

令和 6 年 4 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20430

研究課題名（和文）高温超伝導線材の10桁の電界領域に亘る電流輸送特性のオペランド計測とモデリング

研究課題名（英文）Operando measurement and modeling of current transport properties for high-temperature superconducting tapes with a wide-range of electric-field window

研究代表者

呉 澤宇（Wu, Zeyu）

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号：40962147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、交流モータ応用から直流マグネットまで応用が期待される高温超伝導テープ線材の広い電界領域における電流輸送特性を明らかにするために、基盤技術となる素線電流輸送特性のオペランド計測とその高精度なモデリング手法を確立しようとするものである。直流四端子法および、着磁した線材の磁界分布とそのダイナミクスを計測する磁気顕微法を組合わせて広い電界領域における電流輸送特性を実測でき、メソスコピックな量子化磁束挙動の統計分布を考慮したモデリングが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MRIやNMRの高磁界直流マグネットや核融合炉用大型マグネット、さらに交流モーター用巻線など、直流から交流に至る複雑な実用環境におかれる際に、高温超伝導線材の電磁現象を理解するのに広い電界領域に亘る電流輸送特性の解明が不可欠となる。本研究によって、 10^{-2} ～ 10^{-11} V/m電界領域における電流輸送特性の実測およびそのモデリングにかかる手法を開発した。また、特定な応用環境に対応した材料開発のためにも基盤技術という位置づけとして重要な貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：High-temperature superconducting tapes are potential for AC and DC applications, which correspond to a wide-range of electric-field window from 10^{-2} ～ 10^{-11} V/m. In this study, we developed the method of operando measurement and modeling for current transport properties with a wide-range window of electric-field. We carried out integrated measurements, including current-voltage transport measurements by four-probe method, and dynamics of magnetic field by time-resolved magnetic microscopy. We finally succeeded in obtaining electric-field versus current-density characteristics with continuous electric-field window from 10^{-2} ～ 10^{-11} V/m. Besides, the measurement results could also be described by a numerical model considering the statical behaviours of magnetic flux very well. These achievements support that this research has succeeded in building fundamental technique to clarify current transport properties with a wide-range window of electric-field.

研究分野：計測工学

キーワード：電流輸送特性 磁気顕微法 超低電界領域

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導 (High-temperature superconductor: HTS) テープ線材は優れた高磁界特性、高温安定性によって、定常高磁界の発生や大空間での磁界発生、さらに交流モーター等への応用が期待されている。しかしながら、幅広のテープ形状に起因して、コイルによる磁場発生時に超伝導テープ面内に大きな遮蔽電流が誘起され、この事が高温超伝導マグネット特有の問題点として顕在化しつつある。テープ線材の遮蔽電流は HTS マグネット応用における共通課題であり、マグネットの信頼性向上や可設計性確立のために遮蔽電流の定量的な把握が不可欠である。遮蔽電流の挙動は、電磁現象として線材の電流輸送特性: 電界—電流密度 (Electric field versus critical current density: E - J) 特性に帰結されるが、超定常磁界を要求する直流マグネットでは 10^{-12} V/m 以下と電界が低く、一方、変動磁界を経験する交流モーターでは 10^{-3} ~ 10^{-2} V/m と高い。すなわち、運転時の線材に誘起される電界は 10^{-12} ~ 10^{-2} V/m と 10 桁に亘る広い電界スケールで変化する。さらに、動作時の温度や磁界、更に磁界の印加角度なども大きく異なることから、線材の輸送可能な電流密度もまた複雑に変化する。

一方、一般には四端子法による 10^{-4} V/m 以上の測定結果を元に HTS 線材の E - J 特性をパワー則で近似し、低電界領域に外挿することによって、遮蔽電流をはじめとする電磁現象の検討が行われるに過ぎず、上述した超低電界領域を含む実用環境下の E - J 特性の解明が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

HTS テープ線材のマグネット応用の共通課題である遮蔽電流の定量化に対し、基盤技術となる素線電流輸送特性のオペランド計測とその高精度なモデリング手法の確立である。四端子法により、電圧の測定雑音 10^{-6} V/m 以上の電流輸送特性を定量性よく計測し、 10^{-6} V/m 以下の測定着磁した線材近傍の磁界分布とそのダイナミクスを計測する磁気顕微法を用いる。計測できた特性を基に、メゾスコピックスケールの量子化磁束挙動の統計性を考慮した物理モデルを適用することで広い電界領域におけるモデリングが可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 直流四端子法を用いた計測

電界領域 10^{-6} V/m 以上となる電界電流特性を取得するために、事前に空間均一性を確認した線材試料を用意し、直流四端子法を用いて通電時その電圧応答を測定する。スプリットマグネットを用いて試料に外部磁界を印加する。回転機構付きのプロープと組合わせて、外部磁界の印加方法に対して、試料を回転し、電圧電流特性の角度依存性を計測する。既知の電圧端子間距離と超伝導層の断面積を用いて、電界電流密度特性を導出する。

(2) 磁気顕微法を用いた超低電界領域までの計測

電界領域 10^{-6} V/m 以下となる電界電流特性を取得するために、試料表面の磁界分布の緩和特性を測定する。外部磁界を試料に印加し磁化させる。高い電界領域に対応する初期緩和を取得するために、センサーを試料中心付近におき、磁界の初期緩和特性を 0.1 s 以下の時間分解能で定点 (0-dimensional: 0-D) 計測する。さらに試料の空間情報を取得するために、センサーを試料表面に沿って走査させ、幅方向 (1-dimensional: 1-D) の磁界分布を測定する。二つの測定モードを組み合わせることで、1-D 幅方向の磁場分布に基づいて対応するシート電流分布を導出でき、試料中心磁界と電流密度の関係を用いて 0-D 計測できた初期緩和特性から初期緩和の電流密度を導出できる。同様に 1-D 幅方向の磁場分布の緩和から電界分布を導出し、0-D 初期緩和の電界も導出する。さらに、超低電界領域の特性を測定するために、flux-annealing 法を適用し、低い電流負荷の磁化緩和特性を測定することで電界電流密度特性を取得する。

(3) 物理モデルを用いた理論解析

実測した電界電流密度特性を理解するために、物理モデルを用いて実測データを解析する。メゾスコピックスケールの量子化磁束の挙動に立脚した統計性を考慮した物理モデルを用いて、マクロスケールで観測された電界電流特性との関係を明らかとする。

4. 研究成果

(1) 四端子法で取得した電界領域 10^{-5} V/m 以上の電界電流特性。

液体窒素浸漬冷却方式を採用し、1.0 T の外部磁界印加下、試料を回転しながら電界電流特性を測定した。電界基準 10^{-4} V/m における電流値の角度依存性を図 1 に示す。面内方向に磁場を印加した際は臨界電流値が最大とあり、予想された特性と一致する。角度依存性に関して、高い電界領域 10^{-5} V/m 以上の電界電流特性を取得できたといえる。

(2) 磁気顕微法を用いた電界領域 10^{-5} V/m 以下低電界領域までの計測

試料を極低温 5 K に冷やし、外部磁界を印加した状態でホール素子を試料中心に固定する。ホール素子の優れた時間応答性を利用して $10^{-1} \sim 10^2$ s 三桁時間スケールにおける中心磁場の初期緩和特性を取得した。さらにホール素子を走査しながら磁場分布 B_z を取得した。一回走査の測定時間が約 20 s となり、試料が磁化されたあと 10^1 s あたりの時間依存性を評価できる。これによって、0-D 計測で得られた緩和特性に対応する電界領域が $10^{-5} \sim 10^{-8}$ V/m 程度、1-D モードは $10^{-7} \sim 10^{-10}$ V/m 程度となる。

さらに低い電界領域の特性を取得するために、初期緩和特性から高電界領域の E - J 評価と対照的に、長い時間スケールでの計測が必要となる。そこで、本研究では先行研究[3]のように flux-annealing 法を導入することで、磁束クリープを実効的に加速させ、測定時間を短縮し超低電界領域の E - J 評価した。Flux-annealing の核心は電流負荷が保持された状態で低い温度における電界基準に対応する subcritical 状態を誘導する。測定は 1-D の測定モードを用いて、5 K より高い温度 $T_{ini} = 7 \sim 12$ K で独立に着磁させ、 T_{ini} を 200 s ほど維持してから温度を 5 K に再び冷却した。得られた E - J 特性を図 2 (a)に示す。 $T_{ini} = 7 \sim 9$ K の flux-annealing 測定で得られた E - J 特性が温度を制御することで、 T_{ini} における特性から、矢印に示すキックのように温度 5 K 一定の特性に移り変わり、定量的に一致することが分かる。5 K で得られた 10^{-11} V/m までの電界電流特性を図 2(b)に示す。

(3) 物理モデルを用いた理論解析

測定されたマクロな電界電流特性はメソスコピックスケールな量子化磁束挙動の統計分布を反映していると考えられ、その統計分布を決めるパラメータを測定結果に基づいて決定できる。粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization) [3]を用いて自動で抽出するための基礎検討を実施した。統計分布の形を決めるパラメータを固定し、最小値と特徴値をパラメータとして行った際、四端子法で測定したデータの場合は短時間で決めることができた。低電界領域や、温度・磁場・角度へのへの拡張が期待される。

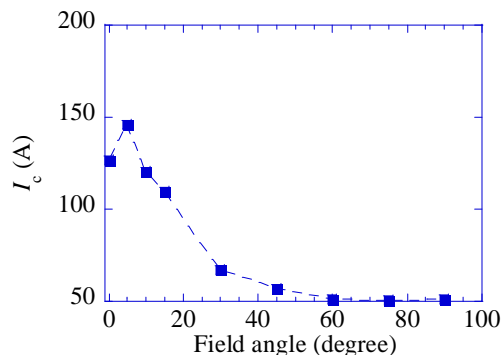


図 1 外部磁界強度 1.0 T、印加角度 0 ~ 90 degree、電界基準 10^{-4} V/m における臨界電流値の角度依存性

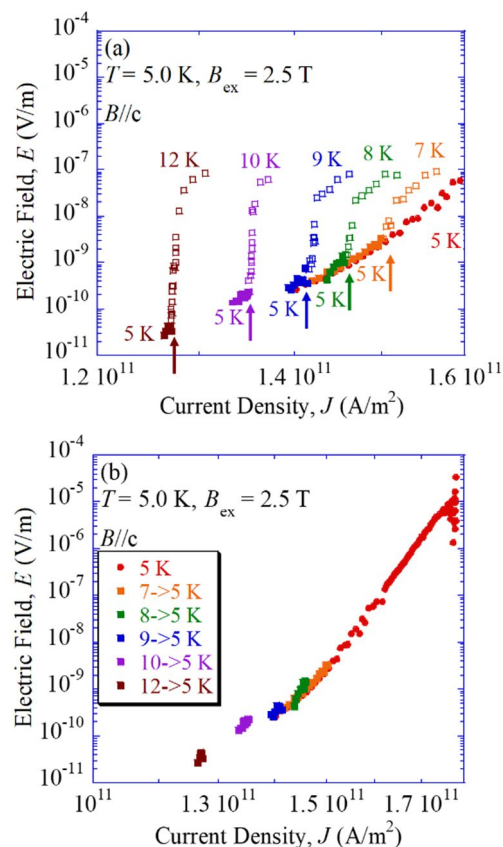


図 2 一定温度 5 K および、flux-annealing 法を導入し $T_{ini} = 7 \sim 12$ K で着磁し 5 K に冷却した際の試料表面磁場から E - J 特性の導出結果。(a) T_{ini} における E - J 特性から、5 K における E - J 特性へ移行変わるの挙動。矢印でそれらのキックを示す；(b)一定温度 5 K と flux-annealing により 5 K に冷却しキックが観察された後の E - J 特性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Wu Zeyu, Higashikawa Kohei, Kiss Takanobu	4. 巻 33
2. 論文標題 Continuous Measurement on Electric-Field Versus Current-Density Characteristics of REBCO Coated Conductors in the Electric-Field Window From 10 ⁻² Down to 10 ⁻¹¹ V/m	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3258375	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 呉 澤宇, 鄭 依城, 東川 甲平, 木須 隆暢
2. 発表標題 磁気計測による積層 REBCO テープの E-J 特性評価
3. 学会等名 第105回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zeyu Wu, Kohei Higashikawa, Natthawirod Somjaijaroen, Kazutaka Imamura, Takanobu Kiss
2. 発表標題 High-resolution Detection of Localized Jc inhomogeneity in long-length REBCO Coated Conductor by Combining Magnetic Microscopy and Deep Learning-based Object Detection
3. 学会等名 MT-28 International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 呉 澤宇, 東川甲平, 木須隆暢
2. 発表標題 磁化緩和測定に基づいた高温超伝導線材の電流輸送特性の非接触・非破壊評価法
3. 学会等名 九州パワーアカデミーフォーラム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zeyu Wu, Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss
2. 発表標題 Continuous Measurement on Electric-field versus Current-density Characteristics in the Electric-field Window from 10 ⁻² down to 10 ⁻¹¹ V/m
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 WU Zeyu, KISHIKAWA Sohki, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu
2. 発表標題 Realization of Wide-range Measurement on Electric-field versus Current-density Characteristics from 10 ⁻⁵ V/m down to 10 ⁻¹¹ V/m Based on Hall-probe Magnetic Microscopy
3. 学会等名 第104回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 呉 澤宇, 田中 佑斗, 東川 甲平, 木須 隆暢
2. 発表標題 リール式磁気顕微鏡を用いたダイナミック磁化測定による長尺 REBCO テープ線材の局所電界 電流密度特性の連続測定に関する検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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