

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15221

研究課題名（和文）電気推進船動力用超伝導ワイヤ積層型界磁極に関する研究

研究課題名（英文）Research of HTS Field Pole using Stacked Wire for Electric Ship Propulsion

研究代表者

都築 啓太 (Tsuzuki, Keita)

豊田工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号：40713045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は電気抵抗ゼロと強磁場発生が可能な超伝導材料を利用し超伝導積層ワイヤ界磁磁石の試作を行い、その実証試験結果に基づいて回転機設計のための計算方法の確立を行うことが目的である。研究成果として、積層ワイヤの小型模擬モデルの構築から、ラジアルギャップ型の界磁極へ積層して搭載した際には、形状効果による捕捉磁束密度の向上する可能性があることを示唆する結果を確認した。加えて、着磁された積層超伝導ワイヤの捕捉磁束分布の算出方法をJc-B特性と電磁解析を用いて構築した。また機器内着磁のための構造技術についての試作試験を行い、船舶用推進動力用回転機に適用するための要素技術検証を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶推進用超伝導モータは、船舶が排出するCO2による環境負荷の低減や航行中の騒音・振動の軽減、安全性や操船性能の向上などの電気推進のメリットを生かすことができる。本研究による電気推進船動力用超伝導ワイヤ積層型界磁極と着磁構造の研究は超伝導材料を用いた強磁場と理想的な磁場分布の追求である。この技術を電気機器工学および船舶工学と結びつけることで回転機の大幅な小型化、高出力化、高効率化に寄与する、学術的にも重要な研究課題である。燃料費の高騰、炭素税の導入などにより超伝導回転機の導入による潜在的国内市場規模の拡大傾向にあり、国際的な市場変動への対策としても有効となるため社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to establish a calculation method for designing a rotating machine based on the verification test results of a prototype superconducting laminated wire field magnet using superconducting materials that can generate a strong magnetic field with zero electrical resistance.

As a result of the research, it was confirmed from the construction of a small-scale model of the laminated wire that the trapped magnetic flux density may be improved due to the shape effect when the laminated wire is stacked and attached to the radial-gap type field pole.

A method to calculate the trapped flux distribution of magnetized stacked superconducting wires by electromagnetic field analysis based on Jc-B curve. Furthermore, a prototype test of the structural technology for magnetism inside the device was conducted, and verification of the elemental technology for application to rotating machines for ship propulsion was completed.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 ワイヤ テープ 界磁極 強磁場 積層 着磁 低温

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導材料は従来の金属あるいは磁性材料と比べて 10 倍以上大きな電磁エネルギーを発生することが可能である。その強磁界、大電流の活用方法を工夫することで、産業用電磁機器の大幅な小型化、高出力化、高効率化が実現可能である。世界的にもメガワット級の電磁推進船への応用や、空気の 800 倍以上の密度をもつ海水での海潮流発電など実現性と経済性を兼ね備えた大規模開発が推進されている。

超伝導コイルと回転機応用について、材料による基礎研究において、わが国は超伝導線材メーカーとしても研究開発で世界をリードしている。超伝導材料をテープ上に加工し巻線した超伝導コイルは、励磁により強磁場を発生することができる。これを界磁極に適用した船舶推進用超伝導モータは、船舶が排出する CO₂ による環境負荷の低減や航行中の騒音・振動の軽減、安全性や操船性能の向上などの電気推進のメリットを生かす先端技術として注目されている。国際的にも、燃費改善と排ガスエミッション低減の社会的圧力増大により電気推進システムの導入が進んでいるため、今後、燃料費の高騰、炭素税の導入などにより超伝導モータの導入による潜在的国内市場規模は拡大すると推計されていた。

2. 研究の目的

本課題は超伝導応用研究技術を用いて、構成する界磁極と電機子すべてが超伝導材料で構成される全超伝導回転機(発電機・モータ)の開発を目指す試作実証研究である。大型機で一般的な構造であるラジアルギャップ型の回転機を対象にさらなる高トルク密度を実現するための要素技術として「超伝導ワイヤ積層界磁」を提案するものである。

その中で、超伝導材料を用いた強磁場と理想的な磁場分布の追求は学術的に重要である。加えて電気機器工学および船舶工学に適合することによる回転機の大幅な小型化、高出力化、高効率化は産業的にも重要な研究課題である。その肝となる要素技術である、超伝導界磁構造についての研究を、模擬モデルの構築と有限要素法を用いた解析結果から検証を行う。

3. 研究の方法

研究内容は「超伝導ワイヤ積層界磁の試作実証研究」と、界磁の再現および推進動力機に向けた「界磁極および回転機の電磁解析設計」に大別される。具体的には、超伝導ワイヤ積層型界磁極の小型サンプルの作成に関するデータ収集のための準備、および、ハイブリッド電機子における着磁構造についての検証を行った。超伝導ワイヤ積層型界磁磁石の試作と電磁解析上での超伝導界磁の適用を実施した。

【研究方法 1】 界磁極模擬モデルの試作と評価

超伝導体は着磁のプロセスを経て磁束を捕捉する能力を有している。まず超伝導線材を調達し、種々の巻線の手法をあげて調査・検証をおこない巻線方法を数タイプに選定し、ラジアル型小型回転機を用いた超伝導積層ワイヤ界磁への着磁について基本原理を明らかにする。

本研究にて使用する超伝導線材を表 1 に示す。市販のワイヤを複数重ねることにより構築したサンプルを作成し、界磁表面が超伝導テープで覆われた超伝導ワイヤ積層型界磁磁石の小型模擬モデルを形成した。線材 A と線材 B はどちらも幅が 4 mm の超伝導線材であるが、線材 A は Bi 系、線材 B は希土類系であり、超伝導材料における差異を検証した。線材 C は幅が 12 mm の超伝導線材である。超伝導材料は線材 B と同様の希土類系超伝導線材を用いた。

本研究にて特性評価を行う実際の積層モデルを図 1 に示す。平面積層モデルでの積層方法は 3 種類とし、界磁極模擬モデルの大きさは縦 25 mm × 横 25 mm × 高さ 5 mm とした。平面積層の結果を用いて選定された線材を用いて、円弧状に形成された試作の界磁表面を超伝導テープで覆われた超伝導ワイヤ積層型界磁磁石を形成した。選定した手法により実サンプルを作成し、着磁装置を用いて検証を液体窒素条件下で実施した。界磁試作と極低温での着磁試験の実施を行った。着磁法の一つであるフィールドクーリング法にて着磁を行った。

表 1 超伝導ワイヤの仕様

	線材 A	線材 B	線材 C
超伝導材料	BiSCCO	GdBCO	GdBCO
線材幅 [mm]	4.5	4.05	12
線材厚 [mm]	0.28	0.128	0.05
臨界電流			
I_c [A] (877 K)	172	243	300

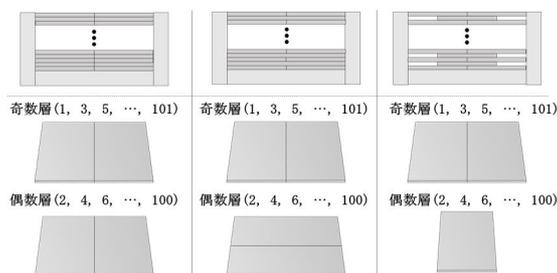


図 1 超伝導ワイヤ界磁極の積層例

[研究方法 2] 電磁解析による回転機設計への適用手法の構築と着磁コイル試作

強磁場を発生するための界磁部について電磁解析を用いた電流密度分布の計算プログラムを独自に作成し、商用ソフトウェア（電磁解析 MagNet7）に組込をおこなう。

電磁解析に加えて超伝導材料のパラメータを考慮した材料特性を追加して計算できるシステムを構築し、その結果を研究方法 1 で確認した捕捉磁束密度の実測と比較する。計算手法を確立したら曲げ形状の超伝導ワイヤ積層型界磁磁石についてその手法を適用し、ソフトウェア上で再現する。

また新規に考案するハイブリッド電機子について電磁解析による設計と試作、直流電流印加状態による検証を行う。電磁解析上でラジアルギャップ型の大型船舶推進動力に適用できるように着磁コイルを配置する。

4. 研究成果

[研究成果 1] 界磁極模擬モデルの試作と評価

表 1 に選定した超伝導線材の種別、図 1 に積層例を示す。超伝導線材を調達し、超伝導ワイヤ積層型界磁磁石の試作を行った。線材 A と線材 B により製作された積層モデルを比較することで超伝導材料が異なる場合の比較を実施し、線材 B と線材 C により製作された積層モデルを比較することで超伝導線材の幅が異なる場合の比較を実施した。

模擬モデルによって得られた捕捉磁束密度を比較すると 4 mm 幅平面積層モデルの着磁試験では Bi 系超伝導線材を積層したモデルに比べて希土類系超伝導線材を積層することで、有効な着磁特性を示したことを確認した。また、積層方法を変更することで、捕捉磁束密度分布の制御が可能となることを確認した。図 2 に示す捕捉磁束密度分布では線材幅が 12 mm の超伝導線材を積層することで、線材幅が 4 mm の超伝導線材を積層したモデルに比べて有効な着磁特性を示したことを確認し、長幅の超伝導線材の優位性を確認できた。

積層方法ではブロック状の積層方法（図 1 右列）が最も平滑で均一な磁場を出力可能な積層モデルとなった。これは、線材間の Gap を補う形にしたことが大きな要因であると考えられる。この結果から、平面積層での積層界磁極の形成には、12 mm 幅の希土類系超伝導線材をブロック状に積層することが最も適していることを確認した。

図 3 に曲げ加工を行った界磁極模擬モデルの捕捉磁束密度特性を示す。円弧状に加工した積層モデルを作成し、捕捉磁束密度の測定を行った。超伝導線材は曲げにより材料内部に歪みが発生するため、臨界電流密度の低下が発生する。曲げにより捕捉磁束密度が低下することが予想されていたが、模擬モデルの形状では形状効果による捕捉磁束密度の増大が見られることを確認した。本研究でのモデルでは半径 40 mm 未満のサンプルは、半径 40mm を超えるサンプルよりも高い最大磁束密度を示すことが確認された。

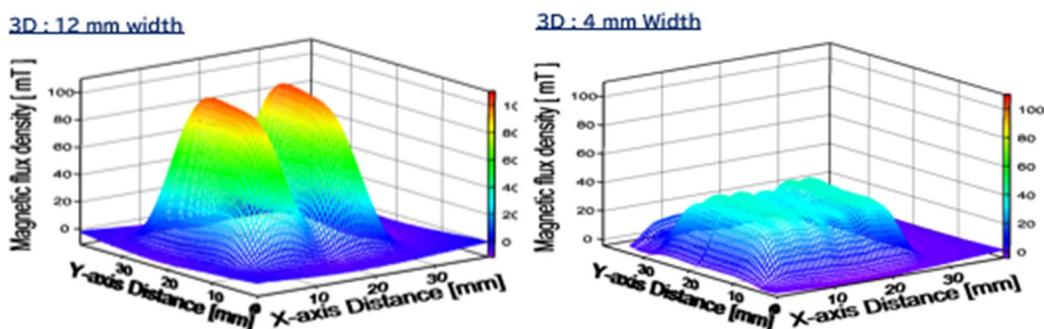


図 2 界磁極模擬モデルの試作と磁束密度分布

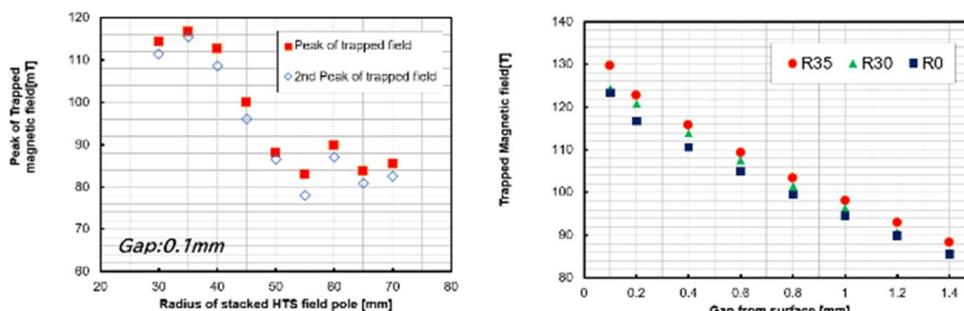


図 3 円弧型界磁極模擬モデルの捕捉磁束密度特性 (77K)

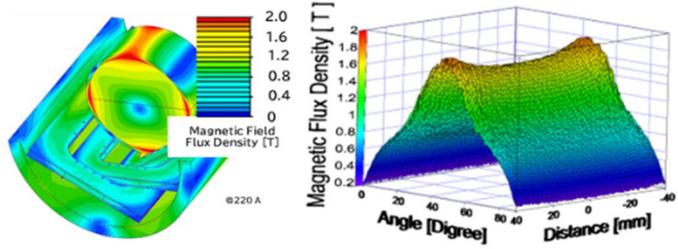
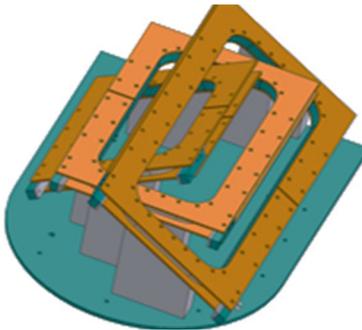


図4 着磁コイル模擬モデルの概念図 図5 電磁解析による回転機内部での有効磁束の算出図

【研究成果2】 電磁解析による回転機設計への適用手法の構築と着磁コイル試作

図4に電磁解析設計に使用したハイブリッド電機子コイル構造の概念図を示す。回転機設計および着磁と電機子の機能を両有しているハイブリッド電機子コイルを対象となる回転機のために新規に考案した。また図5に着磁で得られる回転機内部での有効磁束密度を示す。電磁解析上でラジアルギャップ型の大型船舶推進動力に適用できるように着磁コイルを配置した。模擬着磁コイルについてビスマス系の素線を独自に巻線して構築した。

強磁場を発生するための界磁部について電磁解析を用いた電流密度分布の計算プログラムを独自に作成し、商用ソフトウェアに組込をおこなった。電磁解析に加えて超伝導材料のパラメータを考慮した解析実現のため、材料特性を考慮した計算領域を追加した。電磁解析領域と超伝導特性計算領域による $T-A$ 法を用いた連成解析を行うことにより、コイルとして模擬した電流値を収束させるプログラムを構築した。これを用いて超伝導ワイヤ積層界磁極が着磁によって捕捉できる磁束密度の分布の推定を行った。

検証として、研究成果1で得られた模擬モデルでの平面積層および円弧積層を対象とした。電磁解析上で円弧状に形成された試作の界磁を超伝導ワイヤ積層型界磁磁石とし、計算結果の検証を実測と比較して行った。計算に用いた超伝導特性はバルク超伝導体における種直下で得られた超伝導特性であったため、捕捉磁束密度特性についての差異が発生したと考えられる。

研究全体を通して界磁極としての積層ワイヤの小型模擬モデルの材料選定と試作を行い、捕捉磁束密度分布の形状効果により機器内での有効磁束密度を高められる可能性を示唆する結果を得た。加えて、電磁解析上で着磁された積層超伝導ワイヤの捕捉磁束分布の再現方法を構築し、回転機設計への適用するための連成解析プログラムについて限られたモデルでの一定の成果を得た。

本研究の成果が今後の超伝導応用回転機分野における、電気・磁気設計に関する構造設計上のイノベーションにつながる材料となることが期待され、社会へ還元につながると信じている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0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 門脇駿, 都築啓太, 及川大, 安藤浩哉, 塚本武彦, 杉浦藤虎	4. 巻 第80回
2. 論文標題 バルク超電導回転機での機器内着磁を実現するステータコア形状とトルク特性に関する電磁解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 神戸 紀人, 都築 啓太, 岩月 峻大, 安藤 浩哉, 及川 大, 塚本 武彦	4. 巻 第100回
2. 論文標題 T-A法を導入した捕捉磁束密度解析によるHTSバルク模擬モデルに関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2020年秋季低温工学・超電導学会プログラム 低温工学・超電導学会講演概要集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 岩月 峻大, 都築 啓太, 神戸 紀人, 及川 大, 塚本 武彦, 安藤 浩哉	4. 巻 第100回
2. 論文標題 Gd123超電導線材を曲げ積層した界磁磁石の着磁特性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2020年秋季低温工学・超電導学会プログラム 低温工学・超電導学会講演概要集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 岩月 峻大, 都築 啓太, 神戸 紀人, 及川 大, 塚本 武彦, 安藤 浩哉 (豊田高専)
2. 発表標題 Gd123超電導線材を曲げ積層した界磁磁石の着磁特性評価
3. 学会等名 2020年秋季低温工学・超電導学会プログラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神戸 紀人, 都築 啓太, 岩月 峻大, 安藤 浩哉, 及川 大, 塚本 武彦 (豊田高専)
2. 発表標題 T-A法を導入した捕捉磁束密度解析によるHTSバルク模擬モデルに関する研究
3. 学会等名 2020年秋季低温工学・超電導学会プログラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keita Tsuzuki, Shun Kadowaki, Takahiro Iwatsuki, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Takehiko Tsukamoto
2. 発表標題 Evaluation of 2G Magnetizing coil and stacked field-pole for Fully HTS Radial Machines
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 TSUZUKI Keita, YAMAMURA Sho, KADOWAKI Shun, IWATUKI Takahiro, OIKAWA Dai, ANDOH Hiroya, TSUKAMOTO Takehiko
2. 発表標題 Evaluation of Prototype Armature Unit for Closed-Circuit Magnetization
3. 学会等名 10th Asian-ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 KADOWAKI Shun, TSUZUKI Keita, YAMAMURA Sho, IWATUKI Takahiro, OIKAWA Dai, ANDOH Hiroya, TSUKAMOTO TAKEHIKO
2. 発表標題 Design and Evaluation of Bi2223 Armature Unit for Closed-Circuit Magnetization
3. 学会等名 10th Asian-ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 IWATSUKI Takahiro, TSUZUKI Keita, KADOWAKI Shun, YAMAMURA Sho, OIKAWA Dai, TSUKAMOTO Takehiko, ANDOH Hiroya
2. 発表標題 Study of Magnetic Flux Distribution Control with Stacks of HTS Tape
3. 学会等名 10th Asian-ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keita Tsuzuki, Takahiro Iwatsuki, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Takehiko Tsukamoto
2. 発表標題 Experimental study on magnetic field distribution of high-temperature superconducting stacked tape curved magnet for rotating machine
3. 学会等名 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊田工業高等専門学校 都築研究室 http://tsuzuki-lab.net/

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