

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17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：2017～2018

課題番号：17H06931

研究課題名（和文）超伝導回転機へ向けた高温超伝導線材の交流損失の推定手法および低減技術の確立

研究課題名（英文）Establishment of Estimation method and reduction technique of AC loss of high temperature superconducting wire for superconducting rotating machines

研究代表者

三浦 峻 (Miura, Shun)

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号：80804674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：希土類系高温超伝導テープ線材の交流損失特性は、温度、磁界振幅、磁界印加角度、線材積層枚数などの運転環境に依存する。本研究では、それら様々な運転環境における交流損失の簡便な予測手法の確立を目的とし、実験・理論の両面から検討した。その結果、実験によるわずかな測定による情報から様々な運転環境における交流損失特性を予測可能とする推定手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転機などの超伝導応用機器を設計する際、冷凍機の冷却能力を決定するために超伝導線材の交流損失量を正確に見積もる必要がある。様々な運転環境下における交流損失を測定するには、膨大な時間とコストを必要とするが、本研究で提案した予測手法・理論表式を用いることで、その応用機器の交流損失量を簡便に見積もることが可能となった。超伝導回転機、変圧器などの設計への波及効果が期待される。特に電気推進航空機、空飛ぶ車、洋上風力発電機などの研究開発を促進すると期待される。

研究成果の概要（英文）：The AC loss characteristics of the rare earth-based high-temperature superconducting tapes depend on the operating conditions such as temperature, magnetic field amplitude, applied magnetic field angle, number of stacked layers, and so on. The objective of this study is to establish a simple prediction method of AC loss in those various operating conditions. We have established an estimation method that enables us to easily predict AC loss characteristics in various operating conditions from small amount of experimental results.

研究分野：超伝導工学

キーワード：交流損失 高温超伝導 磁化損失 転位並列導体 スケーリング則 ピックアップコイル 回転機 超伝導応用機器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO: RE = Sm, Gd 等の希土類元素および Y) 高温超伝導線材の特性向上および製造技術の進展は目覚ましく、応用段階に入った。超伝導の特徴である高磁界、高電流密度により電気機器の大幅なコンパクト・軽量化が期待され、世界中でその応用機器の研究開発が活発化している。特に電気推進航空機の革新的技術として超伝導技術は注目されており、高出力密度かつ信頼性の高い推進用モータの開発が必要とされている。

REBCO 線材を用いた回転機などの超伝導応用機器を設計する際、冷凍機の冷却能力を決定するために線材の交流損失を見積もる必要がある。動作温度、印加磁場、磁場印加角度、線材積層枚数などの様々な運転環境により交流損失は影響を受ける。そのため、これまでは線材の交流損失を各運転環境において実測し、それら実測値を機器設計に反映させていた。しかし、その実験量は膨大で、多大な労力とコストが必要である。そこで、より簡便に省実験量で各運転環境における交流損失を見積もる手法が求められている。また、交流損失は熱負荷となるため、できるだけ低損失であるのが望ましく、交流損失を低減する技術の確立は急務である。

2. 研究の目的

前述のように、REBCO 線材の交流損失を簡便に予測する手法が求められている。そこで本研究では、交流損失を少ない実験量から容易に予測する手法の確立を目的とした。具体的には、以下の項目を明らかにし、目的を達成する。

- ① 交流損失の低減技術として提案されているレーザースクライビング加工により細線化された線材試料の特性を実験的に明らかにし、理論式および予測手法の適用可能性を検討する。
- ② これまでに当研究グループで提案した温度スケールリング則および磁場印加角度に関する理論表式を様々な REBCO 線材の実測値との比較により実証する。また交流損失の線材積層枚数依存性の理論表式を導出し、その予測手法を確立する。
- ③ REBCO 線材を数本の並列導体として構成したソレノイドコイルの交流損失を実験的に明らかにし、新しく導出した理論表式の妥当性を明らかにする。

3. 研究の方法

ピックアップコイルを用いた磁化測定により交流損失を測定する。具体的には、均一な交流磁界空間中に試料を配置し、①②の場合は特殊な鞍型のピックアップコイル(図1参照)を用い、③の場合はコイル試料に対して十分長いピックアップコイルを同軸上に配置した。またキャンセルコイルも配置し、キャンセルコイルからの信号電圧を使って抵抗分圧するキャンセルリングにより、ピックアップコイルの信号電圧からコイル試料の磁化の微小信号電圧を抽出した。図2は③における作製した2本並列導体コイル試料である。2本の素線の端部ははんだにより接合されており、それ以外の部分は絶縁した。

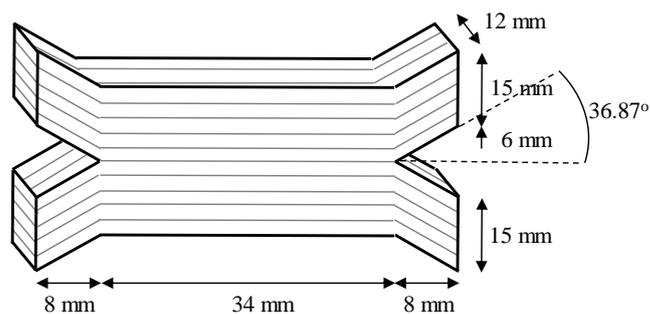


図1 鞍型ピックアップコイルの概念図

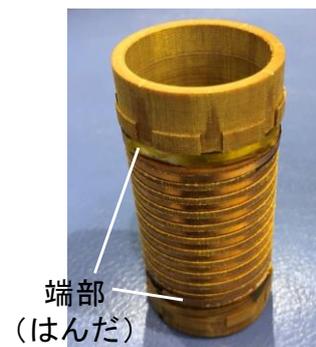


図2 2本並列導体試料コイル

4. 研究成果

①② 共同研究先である産業技術総合研究所より細線化した REBCO 線材を提供いただき、温度 30-77 K、積層枚数 1-6 枚の交流損失を測定した。従来理論と照らし合わせ、図3に示すように細線化の効果を実証した。また図4に示すように分割しさらに積層した試料においても交流損失の温度スケールリング則が成立することを明らかにした。また従来理論では説明が難しい中心到達磁界のフィラメント幅依存性を示した。臨界電流密度および温度スケールリング則を適用し、細線化した低交流損失線材の任意の温度、磁界振幅、磁界印加角度における交流損失の予測手法を検討した。実測による線材積層枚数依存性より新しく積層枚数スケールリング則を見出し、簡便な予測手法を提案した。それら理論式および予測手法を組み合わせ、任意の各条件における予測手法を確立した。さらに発展的な研究として、航空機へ向けた全超伝導回転機概念設計、電磁界解析を併用し交流損失の見積もりを予測手法により示し、その設計指針を明

らかにした。

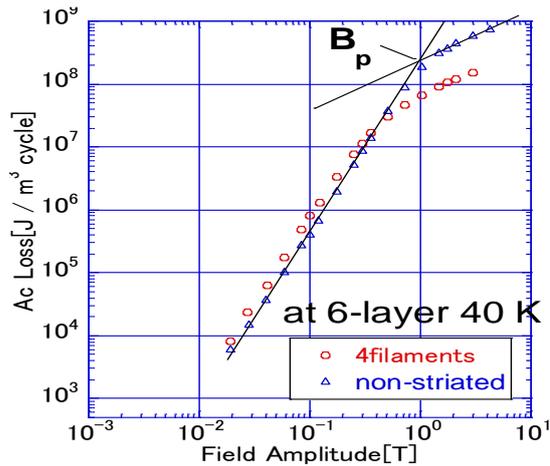


図 3 6枚積層した4分割線材と分割なしの線材の交流損失

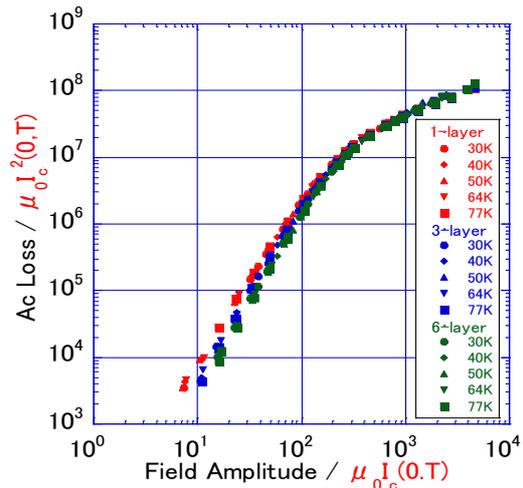


図 4 1-6枚積層した4分割線材の規格化交流損失

③ 従来の並列導体の理論式は、臨界状態モデルを仮定していたが、新しく電圧-電流の勾配 (n 値) を考慮した理論式を提案した。さらにその新しい理論式の妥当性を検討するために、測定システムを立ち上げ、実測し理論計算値との比較を行った。図 5 に示すように実測値と計算値は概ね一致し、理論式が妥当であることが明らかになった。

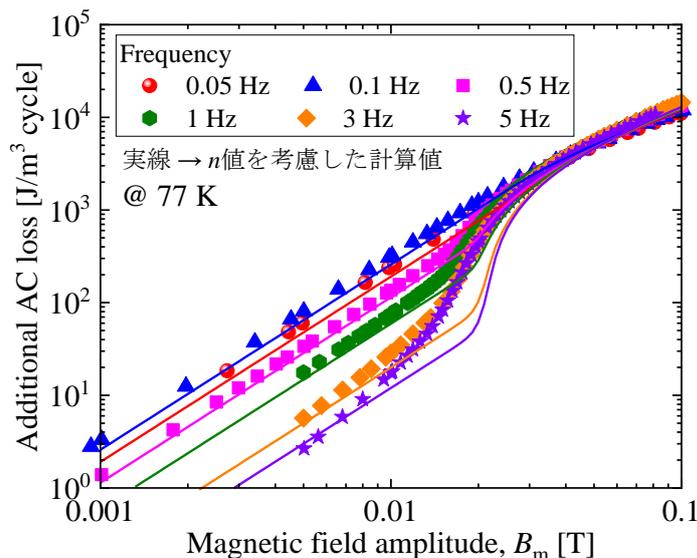


図 5 2本並列導体における交流損失の実測値と理論計算値

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件) (すべて査読有)

1. T. Ito, M. Iwakuma, S. Miura, T. Izumi, K. Adachi, T. Machi, A. Ibi: “Difference of AC Losses between non-striated and striated tape and applicability of temperature scaling law to stacked striated tape”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, 8200505 (2018)
2. S. Oki, S. Miura, M. Iwakuma: “Theoretical Analysis of Additional AC Loss Properties of Two-Strand Transposed Parallel Conductors Composed of REBCO Superconducting Tapes”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, 8201005 (2018)
3. S. Miura, S. Oki, T. Furukawa, M. Iwakuma: “Experimental Validation of Theoretical Expressions on Additional AC Loss of Two-Strand Parallel Conductors Composed of REBa₂Cu₃O_y Tapes via Pick-Up-Coil Method”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 29, 8200504 (2019)
4. H. Sasa, T. Ito, M. Iwakuma, S. Miura, T. Izumi, T. Machi, and A. Ibi: “AC Loss Property of Stacked REBCO Superconducting Multifilamentary Tapes under Perpendicular Magnetic Field”, J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1054, pp. 012037-1-7 (2018)
5. H. Sasa, G. Kawasaki, S. Miura, M. Iwakuma, T. Izumi, T. Machi, and A. Ibi: “Dependences of AC

Loss in Stacked REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes on the Interval among Tapes under Perpendicular Magnetic Field”, J. Phys.: Conf. Ser., in press

6. M. Komiya, T. Aikawa, H. Sasa, S. Miura, M. Iwakuma, T. Yoshida, T. Sasayama, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi: “Design Study of 10 MW REBCO Fully Superconducting Synchronous Generator for Electric Aircraft”, IEEE Trans. Appl. Supercond., in press

[学会発表] (計 6 件)

1. 三浦 峻, 沖 総一郎, 古川 琢馬, 岩熊 成卓: 「ピックアップコイル法による2本REBa₂Cu₃O_y並列導体の交流損失評価」, 2018年度春季低温工学・超電導学会, 2018年5月
2. 三浦 峻: 希土類系高温超伝導線材の高性能化とその応用, 第5回応用物理学セミナー, 2018年5月(招待講演)
3. S. Miura, S. Oki, T. Furukawa, M. Iwakuma, “Experimental Study Using Pick-Up Coil Method on Additional AC Loss of Two-Strand Parallel Conductors Composed of REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes”, Applied Superconductivity Conference, 2018.10
4. 佐々滉太, 岩熊成卓, 伊藤哲也, 三浦峻, 和泉輝郎, 町敬人, 衣斐顕, 「鞍型ピックアップコイル法によるマルチフィラメントREBCO超伝導テープ線材の交流損失の外部磁場印加角度依存性の評価」, 第95回低温工学・超電導学会, 2017年11月
5. H. Sasa, G. Kawasaki, S. Miura, M. Iwakuma, T. Izumi, T. Machi, and A. Ibi: “Scaling Law of AC Loss in Stacked REBa₂Cu₃O_y Superconducting Tapes with Multifilamentary Structure”, Applied Superconductivity Conference 2018, Seattle USA, 2018.10 (Invited)
6. M. Komiya, S. Fukuda, M. Iwakuma, S. Miura, K. Yoshida, T. Aikawa, Y. Hase, A. Tomioka, M. Konno, T. Izumi: “Design Study of 10 MW REBCO Fully Superconducting Synchronous Generator for Fully Turbo-Electric Aircrafts”, Applied Superconductivity Conference 2018, Seattle USA, 2018.10

[その他]

ホームページ等

① <http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/>

② <http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/searchSP/details/K006656/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：岩熊 成卓

ローマ字氏名：(Iwakuma Masataka)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。