

〈特別研究課題〉 低コストスマートグリッドを目指した
ナノ組織高温超伝導高効率電流輸送導体
助成研究者 名古屋大学 吉田 隆



低コストスマートグリッドを目指した
ナノ組織高温超伝導高効率電流輸送導体
吉田 隆
(名古屋大学)

Nanostructured high temperature superconducting current
transport conductor aimed at low cost smart grid

YUTAKA YOSHIDA
(Nagoya University)

Abstract :

In this study, we aimed to fabricate REBCO long wires that are effective against the longitudinal magnetic field effect. Additive $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) thick-film wires were fabricated and their superconducting properties in a longitudinal magnetic field were evaluated. In addition, using the prepared BHO-added YBCO wire, a single-layer longitudinal magnetic field superconducting conductor, which is assumed to be the inner conductor of a force-free cable, was fabricated, and a DC current test was performed.

From the magnetic field dependence of J_c in the longitudinal magnetic field of the BHO-doped YBCO wire normalized by J_c in the self-magnetic field at 65 K, the area where the magnetic field dependence of J_c is flat increases as the film thickness increases. The sample showed $J_c/J_{cs.f.} = 1.01$ at 0.3 T. However, J_c decreased monotonically at film thicknesses of 2.3 μm and above.

We also show the I - V characteristics of a single-layer longitudinal magnetic field superconducting conductor with a winding angle of 5° in a longitudinal magnetic field at 77 K. Resistance was generated from the beginning of the measurement, and zero resistance peculiar to superconductivity was not observed. A voltage rise occurs at about 200- 300 A at 77 K, and I_c of a single-layer longitudinal magnetic field superconducting conductor fabricated using REBCO wires was successfully obtained.

1. はじめに

近年、世界中で電力需要が高まっており、年間の電力使用量は1990年から2019年のおよそ30年間で2倍以上に増加している。一般的に、送電系統にはCuやAl合金を用いた導体を使用されているが、上記の背景から電気抵抗による送電損失や、大電流通電のためにケーブルサイズが巨大化し、地中送電における敷設コストが課題である。そこで、超伝導ケーブルによる電気抵抗ゼロでの送電を用い、送電損失の大幅な減少が期待される。さらに、超伝導ケーブルは単位面積あたりに流せる電流がCuなどと比較して大きいため、ケーブルを小型化し、既存のトンネルを用いて敷設可能である。そのため既存の送電ケーブルの超伝導ケーブルへの換装には敷設用トンネルの拡張や増設を必要としない。

現在、日本における送電方法は交流送電が用いられている。理由としては、主力発電方法である火力や原子力発電で生成される電力が交流であること、送電途中での変圧が容易であるなどが挙げられる。しかし、家庭や事業所などで利用される機器では直流電力を用いる場合が多い。また、交流送電では三つのケーブルコアを用いた三芯一括型のケーブルを用いた三相交流送電が主流であるが、直流送電であればケーブル一本の単相で済む。そのため直流送電を用いることで送電過程の変圧や交直変換にかかる設備コストが削減される。そこで、REBa₂Cu₃O₇(REBCO)などの高温超伝導体を用いた超伝導ケーブルによる直流送電技術は省スペースで高効率な送電が可能な点に注目が集まっている。

REBCO高温超伝導体は高い臨界温度 T_c を有し、さらに磁場中において高い臨界電流密度 J_c を有していることから、様々な分野での応用が期待されている。第二種超伝導体であるREBCO高温超伝導体の磁場中 J_c は、磁束ピンニングに依存し、自然ピンニングセンター(Pinning center: PC)や人工ピンニングセンター(Artificial Pinning center: APC)の形状やサイズによって変化する。多くの場合、超伝導体の磁束ピンニング及び磁場中超伝導特性に関する研究は、電流と磁場が直交する横磁場中において議論される。横磁場中では量子化磁束に働くLorentz力が駆動力となって運動し、PCによる磁束ピンニングによってその運動が抑制される。一方、電流と磁場が平行である縦磁場中においては磁束に働くLorentz力は理論的にはゼロとなり、この状態では様々な特異な電磁現象が報告されている。これらの電磁現象を総じて縦磁場効果と呼ばれている [1]。

直流超伝導ケーブルの更なる通電容量向上のために、この縦磁場効果を用いたフォースフリーケーブルが提案されている。一般的に電流と磁場が垂直な横磁場中における J_c は、印加磁場の増加に伴って単調に減少する。一方、電流と磁場が平行な縦磁場中では、ある磁場において自己磁場中より J_c が向上する[2]フォースフリーケーブルはこの縦磁場中における J_c の向上を利用しており、内部導体に縦磁場を実現しケーブルの通電容量を向上させる設計が採用されている。フォースフリーケーブルの実用化に向けて、縦磁場中で高い J_c を有する高温超伝導線材の開発が必要であるが、縦磁場中において J_c が自己磁場中より向上する J_c gainの具体的な発現機構については明らかにされておらず、 J_c gainの発現及び向上に最適な薄膜構造について、更なる検討の余地がある。フォースフリーケーブルに向けて、REBCO線材の縦磁場中における J_c 向上に関する研究が行われており、REBCO薄膜の主流な作製方法の一つであるPLD法を用いて作製した、APC添加REBCO薄膜において再現性良く J_c gainが観測される薄膜構造が報告された[3,4]しかし、これらの報告は基板を静止させて成膜する静止系によって作製されており、試料のサイズは10 mm×10 mm程度に限られる。

また、上記で報告された試料は膜厚0.3 μm 程度の非常に薄いREBCO薄膜である。したがって、ケーブル応用を想定した場合、基板移動させながら成膜する移動系による線材の長尺化と臨界電流 I_c を向上させるためのREBCO層の厚膜化が必要となる。

縦磁場効果の1つとして、縦磁場中の J_c が横磁場中と比較して向上することが知られている[2]さらに、横磁場中では J_c は磁場の増加に伴って単調に減少するが、縦磁場中では有限の磁場にてピークを示し、自己磁場中よりも向上する(J_c gain) 場合が報告されている。縦磁場効果は送電分野での応用も検討されており、超伝導送電ケーブルの通電容量を向上させる手段として、縦磁場中での J_c の向上を利用するフォースフリーケーブルが提案されている。フォースフリーケーブルは帰りの電流が流れる外部導体が発生させる自己磁場によって、外部設備なしで内部導体部分に縦磁場を実現し、ケーブルの通電容量が向上する設計である。

以下では、現在報告されているREBCO薄膜の縦磁場中 J_c 向上に関する研究について紹介する。Tsurutaら及びSugiharaらは、REBCO薄膜の主流な作製方法の一つであるPLD法を用いて作製した、APC添加REBCO薄膜において再現性良く J_c gainが観測される薄膜構造について報告した[3,4]これらの報告は基板を静止させて成膜する静止系によって作製されており、試料のサイズは10 mm \times 10 mm程度に限られる。また、現在市販されているREBCO線材の膜厚が2 μm 程度であるのに対し、上記で報告された試料は膜厚0.3 μm 程度のREBCO薄膜である。したがって、ケーブル応用を想定した場合、1つ目の課題として、基板を移動させながら成膜する移動系による線材の長尺化と臨界電流 I_c を向上させるためのREBCO層の厚膜化が必要となる。さらに、 J_c gainが再現良く得られた薄膜構造は、nmオーダーの積層構造を有するため、移動系においてこの構造制御を行うには複数回の成膜が必要であり、線材作製時間が増加する。そのため、2つ目の課題として、積層構造を伴わない平易なプロセスで作製され、かつ、縦磁場中で J_c gainを示すREBCO線材の作製が求められる。

さらに、REBCOの縦磁場中における J_c gain発現に有効な薄膜構造について検討する。Tsurutaらの報告より、REBCO薄膜の縦磁場中における J_c の向上には、磁束の3次元的な回転運動を抑制する3次元PCの存在が一つの効果的な要素であると考えられている[3]そこで、本研究では3次元PCを平易なプロセスで導入するために、REBCO線材の成膜条件とBHOナノロッドの形状の關係に着目した。S. Miuraらは、LTG法を用いた低温で作製したBHO添加SmBCO薄膜ではBHOナノロッドが短く傾斜して、高数密度に成長することを確認した[5]。また、高い成膜速度で作製したBHO添加SmBCO薄膜においてもBHOナノロッドが短く傾斜して成長することが報告されている。これらの傾向から、ケーブル応用を想定したREBCO厚膜線材の高速作製では、短く切れたBHOナノロッドが多く成長することが期待される。このように短く切れたBHOナノロッドが3次元PCとして機能し、縦磁場中における J_c 向上に寄与する可能性が考えられる。

2. 本研究の目的

これまで述べたように、REBCO線材のフォースフリーケーブル応用には縦磁場中で高い I_c を有する長尺線材の開発が必要不可欠である。Sugiharaらによって縦磁場中において J_c gainが再現よく観測される薄膜構造が報告されているが[4]、示された薄膜構造はnmオーダーで制御した非常に微細な構造をしている。移動系において報告にある微細構造制御を行うことは線材作製時間の増加に繋がるため線材作製プロセスコストが増加する。したがって、高度な構造制御技術を伴わずに、縦

磁場中で高い I_c を有するREBCO長尺線材の作製が求められる。以上を踏まえ、本研究では高度な構造制御技術を伴わない縦磁場中で効果的なREBCO線材の構造探索を目的として、異なる膜厚でBaHfO₃添加YBa₂Cu₃O_{7-x}線材を作製し、微細構造観察や磁場中超伝導特性の評価、考察を行う。

3. 実験方法：Reel-to-Reel PLD装置の概要

BaHfO₃添加YBa₂Cu₃O_{7-x}超伝導線材の作製に使用したReel-to-Reel PLD装置の概要について述べる。

本研究で使用したPLD装置の模式図を図1に示す。本研究ではREBCO線材のケーブル応用のための長尺化を見据えて、Reel to Reelシステムを備えたPLD(RtR PLD)装置を使用した。RtRシステムは2つのリールを用いて金属テープを送り出し、基板を移動させながら成膜すること(移動系)で長尺線材の作製を可能にする装置である。左右のリールにダミー線材としてHastelloyテープが溶接されており、このリールには最大長さ100 m、幅12 mmのテープが装着可能である。本研究では成膜基板として幅6 mm、厚さ75 μ mのIBAD-MgO基板、ダミー基板として幅5 mm及び幅10 mm、厚み100 μ mのHastelloyテープを使用した。向かって右側のリールに付属している回転機構により基板に引張方向のトルクを付与している。リール部の半径は40 mm、リールの最大トルクは50 N \cdot mである。成膜基板の断面積は0.45 mm²、ダミー基板の断面積は0.50 mm²であるから、それぞれに働く引っ張り応力は最大4.5 MPa、4.05 MPaである。トルクは制御装置のダイヤルにて調整し、本研究では、最大トルクの1/4-1/3程度の負荷で基板をリールにより引っ張り薄膜の作製を行った。したがって、本研究において基板にかかった引っ張り応力は1.5 MPa程度と考えられる。また、向かって左側のリールの回転をコンピュータにより制御し、基板の移動速度を変更することが可能である。最大基板移動速度は100 mm/sである。装置全体はレーザー発振源、真空チャンバー、真空ポンプ、酸素導入部から構成されている。真空チャンバー内には縦28 mm、横113 mmのSiCヒーター2つ、均熱板、ターゲットホルダー、リール、O₂導入及び排出口、大気開放弁がある。3つのターゲットが設置可能で、図2に示すように自転と公転をコンピュータにより制御することでターゲット表面に均一にレーザーを照射することが可能である。レーザー発振源にはCoherent(株)製のKrFエキシマレーザーCOMPex PRO100F(励起波長 $\lambda = 248$ nm)を使用した。また、REBCO薄膜の組成及び膜厚の均一性を向上させるために、AOV(株)製のレーザー स्क্যান装置EKHS-10を用いた。EKHS-10はガルバノスキャナである。装置内部のコイルに電圧を印加し、誘導磁場を発生させる。この磁場に応じて回転軸に設置された永

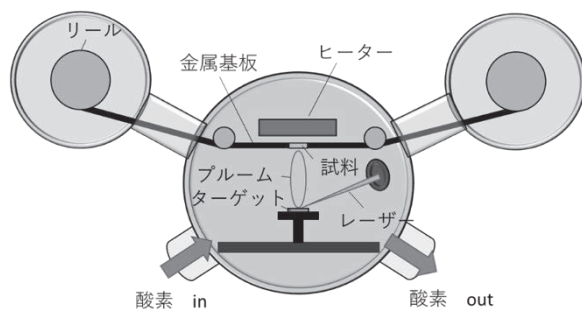


図1 Reel to Reel PLD装置の模式図

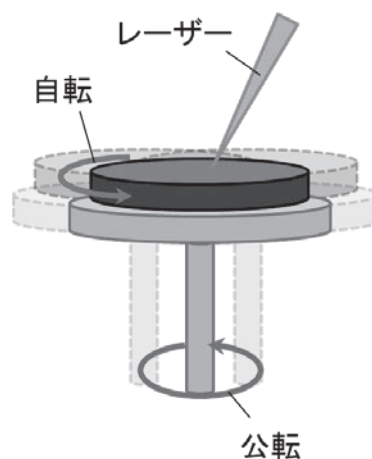


図2 ターゲットの自転・公転の模式図

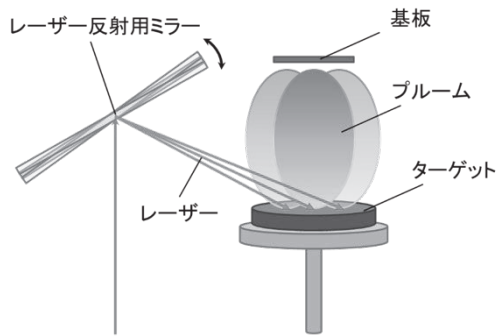


図3 レーザースキャンによるブルーム制御の模式図

久磁石が反発しトルクが発生することで、レーザー反射用のミラーが回転する。(株)テクシオテクノロジー製のファンクションジェネレーター GWInstek-AFG2005を用いて出力した三角波に応じてレーザー反射用ミラーの角度が高速で変更し、光軸をわずかにずらすことで、疑似的にマルチブルームが生成される。図3にレーザースキャンによるブルーム制御の模式図を示す。本研究ではGWInstek-AFG2005が出力する三角波の波形を、周波数29 Hz、電位差0.200 V-ppとした。

4. 実験結果

表1に、BHO添加YBCO線材の成膜条件を示す。REGREB法及びReel to Reel PLD法により長さ3 cmのIBAD-MgO基板上にBHO添加YBCO層を成膜した。図4に膜厚0.3 μm のBHO添加YBCO線材の異なる T_s^{upper} における J_c およびBaCeO₃混在率を示す。 T_s^{upper} は、膜厚0.3 μm の線材において臨界電流密度 J_c が最も高く、かつBaCeO₃が発生しない900 $^{\circ}\text{C}$ を採用した。次に、成膜時の線材送り速度を調節することで、upper層の膜厚を制御した。各試料の層膜厚はそれぞれ0.3、0.9、1.6、2.3、3.0 μm である。

4.1 BaHfO₃添加YBa₂Cu₃O_y線材の結晶配向性

XRD測定の 2θ - ω 測定より、すべての膜厚にてBaHfO₃添加YBa₂Cu₃O_y線材は c 軸配向しており、 a 軸配向粒は現れなかった。また、図5に示す膜厚2.3 μm 及び3.0 μm のBHO添加YBCO線材の 2θ - ω 測定結果よりBaCeO₃の生成が確認され、BaCeO₃混在率はそれぞれ1.1 %、1.6 %であった。BaCeO₃は基板表面のCeO₂層とBaが反応して生成される。BaCeO₃の生成は基板温度が増大するにつれて発生する。本実験の温度条件は膜厚0.3 μm の線材において臨界電流密度 J_c が最も高く、かつBaCeO₃が発生しない条件を採用した。線材送り速度が遅いときほど、基板が加熱用のSiCヒーターの直下部分を通過する時間は増加するため、成膜時の基板温度は上昇すると考えられる。本研究で使用したReel-to-Reel PLD装置において、最適成膜温度は線材送り速度が遅くなるにつれて

表1 BHO添加YBCO線材の成膜条件

パラメータ	buffer層条件	upper層条件
成膜方法	RtR PLD法	
レーザー光源	KrFエキシマレーザー with L.S.	
ターゲット	YBCO	YBCO
基板	IBAD-MgO	
線材長さ	3 cm	
線材幅	6 mm	
成膜基板温度	890 $^{\circ}\text{C}$	900 $^{\circ}\text{C}$
酸素分圧	53 Pa	200 Pa
レーザー周波数	100 Hz	100 Hz
レーザーエネルギー密度	2.6 J/cm ²	2.6 J/cm ²
線材送り速度	7.20 m/h	0.54-7.20 m/h
膜厚	0.1 μm	0.2-2.9 μm

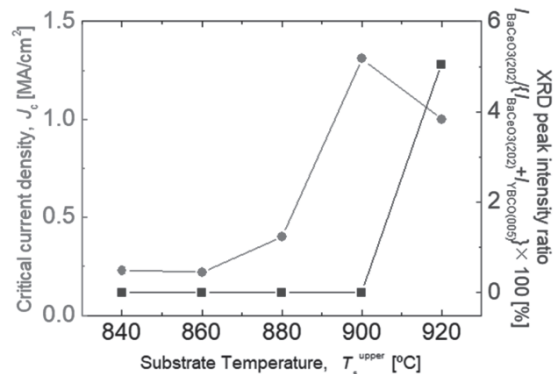


図4 膜厚0.3 μm BHO添加YBCO線材の異なる T_s^{upper} における J_c 及びBaCeO₃混在率

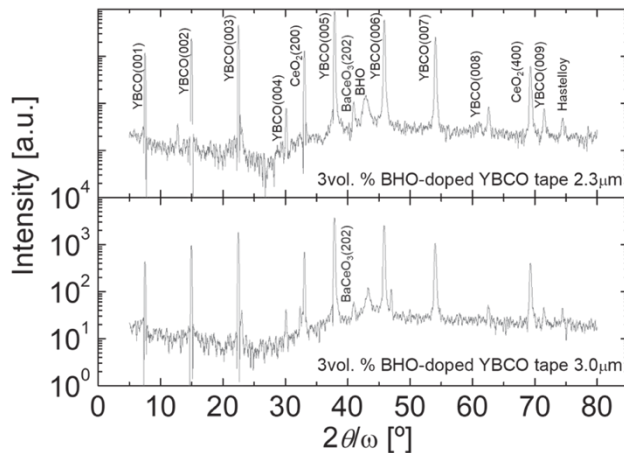


図5 膜厚2.3 μm及び3.0 μmのBHO添加YBCO線材の2θ-ω測定結果

よりBaCeO₃が生成されたと考えられる。

4.2 BaHfO₃添加YBa₂Cu₃O_y線材の断面TEM観察元素マッピング測定を用いたナノ組織観察

図6に膜厚1.6 μmのBHO添加YBCO線材の(a)低倍率及び(b)高倍率の断面TEM観察像、図7に元素マッピング測定の結果を示す。作製したBHO添加YBCO線材は、下から基板、100 nm程度のbuffer層、1.5 μm程度のupper層の順に積層されている。upper層内には、黒色の矢印で示した薄膜垂直方向に平行の濃いコントラストを含む50-200 nmの層、濃いコントラストの厚さ7-30 nm程度の層、白色の矢印で示した薄いコントラストの30-150 nmの層が積層していた。各層はab面方向に対して500-2000 nmほどの広がりを持っていた。試料の表面には、青色の矢印で示した高さ140 nm、幅500 nm程度の析出物が生成されていた。また、図(b)の高倍率観察より、垂直方向に伸びた濃いコントラスト部分は、直径が5-8 nm程度、長さが30-200 nm程度であり、垂直方向に対して±0-20°程度の角度で傾いて成長していることを確認した。元素マッピング結果より、コントラストの濃い部分は薄い部分と比較してHfが多く存在し、Baがわずかに多く存在している。したがって、垂直方向に伸びた濃い領域はBHOナノロッド、面方向に広がった濃い領域はBHO相であると考えられる。したがって、upper層に観られた積層構造は、①BHOナノロッドを含んだYBCO層、②BHOが固化した層、③BHOを含まないYBCO層の順に積層していると考えられる。

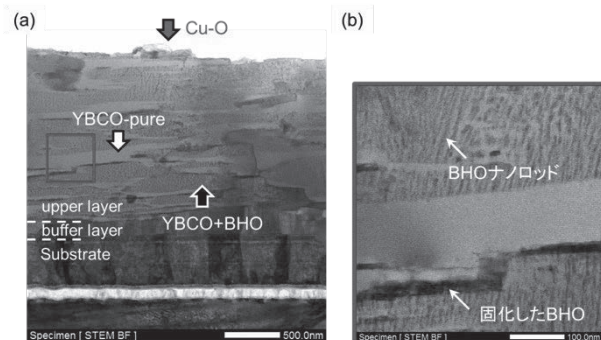


図6 膜厚1.6 μmのBHO添加YBCO線材の(a)低倍率及び(b)高倍率の断面TEM観察像

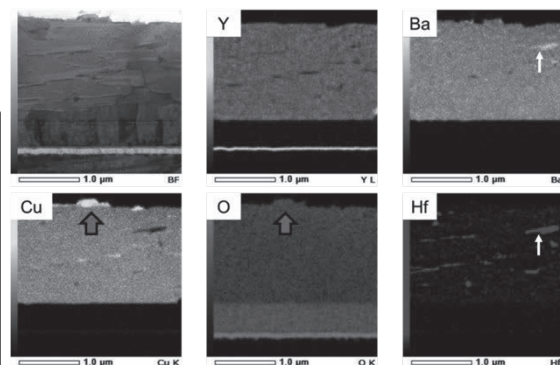


図7 膜厚1.6 μmのBHO添加YBCO線材の断面元素マッピング測定結果

上昇し、1 m/hの速度変化に対して1.0-1.5 °C程度変化すると概算されている。ここでの最適成膜温度は、各線材送り速度におけるa軸配向粒混在率が最も低くなる成膜温度と定義されている。したがって、BHO添加YBCO線材のupper層成膜時の基板温度は、膜厚が最も薄い0.3 μmと最も厚い3.0 μmの間で6-10 °C程度の差が生じていた可能性がある。そのため、膜厚2.3 μm及び3.0 μmの比較的膜厚の厚いBHO添加YBCO線材の成膜では、基板温度の上昇に

4.3 縦磁場中における臨界電流密度 J_c の磁場依存性

図8に(a)77 K、(b)70 K及び(c)65 KにおけるBHO添加YBCO線材の縦磁場中 J_c の磁場依存性を示す。横軸が印加磁場、縦軸が J_c を自己磁場中臨界電流密度 $J_c^{s.f.}$ で規格化した値を示している。77 Kにおいては印加磁場の増加に伴って J_c が単調に減少し、膜厚による大きな差異は見受けられなかった。一方、測定温度が低下するにつれて平坦な領域が出現し始め、65 Kでは膜厚の増加に伴い平坦な領域が増加した。膜厚1.6 μm の試料は0.3 Tで規格化 $J_c = 1.01$ を示した。また、2.3 μm 以上の膜厚では J_c は減少傾向を示した。しかし、これは図5で確認された BaCeO_3 の影響を受けていると考えられ、 BaCeO_3 が生成されないよう作製条件を調整することで異なる磁場依存性が得られる可能性がある。

以前のSugiharaらの報告により、 ab 面方向の2次元PCとして機能する積層界面と、3次元PCとして機能する短く切れたBHOナノロッドがフォースフリートルクに対して有効なPCと考えられている[4]。図9に縦磁場中における磁束ピンニングの概念図を示す。縦磁場中では、超伝導体内に侵入した量子化磁束は薄膜表面で自己磁場によって歪められ、その歪みを解消しようとする復元力としてフォースフリートルクが働く。このフォースフリートルクに起因して、量子化磁束は超伝導体内部へと磁束の歪みを解消しながら併進運動を行う。その際に積層界面やBHOナノロッドなどのPCが量子化磁束の運動を抑制する。縦磁場中における J_c はこのフォースフリートルクと磁束ピンニングのバランスによって変化する。したがって、縦磁場中 J_c の向上にはこの2次元及び3次元のPCを制御することが重要になってくる。本研究で作製した試料では、断面TEM観察より図10に示すようなBHOナノロッドを含むYBCO層、BHOの固化、BHOナノロッドを含まないYBCO層が積層した構造が試料全体に形成されていることが確認された。赤い点線で示すような各層の界面が ab 面方向の2次元的な磁束ピンニングに寄与したことで縦磁場中 J_c が向上した可能性が考えられる。しかし、断面TEM観察結果のみでの積層界面の定量的な評

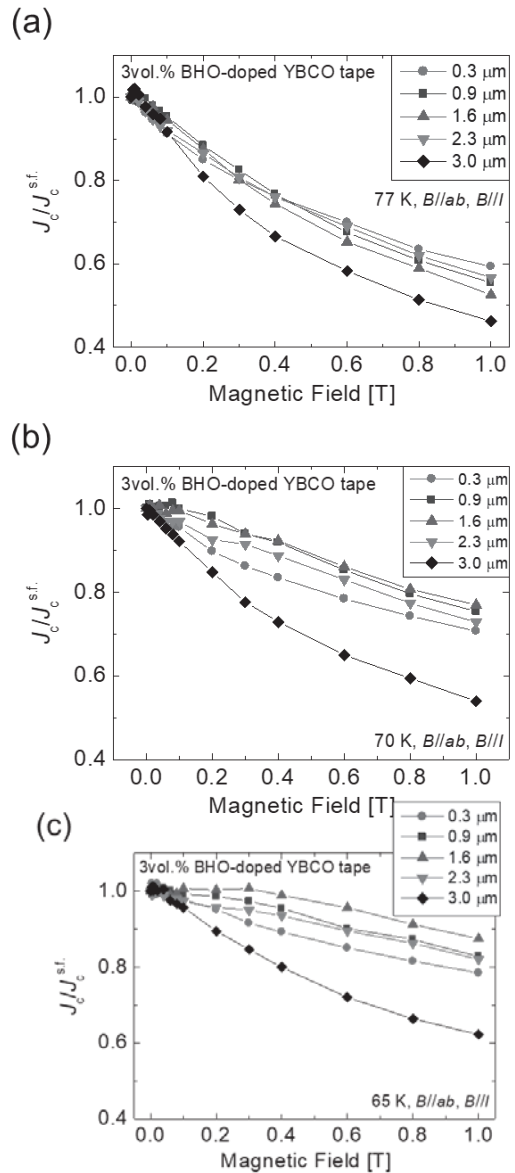


図8 (a)77 K、(b)70 K及び(c)65 KにおけるBHO添加YBCO線材の縦磁場中 J_c の磁場依存性

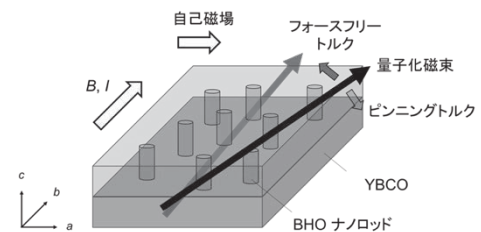


図9 縦磁場中における磁束ピンニングの概念図

価は困難である。一方、BHOナノロッドに関しては磁場印加角度依存性より、図11に示す模式図のように膜厚の増加により上層部に行くほど短く傾斜したBHOナノロッドが増加していると予想される。これにより3次元PCとして機能するBHOナノロッドが増加したことで縦磁場中 J_c が向上した可能性が考えられる。また、77 Kと65 Kにおいて差異が生じた理由に関しては、 J_c の磁場印加角度依存性と同様にBHOナノロッドの直径が影響していると考えられる。

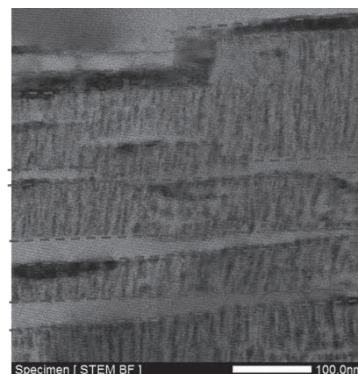


図10 膜厚1.6 μmのBHO添加YBCO線材の高倍率断面TEM像

4.4 単層縦磁場超伝導導体の通電試験

BHO添加YBCO線材を作製し、その複数本の線材から長さ7 cm、巻き角を5°及び10°とした単層縦磁場超伝導導体を作製し、導体の縦磁場中での直流通電試験を行った。

本節では、まず、導体通電試験により得られた電流電圧特性の結果、解析手法について述べる。その後、導体の臨界電流 I_c の計算モデルについて説明し、 I_c の磁場依存性について実測値と設計値の比較を行う。ここで、縦磁場超伝導導体は、フォースフリーケーブルの内部導体部分と定義する。

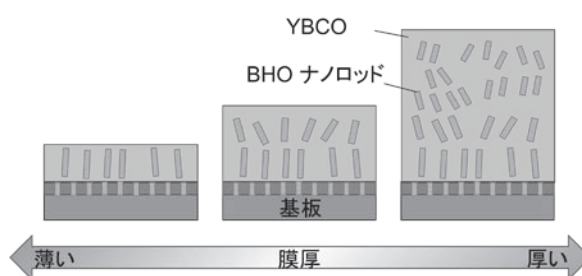


図11 BHOナノロッドの成長と膜厚の関係

4.5 電流電圧特性の測定結果及び解析

表1 単層縦磁場超伝導導体の作製に用いたBHO添加YBCO線材の概要。

超伝導線材	BHO添加YBCO線材
作製方法	REGREB法
線材長さ	7 cm
線材幅	4 mm
REBCO層膜厚	0.9 μm
Ag層膜厚	2.0 μm

表1に、単層縦磁場超伝導導体に用いたBHO添加YBCO線材の諸元を示す。1回の成膜で長さ50 cmのBHO添加YBCO線材を作製し、長さ7 cmずつに7本の線材を金属ばさみを用いて切り出した。上記の工程を計3回行い、予備の線材を含めて21本の線材を作製した。図12に、77 Kにおける巻き角5°及び10°の単層縦磁場超伝導導体の電流電圧(I - V)特性を示す。

巻き角5°導体は、50 A付近までは負の抵抗を示し、その後200 A付近までは正の抵抗を示し電圧が上昇した。常伝導転移による電圧の立ち上がりは200-250 Aの間で発生し、印加磁場の増加に伴って立ち上がる電流値が小さくなった。巻き角10°導体は、300 A付近までは正の抵抗を示し電圧が上昇した。常伝導転移による電圧の立ち上がりは300-400 Aの間で発生し、印加磁場の増加に伴って立ち上がる電流値が小さくなった。また、巻き角10°導体では、自己磁場中及び0.1 Tにおける

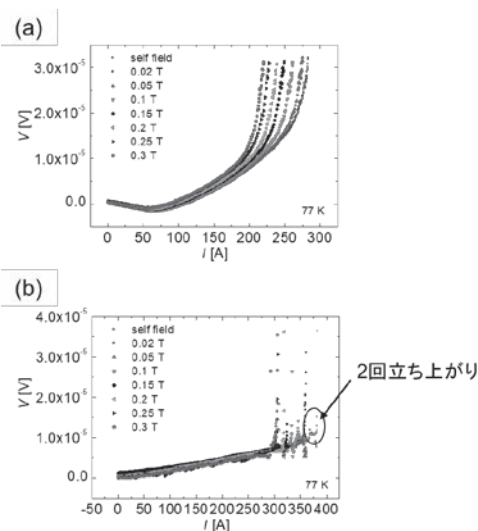


図12 77 Kにおける(a)巻き角5°及び(b)巻き角10°の単層縦磁場超伝導導体の電流電圧(I - V)特性。

測定において I - V 曲線が2回立ち上がる現象が確認された。

導体の I_c の磁場依存性を得るため、図12で示した I - V 特性から、以下の解析を行い I_c を決定した。一般的に、 I_c 決定の電場基準は 1×10^{-4} V/mとされる。しかし、本研究で得られた I - V 特性では抵抗成分が存在するため、電場基準の 1×10^{-4} V/mでは正確な I_c を決定には不適切である。したがって、本研究では常伝導転移の特性が強く現れている I - V 曲線の立ち上がり部分に電場基準を設けた。今回の測定では、導体の焼損の可能性を考慮して測定停止電場を 1×10^{-3} V/mとした。したがって、測定停止電場以下の電場で、電圧の立ち上がりが確認された、 7×10^{-4} V/mを電場基準に設定した。上記の電場基準を基に算出した導体の n 値は、巻き角 5° 導体ではおよそ9であったのに対し、巻き角 10° 導体ではおよそ60と大きな値を示した。REBCO市販線の n 値は20-30程度である [6]。

図13に電場基準を 7×10^{-4} V/mとして算出した I_c の磁場依存性を示す。自己磁場中における I_c は、巻き角 5° 導体は272 A、巻き角 10° 導体では383Aとおよそ101 Aの差があった。これは、導体に使用したBHO添加YBCO線材の J_c によると考えられる。同

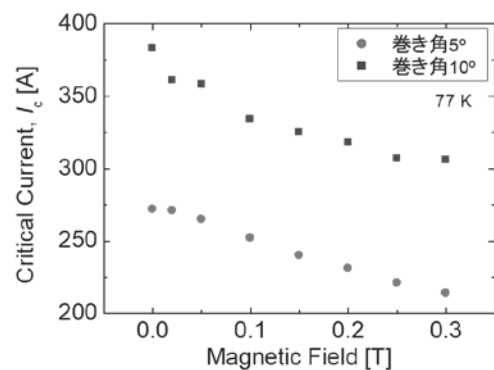


図13 巻き角 5° 及び 10° 導体の I_c の磁場依存性。

条件で作製したBHO添加YBCO線材において、 J_c は ± 0.1 MA/cm²程度の違いが生じる場合がある。仮に、巻き角 5° 及び 10° 導体を使用したBHO添加YBCO線材の J_c に、 0.2 MA/cm²の差が生じたとすると、1本の線材で7.2 A、9本の線材を使用した導体では63.8 A程度の差が生じる。このように、線材を多数用いる導体では I_c の絶対値の差は大きくなる。したがって、REBCO線材の超伝導体応用には、より均一な超伝導特性を有する

REBCO線材が必要である。また、 I_c は電場基準の設定によって算出される値が変化する。本研究のように、抵抗成分を考慮して、電場が立ち上がり始めた部分より高い値を基準にした場合、 I_c が実際より高く見積もられる。仮に、巻き角 10° 導体の n 値が市販線と同程度のおよそ20となるように電場基準を設けた場合、 I_c は349 Aである。したがって、本研究で作製した単層縦磁場超伝導体の I_c は、電場基準によって数10 A程度異なることに注意する必要がある。

4.3.2 縦磁場導体の I_c 計算モデル

縦磁場効果を利用した超伝導体の直流送電において、導体の I_c は以下の方法で算出される [7]。図14にフォーマーに N 層の超伝導線材を巻いた超伝導体の模式図を示す。層数 N の導体における i 番目の層について考える。 i 層の臨界電流を I_{ci} 、導体全体の臨界電流を I_c とする。さらに、 i 層には I_{ci} が流れていると仮定する。 i 番目の層は半径 R_i の中空円筒であると考え、角度 θ_i で超伝導線材を隙間なく巻く。外部シールド層が生み出す磁場 B_{ext} は導体の軸に平行で、電流方向に印加する。

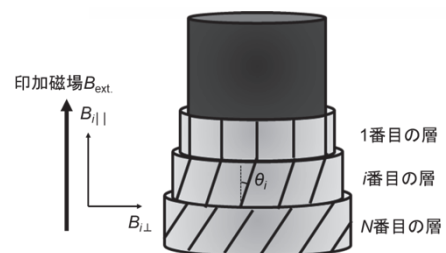


図14 フォーマーに N 層の超伝導線材を巻いた超伝導体の模式図。

図15に、上述した計算モデルを用いて計算した単層縦磁場超伝導体の I_c の磁場依存性を示す。計算に使用した超伝導線材は、膜厚 $0.9 \mu\text{m}$ のBHO添加YBCO線材の縦磁場及び横磁場中 J_c - B 特性を使用した。自己磁場中における I_c は巻き角 5° 導体が437 A、巻き角 10° 導体が432 Aであり、YBCO線材1本あたりには48-49 Aの電流が流れる。導体の磁場中特性は使用したBHO添加YBCO線材の

J_c - B 特性に依存する。BHO添加YBCO線材は、測定温度77 Kでは印加磁場に対して J_c は単調減少し、0.3 Tにおける J_c は自己磁場中と比較して17.5 %減少した。巻き角5° 導体では0.3 Tにおける J_c は自己磁場中と比較して18.1 %減少し、減少率はほぼ一致した。また、今回設計した導体は単層であるため、導体の超伝導線材にかかる磁場は、軸方向の B_{ext} のみである。したがって、巻き角10° 導体の方が磁場と電流が平行から遠いため、磁場中の J_c が巻き角5° 導体よりも低く、0.3 Tにおける J_c は自己磁場中と比較して19.5 %減少した。

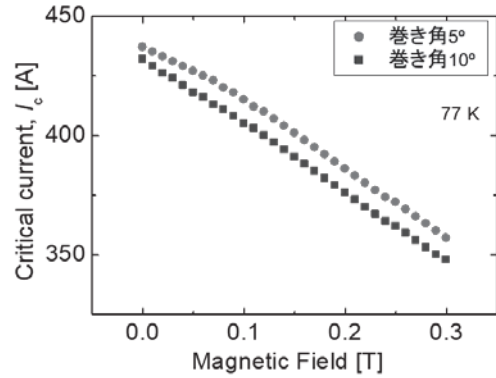


図15 巻き角5°及び10°導体の J_c の設計値

4.3.3 単層縦磁場導体の J_c の磁場依存性

本項では、巻き角5°及び10°導体の J_c の磁場依存性についてまとめる。図16に自己磁場中の臨界電流 J_c^{self} で規格化した巻き角5°及び10°導体の J_c の磁場依存性を示す。また、比較として巻き角0°導体の J_c の設計値を黒色の破線で示す。巻き角5°導体の測定値は、設計値と比較して0.1 Tでは2.5 %、0.2 Tでは3.6 %、0.3 Tでは3.2 %小さかった。しかし、磁場に対して J_c は単調減少し、磁場依存性は概ね一致した。一方、巻き角10°導体の測定値は、設計値と比較して0.1 Tでは6.5%、0.2 Tでは4.1 %、0.3 Tでは0.5%小さく、磁場の増加に伴って設計値との差異が小さくなった。0.1 Tにおける差異が大きかった原因は、巻き角10°導体の自己磁場及び0.1 Tにおける測定において電圧の立ち上がりが2回発生したことにより、正確な J_c が得られなかったためと考えられる。

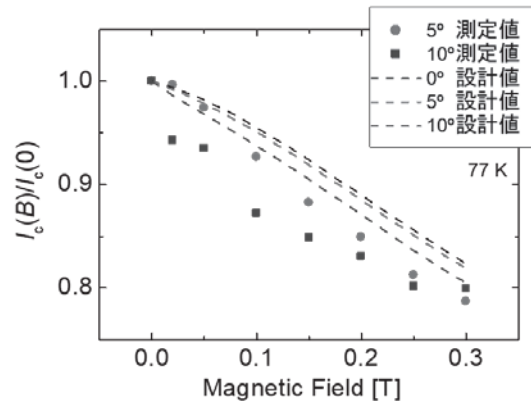


図16 自己磁場中の臨界電流 J_c^{self} で規格化した巻き角0°、5°及び10°導体の J_c の磁場依存性

本研究で作製した導体は単層であるため、導体にかかる磁場 B は軸方向に平行な B_{ext} のみである。したがって、巻き角0°の時に縦磁場が実現する。巻き角

0°の場合、導体の作製に使用した膜厚0.9 μm BHO添加YBCO線材と同様の磁場依存性となり、黒色の破線で示したように最も磁場依存性が向上すると考えられる。

以上の結果より、BHO添加YBCO線材を用いた単層縦磁場超伝導導体が、設計値との誤差が5 %以内の精度で作製可能であることが示唆された。今回作製した導体は液体 N_2 中の77 Kでの測定のみであったため、 J_c のピークや平坦な領域は観測されなかった。しかし、測定温度の低下に伴って縦磁場中 J_c が向上したため、70 K、65 Kなどの温度帯では J_c の増加が期待される。また、 J_c は設計値と測定値で差最大160 A程度の差が存在し、REBCO線材の均一性向上が課題であることが明らかになった。

まとめ

REBCO線材のフォースフリーケーブル応用には縦磁場中で高い J_c を有する長尺線材の開発が必要不可欠である。高度な構造制御技術を伴わずに、縦磁場中で高い J_c を有するREBCO長尺線材の

作製が求められる。以上を踏まえ、本研究では高度な構造制御技術を伴わない縦磁場中で効果的なREBCO線材の構造探索を目的として、異なる膜厚でBaHfO₃添加YBa₂Cu₃O₇線材を作製し、微細構造観察や磁場中超伝導特性を行い、さらに単層縦磁場超伝導導体の作製および評価を行った。

はじめにフォースフリーケーブル応用を想定し、平易なプロセスで作製され、かつ、縦磁場中で J_c gainを示すREBCO線材の作製を目的として、BaHfO₃添加YBa₂Cu₃O₇線材を作製し、微細構造観察や磁場中超伝導特性の評価、考察を行った。

断面TEM観察より、①BHOナノロッドを含んだYBCO層、②BHOが固化した層、③BHOを含まないYBCO層の順に積層していることが確認された。成長したBHOナノロッドは全体的に短く切れ、ランダムに傾斜していることが確認された。

縦磁場中の磁場依存性については、77 Kにおいては印加磁場の増加に伴って J_c が単調に減少し、膜厚による大きな差異は見受けられなかった。一方、測定温度が低下するにつれて平坦な領域が出現し始め、65 Kでは膜厚の増加に伴い平坦な領域が増加し、膜厚1.6 μm の試料は0.3 Tで規格化 $J_c = 1.01$ を示した。また、2.3 μm 以上の膜厚では規格化 J_c は減少傾向を示した。縦磁場中の超伝導特性に差異が生じた要因としては、積層構造の界面が ab 面方向に有効な2次元PCとして機能したことが考えられる。また、横磁場中の磁場印加角度依存性の結果より、膜厚の増加に伴って c 軸相関した磁束ピンニングセンター(PC)の割合が減少することが示唆されたことから、上層部ほど短く傾斜したBHOナノロッドが増加し、3次元PCとして機能するBHOナノロッドの割合が増加したことが考えられる。

さらに、BaHfO₃添加YBa₂Cu₃O₇線材を用いた単層縦磁場超伝導導体の作製および評価を行った。フォースフリーケーブルを想定したREBCO縦磁場超伝導導体の作製に向けて、スパッタリング法を用いて成膜したAg安定化層による経時劣化評価を行った。さらに、Ag安定化層を成膜したBHO添加YBCO線材を用いて単層の縦磁場超伝導導体を作製し、導体の通電試験を行った。

BHO添加YBCO線材を用いて巻き角5°及び10°の単層縦磁場超伝導導体を作製した。作製した導体の直流通電試験を行い、導体の電流電圧(I - V)特性を得ることに成功した。しかし、導体の長さが7 cmと短いため、電流端子部分で発生する接触抵抗の影響により取得した I - V 特性には抵抗成分が発生した。巻き角5°導体の測定値は、設計値と比較して磁場の増加に伴って設計値との差異がわずかに大きくなったが、磁場に対して I_c は単調減少し、磁場依存性は概ね一致した。この結果より、BHO添加YBCO線材を用いた単層縦磁場超伝導導体が、設計値との誤差が5 %以内の精度で作製可能であることが示唆された。

参考文献

- [1]. T. Matsushita: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 010111.
- [2]. Yu. F. Bychkov, V. G. Vereshchagin, M. T. Zuev, V. R. Karasik, G. B. Kurganov, and V. A. Mal'tsev: JETP Lett. **9** (1969) 404.
- [3]. A. Tsuruta, S. Watanabe, Y. Ichino and Y. Yoshida: Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 078003.
- [4]. K. Sugihara, Y. Ichino, and Y. Yoshida: Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 104004.
- [5]. S. Miura, Y. Yoshida, Y. Ichino, Q. Xu, K. Matsumoto, A. Ichinose, and S. Awaji: APL Mater. **4** (2016) 016102.

[6]. 株式会社フジクラ, 「希土類系高温超電導線材のご紹介」:

<https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf>.