

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01928

研究課題名（和文）超伝導電力機器の最適構造設計のための磁場中電流輸送特性精密評価

研究課題名（英文）Investigation of in-field current transport properties for design of superconducting power devices

研究代表者

井上 昌睦（Inoue, Masayoshi）

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：80346824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：希土類系高温超伝導線材の電界 - 電流密度特性を、パルス通電測定法、直流磁化ヒステリシス測定法、直流磁化緩和測定法を組み合わせた精密計測により、10桁を超える広電界領域に亘り実験的に明らかとすることに成功した。各測定手法間の整合性担保に要する面内臨界電流密度分布の均一性については、本研究課題内で走査型ホール素子磁気顕微鏡の構築を図り評価体制を整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電界 - 電流密度特性は、電気材料を用いた各種機器設計において最も基礎となる電気的特性の1つであるが、高温超伝導線材では使用する電界領域が機器によって8桁以上異なるうえ、所謂オームの法則と呼ばれる線形則が成り立たないこと、そして、測定感度や熱的制限により計測可能な電界範囲が限られることから、従来は対象電界近傍のみが計測・評価対象であった。本研究の成果は対象線材の性能を統一的に計測・評価するものであり、各種超伝導機器の統一的設計、設計精度の向上に資する。また、性能を制御した高温超伝導線材の開発にも寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have experimentally clarified the electric field vs. current density characteristics of rare-earth-based high-temperature superconducting wires over a wide electric field range of more than 10 orders of magnitude by precise measurements combining the pulse current measurement method, the DC magnetization hysteresis measurement method, and the DC magnetization relaxation measurement method. In order to ensure the consistency among the measurement methods, we have also constructed a scanning Hall-probe magnetic microscope and confirmed the uniformity of the in-plane critical current density distribution in this research project.

These results will contribute to the unified design of various superconducting devices, and to the improvement of design accuracy. It will also contribute to the development of high-temperature superconducting wires with controlled performance.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 高温超伝導線材 電界 - 電流密度特性 電流電圧特性 臨界電流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

直流においてゼロ抵抗状態で大電流通電が可能となる超伝導は、既存の電力機器の更なる省エネルギー化に寄与するのみならず従来材料では成し得ない性能を与えるポテンシャルを有していることから、その機器応用に向けた研究が精力的に進められている。具体的には、低ロス化と大電流量化を同時に実現する高温超伝導電力輸送ケーブルや、高効率化と省スペース化、更には系統短絡事故時の最大電流抑制機能を附加した高温超伝導変圧器など、多種多様な機器が提案され実証試験が進められている。これらの超伝導電力機器の設計において最も重要な材料パラメータが、機器を構成する超伝導線材の「電界 - 電流密度特性 (E - J 特性)」である。高温超伝導体の E - J 特性は、銅などの従来材料のような線形性 (オームの法則) を示さず、複雑な振る舞いを示す。そこで機器設計においては、一般的に n 値モデルと呼ばれる近似モデルが用いられる。このモデルは、ある電界閾値における電流密度を臨界電流密度 (J_c) と定義し、その点を通る「べき乗関数」で E - J 特性を表現するもので、3 桁程度の広い電界範囲に亘り実験結果を良く再現することから広く用いられている。しかしながら、(1) 対象となる電界は機器によって 8 桁から 10 桁も異なっており、同一の近似式は適用できないこと、(2) 一般的に行われる通電法による計測では測定感度と熱的制限により 3 桁程度の電界測定が限界であることから、10 桁にも及ぶ E - J 特性の計測そのものが困難である。

2. 研究の目的

本研究は、省エネルギー化、低炭素化への貢献が期待される超伝導電力機器の最適構造設計において必要不可欠となる高温超伝導線材の電界 - 電流密度特性を、複数の精密計測手法を取り入れることにより 10 桁もの広い電界領域に亘り明らかとすることを目的としている。また、それらの計測手法間の整合性を担保するための面内臨界電流密度特性評価にも取り組む。

3. 研究の方法

(1) 磁化法による E - J 特性計測

平板状高温超伝導線材の平面に対して垂直に外部磁場を印加した際に、線材面内に誘起される磁化電流は臨界状態モデルによれば線材の臨界電流に相当する。従って、線材の磁化 (磁気モーメント) を計測することにより臨界電流密度を求めることが可能となる。本研究では、直流磁化を外部磁場を掃引しながら計測する手法と、磁化の緩和特性を計測する手法の 2 通りの測定を実施した。前者では磁場の掃引速度により電界を制御し、後者では磁化緩和率から電界を算出している。

(2) 通電法による E - J 特性計測

高温超伝導線材に直流安定化電源により電流を印加し、発生電圧を測定することで E - J 特性を得た。最大印加電流は 220 A とした。通電法により得られる電界範囲は、磁化法に比べると高く、いわゆる臨界電流密度の定義に用いられる $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ($=10^{-4} \text{V}/\text{m}$) の前後 1 桁程度が一般的である。本研究では、より高電界での計測を実現するため、パルス通電法を採用した。更に、大電流通電に伴う局所発熱による試料破壊を回避するため、超伝導線材にシャント抵抗を並列挿入し電圧発生時に電流分流を生じさせる手法を導入した。この分流通電法により同一発生電界における等価抵抗が減少し試料の発熱を抑えることが可能となる。

(3) 走査型ホール素子磁気顕微鏡による面内臨界電流密度分布の計測

磁化法、通電法ともに、試料面内の臨界電流密度が均一であることを前提に電界及び臨界電流密度を算出している。すなわち、磁化法では周回電流を構成する遮蔽電流の均一性が、通電法では線材長手方向の通電電流の均一性が得られていることが前提となっている。そこで、試料の面内臨界電流密度分布を計測するための走査型ホール素子磁気顕微システムを構築した。

4. 研究成果

(1) 走査型ホール素子磁気顕微鏡による面内臨界電流密度分布の計測を行った後、面内均一性が確認された線材に対して、磁化法及び通電法による E - J 特性測定を実施した。磁化特性は、物理特性測定システムによる直流磁化測定により得た。磁場掃引速度を $1 \text{Oe}/\text{sec}$ から $100 \text{Oe}/\text{sec}$ まで変化させることにより、直流四端子法による通電測定で得られる電界以下に相当する $100 \text{nV}/\text{m}$ から $10 \mu\text{V}/\text{m}$ での E - J 特性を得た。磁化緩和測定では、数 pV/m から $100 \text{nV}/\text{m}$ の 5 桁にわたる電界領域の特性を得た。通電法では、パルス通電の条件最適化及び分流通電法の導入により、電界基準 ($10^{-4} \text{V}/\text{m}$) から $0.1 \text{V}/\text{m}$ を超える高電界領域の E - J 特性を得た。

これらの3つの測定結果を統合することにより、数 pV/m から 0.1 V/m 程度の 10 桁以上にわたる E - J 特性の計測を実現した(図1は、パルスレーザー蒸着法で作製された希土類系高温超伝導線材の評価例で、電流補正を行っている)。

(2) 通電法により所望の性能が得られなかった線材に対して、面内臨界電流密度分布測定を実施し、性能分布の部位を特定するとともに、それらの部位の磁化特性と微細構造を調べ、線材の性能制限因子について考察した。その結果、走査型ホール素子磁気顕微鏡では臨界電流密度が観察されなかった領域においても超伝導層が局在していることが明らかとなった。すなわち、超伝導層が局在する場合には、通電法やホール素子による磁化計測では測定感度の制限により超伝導特性を検出できないことがあることから、高感度な磁場検出デバイスを有する物理特性測定システムとの併用評価が不可欠である。

(3) 通電法、磁化法及び面内臨界電流密度分布計測による複合評価は、対象線材の性能を統一的に計測・評価するものであり、各種超伝導機器の統一的設計、設計精度の向上に資する。また、性能を制御した高温超伝導の開発にも寄与するものである。

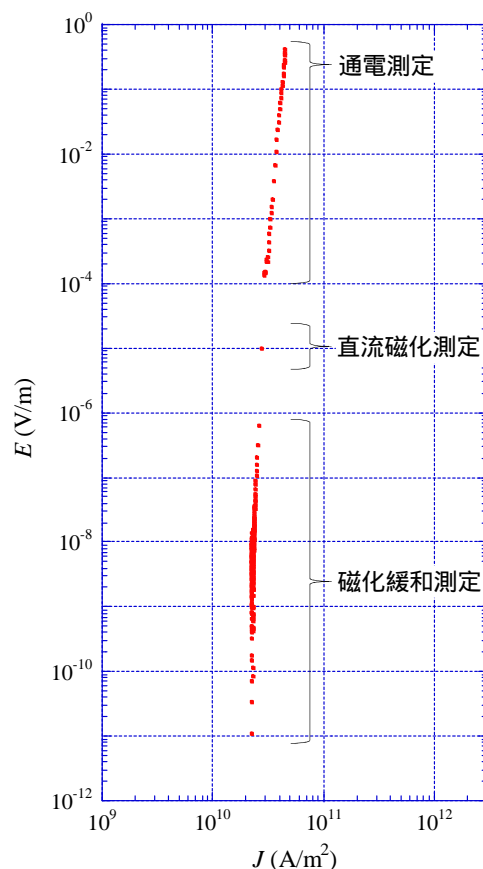


図1 電界 - 電流密度(E - J)特性

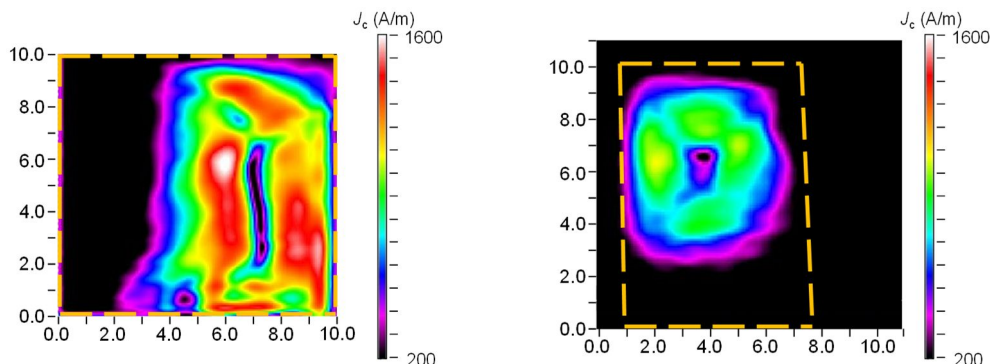


図2 面内臨界電流密度分布の観察例(破線が試料の外縁)

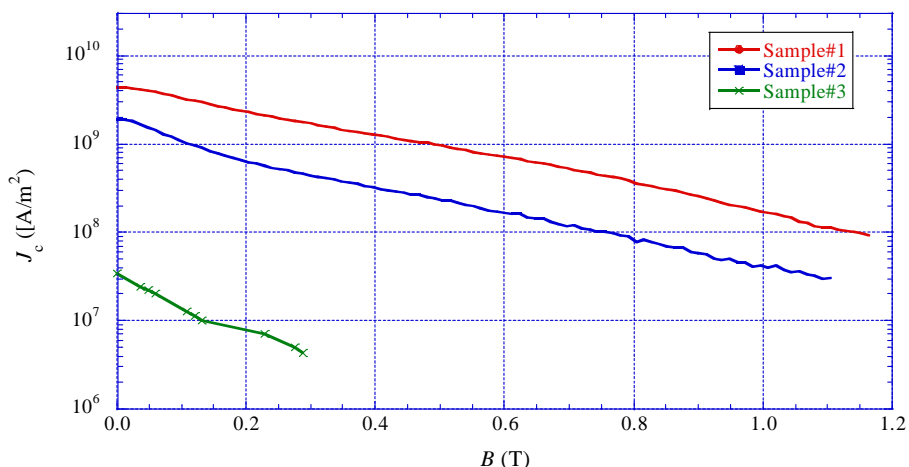


図3 臨界電流密度の異なる部位における磁場中臨界電流密度特性の比較例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 R. Teranishi, K. Hiramatsu, S. Yasuyama, T. Miyajima, Y. Sato, K. Kaneko, S. Awaji, A. Matsumoto, M. Inoue	4. 巻 巻未定
2. 論文標題 Superconducting joint of GdBa ₂ Cu ₃ O _y coated conductors by crystallization of additionally deposited precursor layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2902693	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24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 酒井 秀哉, 井上 昌睦, 寺西 亮
2. 発表標題 TFA-MOD法で作製されたREBCO線材の臨界電流密度分布と組織分布の関係
3. 学会等名 2021年度春季第101回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 祥貴, 井上 昌睦, 岩熊 成卓
2. 発表標題 REBCO線材の高電界下における電流輸送特性評価
3. 学会等名 2021年度春季第101回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上昌睦
2. 発表標題 超電導電力機器応用とパワーエレクトロニクス
3. 学会等名 第10回次世代ユビキタス・パワーエレクトロニクスのための信頼性科学ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 昌睦, 川島 直暉, 鶴田 純平, 柳 知志, 寺西 亮, 山田 眞
2. 発表標題 塗布熱分解法により作製されたREBCO膜の臨界電流密度分布評価
3. 学会等名 2020年度春季第99回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠倉 大輝, 江藤 大登, 酒井 秀哉, 田中 祥貴, 井上 昌睦
2. 発表標題 パルスレーザ蒸着法で作製された高温超伝導線材の臨界電流密度分布
3. 学会等名 2020年度第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 祥貴, 酒井 秀哉, 寺西 亮, 井上 昌睦
2. 発表標題 塗布熱分解法で作製された高温超伝導線材の臨界電流密度分布計測と組織観察
3. 学会等名 2020年度第73回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井 秀哉, 田中 祥貴, 寺西 亮, 井上 昌睦
2. 発表標題 塗布熱分解法で作製された高温超電導線材の臨界電流密度分布測定と組織観察
3. 学会等名 低温工学・超電導学会九州・西日本支部支部研究成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江藤 大登, 篠倉 大輝, 酒井 秀哉, 田中 祥貴, 井上 昌睦
2. 発表標題 長手方向に臨界電流分布を有する REBCO 線材の面内 Jc 分布と組織観察
3. 学会等名 2020年応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 祥貴, 酒井 秀哉, 寺西 亮, 井上 昌睦
2. 発表標題 塗布熱分解法で作製されたREBCO薄膜線材の臨界電流密度分布と磁場中臨界電流特性
3. 学会等名 2020年度秋季第100回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠倉 大輝, 江藤 大登, 酒井 秀哉, 田中 祥貴, 井上 昌睦
2. 発表標題 長手方向に臨界電流分布を有するREBCO線材の面内Jc分布と磁場中Jc特性
3. 学会等名 2020年度秋季第100回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Kawashima, S. Yanagi, J. Nakagawa, J. Tsuruta, R. Teranishi, M. Inoue
2. 発表標題 E-J characteristics in BaHfO3 doped REBCO CCs Fabricated by TFA-MOD Process
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yamada, R. Teranishi, Y. Sato, K. Kaneko, M. Inoue
2. 発表標題 Effect of extra addition of Ba into YBa ₂ Cu ₃ O _{7-d} coated conductor with BaHfO ₃
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Teranishi, T. Miyajima, S. Yasuyama, Y. Sato, K. Kaneko, V. Petrykin, S. Lee, S. Awaji, A. Matsumoto, and M. Inoue
2. 発表標題 Fabrication of superconducting joint for GdBa ₂ Cu ₃ O _y coated conductors
3. 学会等名 International Symposium on Microscopy & Microanalysis of Materials 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	寺西 亮 (Teranishi Ryo) (70415941)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

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
---------	---------