高温超伝導物質の2軸磁場配向
3. 学会等名 2019年秋季 粉体粉末冶金協会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏木、木村、堀井、川山、土井
2. 発表標題 in-situ X線回折測定による変調回転磁場下のDy123高温超伝導体微結晶の2軸磁場配向挙動の検討
3. 学会等名 2020年春季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下山淳一、近藤真吏、岡村行泰、元木貴則、武田泰明、堀井滋
2. 発表標題 多結晶RE123に対する後熱処理およびCaドーブ効果
3. 学会等名 平成30年春季低温工学・超電導学会（1B-a01）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井滋
2. 発表標題 希土類系高温超伝導体の結晶配向
3. 学会等名 新潟大学理学部物理学科コロキウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井滋
2. 発表標題 磁場配向のためのリニア駆動型磁場発生装置の開発と課題
3. 学会等名 平成30年超伝導バルク夏の学校（芝浦工大）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井滋、有本樹、柏木勇人、野津乃祐、土井俊哉
2. 発表標題 リニア駆動型回転変調磁場を用いたREBa2Cu3Oy粉末の三次元結晶配向
3. 学会等名 平成30年春季低温工学・超電導学会 (1B-a04)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井滋
2. 発表標題 磁場配向法を利用した単結晶性セラミックスの創出
3. 学会等名 H30年 高機能セラミックス展専門技術セミナー (CERA-5) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野津乃祐, 堀井滋, 有本樹, 柏木勇人, 土井俊哉
2. 発表標題 高温超伝導体REBa2Cu3O7粉末の2軸配向に与える磁場印加法の影響
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 平成30年度春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井 滋、柏木勇人、野津乃祐、木村史子、土井俊哉
2. 発表標題 分散媒粘性を考慮したRE-Ba-Cu-O粒子の2軸磁場配向条件
3. 学会等名 平成30年秋季応用物理学会 (7a-S42-10)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏木勇人、堀井 滋、野津乃祐、土井俊哉
2. 発表標題 回転工程を含まない回転変調磁場による(Y,Dy)Ba ₂ Cu ₃ O _y 超伝導体の2軸磁場配向
3. 学会等名 平成30年秋季応用物理学会(19a-PB2-6)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井 滋、柏木勇人、野津乃祐、木村史子、土井俊哉
2. 発表標題 リニア駆動型回転変調磁場発生装置の開発
3. 学会等名 平成30年日本磁気科学会第13回年会(0-19)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井 滋、柏木勇人、野津乃祐、木村史子、土井俊哉
2. 発表標題 リニア駆動型回転変調磁場を用いたRE123粒子の2軸磁場配向
3. 学会等名 平成31年春季応用物理学会(11p-S423-3)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀井 滋、有本 樹、野津乃祐、土井俊哉、木村史子、木村恒久
2. 発表標題 分散媒粘性を考慮したRE-Ba-Cu-O粒子の2軸磁場配向条件
3. 学会等名 平成30年春季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井 滋
2. 発表標題 磁場配向法による斜方晶系超伝導セラミックスの三次元結晶配向
3. 学会等名 平成30年春季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野津乃祐、堀井 滋、有本 樹、柏木 勇人、土井俊哉
2. 発表標題 首振り回転磁場下における(Y,Er)Ba ₂ Cu ₃ O ₇ 粉末の配向挙動
3. 学会等名 平成30年春季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀井 滋、有本 樹、野津乃祐、土井俊哉
2. 発表標題 分散媒の粘性を考慮したRE ₂ Ba ₄ Cu ₇ O _{15-y} 超伝導体の2軸磁場配向条件の検討
3. 学会等名 平成29年日本磁気科学会第12回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 有本 樹、堀井 滋、野津乃祐、土井俊哉
2. 発表標題 希土類系高温超伝導体の2軸磁場配向度に与える磁場印加条件と双晶の影響
3. 学会等名 平成29年日本磁気科学会第12回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野津乃祐、堀井 滋、有本 樹、土井俊哉
2. 発表標題 首振り回転磁場を用いた希土類系銅酸化物高温超伝導体の2軸結晶配向
3. 学会等名 平成29年日本磁気科学会第12回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Horii, I. Arimoto, D. Notsu, and T. Doi
2. 発表標題 Bi-axial Magnetic Alignment in Twinned REBa ₂ Cu ₃ O _y Superconductors
3. 学会等名 International Conference on Magneto Science 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀井 滋
2. 発表標題 強磁場を利用した希土類系高温超伝導物質の配向制御
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 パルクの磁氣的挙動調査研究会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀井 滋、有本 樹、野津乃祐、土井俊哉、木村史子、木村恒久
2. 発表標題 双晶を含むRE123粒子の配向エネルギーと配向度の関係
3. 学会等名 平成29年秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野津乃祐、堀井 滋、有本 樹、土井俊哉
2. 発表標題 首振り回転磁場下における(Y,Er)Ba ₂ Cu ₃ O ₇ 粉末の配向挙動
3. 学会等名 平成29年秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Horii, I. Arimoto, D. Notsu, and T. Doi
2. 発表標題 Bi-axial Alignment of REBa ₂ Cu ₃ O _y Superconductors under Modulated Rotating Magnetic Fields
3. 学会等名 IUMRS-ICAM 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 堀井	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 700
3. 書名 「高熱伝導材料の開発」(担当: 第3章 第7節)	

1. 著者名 S. Horii and J. Shimoyama (Chapter 6)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Nova Science Publishers, Inc.	5. 総ページ数 pp.153-pp178
3. 書名 High-temperature superconductors -Occurence, synthesis and applications-	

〔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	下山 淳一 (Shimoyama Jun-ichi) (20251366)	青山学院大学・理工学部・教授 (32601)	
研究分担者	一瀬 中 (Ichinose Ataru) (70371284)	一般財団法人電力中央研究所・電力技術研究所・上席研究員 (82641)	

	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
研究協力者	足立 伸太郎 (Adachi Shintaro)		2020.7より参画。

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