

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760235

研究課題名(和文) 先進高温超伝導線材の広範な実用環境下における臨界電流特性の推定法の開発

研究課題名(英文) Development of a method for estimating current-voltage characteristics of advanced high temperature superconducting coated conductor over a wide range of temperature and external magnetic field

研究代表者

井上 昌睦 (INOUE, Masayoshi)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・准教授)

研究者番号：80346824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導薄膜線材の電界-電流密度特性のモデリング手法を提出し、それらが希土類系高温超伝導膜の母材の種類や、人工ピンニングセンターの導入の有無によらず有効であることを、広範な温度、磁場領域に亘る電流-電圧特性の精密測定との比較により明らかとした。また、本手法を適用することにより得られる臨界電流密度の温度、磁場平面上へのマッピングが、動作条件を考慮した機器設計において有用かつ有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed estimating method based on the analytical expression of current-voltage characteristics over a wide range of temperature and external magnetic field. The effectiveness and usefulness of our proposed estimating method have been confirmed by the correspondence between the experimental results and the analytical ones. confirmed by the correspondence between experimental results and an analytical one.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高温超伝導 超伝導線材 臨界電流 電流電圧特性 特性推定

1. 研究開始当初の背景

希土類系高温超伝導線材は、幅広い温度、磁場領域に亘って高い臨界電流密度 (J_c) を有することから様々な機器への応用が期待されている。機器応用に際しては、 J_c の温度、磁場依存性の把握が必要不可欠であるが、その振る舞いは複雑なうえ、広範な実用環境下に亘る実験は容易ではないため、限られた実験結果から特性を推定する手法が求められていた。しかしながら、構成材料及び作製プロセスに種々なものが提案されている同線材の J_c 特性を推定する手法は確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、希土類系高温超伝導線材の電流-電圧特性を広範な実用環境下に亘り精密に計測するとともに、それらを用いた臨界電流密度の統計分布及びピンニング特性について詳細な解析を行うことにより、臨界電流特性の推定法を開発しようとするものである。

3. 研究の方法

配向させた基材上に $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (RE は Y, Gd などの希土類元素を示す。以後 RE123 と略記) 超伝導膜を形成することにより得られる RE123 線材の電流-電圧特性を、広範な温度 (4.2K から 77K)、磁場 (自己磁場から 17T) にわたり精密に計測し、臨界電流特性の詳細を明らかとする。これらの結果に、筆者らの提出している電界-電流密度特性のモデリング手法を適用することにより、臨界電流密度の統計分布パラメータを求め、その温度、磁場依存性の詳細な解析から、任意の温度、磁場における臨界電流特性を推定する手法を検討する。さらに、更なる実用性能向上のために人工ピンニングセンターを導入した RE123 線材についても同様の検討を行い、提案する推定法の適用可能性について検証を行う。導入する人工ピンニングセンターとしては、実用線材への適用可能性の高い 2 種類を対象とした。すなわち、RE123 薄膜の成長方向に平行に形成されるナノサイズ径の柱状欠陥、いわゆるナノロッドピンと、ナノ粒子が超伝導膜内に均一分散するナノドットピンの 2 種類である。

4. 研究成果

本研究の主な成果は以下のとおりである。

(1) $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (GdBCO) 超伝導層をパルスレーザ蒸着法にて形成する際に、 BaHfO_3 を添加した GdBCO ターゲットを使用することにより人工ピンニングセンターとして機能する BaHfO_3 ナノロッドが導入される。同線材の磁場中臨界電流特性の精密測定を実施し、その温度、磁場依存性の詳細を明らかとした。

電界-電流密度特性の温度、磁場依存性の推

定値を得るために、臨界電流密度の統計分布パラメータを抽出し、そのピンニング特性について詳細な解析を行った。巨視的に得られるピン力密度の磁場依存性が、温度によらず 1 本のマスターカーブにスケールすることが明らかとなった。このスケール特性と、規格化磁場として求められる転移磁場の温度依存性等を用いて、電界-電流密度特性を定式化することにより、任意の温度、磁場における電流輸送特性を定量的に求められることを実験との比較により示した。

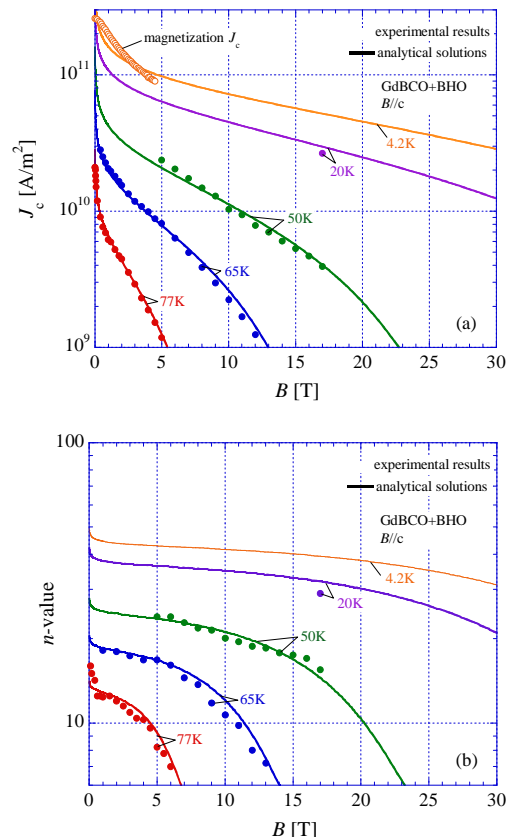


図 1 人工ピンニングセンターを導入した高温超伝導線材の臨界電流(a)及び n 値(b)の温度、磁場依存性の実験値及び解析解

図 1 に BaHfO_3 人工ピンニングセンターを導入した GdBCO 線材の J_c の温度、磁場依存性を示す。図中の実線で示した解析解が実験値と良く一致していることが確認できる。また、図 1(b)には、電界-電流密度特性を特定の電界領域でべき乗近似した際のべきの指数である n 値の温度、磁場依存性の実測値と解析値とを示した。 n 値は応用機器の動的特性を評価、設計する際に用いられる重要なパラメータの一つであるが、単なる J_c 測定よりも広い電圧領域に亘る精密な測定が必要となるため、実測は容易ではない。筆者らの提出するモデルは単に J_c 値を推定するのではなく、電界-電流密度特性そのものを記述するモデルであることから、 n 値を定量的に推定することを可能とする。これらの成果は、同線

材における人工ピンニングセンターの導入効果を広範な温度、磁場領域に亘り検証するため、さらには同線材を用いた機器設計のための基礎データとして有用かつ有効である。

(2) 任意の温度、磁場における臨界電流密度 J_c を定量的に求められることから、通常の実験では得ることが困難な J_c や n 値のマッピングが実現できる。図 2 に、温度-磁場平面上に等 J_c 特性をマッピングした例を示す。 J_c 値は、各種機器の設計において最も基礎的な仕様として与えられるものの、実験における計測パラメータとして設定するのは困難である。従って、同図のような等 J_c マップは、広範な実用領域を有する RE123 線材を用いた機器の設計に有用かつ有効である。すなわち、使用目的に応じた温度、磁場の選択や低温発生の最適化、運転特性の評価といった工学設計の設計に有用である。

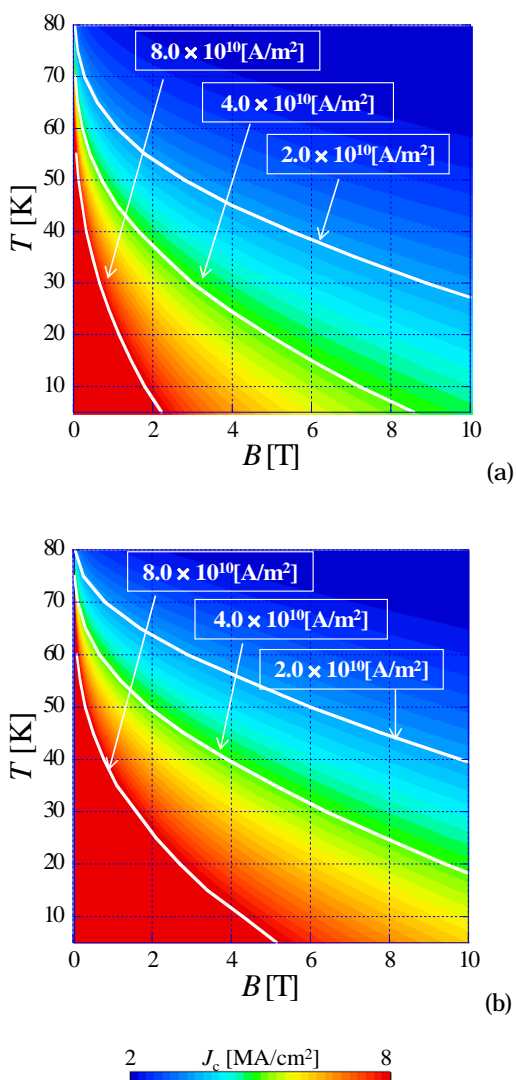


図 2 温度-磁場平面上の等 J_c マップ。(a)人工ピンニングセンター未導入の GdBCO 線材、(b)人工ピンニングセンターを導入した GdBCO 線材

また、等 J_c マップは、超伝導線材間の特性の比較にも有効である。図 2 では、人工ピンニングセンターの導入の有無による等 J_c マップの比較を行っているが、図中に示した等 J_c 曲線が、人工ピンニングセンターの導入に伴い高温、高磁場領域へと拡張する様子が視覚的に確認できる。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 1 件)

M. Inoue, Y. Yamaguchi, T. Sakakibara, K. Imamura, K. Higashikawa, T. Kiss, S. Awaji, K. Watanabe, H. Tobita, M. Yoshizumi, T. Izumi, Enhancement of In-Field Current Transport Properties in GdBCO Coated Conductors by BaHfO₃ Doping, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, 2013, 8002304
DOI:10.1109/TASC.2013.2247456

(学会発表)(計 20 件)

井上 昌睦, 他, 面内配向性の異なる IBAD 基板上に作製した PLD-GdBCO 線材の磁場中臨界電流特性, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2014.05.27, タワーホール船堀

田中 健太, 横溝 孝明, 今村 和孝, 東川 甲平, 井上 昌睦, 他, BaHfO₃ 人工ピンを導入した EuBa₂Cu₃O_{7-x} 線材の磁場中臨界電流特性, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2014.05.26, タワーホール船堀

井上 昌睦, 他, 高配向 IBAD 基板上に作製した PLD-GdBa₂Cu₃O_{7-x} 線材の磁場中臨界電流特性, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014.03.18, 青山学院大学相模原キャンパス

横溝 孝明, 井上 昌睦, 他, TFA-MOD 法により作製された人工ピンを導入した長尺 YxGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_{7-x} 線材の臨界電流特性, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013.12.06, ウィンクあいち, 愛知

井上 昌睦, 他, 高配向 IBAD 基板上に作製した GdBa₂Cu₃O_{7-x} 線材の磁場中臨界電流特性, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013.12.06, ウィンクあいち, 愛知

田中 健太, 井上 昌睦, 他, 塗布熱分解法により作製された BaZrO₃ 人工ピン導入長尺 YxGd_{1-x}Ba₂Cu₃O_{7-y} 線材の臨界電流特性, 平成 25 年度応用物理学会九州支部学術講演会, 2013.11.30, 長崎大学

小野寺 優太, 雁木 卓, 今村 和孝, 東川 甲平, 井上 昌睦, 他, 磁化法による BaHfO₃ 人工ピン導入 GdBa₂Cu₃O_{7-x} 線材の超低電界特性の評価, 平成 25 年度応用物理学会九州支部学術講演会, 2013.11.30, 長崎大学

M. Inoue, et al., In-field Current Transport Property of Long-length

TFA-MOD Processed YGdBaCuO Coated Conductor Doped with BaZrO₃ Artificial Pinning Centers, 26th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2013), 2013.11.19, Tower Hall Funabori, Japan
田中健太, 井上昌睦, 他, TFA-MOD 法により作製された BaZrO₃ 人工ピン導入長尺 Y_xGd_(1-x)Ba₂Cu₃O₇-線材の臨界電流特性, 電気関係学会九州支部第 66 回連合大会, 2013.09.24, 熊本大学

田中 健太, 井上 昌睦, 他, BaHfO₃人工ピンを導入した長尺 GdBa₂Cu₃O₇-高温超電導線材の磁場中臨界電流特性, 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2013 年度 若手セミナー・支部研究成果発表会, 2013.09.06, 九州工業大学戸畑キャンパス

井上 昌睦, 希土類系高温超伝導線材の臨界電流特性(招待講演), 平成 25 年度 低温工学・超電導学会 東北北海道支部研究会/第 2 回材料研究会, 2013.07.31, グランドサンピア八戸

井上 昌睦, 他, BaHfO₃ 人工ピンを導入した Gd₁Ba₂Cu₃O₇-線材の通電特性のモデリングと技術コストの検討, 2013 年度 春季低温工学・超電導学会, 2013.05.15, タワーホール船堀

横溝 孝明, 井上 昌睦, 他, BaHfO₃ 人工ピンを導入した長尺 Gd₁Ba₂Cu₃O₇-線材の臨界電流特性, 2013 年度 春季低温工学・超電導学会, 2013.05.15, タワーホール船堀

横溝 孝明, 井上 昌睦, 他, BaHfO₃ 人工ピンを導入した長尺 GdBCO 線材の臨界電流特性, 2013 年 第 60 回応用物理学会 春季学術講演会, 2013.03.29, 神奈川工科大学

M. Inoue, et al., Enhancement of In-field Current Transport Property in High Temperature Superconducting Tape, 2013 International Symposium on Information Science and Electrical Engineering (ISEE2013), 2013.01.11, Kyushu University, Japan

M. Inoue, et al., In-field current transport property of high Ic Y_xGd_(1-x)Ba₂Cu₃O_y coated conductors fabricated by TFA-MOD process, 25th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2012), 2012.12.05, Tower Hall Funabori, Japan

横溝 孝明, 榊原 崇志, 井上 昌睦, 他, 塗布熱分解法により作製された Zr 添加 YGdBCO 高温超伝導線材の臨界電流特性, 平成 24 年度応用物理学会九州支部学術講演会, 2012.12.01, 佐賀大学

榊原 崇志, 井上 昌睦, 他, MOD 法を用いたピン導入 Y_xGd_(1-x)Ba₂Cu₃O₇-線材の磁場中電流輸送特性, 第 86 回低温工学・超電導学会, 2012.11.08, いわて県民情報

交流センター

M. Inoue, et al., Enhancement of in-field current transport properties in GdBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor by BaHfO₃ doping, 2012 Applied Superconductivity Conf. (ASC2012), 2012.10.11, Oregon Convention Center, USA

M. Inoue, et al., In-field current transport properties in advanced GdBCO coated conductor, The 2nd Korea Japan Superconducting Technologies for Electric Power System, 2012.08.09, Changwon National University, Korea

〔その他〕

ホームページ等

<http://super.ees.kyushu-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 昌睦 (INOUE, Masayoshi)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・准教授

研究者番号：80346824