

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560249

研究課題名(和文)高温超電導軸受を持つ磁気浮上電力貯蔵フライホイールの開発と動特性解析

研究課題名(英文)Development and dynamic analysis of magnetic levitation flywheel with high-temperature superconducting bearing

研究代表者

村上 岩範(Murakami, Iwanori)

群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号：80292621

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は高温超電導磁気軸受の構成要素である永久磁石部の磁束密度を高密度化する方法を提案し、これを各種適応することにより、非接触軸受の機械的特性を向上させ、その特性を明らかにした。また、高温超電導体によるピン止め効果を用いることで吸引型磁気浮上の浮上方向安定化および反発型磁気浮上の半径方向不安定力抑制に成功し、従来困難だった磁気反発を用いた磁気浮上を無制御で実現している。この高温超電導磁気軸受を使用した電力貯蔵フライホイールを開発し、その諸特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, It have proposed a method of increasing the magnetic flux density of the permanent magnet part that is constructing the high-temperature superconducting magnetic bearing. Since High magnetic flux density improves the mechanical characteristics of the magnetic bearing, this characteristic has clarified.

In addition, by pinning effect of high-temperature superconducting levitation, the magnetic bearing has succeeded in levitation direction stabilization of attraction type magnetic levitation and suppression of the radial instability force of repulsive-type magnetic levitation. As this result, repulsive-type magnetic levitation, ever has been difficult, can be realized.

Energy storage flywheel with a high-temperature superconducting magnetic bearing like this is developed, and the various characteristics were clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：運動制御 高温超電導 磁気浮上 磁気軸受 非接触 超電導応用 フライホイール

1. 研究開始当初の背景

永久磁石による非接触磁気浮上系は、安価に大きな浮上力を得られ、摩擦が無く、高速回転ができるなどの特徴を有している。しかしながら、この様な磁気浮上は基本的に不安定であり、非接触磁気浮上を実現するためには複雑な制御を必要とする。一方、高温超電導浮上系は、ピンニング力により無制御で安定な非接触浮上を実現できる。この事から様々な研究が成されてきている。また、これらの特徴から、現在、有効利用が模索されている夜間電力を利用した電力貯蔵フライホイールへの応用が期待されている。しかしながら、フライホイールの様な大きな質量を浮上させるためには、大型の高温超電導体 (HTSC) と高い磁束密度を持つ永久磁石が必要となり、非常にコストが高くなってしまふ。また大型の HTSC を冷却するためのエネルギーも必要となってくる。

ここで、安価に大きな浮上力を得られる永久磁石を用いて磁気浮上を行い、これに小型 HTSC のピンニング力を用いた軸受を外周に複数箇所配置して非接触支持する。この様な構成にするとピンニング力により磁気浮上を安定化させることが可能であり、高価で、維持コストの高い HTSC を小型とすることができると考えられる。これら各浮上系の利点を組み合わせることにより、比較的安価にフライホイールのような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完全非接触磁気浮上系を実現できると考えられるが、この様な研究はほとんど成されていない。

2. 研究の目的

本研究は、単一のディスク状フライホイールに完全非接触浮上に必要な全ての機能を持たせた、高温超電導軸受を持つ電力貯蔵磁気浮上フライホイールを開発し、エネルギーの貯蔵及び取り出しを行うことを目的とする。第1段階として、磁束収束型配列を参考とした、ラジアル方向に一樣で強い磁束密度を持つロータを開発する。これを用いて小型の高温超電導体による非接触軸受けの性能向上、特性解析を行う。第2段階として、応募者が開発したアキシタル型駆動を使用した磁気浮上フライホイールに応用し、無制御で安定浮上するフライホイールを開発する。これによる浮上・駆動・発電の各実験を行うと共に、動特性解析を実行し、その有用性を確認する。

(1)平成 23 年度は、永久磁石による磁気吸引浮上と高温超電導非接触軸受けで構成した、非接触無逝去磁気浮上系を提案する。従来、永久磁石による磁気浮上は、磁石と重力が釣り合った安定点でのみ可能となる。しかし、高温超伝送磁気軸受けを設置することにより、軸方向に発生するピン留め力を用いた、安定領域の創出が可能となる。本研究では、上記の構成の実験装置を製作し、磁気収束の磁束密度測定及び解析、高温超電導軸受けの

静特性解析並びに動特性解析を行い、磁気浮上安定領域の範囲を確認する。

(2)平成 24 年度は、永久磁石による磁束集束と高温超電導体を用いた非接触無制御磁気浮上型の軸受を持つ電力貯蔵フライホイールを提案する。本研究では、三個のリング型永久磁石を用いて磁束を集束し、この集束した強磁場を高温超電導体のピンニング効果によって拘束し磁気浮上に利用する。本研究では、この様な永久磁石構成を用いた高温超電導磁気軸受を持つフライホイールを開発し、その軸受ロータ部内側の半径方向と軸方向の磁束密度の測定、及び半径方向と軸方向の復元力の測定等を実施し、高温超電導体をリング状磁石内径側に配置した際の高温超電導磁気軸受の特性評価を行う。さらに開発したフライホイールを駆動し、運動エネルギーの貯蔵および発電によるエネルギーの取出しに関する特性を解明する。

(3)本年度は、昨年の研究において外周側へと創出されていた磁束の回収、さらに内周側に作られる磁場の強化を図るため、軸受ロータ部の磁石構成を半径方向に多段とし、外周側の構成にハルバツハ配列を適用することにより、高密度磁束集束配列を構成するものとした。また、フライホイール下部に反発用磁石を配置し、フライホイールの浮上力、及び駆動に与える影響を確認する。本研究では、提案する磁石配列を用いた磁気軸受を有するフライホイールを開発し、特性解析を行うことにより、その有用性を検討する。

3. 研究の方法

(1)平成 23 年度は Fig.1 の実験装置を試作し、磁束収束部の磁束密度測定および解析による妥当性の検証を行う。また軸方向、半径方向の復元力特性について計測しその特性を解析する。さらに磁気浮上位置の違いによる回転駆動時の浮上ロータの振動特性を解明した。

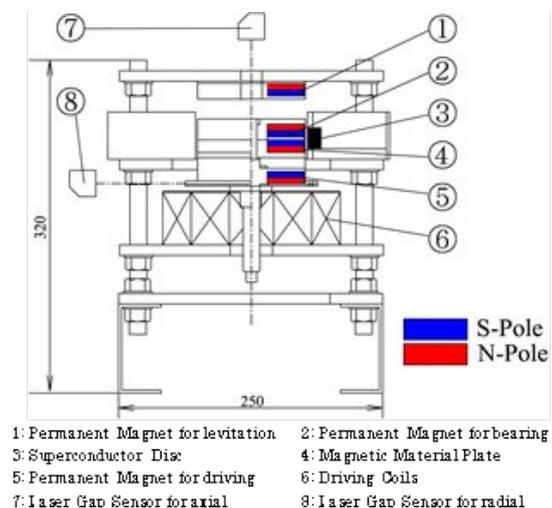


Fig.1 Geometry of the system

(2) 平成 24 年度は Fig.2 の電力貯蔵フライホイールを試作し、磁束収束による非接触磁気軸受部の特性を検証した。これを用いたフライホイール直接駆動におけるロータの挙動および駆動トルクの検証を行った。また、フライホイールによる電力貯蔵を実施し、回転が高速に達したのち、駆動コイルに発生している交流の逆起電力を用いて発電する事によって貯蔵電力の回収（出力特性）についての検証を行う。

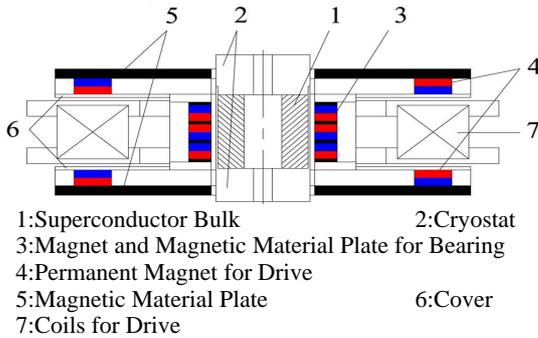


Fig.2 Geometry of Flywheel System

(3) 平成 25 年度は、Fig.3 のような実験装置を用い、磁気軸受部の磁束密度測定、復元力特性の計測およびを行った。また反発型磁気浮上を用いた場合の軸受部の特性についても検証する。反発型磁気浮上による磁気浮上ロータの回転時挙動についての動特性解析も併せて検証した。

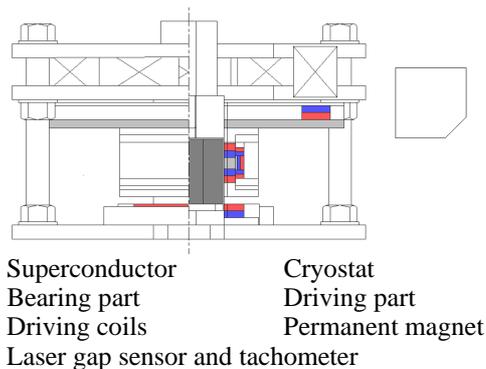


Fig.3 Experimental equipment

#### 4. 研究成果

(1) 平成 23 年度の成果は以下のようになっている。

Fig.4、Fig.5 より厚み方向に磁化された永久磁石同士を同極で接近させることで、磁気収束によりその境界付近に半径方向及び軸方向に大きな磁気勾配が発生することを確認した。

Fig.4、Fig.5 より磁性材料円板を介して 2 枚の磁気収束用永久磁石を密着させることでより大きな勾配が創出されることを確認した。

Fig.4、Fig.5 より浮上体周りの磁束密度

測定結果と理論解析結果が良く一致していることを確認した。

提案した超電導軸受けを用いた磁気浮上系において、浮上体を安定して浮上させることの出来る安定領域を Fig.6 から確認することが出来た。

提案した浮上体において、無制御で共振を乗り越えることを実現させ、安定した回転を達成することが出来た。

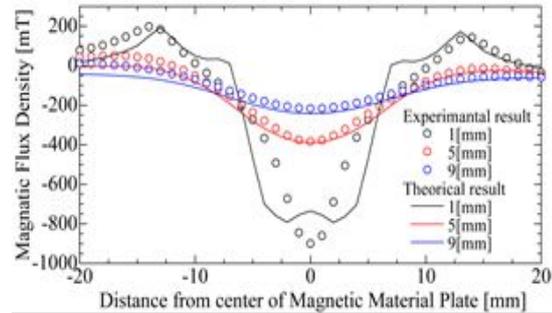


Fig.4 Magnetic Flux Density of Levitation Rotors in the Radial Direction

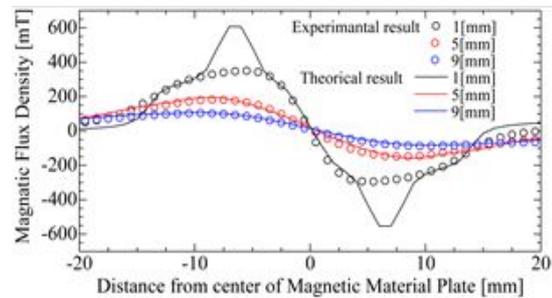


Fig.5 Magnetic Flux Density of Levitation Rotors in the Axial Direction

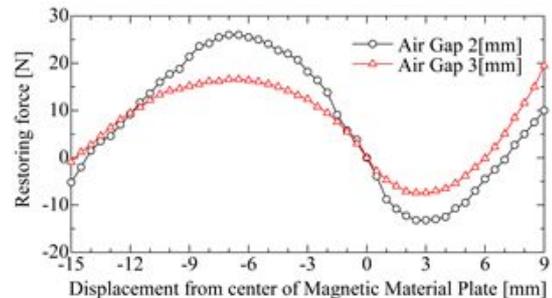


Fig.6 Restoring force in the Axial Direction

(2) 平成 24 年度の成果は以下のようになっている。

Fig.7 より磁束収束部を 2 極とすることにより収束部で磁気回路を構成するために大きな磁気勾配を校正することが可能となった。

Fig.8、Fig.9 より集束させた磁束を高温超電導軸受けに用いたことで、この軸受けは半径、軸方向に大きな復元力を持つことを測定によって確認した。

Fig.10 より本系のトルク測定を行い、高速回転域まで安定したトルクが得られている事を確認した。

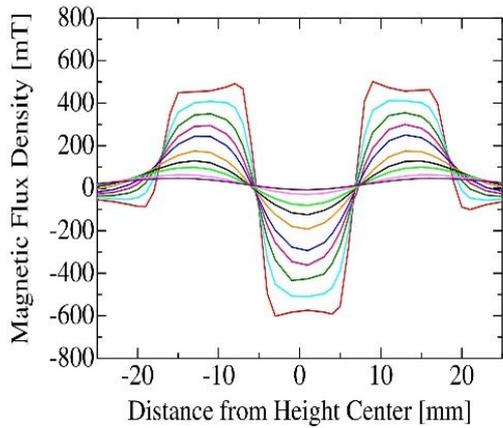


Fig.7 Magnetic Flux Density of Levitation Rotors in the Axial Direction

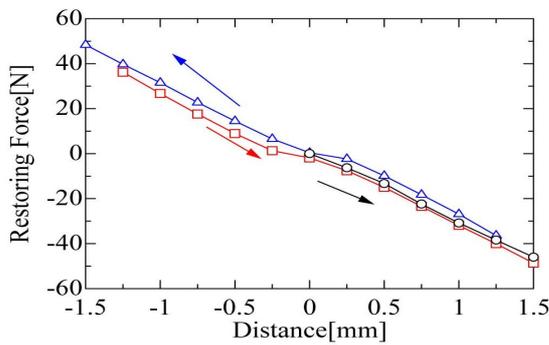


Fig.8 Restoring force in the Radial Direction

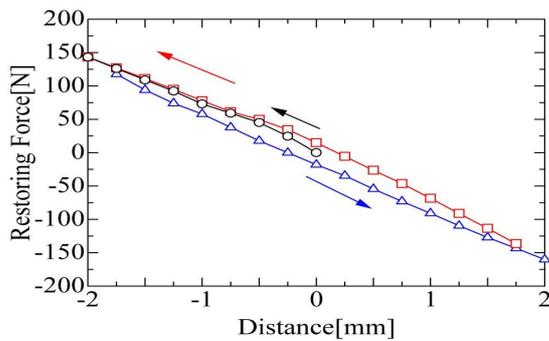


Fig.9 Restoring force in the Axial Direction

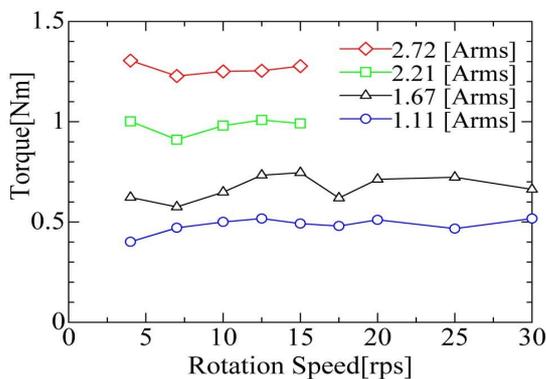


Fig.10 Driving Torque of Constant Current

提案するフライホイールは、無制御で共振を乗り越す事ができた。

Fig.11 より高速回転域から発電実験を行い、本系では運動エネルギーの約 79%を電気エネルギーとして取り出せた。

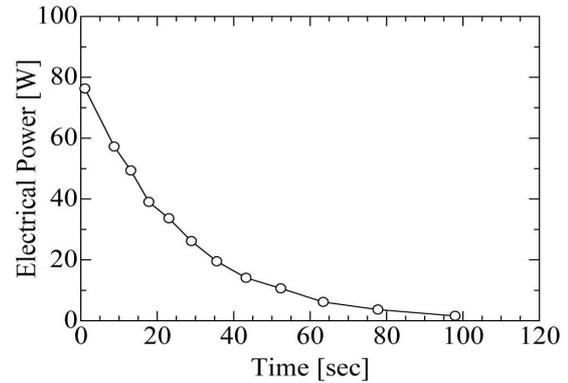


Fig.11 Time response of Electrical Power

(2) 平成 25 年度の成果は以下のようになっている。

Fig.12、Fig.13 よりフライホイール内部に高密度磁束集束配列を構成することによりフライホイール内周側に半径方向及び軸方向に大きな磁束密度を持つ磁場を創出させることができた。

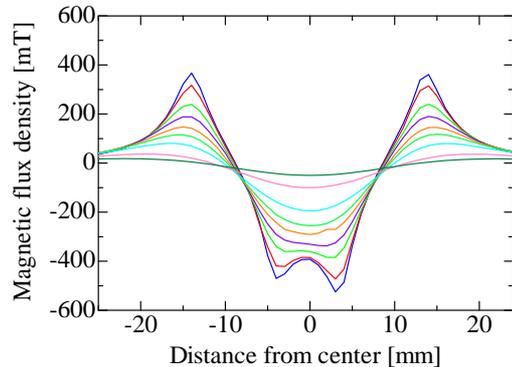


Fig.12 Magnetic flux density in radial direction

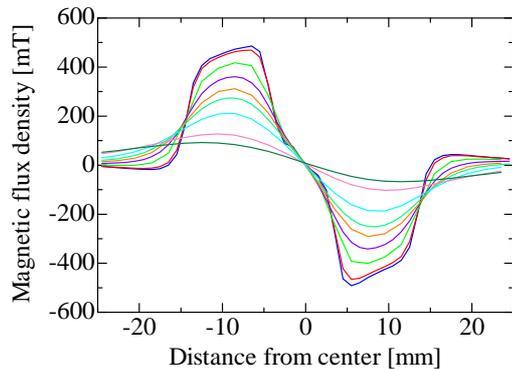


Fig.13 Magnetic flux density in axial direction

フライホイールの支持に永久磁石同士の反発する磁気力を利用し、フライホイールの支持に成功した。

Fig.14、Fig.15 より集束させた磁束を高温超電導体軸受に用いたことで、この軸受は半径、軸方向に大きな復元力を持つことを測定によって確認した。また反発型磁気浮上を行っても浮上状態が安定することが確認された。

Table.1 Measurement condition

	(b)	(c)
Repulsion magnet	-	

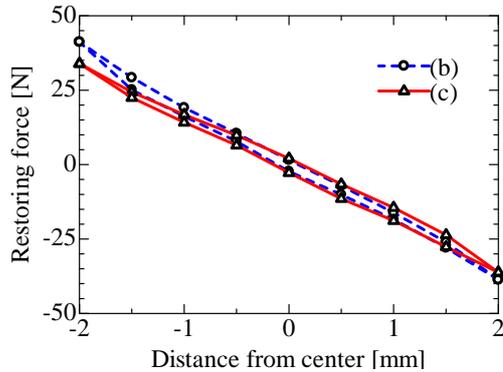


Fig.14 Restoring force in radial direction

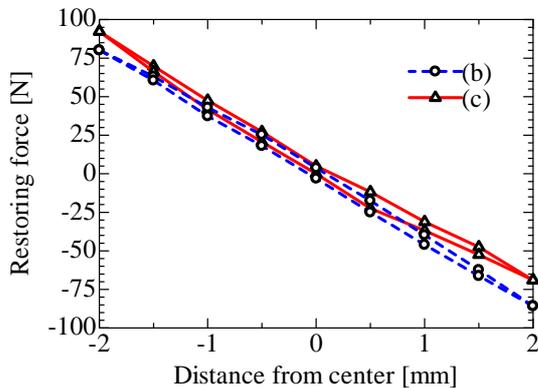


Fig.15 Restoring force in axial direction

Fig.16 より反発型磁気浮上を援用した場合のフライホイール回転時の挙動解析を実施し、反発型浮上の影響について検討した。

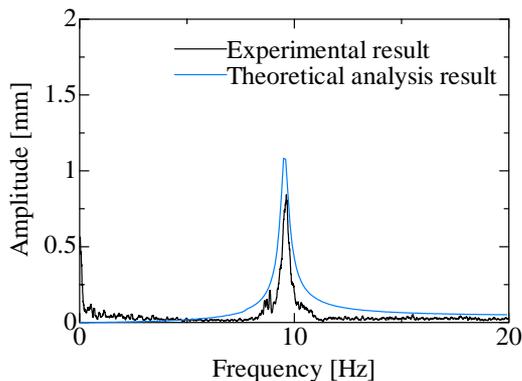


Fig.16 Frequency response of levitation rotor

これまで実現が困難であった磁気反発による磁気浮上の無制御安定化が高温超電導磁気軸受を用いることにより実現可能であることが判明した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文](計1件)

Iwanori Murakami, Yusuke Kobayashi, Masashi Gyoda, Yoshinori Ando and Kou Yamada, Development of magnetic levitation synchronous motor with high-Tc superconducting bearing, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有、Vol.39、2012、pp.97-103.

### [学会発表](計6件)

村上岩範、中島啓、嶋田長、小林康広、磁束収束法を用いた超電導磁気軸受の開発、第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2014/5/21、アイーナ岩手県民情報交流センター

村上岩範、中島啓、嶋田長、小林康広、超電導磁気軸受の特性解析、第22回MAGDA コンファレンス in 宮崎、2013/12/3、宮崎市宮崎観光ホテル

I.Murakami, Kei Nakashima, M.Gyoda, T.shimada, Y.Ando, Development of noncontact Flywheel with High-Temperature Superconducting magnetic bearing, The 16<sup>th</sup> International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2013), 2013/7/31 ~ 2013/8/2, University Laval in Quebec, Canada

村上岩範、行田将司、中島啓、安藤嘉則、高温超電導磁気軸受を用いた同期モータの開発、Dynamics and Design Conference 2012、2012年09月18日~2012年09月21日、慶應義塾大学日吉キャンパス

村上岩範、行田将司、中島啓、安藤嘉則、磁束収束法を用いた非接触高温超電導磁気軸受の特性解析、第24回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2012年05月16日~2012年05月18日、富山国際会議場

I. Murakami, Y. Kobayashi, M. Gyoda, Y. Ando, K. Yamada, Development of magnetic levitation synchronous motor with Hi-Tc superconducting bearing, 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, September 8th, 2011, Napoli, Italy

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

村上 岩範 (MURAKAMI IWANORI)

群馬大学・理工学研究院・准教授

研究者番号：80292621