

令和元年6月27日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06136

研究課題名(和文)ハイブリット超伝導電機子の船舶用電気推進システム応用に関する研究

研究課題名(英文) Research on application of hybrid superconducting armature for ship electric propulsion system

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) 16,200,000円

研究成果の概要(和文)：電気抵抗ゼロを実現できる高温超伝導は、常温磁性材料の10倍以上大きな電磁エネルギーを扱うことができる他に類を見ない先端材料である。その恩恵により動力やエネルギーを変換する産業用機器の大幅な小型化、高出力化、高効率化がシステムの効率化を促す。超伝導材料の結晶塊であるバルク超伝導体の回転機内部で強着磁を実現する超伝導電機子コイルの研究開発を実施した。バルク体を有する回転機における着磁コイルと電機子コイルの機能を両有する超伝導電機子の設計から実証実験を行い、有限要素法を用いた電磁解析と回転機内部構造の部分試作により原理実証機15 kWおよび1 MW級の回転機に関する研究を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的な意義として、過去の関連先行研究では見られなかった回転機機器内における着磁手法や回転機モデルを示すことで、超伝導材料の新たな応用技術の礎を確立できた。主流である回転機よりも安全かつ作業効率的に有利な機器内着磁法が実現できることを研究成果にて示している。また周囲の磁性材料や超伝導コイルの構造を改良することによる出力トルクへの影響も明らかにした。社会的意義として動力やエネルギーを変換する産業用回転機では大幅な小型化、高出力化、高効率化がその系(システム)の効率化を促す。船舶の推進動力だけでなく、大型EVや航空機動力、風力発電機と比較して空間や重量制限などにおいてもさらなる開発が期待できる。

研究成果の概要(英文)： High-temperature superconductivity is an advanced material that can handle electromagnetic energy more than that of normal-temperature magnetic materials. Thanks to the unique characteristic, the significant downsizing, high output, and high efficiency of industrial equipment that convert power and energy is feasible which accelerates the efficiency of the system. Research and development of a superconducting armature coil that achieves strong magnetization inside a bulk superconductor rotating machine, which is a crystal mass of a superconducting material, was carried out. Conduct demonstration experiments from the design of a superconducting armature having both functions of magnetizing coil and armature coil in a rotating machine with a bulk body, demonstrate the principle by partial analysis of the rotating machine internal structure and electromagnetic analysis using the finite element method Research was conducted on rotating machines of 15 kW and 1 MW class.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導 回転機 高温超伝導材料 電機子 着磁 強磁場

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 動力やエネルギーを変換する産業用機器では大幅な小型化、高出力化、高効率化がその系(システム)の効率化を加速させることができる。自動車や航空機動力、風力発電機と比較して空間や重量制限などにおいて開発の余地がある船舶の推進動力においては、新たな知見による革新を行うフィールドとして好都合であった。加えて研究代表者が所属する国立高等専門学校機構は商船高等専門学校にて商船学を学ぶ練習船を保有しており、現行の内燃機関に代る動力の検討が必要であると考えた。

(2) 研究代表者は高温超伝導材料の船舶動力応用について 10 年以上研究を実施してきた。この材料は極低温まで冷却することで電気抵抗ゼロを実現できる。この特性により従来の磁性材料と比べて 10 倍以上大きな電磁エネルギーを扱うことができる他に類を見ない先端材料である。バルク超伝導体については超伝導材料の結晶塊であり、超伝導回転機構造として様々な構成のモデルができています。本研究においても核となる機器応用のための活用が期待できる。

2. 研究の目的

研究代表者が蓄積してきた超伝導電機子の基礎研究を収斂し、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モータの要素技術開発を実施する。本助成の支援を得て、図 1 に示すようなバルク超伝導体を有する回転機における要素技術である着磁コイルと電機子コイルの機能を両有する超伝導電機子の着想を現実化する。具体的には本研究は以下のステップを踏んで構想・設計から要素技術の実証実験までを行うことを目的と設定した。

- (1) 電磁解析によるハイブリット超伝導電機子構造の概念設計
- (2) 一次プロトタイプ電機子コイルの製作と評価
- (3) 交流電流印加時の超伝導コイル特性評価システムの構築
- (4) 二次プロトタイプ電機子ユニットの作成
- (5) 極低温冷凍機を用いた 30 K 冷却試験
- (6) MW 級全超伝導回転機の実現に向けた概念設計

3. 研究の方法

- (1) 電磁解析によるハイブリット超伝導電機子構造の概念設計

本研究における研究計画として、まず電磁解析を用いたハイブリット超伝導電機子の構造設計を実施した。電磁解析を用いた概念設計を実施し、電源の切替により目的に応じて直流・交流運転が可能であるハイブリット超伝導電機子を用いた超伝導回転機の構造検討を実施した。電磁解析については、調達したソフトウェアを用いて 1 テスラ以上の着磁を目指し、さらなる構造改良に取り組んだ。

- (2) 一次プロトタイプ電機子コイルの製作と評価

実験準備として、電機子コイルの一次プロトタイプ機の製作を実施した。回転機に最適な強磁場分布を生成する電機子構造のプロトタイプの支持構造についても検討し、電磁解析結果を踏まえて、適切な超伝導線材および形状を選択し電機子コイル形状に巻線した超伝導コイルアセンブリを調達した。

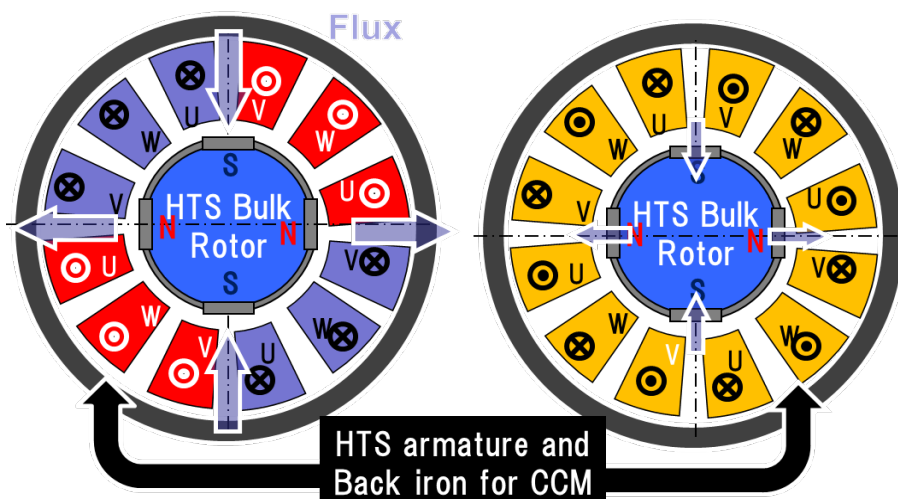


図 1 閉磁路型着磁法 (CCM) 概念図

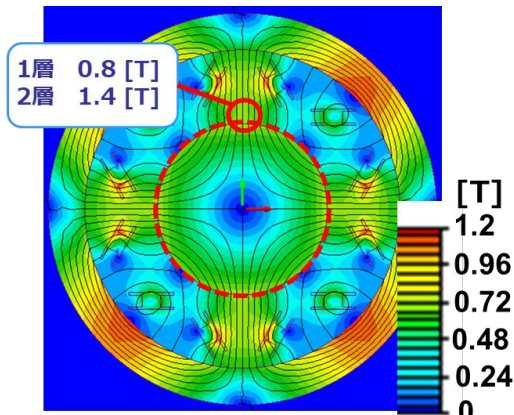


図2 電機子コイルの交流通電特性

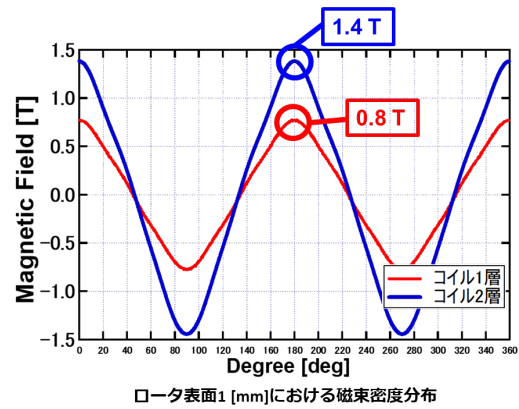


図3 電機子コイルの交流通電特性

(3) 交流電流印加時の超伝導コイル特性評価システムの構築

上記プロトタイプ直流および三相交流印加時の特性評価を行った。実証検証はプロトタイプコイルを液体窒素で浸漬冷却し、直流評価では直流電源と極低温磁場センサを用いて着磁コイルの磁束密度測定を行った。交流評価として三相交流に対応する低圧大電流インバータを用いて評価試験を行った。交流波形をリアルタイムかつ連続に記録する計測アプリケーションによりクエンチ時の電流制御を行い、焼損対策をおこなった。

(4) 二次プロトタイプ電機子ユニットの作成

電機子コイル単体をユニットとして構成する際の現実的な巻線方法や電流方向を検討していくなかで、これまで常電導コイルで主流であった巻線構造では必要となる磁束密度の分布を得られないことがわかってきた。超伝導界磁を用いた回転機とは異なる着磁の仕組みを用いるため、二次プロトタイプとして超伝導コイル巻き線を組み合わせさせてユニット化した。

(5) 極低温冷凍機を用いた 30 K 冷却試験

全超伝導回転機では電機子と界磁子がそれぞれ極低温に冷却される。液体窒素温度下 77 K (-196 度) に加えて、極低温冷凍機を用いた伝導冷却で実現できる運転温度 30 K (-243 度) にて実証実験を行うための冷却構造の準備を行う。直流で着磁コイルとして 1 テスラ以上到達を検証する。各相で 20A 以上の通電を確認し、電磁解析結果と照らし合わせて、成立性検証を行う。

(6) MW 級全超伝導回転機の実現に向けた概念設計

本研究課題による高温超伝導バルク材と高温超伝導線材に関わる研究成果と、従来の研究成果を元に高温超伝導同期回転機に必要な界磁子及び電機子に要求される性能を比較検討し、本研究課題の次段階に位置付けられる研究開発の目標とすべき全超伝導回転機の仕様を策定する。

4. 研究成果

(1) 電磁解析によるハイブリッド超伝導電機子構造の概念設計

有限要素法を用いた電磁解析ソフト MagNet 7 を調達し、超伝導コイルに最適な巻数および構造を決定した。解析ソフトに付随する静磁場解析ソルバーを用いて、電機子コイルに着磁に適した直流電流を印加し、着磁コイルとしての動作検証を完了した。

図2・図3に示すように 15kW 試作機に用いる回転機を想定した電磁解析モデルにおいて、最大値 0.8 テスラの磁束密度分布を得た。検討を実施するなかで巻線構造などが複雑化したが、巻線の形状に新たな仕組みを取り入れることにより実現可能な構成を確立した。さらに多段化し、巻き線構造を改良した場合は 1.4 テスラ以上の磁束密度を得ることができ、同時にこれまでにない多極・全極同時着磁である画期的な方法であることを示した。

(2) 一次プロトタイプ電機子コイルの製作と評価

電磁解析結果を踏まえて、回転機に最適な強磁場分布を生成する電機子構造のプロトタイプの支持構造についても検討を完了した。Bi2223 超伝導線材を巻線し、ダブルパンケーキ型形状を選択し電機子コイル形状に巻線した超伝導コイルアセンブリを調達した。超伝導コイルを構造部材である樹脂で構成した治具に巻線し、電気子構造を構成した。電磁解析結果を踏まえて、適切な超伝導線材および形状を選択し電機子コイル形状に巻線した超伝導コイルアセンブリを調達し 200 A の印加電流にも耐えられることを確認した。

(3) 交流電流印加時の超伝導コイル特性評価システムの構築

図4に示すように77 Kにおける通電電流および端子間電圧測定により20 A 通電を確認した。上記アセンブリを液体窒素で浸漬冷却し、調達した低電圧大電流が通電可能なりニアバイポーラ電源にて77 Kにおける通電電流および端子間電圧測定により十分な通電が可能であることを確認した。計測モジュールを調達し、交流電流制御と三相交流計測システムを確立した。通電電流の指示についても調達した制御用パソコンに取り込むことで、電流設定やクエンチ保護等を一元化したシステムを構築した。

(4) 二次プロトタイプ電機子ユニットの作成

図5に示すように、ユニット形状に必要なコイル3対を用いた電機子について実証実験について準備を実施し、試作モデル全体が30 Kまで冷却できるシステムを構築した。巻線に関しては、調達した超伝導コイルを研究室にて多段化改造を施した二次プロトタイプ試作モデルの評価を実施した。

(5) 極低温冷凍機を用いた30 K 冷却試験

図6に30Kでの冷却試験概念図と構築したシステム外観を示す。液体窒素(77 K)における評価試験を踏まえて、調達したクライオスタット(真空容器)と必要部材を用いてさらに低温で超伝導電機子コイルの評価ができる環境を構築した。30 Kにおける冷却試験を実施し、直流通電試験における目標値電流値の達成を確認した。

(6) MW 級全超伝導回転機の実現に向けた概念設計

次に、電磁解析シミュレーション上で回転機としての運転時の動作検証し、原理検証モデルである15kWクラスの出力を有する回転機的设计を行った。練習船の出力相当であるメガワットクラスの回転機の電機子コイル配置も検討し、概念設計を研究実施期間中に段階的に精度を向上させることができた。

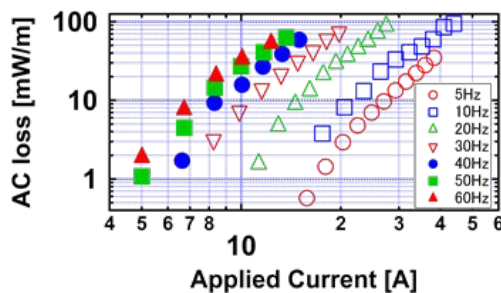


図4 電機子コイルの交流通電特性



図5 電機子コイルおよびコイルユニット

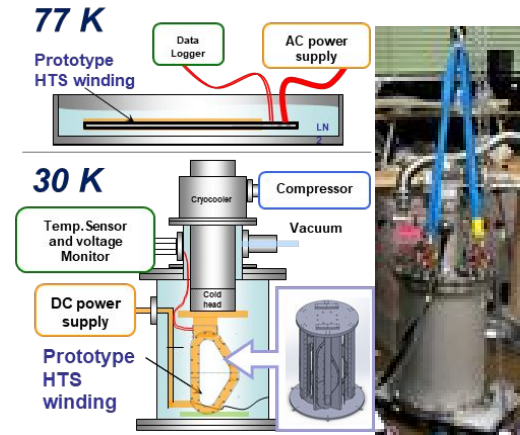


図6 実験装置概念図と実験装置外観

まとめ

超伝導回転機における電機子および着磁技術についての電磁解析・試作による実証研究を推進した。要素技術である着磁と電機子・界磁子構造に着目し、コイル構造や磁性材料の形状の工夫などで、大幅な着磁特性の向上が見込まれる新たな知見を獲得できた。

回転機の要素技術としては、15 kW の実証機から主機 1 MW の電磁解析と質量に関する設計を実施した。製作した試作電機子モデルを電磁解析上で模擬することで着磁コイルとして1テスラ以上到達できる能力があることを検証した。また交流電流で20 A以上の通電を確認することを確認し、電磁解析結果と照らし合わせて、成立性検証を完了した。

3年間の成果については国際応用超伝導会議(ASC2018)をはじめとした国内外の学会にて発表を行った。成果発表を通じた関連研究者との意見交換より冷却構造・機械的構造についても改善の余地がある。全高温超伝導同期回転機に必要な界磁子及び電機子について次段階に位置付けられる研究開発の目標とすべき全超伝導回転機についての取り組みを継続する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

Keita Tsuzuki, Yunosuke Suzuki, Sho Yamamura, Shun Kadowaki, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Takehiko Tsukamoto, Design of Bulk HTS Rotating Machine Using Closed-Circuit Magnetization, IEEE Transactions on Applied

Superconductivity(Early Access), 10.1109/TASC.2019.2902427, 2019 (査読あり)
都築啓太, 門脇駿, 山村昇, 岩月峻大, 及川大, 塚本武彦, ステータコア形状最適化による閉磁路型収束着磁法を用いたバルク超伝導回転機の磁束密度特性向上に関する研究, 平成30年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 論文集 Po1-10, 2018 (査読なし)
都築啓太, 門脇駿, 山村昇, 岩月峻大, 及川大, 塚本武彦, 閉磁路型収束着磁法で用いる電機子コイルの試作と評価, 平成30年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 論文集.Po1-5, 2018 (査読なし)

〔学会発表〕(計9件)

山村昇, 都築啓太, 門脇駿, 岩月峻大, 池戸 さくら, 及川大, 塚本武彦, 新しい着磁法を実現する超伝導電機子コイルの試作試験に関する研究, 平成30年度第3ブロック専攻科研究フォーラム, 2019

門脇駿, 都築啓太, 山村昇, 岩月峻大, 池戸 さくら, 及川大, 塚本武彦, 電磁解析による新しい着磁法を用いた超伝導回転機の検討, 平成30年度第3ブロック専攻科研究フォーラム, 2019

都築啓太, 門脇駿, 山村昇, 岩月峻大, 及川大, 塚本武彦, ステータコア形状最適化による閉磁路型収束着磁法を用いたバルク超伝導回転機の磁束密度特性向上に関する研究, 平成30年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 2018

門脇駿, 都築啓太, 山村昇, 岩月峻大, 閉磁路型収束着磁法を用いた超伝導回転機に関する電磁解析, 平成30年度低温工学・超伝導学会東北・北海道支部 第22回超伝導・低温若手セミナー, 2018

Keita Tsuzuki, Yunosuke Suzuki, Sho Yamamura, Shun Kadowaki, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Takehiko Tsukamoto, Design of Bulk HTS Rotating Machine Using Closed-Circuit Magnetization, 2018 Applied Superconductivity Conference, 2018

都築啓太, 鈴木悠之介, 及川大, 安藤浩哉, 塚本武彦, 閉磁路型収束着磁法を用いた高温超伝導界磁磁石の電磁界解析, 2017年度春季低温工学・超伝導学会, 2017

Keita Tsuzuki, Yunosuke Suzuki, Sho Yamamura, Dai Oikawa, Takehiko Tsukamoto, Hiroya Ando, Design and Electrical Performance of Prototype Winding for Closed-Circuit Magnetization, 30th International Symposium on Superconductivity, 2017,

Yunosuke Suzuki, Keita Tsuzuki, Sho Yamamura, Dai Oikawa, Takehiko Tsukamoto, Hiroya Ando, Study of bulk HTS rotating machine using Closed-Circuit Magnetization, 30th International Symposium on Superconductivity, 2017

都築啓太, 鈴木悠之介, 有限要素法を用いた円筒状高温超伝導磁石における捕捉磁束密度分, 平成28年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2016年09月12日~2016年09月13日 豊田高専高等専門学校

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 鈴木 悠之介

ローマ字氏名: Suzuki Yunosuke

研究協力者氏名: 門脇 駿

ローマ字氏名: Kadowaki Shun

研究協力者氏名: 山村 昇

ローマ字氏名: Yamamura Sho

研究協力者氏名: 岩月 峻大

ローマ字氏名: Iwatsuki Takahiro

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。