

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420166

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Study on characteristics analysis of high temperature superconducting magnetic bearing with high density magnetic flux focusing method

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新たな型式の磁束集束型永久磁石配列を用いた、高い磁束密度を持つ磁場の生成法を提案し、これを完全に非接触で無制御安定な特徴を持つ高温超電導磁気軸受に応用することでその機械的特性を明らかにした研究である。この非接触にもかかわらず高い磁束密度によって実現した剛性の高さを利用し、これまで無制御での安定化例が極めて少ない反発型磁気浮上の安定化を容易に行えるようにし、さらに反発型磁気浮上にもかかわらず、高剛性を維持できることを明らかにした。また、超電導体を分割配置することによって、同一磁場においても単位体積当たりのピンニング力が向上することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, it propose a stabilization method of repulsive type magnetic levitation system by superconducting magnetic bearing. Repulsive type magnetic levitation system can generate large levitation force. However, the repulsive type magnetic levitation system is unstable since there is no horizontal stable point and moment force without control. By the way, high temperature superconducting levitation can always stable levitation without control. If we can increase the rigidity of the Hi-Tc superconducting bearing, it is possible to cancel the instability force of repulsion type magnetic levitation. In this report, the unstable force of repulsion type magnetic levitation is stabled by combining these two magnetic levitation method. In addition, levitation system can obtain a large levitation force.

研究分野：工学

キーワード：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 制振

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大きな特徴を有している。このことから、現在、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 の体積と高い磁束密度を持つ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。

そこで本研究ではその問題点の解決と、これに伴う新たな磁束集束法の開発を実施する。磁気浮上部はこれまでの研究がほとんど成されていない磁気反発を用い、浮上方向に常に正のばね定数を持つ浮上方式とする。磁気反発浮上は反発する磁石間でピッチング方向のモーメント力が発生するため、このモーメントの安定化のために軸上の 2 カ所で HTSC 磁気軸受を設置すると共に HTSC 磁気軸受の高剛性化が必要となるため、これまでにない高密度磁束集束方法を提案し、この方法の有用性をはじめに確認する。これを実施した後、HTSC 磁気軸受を用いた反発型磁気浮上を用いた回転系を試作・開発その動特性解析を行うことにより本研究で提案する系の有用性を検証する。

2. 研究の目的

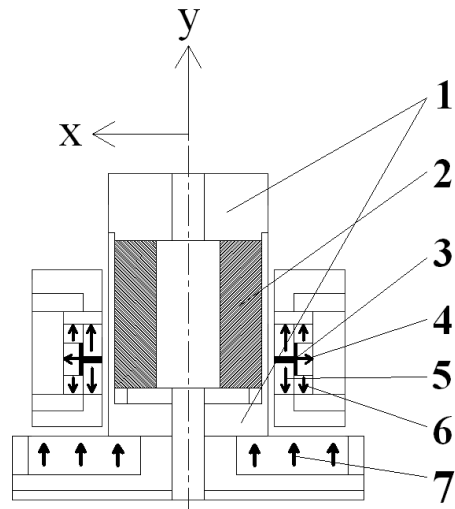
本研究は、新たな型式の磁束集束型永久磁石配列を用いた高い磁束密度を持つ磁場の生成の実現、並びにこの磁石配列を用いた回転部と高温超電導バルク材を組み合わせる事による全軸方向に無制御で安定かつ高剛性な完全非接触高温超電導磁気軸受の開発を行うことを目的とする。

(1) 第一段階として、提案する高密度磁束集束型永久磁石配列の生成磁場、磁束密度、磁気勾配等の諸特性を数値解析および試作品の計測により確認する。

(2) 第二段階として、本磁束集束法を用いて非常に高いラジアル方向磁束密度とアキシャル方向磁気勾配を持つロータを開発し、このロータと中心軸に配置した円筒型高温超電導体によって構成される非接触磁気軸受の開発を行う。また、このロータの磁石部を用いた永久磁石間の吸引・反発力による磁気浮上系を構成する。両者を組み合わせ、回転系を構成し、提案する系の静特性並びに動特性解析を実行し、その有用性を確認する。

3. 研究の方法

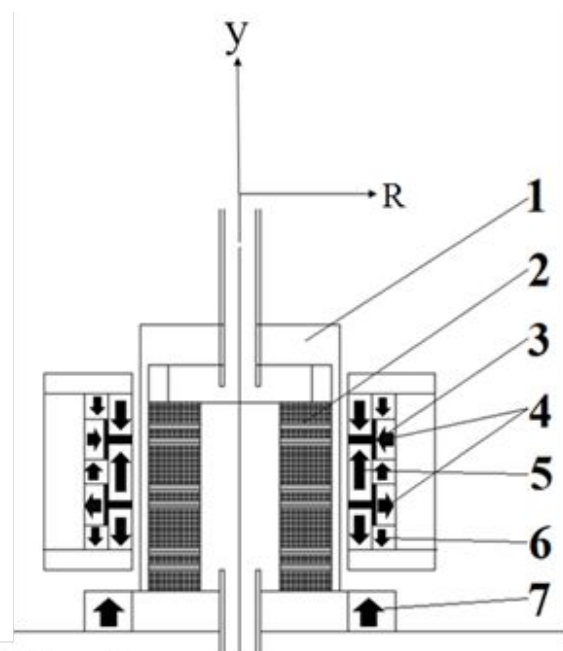
(1) 平成 26 年度は Fig.1 の実験装置を試作し、高密度磁束収束型の磁石配列を行った永久磁石部の磁束密度測定および解析による本永久磁石配列の有用性を確認した。また合わせて磁束密度解析も実施した。



- 1: Cryostat
- 2: Superconductor bulk
- 3: Magnetic material plate
- 4: Segment magnet
- 5: Magnet for concentrate magnetic flux
- 6: Magnet for Halbach array
- 7: Repulsing magnet

Fig.1 Geometry of superconducting magnetic bearing

(2) 平成 27 年度は高密度磁束集束部を積層することで軸方向の磁束密度勾配を大きくし軸方向の合成を高めることを目的として Fig.2 のような装置を試作し、各特性解析を実施した。さらに制振装置を新たに開発し制振性能についても検証した。



- 1: Cryostat
- 2: Superconductor bulk
- 3: Magnetic material plate
- 4: Segment magnet
- 5: Magnet for concentrate magnetic flux
- 6: Magnet for Halbach array
- 7: Repulsing magnet

Fig.2 Geometry of superconducting magnetic bearing.

(3)平成 28 年度はピッチング剛性の検証のため超電導体を分割配置した Fig. 3 のような装置を試作し、本系の各種剛性の検証を実施した。

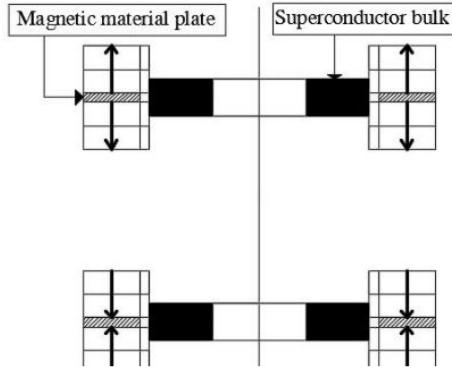


Fig. 3 Constraction of currentSCMB

4. 研究成果

(1)平成 26 年度の成果は以下のようになっている。

Fig. 4 は周方向の磁束密度を一周分計測した結果である。この結果、分割した扇形磁石を組み合わせた場合でもバッファとなる磁性材料板を用いることで、ほぼ変動のない均一な磁束を得られることを確認した。高磁束密度部分の変動は計測時の偏心が原因であることを確認しているため、実際の使用時（回転時）には回転抵抗とならないと考えられる。

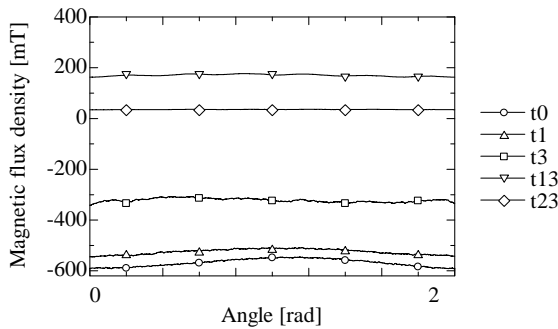


Fig.4 Measurement results in a radius 26[mm]

Fig. 5 ,Fig.6 はそれぞれ半径方向並びに軸方向の磁束密度測定結果であるが、非常に高い磁束密度および急峻な磁気勾配が得られていることが確認された。

Fig. 7 , Fig. 8 は半径方向並びに軸方向の復元力を測定した結果である。これより反発磁石を挿入した場合でも正の復元力が得られており、安定した系であることが確認された。

(2)平成 27 年度の成果は以下のようになっている。

Fig. 9 および Fig. 10 は各方向の磁束密度計測結果である。これより、高密度磁束集束部を積層することによりより高い磁束密度

を得られることが確認された。

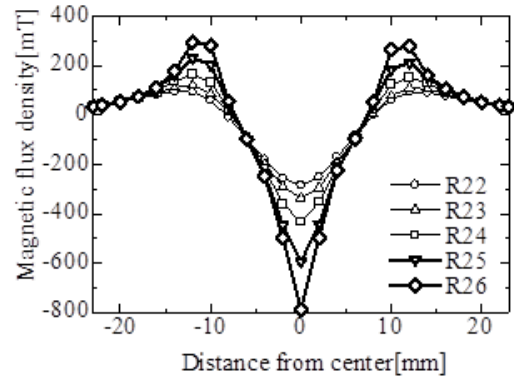


Fig.5 Magnetic flux density in radial direction

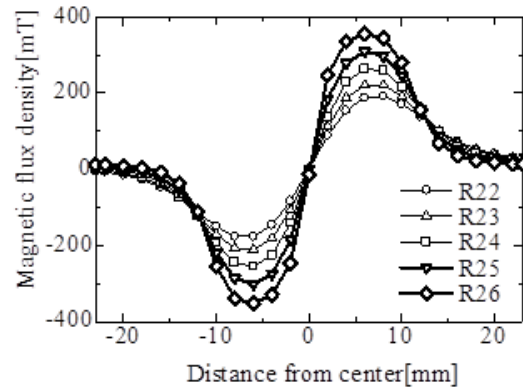


Fig.6 Magnetic flux density in axial direction

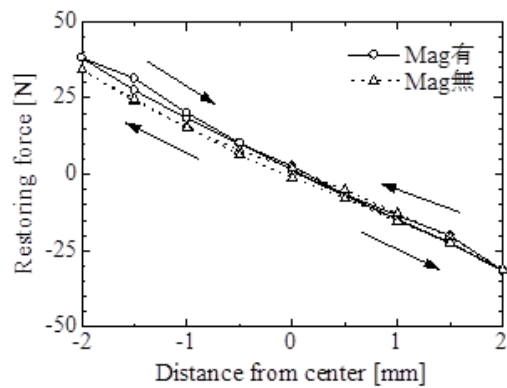


Fig.7 Restoring force in radial direction

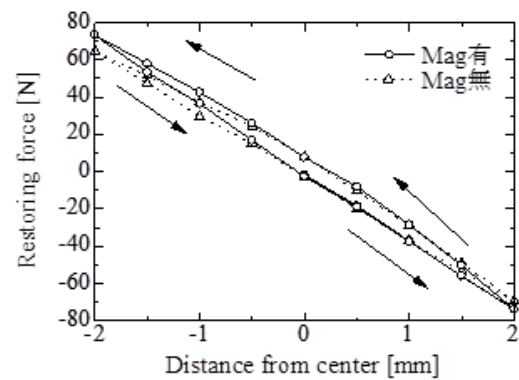


Fig.8 Restoring force in axial direction

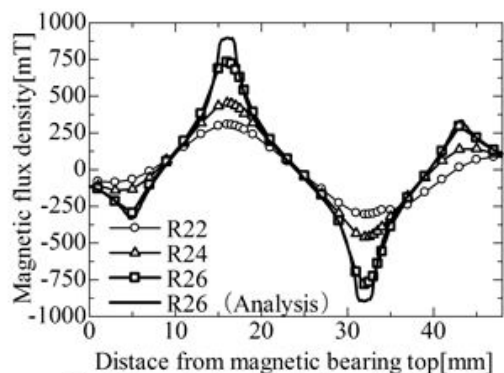


Fig. 9 Magnetic flux density in radial direction.

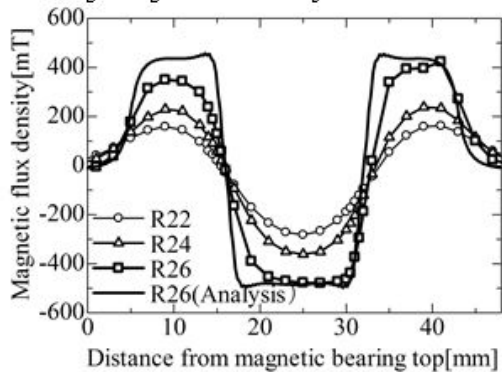


Fig. 10 Magnetic flux density in axial direction.

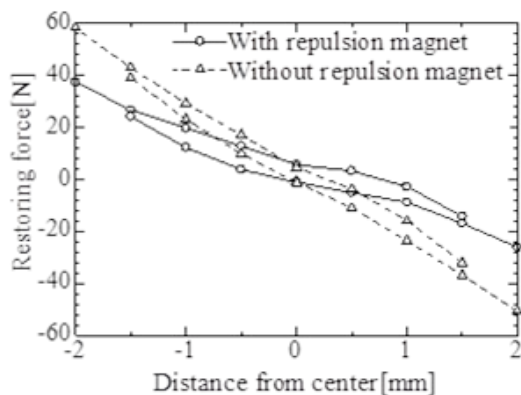


Fig. 11 Horizontal restoring force

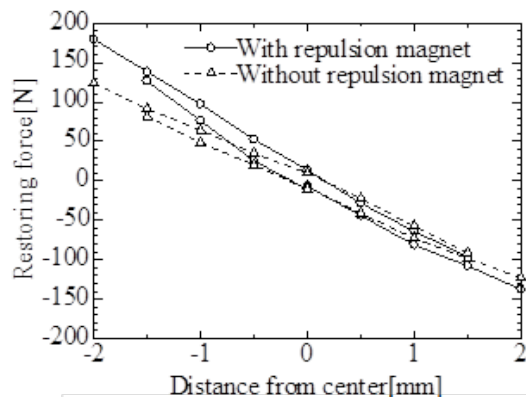


Fig. 12 Axial restoring force

Fig. 11, Fig. 12 および Fig. 13 は各方向の復元力特性を確認した結果である。これより、得られた高い磁束密度も利用することで反

発型軸浮上と組み合わせても全方向に正の復元力を持つ無制御で安定な系の実現を確認し、軸方向すなわち浮上力の増大を確認した。

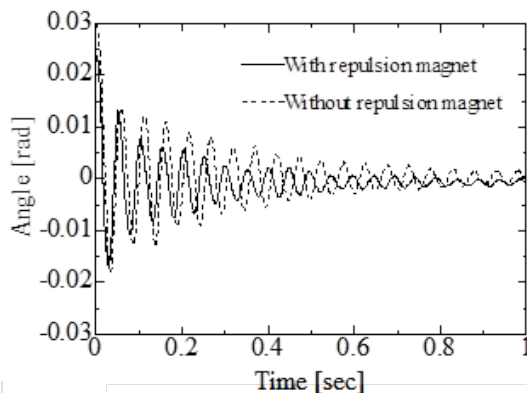


Fig. 13 Time career replay of vibration

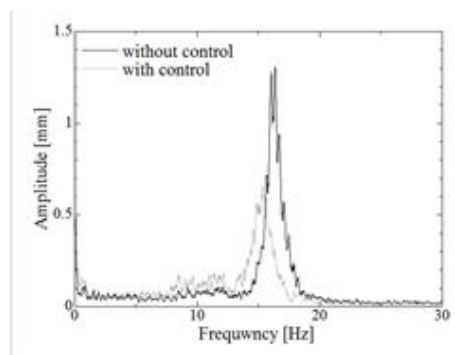


Fig. 14 Comparison of frequency response of vibration

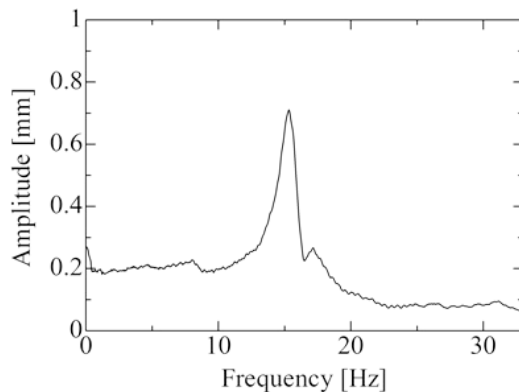


Fig. 15 Frequency response of H27 flywheel

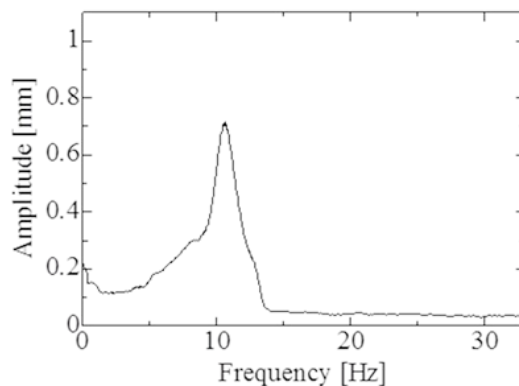


Fig. 16 Frequency response of H28 flywheel

Fig. 14 は新たに試作したダンパー型の制振装置を用いた制振を行った場合の触れ回り振動における周波数応答を求めた結果である。これより、制振が実現できることを確認した。

(3)平成 28 年度は以下のような成果を得た。

Fig. 15 ,Fig. 16 は平成 27 年度の系と 28 年度の系におけるフライホイールの回転時の触れ回り振動から得た周波数応答である。この結果、高温超電導体を分割配置し、回転体の主質量であるフライホイールは挟み込む形態にした結果、これまで構造的に起きていたピッチング振動を抑制出来ることを確認した。

table.1 は超電導体を分割配置した場合と集中配置した場合の単位体積当たりの軸受けとして性能を比較した結果である。これより、分割配置することによって各性能が向上することが実験的に明らかになった。

Table 1 Comparison of past and current bearing

	Past bearing	Current bearing
Volume of superconductor [mm ³]	24.8×10 ⁴	8.62×10 ⁴
Radial restoring force [N]	60	30
Restoring force per unit volume [N/mm ³]	2.42×10 ⁻⁴	3.48×10 ⁻⁴
Axial restoring force [N]	200	90
Axial force per unit volume [N/mm ³]	8.06×10 ⁻⁴	10.4×10 ⁻⁴
Radial hysteresis loss [J]	12.0×10 ⁻³	9.4×10 ⁻³
Radial hysteresis loss per unit volume [N/mm ⁴]	4.84×10 ⁻⁷	1.09×10 ⁻⁷
Axial hysteresis loss [J]	60.6×10 ⁻³	19.0×10 ⁻³
Axial hysteresis loss per unit volume [N/mm ⁴]	2.44×10 ⁻⁷	2.20×10 ⁻⁷

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)

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, Takeru SHIMADA, Yasuhiro KOBAYASHI, Hayato MORI, Yoshinori ANDO, Stabilization of repulsive-type magnetic levitation system using superconducting magnetic bearing, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有、vol.52、no.3-4、2016、pp.1607-1613、DOI: 10.3233/JAE-162181

〔学会発表〕(計 6 件)

村上 岩範, 清水 誠, 森 勇人, グエン・マイン・クアン, 高温超電導磁気浮上フライホイールの制振に関する研究, 第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生 (MAGDA 2016), 2016/11/24, 桐生市市民文化会館

村上 岩範, 清水 誠, 小林 康広, 森 勇人,

グエン・マイン・クアン, 高温超電導磁気浮上フライホイールの制振, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス(SEAD28)」シンポジウム, 2016/5/20, 慶應義塾大学日吉キャンパス協生館

Iwanori MURAKAMI, Takeru SHIMADA, Yasuhiro KOBAYASHI, Hayato MORI, Yoshinori ANDO, Stabilization of repulsive type magnetic levitation system with superconducting magnetic bearing, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015/9/16, Awaji Yumebutai International Conference Center

村上 岩範, 嶋田 長, 小林 康広, 森 勇人, 反発型磁気浮上を利用した高温超電導磁気軸受の評価と特性解析, 第 23 回 MAGDA コンファレンス, 2014/12/5, サンポートホール高松

村上 岩範, 嶋田 長, 小林 康広, 高温超電導磁気軸受を用いた反発型磁気浮上系の特性解析, Dynamics and Design Conference 2014 (D&D2014), 2014/8/28, 上智大学 四谷キャンパス

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

6. 研究組織

(1)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