

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04252

研究課題名(和文) 高効率超伝導送電技術へのナノ組織制御・フォースフリー融合技術の構築

研究課題名(英文) Construction of nanostructure control and force-free technology for high efficiency superconducting transmission application

研究代表者

吉田 隆 (YOSHIDA, YUTAKA)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20314049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導の物理現象「フォース・フリー状態(縦磁界効果)」を用いて、長距離超伝導直流送電技術応用が期待される超伝導ケーブルを検討する。そこで、液体窒素温度(77K)、縦磁界下における特性向上をめざし、REBa₂Cu₃O_y (REBCO; RE = rare earth)超伝導膜および線材のナノ組織制御技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：Using the superconducting physical phenomenon "force-free state (longitudinal magnetic field effect)", we study superconducting cable expected to be applied to long-distance superconducting DC power transmission technology. Therefore, we have constructed nanostructure control technology of REBa₂Cu₃O_y (REBCO; RE = rare earth) superconducting film and coated conductor, aiming at improvement of properties under liquid nitrogen temperature (77K) and longitudinal magnetic field.

研究分野：電気電子材料工学、超伝導工学、薄膜工学

キーワード：超伝導 電気電子材料 臨界電流密度 ナノ組織 薄膜

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーは、長距離伝送・直流活用・電力ネットワークなどの活用により、もっとも有効となり、特に抵抗ゼロの長距離超伝導直流送電技術は期待される技術である。本研究は、これまであまり物理的には理解されていなかったが、応用技術などに展開されてきていない超伝導の物理現象「フォース・フリー状態(縦磁界効果)」における長距離超伝導直流送電技術応用が期待される超伝導ケーブルの飛躍的特性向上をめざしたナノ組織制御技術の展開を図り、エネルギー応用にむけた電力ケーブルの新展開のみならず、新規な超伝導現象の実用化へと開拓していくことが期待される。

高特性超伝導ケーブルの技術革新のなかで、超伝導現象の一つ、縦磁界効果の有効活用が提案されてきており、その基礎的な研究の重要性が求められている。縦磁界効果とは、フォース・フリー下($B//I$)における臨界電流密度(J_c)が自己磁場下における $J_c(J_c^{\text{self}})$ と比較して向上する現象であり、超伝導物理の分野で著名な九州工大松下照男先生によって縦磁界効果を利用した超伝導ケーブルが提案されている(T. Matsushita et al.: *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 125009.)。また、縦磁界効果に関する報告は液体ヘリウム作動(4.2K 作動)超伝導システムなどに用いられる Nb-Ti 等の金属系超伝導線材で多くされている (Yu. F. Bychkov et al.: *JETP Lett.* **9** (1969) 404.)。

しかし、安価なコストで作動する液体窒素作動(77K 作動)で実用化が期待されている、REBa₂Cu₃O_y (REBCO; RE = rare earth)超伝導体における報告はほとんどない。

2. 研究の目的

高温超伝導体には通常、磁束が量子化した状態(量子化磁束)で侵入している。超伝導体に電流を流すと、両子化磁束に電流密度に比例したローレンツ力が働き量子化磁束が運動する。この運動によって電界が発生し抵抗が生じることで超伝導状態が壊れてしまうため、超伝導体の電気特性向上にはこの磁束運動の抑制が必要であり、人工ピンニングセンター(Artificial Pinning Center:)の導入が試みられている。

一方で、ローレンツ力をゼロにするという観点から電気特性の向上を考えることもできる。ローレンツ力は電流密度と磁束密度のベクトル積で与えられるため、電流と磁束が平行であればローレンツ力をゼロにすることができる。この状態をフォース・フリー状態という。回転的な剪断歪みを持つことが、松下照男先生らのフォース・フリーモデルで説明されており、この磁束と平行に電流が流れることでフォース・フリー状態が保たれる。電気抵抗がある金属では、必ず電気抵抗が最少になるように電流が流れるため、フォース・フリー状態を実現することは不可能である。しかし、超伝導体は電気抵抗がゼロであるため、フォース・フリー状態を唯一実現可

能な材料である。フォース・フリー状態は超伝導体に流れる電流に対して、平行に外部磁場を印加することで実現できる。このとき観察される特異な電磁現象を縦磁界効果という。中でも、超伝導線材に応用する上で重要なのは、自己磁場下の臨界電流密度(J_c^{self})に対して、磁場中 J_c が向上する現象である。この現象は金属系超伝導体では多くの報告例があるが、次世代超伝導線材として研究されている高温超伝導体においてはほとんどないため、その電磁現象メカニズムを解明することは重要である。

さらに、超伝導応用ケーブルへの展開として、酸化物中間層などから構成されたフレキシブルな金属テープ上に薄膜で得られた知見や技術を導入し、さらにフォース・フリー状態で用いるための Reel to Reel (RTR)型レーザ成膜法でナノ組織制御による高温超伝導長尺線材・導体へと研究レベルを向上することを目的とする。

3. 研究の方法

APC 材料として BaHfO₃ (BHO)を主な検討材料として行った。BHO 添加 SmBa₂Cu₃O_y (SmBCO) 積層薄膜はパルスレーザー蒸着(PLD)法により LaAlO₃ 単結晶基板や酸化物中間層を設けた金属基板上に作製した。BHO はターゲット交換法により SmBCO に添加し、BHO ターゲットへのレーザー照射パルス数の制御により BHO 添加量を制御した。無添加 SmBCO 層及び BHO 添加 SmBCO 層を交互に積層し、基板直上は無添加 SmBCO 層とした。さらに、Sm₂BaCuO₅ (Sm211)、または Y₂O₃ 材料の APC 材料についても検討を行った。作製した薄膜の超伝導特性は直流四端子法により測定した。また、微細組織評価は透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察した。

4. 研究成果

(1) SmBCO 積層薄膜における BHO 添加効果

無添加 SmBa₂Cu₃O_y 層と BaHfO₃ ナノロッドを導入した SmBa₂Cu₃O_y 層を交互に積層させた薄膜を作製した。さらに各種成膜方法を駆使した結果、TEM 微細組織観察像から、高温超伝導膜中に BaHfO₃ 人工ピンがナノロッド状に成長した膜と積層法で得られたナノパーティクル状で成長した膜を用い、フォース・フリー状態の電気特性を評価した。その結果、積層法で得られたナノパーティクル状で成長した膜においては $B=1\text{T}$ 付近で特性が向上していることが世界に先駆けて初めて確認された。

積層薄膜の総膜厚び積層界面密度が縦磁場中 J_c に与える影響を評価した。ここで、積層界面密度は膜厚 1 μm 当たりに含まれる積層界面数である。いずれの試料においても、BHO 添加量は BHO 添加 SmBCO 層において 1.6 vol.% 程度に固定した。総膜厚依存性評価では積層界面密度をおよそ 80 layers/ μm に固定して、総膜厚を 200 ~600 nm の範囲

で変え縦磁場中 J_c を評価した。縦磁場中 J_c 特性の低磁場特性から、400 nm 以上の試料において明らかな J_c ピークを観察した。これは膜厚の増加に伴う I_c の増加により自己磁場が増大し、歪み角度が大きくなった量子化磁束を積層構造によりピン止めすることで J_c が向上したためと考えられる。積層界面密度依存性評価では総膜厚をおよそ 400 nm に固定して、積層界面密度を 20~120 layers/ μm の範囲で変えた。図 2 に 77 K における J_c^{self} で規格化した縦磁場中 J_c 特性を示す。80 layers/ μm 以上の試料では J_c ピークを確認でき、積層界面密度の増加に伴い縦磁場中 J_c は向上した。以上から、 ab 面方向へのフォース・フリートルク及びその歪みにより生じる c 軸方向の Lorentz 力の双方を十分にピン止めできる構造が J_c ピークの発現には必要であり、80 layers/ μm 以上の積層界面密度がこの条件を満たしていることが推察される。

また、無添加 SmBCO 層厚のみを厚くして同様の評価を行ったが、積層数が十分でなければ J_c ピークは観察できず、各層の層厚よりも積層界面密度が大きく寄与していることを明らかにした。

(2) 積層欠陥による磁束ピン止め

BHO 添加 Sm123 薄膜における主なピンニングセンターは BHO であるが、このような APC を導入していない薄膜においても縦磁場効果が報告されている。そこで、APC 無添加薄膜において最もピンニングセンターとして機能する可能性のある積層欠陥が縦磁場中特性に与える影響を検討した。積層欠陥が多く導入されている薄膜ほど縦磁場効果が確認された。しかし、液体窒素温度では大幅な向上はほとんど観察されなかった。これは、環境温度によって広がりが増える量子化磁束の特徴に起因し、環境温度の低下に伴い縦磁場中特性の向上が観察できた。これより、ピンニングセンターの大きさや密度が縦磁場中特性に寄与することが示唆された。

(3) ランダムパーティクル状の APC 導入

APC 添加層と無添加層を規則的に積層した薄膜構造を中心に縦磁場効果の評価を行ってきた。これは APC 添加層による磁束のピン止めと、無添加層に外部磁場と並行な電流が流れることが縦磁場効果に対して有効であると推察したためである。そこで、薄膜内にランダムに APC を導入した場合の縦磁場中特性を評価することで、より有効な薄膜構造を提案できる。本研究では、Sm123 高温超伝導薄膜中に APC として $\text{Sm}_2\text{BaCuO}_5(\text{Sm}211)$ または Y_2O_3 を添加し、直交磁場 ($B//c$, $B//ab$, $B \perp I$) における巨視的磁束ピンニング力 $F_p(J_c \times B)$ に着目して縦磁場中特性との比較を行った。これにより、どのような方向の磁束運動に対するピン止めが縦磁場中特性に寄与するのかを検討するためである。その結果、 $B//c$, $B//ab$ のいずれの方向においても F_p が大

きいほど縦磁場中特性が高くなる傾向にあり、かつ $B//ab$ の磁場中特性の高低が縦磁場中特性のそれに近い結果となることが確認された。すなわち、Sm123 の ab 面方向の磁場に対して有効な APC が縦磁場中特性により大きく寄与していることを示している。しかし、いずれの試料においても縦磁場効果による J_c の大幅増加は観察できなかったため、磁束のピン止めが十分であっても、積層構造のように電流が磁場に対して並行に流れられる層の存在が重要であると推察される。

(4) 金属基板上での縦磁場効果実証と電力ケーブルへの応用

縦磁場効果の報告は主に単結晶基板上での研究であったが、応用に向けてフレキシブルな、曲折可能な金属基板上での実証が必要である。そこで、酸化物中間層を設けた金属基板テープ上に、単結晶基板上で大幅な J_c 増加が観察できた BHO 添加 Sm123 積層薄膜を様々な条件で作製、評価した。その結果、大幅な J_c 増加を金属基板上でも再現することができた。これまで報告されている Bi 系高温超伝導線材を使用した縦磁場効果利用ケーブルの実証は報告されていたが、縦磁場中での J_c 向上がほとんど観察できないため、大幅な電流容量増大は確認されていない。本報告で得られた BHO 添加 Sm123 線材は、自己磁場に対して最大で 10%以上の J_c 増加が確認できている。また、BHO 添加層内のナノロッド数密度の増加に伴いピーク形状の半値幅が増大する、すなわち、より広範囲の磁場中において縦磁場中特性が向上することも金属基板上で確認している。これらの結果より、Ag 安定化層、Cu メッキなどの導体基礎技術の構築とともに、Reel to Reel (RTR) 技術などの長尺化線材との融合により高性能縦磁界導体ケーブルの実証が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) K. Sugihara, N. Shimazaki, Y. Ichino, Y. Yoshida, A. Ichinose, “Investigation of the Longitudinal Magnetic Field Effect on Multilayered-SmBa₂Cu₃O₇ Films Fabricated on Single-Crystal and Metal Substrates”, IEEE Transactions Applied Superconductivity (IEEE), **26**, 8, 8001704, 2016
- (2) 杉原 和樹, 一野 祐亮, 吉田 隆, 一瀬 中, “SmBa₂Cu₃O₇ 積層薄膜の広範囲な測定温度下における縦磁場効果”, 日本金属学会誌 (日本金属学会), **80** 巻, 439-442, 2016
- (3) K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Yoshida, “Enhancement of critical current densities by the longitudinal magnetic field effect in multilayered SmBa₂Cu₃O₇ films controlling

the film thickness”, Superconductor Science and Technology, **28**, 104004, 2015

〔学会発表〕（計 11 件）

国内学会

- (4) 島崎 直人, 杉原 和樹, 一野 祐亮, 吉田 隆, “異なる積層数を有する IBAD-MgO 金属基板上 BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 積層膜の縦磁場効果”, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会, 姫路商工会議所, 3C-p02, 12・2015
- (5) 杉原 和樹, 一野 祐亮, 吉田 隆, 一瀬 中, “低温度領域における BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 積層薄膜の縦磁場効果”, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 14p-4D-2, 9・2015

国際学会（口頭発表）

- (6) Kazuki Sugihara, Daishi Gotoh, Shuya Tajiri, Yuji Tsuchiya, Yusuke Ichino, Ataru Ichinose, Yutaka Yoshida, “Influence of natural pinning centers on the longitudinal magnetic field effect in REBa₂CuO_y films with different deposition conditions”, Coated Conductors for Applications 2016, CO-18, Aspen, Colorado, US, 9・2016
- (7) K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Yoshida, A. Ichinose, “Investigation of the longitudinal magnetic field effect on multilayered-SmBa₂Cu₃O_y films fabricated on single-crystal and metal substrate”, 12th European Conference on Applied Superconductivity, 2A-M-O1.7, Lyon, France, 9・2015
- (8) K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Yoshida, A. Ichinose, “Flux pinning effect under several magnetic field angles on BaHfO₃-doped-multilayered- SmBa₂Cu₃O_y films with the longitudinal magnetic field effect”, 14th International Union of Materials Research Societies-International Conference on Advanced Materials, III-6We3E1-5, Jeju, Korea, 10・2015

国際会議（ポスター発表）

- (9) Kazuki Sugihara, Yuji Tsuchiya, Yusuke Ichino, Ataru Ichinose, Yutaka Yoshida, “Investigation of the longitudinal magnetic field effect in REBa₂Cu₃O_y films with various particulate artificial pinning centers”, 13th European Conference on Applied Superconductivity, 3MP1-06, Geneva, Switzerland, 9・2017
- (10) Kazuki Sugihara, Yusuke Ichino, Yuji Tsuchiya, Ataru Ichinose, Yutaka Yoshida, “Effect of flux pinning force on in-field current carrying capabilities in the force-free state of REBa₂Cu₃O_y films with particulate artificial pinning centers”, 30th International Symposium on

Superconductivity, WBP1-7, Tokyo, 12・2017

- (11) N. Shimazaki, K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Yoshida, “Superconducting properties in the force free state of multilayered SmBa₂Cu₃O_y films doped with BaHfO₃ on IBAD-MgO tapes”, International Symposium on EcoTopia Science '15, P-5-4, Nagoya University, 11・2015

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 隆 (YOSHIDA YUTAKA)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20314049

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

一野祐亮 (ICHINO YUSUKE)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90377812

一瀬 中 (ICHINOSE ATARU)

(財)電力中央研究所・上席研究員
研究者番号：70371284

淡路 智 (AWAJI SATOSHI)

東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：10222770

松下 照男 (MATSUSHITA TERUO)

九州工業大学・情報工学部・名誉教授
研究者番号：90038084

(4) 研究協力者

杉原 和樹 (SIGIHARA KAZUKI)

名古屋大学・大学院工学研究科・博士後期課程、(独)日本学術振興会 特別研究員 (DC)