

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13737

研究課題名（和文）超電導薄膜積層体を用いた高出力密度埋込磁石型モータに関する研究

研究課題名（英文）Research on High Power Density Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stacked Superconductor Thin Films

研究代表者

寺尾 悠 (Terao, Yutaka)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：00777823

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：超電導技術は材料自身の電流密度が高いことから永久磁石の代わりに磁束源としてや磁気遮蔽材として有用な材料の一つであり、これらの特徴を生かすことで高出力密度な永久磁石型のモータを実現できる可能性がある。

本研究では、積層超電導体をIPMSMの界磁に適用した超電導IPMSM（S-IPMSM）を提案し、積層超電導体の着磁特性や、建設機械等をはじめとした大型車両への適用を前提とした大型のモータの電磁設計及び特性解析を行い、通常のIPMSMとの比較を行った。さらに基礎実験を行うための小型S-IPMSMの製作及び、これを用いてのモータ特性実験を行い積層超電導体使用の効果について検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に超電導線材を低温半田で貼り合わせた積層超電導体は、バルク超電導体や永久磁石と比較して加工が容易で、様々な形状での使用が可能であるため、モータ等の電気機器類への応用が期待できる。

しかしながら、積層超電導体の製作及び特性に関する研究は近年活発に行われているが、応用関連の研究はあまり進んでおらず、実際のモータへ搭載しての実験的特性を考察した研究は少ない。このような点から本研究では積層超電導体の製作・着磁特性からモータの電磁設計、実験系の構築・試験までを行っており、将来的な積層超電導体の応用や超電導モータの実用化の観点から有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）： Superconducting technology is one of the useful materials as a flux source instead of a permanent magnet or as a magnetic shielding material due to the high current density of the material itself, and there is a possibility that a permanent magnet type motor with high power density can be realized by taking advantage of these features.

In this study, we proposed a superconducting IPMSM (S-IPMSM) in which a stacked superconductor is applied to the magnetic field of the IPMSM. The magnetizing properties of the stacked superconductors are conducted. Also, the electromagnetic design and characteristic analysis of a large motor, which is assumed to be applied to large vehicles such as construction machinery, were performed and compared with a conventional IPMSM. In addition, a small S-IPMSM was fabricated for basic experiments, and motor characteristics experiments were conducted using the S-IPMSM to discuss the effect of using a laminated superconductors.

研究分野：超電導工学、電気機器学

キーワード：超電導モータ 積層超電導体 埋込永久磁石型同期モータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年ビジネスのグローバル化に伴い、航空機や鉄道、自動車を始めとした輸送機器の需要は大幅に増加している。その一方で、化石燃料の消費による温室効果ガスの排出が問題視されている。このような状況下において、電気自動車のように既存のガソリンエンジンに代わり電気モータを搭載した輸送機器が普及し始めており、近年は航空旅客機の電気駆動化も検討されるようになってきた。このような輸送機器には「高効率」、「軽量・コンパクト」、「大トルク」等が求められる。

上記のような要求がある中で、超電導技術の使用はモータの高出力密度化を達成するキーテクノロジーの一つである。モータなどの電気機器への応用のために研究されている超電導材料には、主に線材とバルク（超電導体の塊）の2通りが存在する。線材でコイルを構成するか、バルクに外部磁界をかけた状態で冷却・着磁し、永久磁石のような磁束源として用いる方法が一般的であるが、数年前からは超電導薄膜を複数枚積層させてバルクのように着磁して磁束源（以下、積層超電導薄膜磁石）として用いる方法が英国の研究グループによって活発に研究されてきている。積層超電導薄膜磁石は、永久磁石やバルク磁石と比較して形状加工が簡単で軽量であるという利点がある。

超電導回転機は、冷却温度によっては銅線の100-1000倍の電流密度で通電可能な超電導線材を界磁コイルのみ、あるいは電機子巻線と界磁コイルの両方に用いる。この場合、冷却システムの構成について熱・電気・機械的な面からさらに検討する余地があるものの、結果として高出力密度のモータを実現出来るというコンセプトの下で、世界中の企業・大学の研究グループで研究開発が行われてきた。特に欧州の研究グループは、上に挙げた積層超電導薄膜磁石を用いた表面磁石型超電導モータ（以下、SPMSM）の検討を進めている。しかしSPMSMの場合、表面の積層超電導薄膜磁石の遠心力等による剥離等を防ぐために保護管（SUS管など）が必要となる。

このような中で、埋込永久磁石型同期モータ（IPMSM）は超電導体を鉄心で構成された回転子のスロット内に挿入するために上記のような剥離等の問題が回避される。また、界磁によるマグネットトルクだけでなく、鉄心を用いることによるリラクタンストルクも利用することが可能であるため、SPMSMよりも大トルク化が期待できるがまだ具体的な特性に関して検討された例は殆どない。

2. 研究の目的

本研究の目的は積層超電導薄膜磁石をIPMSMの界磁へ適用した際の超電導モータ（図1）すなわち超電導IPMSM（S-IPMSM）に関して、実験及び有限要素法によるモータの電磁設計を行い、S-IPMSMの成立ちに関して研究を行うことである。具体的には、下記のことを行っていく。

- (1) 積層超電導体の製作及び着磁実験
- (2) S-IPMSMに関する電磁解析と大型化の検討
- (3) 基礎実験用小型S-IPMSMの製作
- (4) リラクタンストルクとしての実験的検討

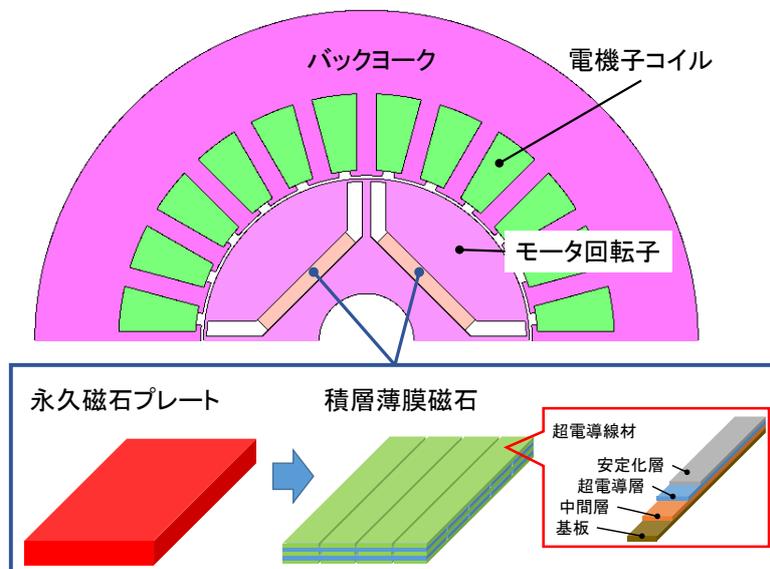


図1. S-IPMSMの概要

3. 研究の方法

本研究で扱う S-IPMSM の特性に関する検討を行う上で、以下のことを行っていく。

(1) 積層超電導体の製作及び着磁実験

市販の希土類系銅酸化物超電導 (REBCO) 線材 (77 K で臨界電流 100 A 程度) を使用し、低温はんだで積層・接着させたサンプルを製作する。そして超電導マグネットによる外部磁界発生環境下において液体窒素による磁界中冷却を行い、着磁した際の磁束密度分布を計測する。

(2) S-IPMSM に関する電磁解析と大型化の検討

積層超電導体をバルク体と近似し、大型建設機械 (ダンプ、トラック、etc. ...) へ使用する場合の S-IPMSM の回転子における界磁のアレンジを変更して有限要素法による電磁設計を行った場合のトルク特性等に関して考察する。電磁設計に当たっては、汎用有限要素法解析ソフトの JMAG-Express 及び JMAG-Designer を使用する。

(3) 基礎実験用小型 S-IPMSM の製作

基礎実験を行うための小型の S-IPMSM を製作する。すなわち市販の IPMSM を使用して回転子の永久磁石挿入スロット部分を改良し、積層超電導線材のサンプルを挿入可能なスロット幅に拡張する。更にモータ全体を液体窒素により浸漬冷却を行うことを前提とし、ケーブル被覆を従来のビニル被覆から液体窒素温度 (77 K) に耐えうる被覆へ変更し、通電用のケーブル線を保護する。

(4) リラクタンスモータとしての可能性の検討

永久磁石同期モータとして使用する一方で、リラクタンスモータとしての可能性も検討を行う。このために液体窒素で冷却してモータ特性を測定するためのテストベンチを構築し、積層超電導体を磁気遮蔽材 (着磁無し) として使用した場合のトルクを測定し、考察を行う。モータ自体は 6 極機であるが、今回は製作した積層超電導体サンプル数の関係から 6 スロット中 3 スロット分に積層超電導体を挿入する。

4. 研究成果

(1) 積層超電導体の製作及び着磁実験

図 2 に示す様に、まず 77 K における臨界電流約 100 A の 4 mm 線材を使用して 20 mm × 5 mm × 40 mm のサンプルを作成した。そしてこれを超電導マグネットにより外部磁界 2.0 T を発生させた中で、液体窒素での磁場中冷却を行い、捕捉磁束密度を測定した。その結果今回の試験条件での最大捕捉磁束密度として 30 mT 程度が得られた。超電導線材は現在 77 K 以下で数百 A 以上の臨界電流特性を得ることが可能であり、かつサンプル体積中の占積率は半田の塗布厚さを調整することで今回の数倍程度は捕捉磁束密度の向上が期待できる。すなわち大型のモータ界磁を構成する場合、上記に挙げた条件でさらに線材の積層数を増加させることでより強磁界を捕捉可能な見通しを得た。

(2) S-IPMSM に関する電磁解析と大型化の検討

回転子の界磁が永久磁石である場合と超電導体である場合 2 通りの IPMSM の電磁設計を行った。界磁のアレンジに関しては超電導体の体積を固定し、図 3 のような構造と超電導体を V 字に配置した形、更に三角形上に配置した形の 3 通りに関して検討を行った。電磁設計の結果としてマグネットトルク、リラクタンストルクの特長並びに損失等について永久磁石型の IPMSM と比較を行い、必要なトルクを得るための界磁の使用量に関して優位性が得られることを示した。また大型建設機械が部品を分割して現地組み立てを行う際に、同様に現地で超電導界磁の着磁作業を行い回転子スロットに挿入するなどの実用化に当たっての検討・議論を行うことが出来た。

(3) 基礎実験用小型 S-IPMSM の製作

図 4 に製作した S-IPMSM を示す。回転子における永久磁石の挿入スロットは従来厚さ 1.5 mm の永久磁石を挿入することが前提であったが、今回の基礎実験に使用するために厚さ 5.0 mm の積層超電導体が挿入可能なスロットとなった。本製作モータにより、積層超電導体だけでなく、同じサイズのバルク超電導体を挿入しての実験も可能となった。

(4) リラクタンスモータとしての実験的検討

図 5 に示す様に、(3) で製作した S-IPMSM の実験系を構築した。すなわち液体窒素 (77 K) で S-IPMSM を浸漬冷却した状態で三相交流電流を通電して回転させ、トルクメータでトルク、回転数、出力の 3 つを測定する。ただしモータとトルクメータ間は、極低温冷媒に晒されているモータ側から霜がトルクメータへ到達することを防ぐために、低熱伝導材料であるベークライトを使用し S-IPMSM とトルクメータ間にカップリングを用いて接続した。

図 6 に S-IPMSM を 500 rpm で回転させた際のトルク波形を示す。積層超電導体をスロットに挿入することで、挿入しない場合に比べてモータトルクが 80-90% 程度向上している事が分かる。すなわち本実験により積層超電導体は磁束源としてだけでなく、磁気遮蔽材としても作用し、リラクタンスモータとしても活用が可能な見通しが得られた。

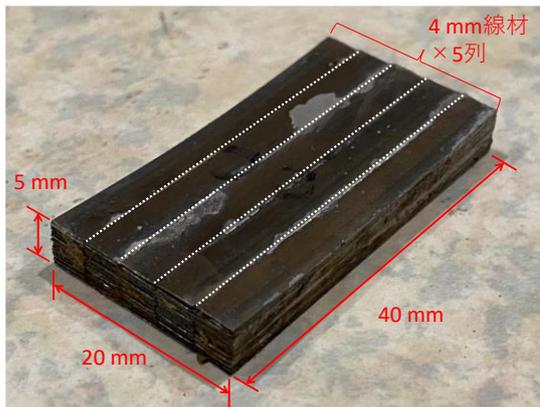


図 2. 製作した積層超電導体サンプル

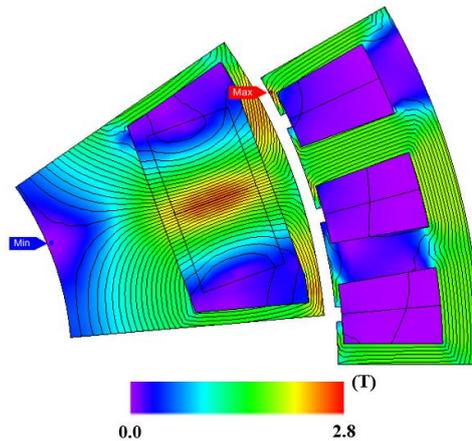


図 3. S-IPMSM を大型化 (直径 1.0 m) した際の磁束密度分布の一例

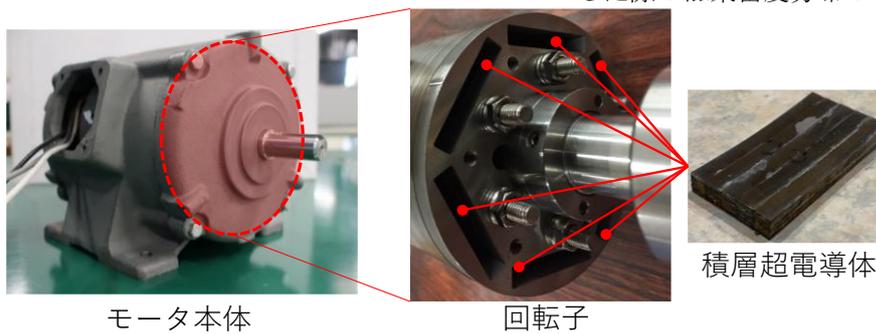


図 4. 製作した S-IPMSM

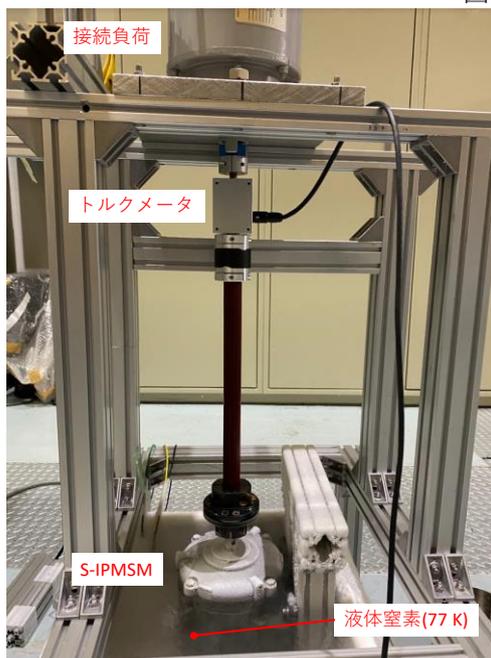


図 5. S-IPMSM の実験系

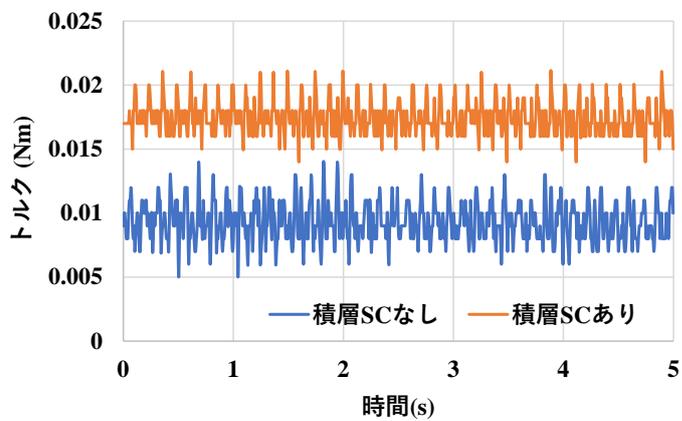


図 6. S-IPMSM を界磁あり/なしの条件でのトルク波形 (回転数 500 rpm)

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 Wataru Akada, Yutaka Terao and Hiroyuki Ohsaki	4. 巻 1293
2. 論文標題 Motor structure and mechanical output density of IPM motor using bulk superconductors as magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1293/1/012076	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 -

1. 著者名 Y. Terao, W. Akada and H. Ohsaki	4. 巻 掲載決定
2. 論文標題 Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Different Bulk Superconductor Arrangements	5. 発行年 2019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.2019.2899181	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 寺尾悠、赤田渉、大崎博之
2. 発表標題 バルク超電導体を用いたMW級埋め込み磁石型同期モータの電磁特性
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺尾悠、赤田渉、大崎博之
2. 発表標題 バルク超電導体を用いた大型輸送機器のためのMW級埋め込み永久磁石型同期モータの構造に関する考察
3. 学会等名 第96回 2018年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Terao, W. Akada and H. Ohsaki
2. 発表標題 Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Different Bulk Superconductor Arrangements
3. 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 W. Akada, Y. Terao and H. Ohsaki
2. 発表標題 Motor structure and mechanical output density of IPM motor using bulk superconductors as magnetic field
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Superconductivity (ISS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺尾悠、赤田渉、大崎博之
2. 発表標題 バルク超電導体を用いた大型輸送機器のためのMW級埋め込み永久磁石型同期モータの構造に関する考察
3. 学会等名 第97回 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap https://researchmap.jp/terao_yutaka 寺尾悠のホームページ http://www.ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp/terao/terao_index.htm Researchmap (寺尾悠) https://researchmap.jp/terao_yutaka 寺尾悠のホームページ http://www.ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp/terao/terao_index.htm Researchmap https://researchmap.jp/terao_yutaka
--

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