

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06224

研究課題名(和文)高温超電導磁気軸受を用いた磁気反発型浮上系の安定化に関する研究

研究課題名(英文) Study on stabilization of magnetically repulsive levitation system with high temperature superconducting magnetic bearings

研究代表者

村上 岩範 (MURAKAMI, Iwanori)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：80292621

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：私は高温超電導浮上磁気軸受と反発型の永久磁石磁気浮上を組み合わせることで、浮上力が大きく、無制御にもかかわらず安定した磁気浮上を実現した。これによって従来の高温超電導浮上に用いていた超電導体の使用量を大幅に低減することに成功した。また超電導体に侵入させる磁束密度を高める磁気集束型磁石配列を使った磁気回路構成を実現することで超電導磁気軸受に適した単純な永久磁石を用いて強磁場の創出を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、反発力を利用することによって恒常的に浮上力を発生させるが可能であるが、浮上力以外の方向では不安定な永久磁石反発浮上系を高温超電導体のピン止め力を用いて安定化させることに成功した。このことによって、大きな浮上力すなわち重たいものを浮かすのに使っていた超電導体の使用量を劇的に低減させながら、超電導浮上磁気軸受の特性である無制御で安定した磁気浮上を実現することに成功している。

研究成果の概要(英文)：By combining a high-temperature superconducting levitation magnetic bearing and a repulsive permanent magnet magnetic levitation, I achieved stable magnetic levitation despite the large levitation force and without control. As a result, we succeeded in significantly reducing the amount of superconductor used in conventional high-temperature superconducting levitation. In addition, we realized the creation of a strong magnetic field that can be constructed using simple permanent magnets suitable for superconducting magnetic bearings by realizing a magnetic circuit configuration using a magnetic focusing type magnet array that enhances the magnetic flux density that penetrates into the superconductor.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：超電導浮上 磁気軸受 磁場解析 磁気反発浮上 フライホイール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

永久磁石による可動部と高温超電導体(HTSC)による固定部によって構成される高温超電導磁気軸受は、ピンニング力等により無制御で安定した非接触浮上系を構成できる特徴を有している。現在、これを利用した夜間電力利用のための電力貯蔵フライホイールや、極低温ポンプ等への応用など様々な研究がなされている。しかしながら、浮上させる質量に比例した HTSC 体積、高い磁束密度の大きな永久磁石が必要となり、コスト面に問題がある。また HTSC を冷却するためのエネルギーも同様に必要となってくる。

ここで、永久磁石間の磁気反発力は HTSCMB によるピンニング力に比べ非常に大きな浮上力を得ることが容易に可能であるが、それに伴い不安定力も増加する欠点がありこれまで、このような磁気反発を利用した磁気浮上系についてはほとんど研究がなされていない。もし、この磁気反発型浮上系を、無制御に近い状態で安定化させることができれば、小型で大きな浮上力を得られる磁気浮上系の実現が可能となり、HTSC 浮上の問題点の改善に利用できると考えられる。

我々はこれまで小型の HTSC と集束磁束による高温超電導磁気軸受(HTSCMB)を開発し、さらに浮上力を増大させるための永久磁石を浮上体下部に配置することによって最大浮上力を HTSCMB 単体に比して約 40% 程度向上させることに成功すると共に、これを用いたフライホイールの開発を実行した。この系は反発型永久磁石磁気浮上と HTSCMB の利点を組み合わせることによって、大質量を持つロータを安定して浮上させることができる非接触磁気浮上系を実現している。しかしながら、浮上力の主な部分は HTSCMB によって生成されており、反発型磁気浮上はあくまで補助的に利用しているにとどまっている。そこで本研究では上記のことを踏まえ、磁気反発型浮上系の問題点である不安定力の安定化を HTSCMB により実施し、浮上力と安定化限界の関係を明らかにすることを実施する。図 1 に本研究の基本構成を示す。磁気浮上部はこれまでの研究がほとんど見受けられない**磁気反発を用い、浮上方向に常に正の復元力特性を持つ浮上方式**とする。磁気反発浮上は磁石間で浮上力と垂直方向の推力とピッチング方向のモーメント力の 2 つの不安定力が発生するため、この不安定力の安定化のために磁気反発部外周に 3 個以上の HTSC を配し、HTSCMB を構成する構造とする。このようにすることで磁気反発時に発生する永久磁石間の磁束集束を利用することが可能となり増大する 2 つの不安定力に対して HTSC によるピンニング力の増大が発生するため効率よく安定化可能になる。この安定化手法に関して永久磁石間のギャップと HTSCMB による安定化限界に関しての検討を始めに行う。その後、反発型磁気浮上を用いた回転系を構成し、動特性解析・制振制御を行い本研究の有用性を示す。

## 2. 研究の目的

本研究でははじめに、永久磁石間の磁気反発による不安定力を HTSCMB によって安定化できる限界についての検討を行う。図 2、図 3 に予備的磁束密度解析結果を字示す(電磁場解析ソフト JMAG による)。永久磁石間で磁束集束が発生している事が見て取れるがこの集束磁束を HTSC によりピンニングして安定化できる限界値を特性計測実験および特性解析を行って明らかにする。

第二段階として反発型磁気浮上系を持つ完全非接触浮上回転系を構成し、HTSCMB による無制御安定浮上に関する諸特性を実験により明らかにするこの際回転体の半径方向剛性は極めて低くなると考えられるのでこれに対応する駆動系の検討を行う。

最終的に問題となると思われる 1 次危険速度の乗り越しのための制振機構の開発を行い磁気反発による回転浮上系の諸特性を実験並びに数値解析によって明らかにする。

近年、地球温暖化や原子力発電への社会的反発により自然エネルギーの利用が重要となっているが、元来エネルギー源としてはあまりに不安定なこれら自然エネルギーを安定的に供給するために電力貯蔵法の研究が重要となり、様々な手法について研究がなされている。本研究は、この様な電力貯蔵法の一つとして電力貯蔵フライホイールに着目し、その貯蔵密度を高める手法として**磁気反発型磁気浮上を積極的に利用する**ことを提案する。本提案の様な研究は、応募者が知る限りこれまでほとんどなされておらず、この点が独創的と言える。

またこれまでの応募者の研究によって HTSCMB によるこのような磁気反発型浮上は安定化可能化であることが明らかになっているが未だその詳細な安定化限界等の諸特性は判明していない。非接触磁気浮上系は先に述べた電力貯蔵フライホイールのほかエネルギー回生、省エネルギーさらに極低温ポンプや、極限環境での使用への応用が期待され、これに関する研究が行われている。このような系を容易に構成できる磁気浮上系を無制御に近い状態で安定化することに関する研究は現在のところあまり見受けられない。

本研究は永久磁石による反発型磁気浮上と HTSCMB を複合させることにより無制御で安定な磁気浮上の実現を目指している。このような研究はほとんど成されておらずこの点でも独創的である。

### 3. 研究の方法

第1段階として提案する磁気反発浮上系の HTSCMB による安定化限界についての検討を行う。磁石間ギャップと磁気反発による浮上力、不安定力並びにその時の集束する磁束密度の相関関係について実験と解析から明らかにする。第2段階として、磁気反発を用いた回転浮上系を実際に試作し、半径方向剛性並びにピッチング剛性の解析を行う。以上を踏まえこのような磁気反発力によって浮上力を得る完全非接触浮上回転系を試作・開発し、その駆動方法の検討および低いと予測される半径方向剛性に起因する危険速度時の大振幅に対する制振機構の検討、開発を実施し実際に実験を行うことによってその諸特性を解析するとともに本研究の有用性を確認する。

平成 29 年度

本年度は主に永久磁石間の磁気反発部における磁束密度解析、各方向力のシミュレーション、これに伴う反発部の試作を実行する。

第1段階として、本研究で提案する磁気反発型浮上系の安定化の基礎となる磁気反発部での磁束集束の状況並びにそれに伴う浮上力、水平方向推力、ピッチング方向推力の推定および実験装置による実際の状態についての確認を行う。ここで重要となるのは永久磁石間の反発が磁石形状によってどのように変化するかを検証することである。研究目的で述べた簡易的解析の結果磁石の組み合わせにより反発方向力とそれに垂直な方向の推力の関係は、組み合わせる磁石のサイズによって変化することが分かった。そこで磁場解析ソフトによる解析を繰り返し、反発方向力が大きくそれに垂直な方向の推力が小さくなる組み合わせの探索が必要となる。ここで得られた組み合わせをもとにその時の磁気反発部における磁束集束状況と解明し、HTSCMB によるピンニング力を推定することによって、安定化限界を解析できると考えられる。第2段階としてこれらを確認するための HTSCMB を試作し、実際の試作浮上系を作成し実験によって検証を行う。

#### (1) 永久磁石間の反発部における磁束密度解析

本研究の基礎となる永久磁石間での反発部における磁束密度解析を行い各方向の発生力の検証を行う。このために、使用する磁石の形状、各部の寸法比率等に着目して詳細な検討をシミュレーションによって行う。またこの段階で代表的な数種を抽出した後、実際に試作を行い各特性の計測・解析を行うことによりモデル化誤差並びに製作上の制限を明らかにする。これは強力な永久磁石同士の反発を用い、磁束集束を発生させる必要があるため、モデルでは想定していない制限（初期配置における許容誤差の範囲など）が発生すると考えられるためであり、このような試作を行うことは非常に重要と考えられる。

#### (2) 反発力並びに反発部での磁束密度解の相関

(1)の結果を基に反発方向力が大きく、浮上系を構成した場合の不安定力となる反発方向と垂直な方向の力が小さくなるようなパラメータを選定し、これに基づいて最適化を実行する。この際、上記2項目の力についてのみならず磁束集束部の磁束密度についても十分に留意する。この際、磁束密度のみならず表面からの距離および反発磁石間の相対変位に依存した磁束密度分布の変化を計測し、動的3次元磁束分布を調査し、密度分布の変化を計測し、動的3次元磁束分布を調査し、磁気反発特性を明らかにする。特に本研究で安定化に用いる HTSCMB に侵入する集束磁束

に着目して解析を行う。

(3) 永久磁石による無制御安定化反発型磁気浮上系の検討

(2)で明らかにした諸特性をもとに HTSCMB のピンニング力により無制御でも安定した浮上が得られるような反発力を用いた磁気浮上系を構成する。この時、浮上体を安定化させるための限界値を決定し、この限界値の物理的に超えないような設計を検討実施することが重要となる。

(4) 実験による反発型磁気浮上の特性解析

(3)で検討した磁気反発浮上系を試作し実験によりその特性を解析する。この際、制作上の誤差、並びに永久磁石間の初期配置によりシミュレーションとの相違が発生すると考えられるため適宜、試作とシミュレーションを繰り返し、反発による各方向力、HTSCMB のピンニング力、磁石形状および初期ギャップ、浮上体質量との実際的な相関を明らかにし提案するような磁気反発浮上系に関する設計指針の策定を検討する。これに基づき、実際の HTSCMB によって制御することなしに安定化できる反発型磁気浮上系を開発する。またこの安定化反発型磁気浮上系の特性を実験により解析しその有用性を明らかにする。

平成 30 年度～

この期間に 29 年度で検討した解析および試作結果を用いた HTSCMB による安定化した反発型磁気浮上を有する完全非接触磁気浮上系の開発を行う。この時の反発型磁気浮上による不安定性を打ち消すために回転体半径方向の剛性が低下することが予想されるため、この剛性の評価および加振による振動特性解析等を実行する。またこの低い剛性が回転駆動時の駆動により影響されると考えられるため、応募者が開発した半径方向力を発生しないアキシアル型同期駆動によってロータの直接駆動を実現する。

また、期間の後半部分では半径方向剛性の低下によって発生する回転体の危険速度付近での大きな振れ回り共振やピッチング方向の共振を乗り越すための制振機能を付加することにより反発型磁気浮上の高い浮上力を利用可能な安定な非接触回転系の開発を実現する。以上の課程を各段階でまとめ、随時、学会発表、論文投稿を行い、研究成果を公表することとする。

#### 4. 研究成果

平成 29 年度は反発型磁気浮上系と超電導磁気浮上系を組み合わせ、無制御で全軸方向に安定かつ強い軸方向浮上力を持つ超電導磁気軸受(Superconducting Magnetic Bearing : SMB)を製作し、反発磁石の発生させる半径方向不安定力のみ超電導体の磁束ピンニングによって安定化させることを目指す。これによって高価な HTS の使用量を抑えつつ全軸方向に無制御で安定でありなおかつ強い軸方向浮上力を持つ SMB を実現する。その SMB を組み込んだフライホイールの駆動実験を行い、特性を検証した。具体的にはリング型の永久磁石を反発するようにステータ側とロータ側に配置して反発型磁気浮上部を構成し、その内側にステータ側の HTS とロータ側の磁束源を組み合わせた SMB 部を配置する構造の軸受を製作した。このロータ側の磁束源は強磁性体材料とネオジム磁石による磁束収束部を持ち、リング状の HTS の上面と側面に高い磁束密度および磁束密度勾配を発生させる構造となっている。製作した磁気軸受の半径方向、軸方向、ピッチング方向の復元力を測定し、これによって本研究で提案した反発型磁気浮上系の SMB による安定化法についての有用性を明らかにした。さらに今回製作した軸受部を組み込んだフライホイールを製作し、駆動実験を行うことで製作した SMB の有用性を確認した。

平成 30 年度は平成 29 年度に試作・開発した超電導磁気軸受(Superconducting Magnetic Bearing: SMB)の特性を明らかにするため、以前の研究(課題番号:26420166,「高密度磁束集束法を用いた高温超電導磁気軸受の特性解析に関する研究」)において試作した SMB との特性比較を実施した。これにより、今回提案する SMB における高温超電導体(High Temperature Superconductor: HTS)の使用量がどのように変化しているかを検証した。また磁気反発部の永久磁石間距離を変化させることによって、非接触磁気浮上軸受としての各方向剛性の推移についての検証を実施した。

具体的には今回提案した SMB の浮上力特性、半径方向復元力特性、浮上側（永久磁石構成部分）の磁束密度分布に関する精密な数値解析および、実際の計測を実施し、本研究の様な複合的永久磁石配列における数値解析結果の妥当性の検証を実施しつつ、SMB の機械的特性を明らかにし、従来研究の SMB の計測結果と比較を実施した。この結果、磁束密度の数値解析結果は実測値とよく一致しており、今後の設計において本数値解析は実際の装置の特性を予測するのに十分であることが確認された。また軸受としての機械的特性は今回提案の SMB と以前の研究における SMB でほぼ同等の特性を得ることが可能となった。今回提案の SMB は HTS 使用量が前研究の半分であり、大幅な低減効果があることが確認された。

令和元年度は研究期間最終年度として、これまでの研究を踏まえ開発した反発型磁気浮上系と SMB を複合させた HMB (Hybrid Magnetic Bearing) において、軸方向での磁気反発部の磁束変化を変化させることにより、軸半径方向の剛性を変化させることが確認されたため、これを用いた制振システムの開発並びに検証を実施した。

具体的にはステータ側磁石の磁束密度を電磁石により制御することによって半径方向剛性を変動させる手法を採用し、共振回転周波数を約 1 Hz 程度の範囲で瞬時に切り替えることに成功した。これにより従来同様な制振方法として永久磁石間の距離を変更することによって磁場変動を起こす方法では困難であった触れ回り振動の制振を可能とし、新たな制振手段の一方法を確立できたものと考えられる。これらの制振手法を適応したフライホイールを開発し、その特性を明らかにし、本研究で提案したシステムの有用性を確認できたものと考えられる。

以上の結果から、本研究では高温超電導浮上磁気軸受と反発型の永久磁石磁気浮上を組み合わせることで、浮上力が大きく無制御にもかかわらず安定した磁気浮上を実現し、これによって従来の高温超電導浮上に用いていた超電導体の使用量を大幅に低減することに成功した。また超電導体に侵入させる磁束密度を高める磁気集束型磁石配列を使った磁気回路構成を実現することで、超電導磁気軸受に適した単純な永久磁石を用いて構成できる強磁場の創出を実現した。これにより超電導体への侵入磁束の強化を実現することでピンニング力の向上を実現し、従来手法に比べ超電導体使用量の提言を実現できた。さらに反発型磁気浮上に用いたステータ側の磁束変化により半径方向の触れ回り振動を抑制する手法を提案し、これを実験を通して確認し、その有用性を示した。

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 Murakami Iwanori, Mori Hayato, Shimizu Makoto, Quan Nguyen Manh, Ando Yoshinori	4. 巻 59
2. 論文標題 Study on rigidity of the superconducting magnetic bearing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 191 ~ 200
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3233/JAE-171238	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 Iwanori Murakami
2. 発表標題 Stabilization of Magnetic Repulsive Levitation System by Superconducting Magnetic Bearing
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Magnetic Bearings（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Iwanori MURAKAMI, Hayato MORI, Makoto SHIMIZU, Nguyen Manh Quan, Yoshinori Ando
2. 発表標題 Study on rigidity of the Superconducting Magnetic Bearing
3. 学会等名 the 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM) 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上 岩範, 清水 誠, グエン・マイン・クアン, 池 礼紋, 安藤 嘉則
2. 発表標題 磁気反発浮上系の超電導ピンニングによる 無制御安定化
3. 学会等名 MAGDA コンファレンス in 金沢
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田 陽祐, 村上 岩範, 清水 誠, 安藤 嘉則, 池 礼紋, 趙 一鳴
2. 発表標題 磁気反発浮上系の超電導磁気軸受による安定化
3. 学会等名 「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD31)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上岩範, 趙一鳴, 山下尚人
2. 発表標題 超電導磁気浮上フライホイールの制振
3. 学会等名 第28回MAGDAコンファレンス in 大分(MAGDA 2019)
4. 発表年 2019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