超電導磁気軸受システムの性能向上に
関する実験的検討*浜崎 拓^{*1}, 小森 望 充^{*2}An Experimental Study on Improvement of a Passive Type
Superconducting Magnetic Bearing SystemTaku HAMASAKI and Mochimitsu KOMORI^{*3}^{*3} Kyushu Institute of Technology, Dept. of Mechanical System Engineering,
Kawazu 680, Iizuka, Fukuoka, 820-8502 Japan

This paper describes the improvement of dynamics for a passive type superconducting magnetic bearing (SMB) system. The SMB system is composed of a pair of SMB's with high T_c (critical temperature) superconductors, and a rotor with some permanent magnets. The rotor is passively supported by the SMB's without any control mechanism. The superconductors of the SMB's were field-cooled in the experiments. After the superconductors were cooled, the bearing housings of the SMB's were forced to change in the axial direction. Then, the stiffness change and damping coefficient change resulting from the housing displacements were investigated. From the experimental results, it is found that the static stiffness is related to the dynamic stiffness, and that the stiffness and the coefficient change according to the housing displacements. The rotor displacement and the rotation angle near the resonance rotation speeds also change according to the housing displacements. These results show that the stiffness and the damping coefficient of the SMB system can be adjusted using the housing displacements.

Key Words: Magnetic Bearing, Rotary Machinery, Damping, Passivity, Superconductor

1. はじめに

ピン止め力の大きな酸化物高温超電導体が作成されるようになり、それらを用いたさまざまな応用・研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。酸化物高温超電導体を用いた超電導磁気軸受を用いれば、能動型磁気軸受に必要な電磁石、パワーアンプ、制御装置などを必要とせず、冷却のみの簡単な構造で磁気軸受を構成できるという利点があるからである。これらの応用・研究の中でも、酸化物高温超電導体と永久磁石との反発力を用いた受動型超電導磁気軸受に関する研究はフライホイールなどへの応用の可能性から盛んに行われている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。これらの試作例の多くは、ロータなどの回転部に永久磁石を組込み、ステータ側に高温超電導体を用いた構造になっている。これらのシス

テムにおいて回転するロータやフライホイールの振動振幅を抑えるために、超電導磁気軸受における軸受剛性を上げることや、ロータやフライホイールの振動を短時間で減衰させるために、粘性減衰定数を向上させることが超電導磁気軸受を用いたシステムを構成する上で重要になっている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また、これらのことは、超電導磁気軸受を用いた超電導磁気軸受システムや超電導フライホイールにおいて変動磁場のために生じる超電導体中でのエネルギー損失を減少させる上でも重要な研究課題となっている。

超電導磁気軸受システムや超電導フライホイールを構成したとき、高温超電導体と永久磁石とのギャップ(隙間)は磁場中冷却時に設定した初期ギャップにほぼ等しいが、実際のギャップはロータやフライホイールの自重と超電導磁気軸受における反発力とが釣り合う位置に決定する⁽⁵⁾。これは、ピン止め力によって発現する浮上力が磁場中冷却された直後の磁束密度分布からの磁束密度の変化によって生じるからである。したがって、高温超電導体の臨界電流密度が一定の場合には、ロータやフ

* 原稿受付 1998年6月30日。

^{*1} 九州工業大学学部生(〒820-8502 飯塚市川津 680-4)。^{*2} 正員, 九州工業大学情報工学部。

E-mail: komori@mse.kyutech.ac.jp

ライホイールの磁場中冷却された位置からの変位による磁束密度の変化が小さいとロータやフライホイールが超電導磁気軸受から受ける反発浮上力は小さいが、ロータやフライホイールの磁場中冷却された位置からの変位による磁束密度の変化が大きいとロータやフライホイールが超電導磁気軸受から受ける反発浮上力も大きくなる。実際に超電導磁気軸受システムや超電導フライホイールなどを構成する場合、高温超電導体の臨界電流密度は一定であるので、この磁束密度を変化させることを積極的に超電導磁気軸受に導入することは超電導磁気軸受システムなどを構成する上で非常に重要なことと考える。また、磁束密度を変化させることを積極的に超電導磁気軸受システムや超電導フライホイールなどに導入し、これを評価した論文は現在のところあまり見受けられないと考える。

そこで、超電導磁気軸受システムや超電導フライホイールにおける軸受剛性(ばね定数)と粘性減衰定数を評価・検討するために、著者らは簡単な超電導磁気軸受システムを試作した。そして、超電導磁気軸受の高温超電導体を磁場中冷却した後、強制的に変位を加えることによって高温超電導体表面の磁束密度に変化を与え、超電導磁気軸受システムの性能を評価・検討した。

2. 装置構成および実験方法

本研究で使用した超電導磁気軸受システムの構成を図1に示す⁽⁴⁾。システムは支持軸受である超電導磁気軸受、ロータ、送り出し機構から構成される。ロータは直径 24mm、長さ 158mm で、円形の SmCo 希土類磁石(直径 24mm、厚み 4mm)

Fig.1 Structure of a superconducting magnetic bearing system

を左右に各 4 個、計 8 個配置している。また、希土類磁石の磁極は NS-SN-NS-SN と隣り合う永久磁石の磁極が同極となるようにした。用いたロータの質量は $3.2 \times 10^{-1} \text{ kg}$ であった。超電導磁気軸受は $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 酸化物高温超電導体(外径 45mm、内径 25.6mm、厚み 16mm)から構成され、この酸化物高温超電導体は液体窒素によって磁場中冷却される。また、超電導磁気軸受の支持軸受は台座に固定された押し出し機構によって台座上を軸方向に移動することができる。

超電導磁気軸受システムの性能向上の手段として磁場中冷却後に左右の支持軸受を変位させることを試みる。実験では支持軸受の初期変位を $z=0.5, 1.0, 1.5 \text{ mm}$ として、高温超電導体を磁場中冷却し、冷却後左右の支持軸受を元の位置 $z=0 \text{ mm}$ に戻した後、各種の評価、検討を行った。これは、各々の初期変位に対して測定時の支持軸受間の距離を同じにするための処置である。したがって、超電導磁気軸受システムの評価時には支持軸受間の距離は全て等しい。初期変位は実験結果の再現性がある $z=1.5 \text{ mm}$ 以下とした。また、以後の実験結果は、同様の実験を数度行った上でその妥当性を確認したものであり、統計的な処理は行っていない。

3. 実験結果および考察

3.1 静特性 超電導磁気軸受システムの静特性として負荷容量および静剛性を測定・評価した。実験では、超電導磁

Fig.2 Relationship between the repulsive force and the displacement

Fig.3 Relationship between the static stiffness and the displacement

気軸受の一方のみを使い、ロータはメカニカルステージを用いて変位させ、その変位は渦電流式センサで測定した。ロータに働く反発力はロードセルで測定した。実験では、前述の通り、左右の支持軸受を $z=0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ で磁場中冷却した後、変位 $z=0\text{mm}$ とした。この状態でロータを静的に上下 (x 軸方向) 変位させ反発力を測定・評価した。

図 2 に変位 $z=0\text{mm}$ の場合の測定結果を示す。図から、酸化高温度超電導体特有のヒステリシスが現れていることがわかる。さらに、ロータの質量が $3.2 \times 10^{-1}\text{kg}$ であることから、この超電導磁気軸受はロータの浮上支持には十分な能力であることがわかる。

Fig.4 Impulse response of the cylindrical motion

前述の実験で変位 $z=0, 0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ に対応したヒステリシスループが得られている。これらのヒステリシスループの最大の傾きを静剛性と考え、これをグラフ化したものが図 3 である。図から支持軸受の変位 z が増えるにしたがって静剛性が向上していることがわかる。これは、 z だけ変位させたときに得られる超電導体表面における磁束密度と磁場中冷却後の超電導体表面における磁束密度とに変化が生じ、その結果、軸受剛性が向上したものと考えられる。

3.2 動特性 動剛性の評価の 1 つとして、インパルス応答を測定・評価した。ロータの浮上方法は先の静特性の場合と全く同じである。実験では並進運動と傾斜運動における二種類のインパルス応答を測定・評価した。また、加振力を一定とするため、加振で得られたインパルス応答波形の最初の振幅が約 0.1mm となるように加振力を調整した。

図 4 に並進運動におけるインパルス応答およびパワースペクトルを、図 5 に傾斜運動におけるインパルス応答およびパワースペクトルをそれぞれ示す。図 4 のインパルス応答では振動周波数が約 85Hz の減衰振動波形が見受けられるが、 0.1 秒後も振動が完全に収束していない。また、図 5 のインパルス応答では振動周波数が約 102Hz の減衰波形が見られ 0.2 秒後も振動が完全に無くなっていない。これらのことから、超電導磁気軸受システムにおける振動減衰がそれほど大きなものではないことがわかる。

超電導磁気軸受システムにおけるロータのインパルス応答から、ロータの運動のモデル化を行った。並進運動と傾斜運動のそれぞれについて支持軸受をばね定数と粘性減衰定数で近

Fig.5 Impulse response of the conical motion

Fig.6 Relationship between the dynamic stiffness and the displacement

Fig.8 Relationship between the damping coefficient and the displacement

Fig.7 Relationship between the dynamic stiffness and the static stiffness

似したモデルを式(1), (2)で示す⁽⁴⁾。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_d \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$J\ddot{\theta} + c_r\dot{\theta} + k_r\theta = m_d \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし, x : 変位, m : 質量, c : 粘性減衰定数, k : ばね定数, F_d : 外乱, θ : 回転角, J : 慣性モーメント, c_r : 粘性減衰定数, k_r : ばね定数, m_d : 外乱モーメントである。減衰振動波形から必要な各定数を読み取り, 式(1), (2)におけるばね定数と粘性減衰定数を求めた。また, 実験で得られたインパルス応答波形の振幅の範囲では, ロータは式(1), (2)によるモデル化で十分表現できることがわかっている⁽⁷⁾。

並進運動におけるばね定数と支持軸受の変位 z との関係を図 6 に示す。この結果, 支持軸受の変位が増加するにしたがってばね定数が増加していることが認められた。実験結果から, 支持軸受の変位が $z=0\text{mm}$ のとき, ばね定数は $4.9 \times 10^4 \text{N/m}$ であるが, 変位 $z=1.5\text{mm}$ のとき, ばね定数は $5.7 \times 10^4 \text{N/m}$ と約 $0.8 \times 10^4 \text{N/m}$ の増加となっている。このインパルス応答から得られた図 6 のばね定数と先の図 3 で得られたばね定数との関係を図 7 に示す。インパルス応答から得られた図 6 のばね定数の値は図 3 のばね定数の値より 5 割程度大きいことがわかる。これは動的な実験から得られたばね定数が主に磁束フローの影響のために静的な実験から得られたばね定数より大きくなっているからと考えられる。しかし, 静的, 動的という異なる実験で得られたばね定数は非常によい相関を示していることがわかる。このことから, 静的あるいは動的な実験から得られたばね定数からもう一方のばね定数を見積もることができることがわかる。また, 粘性減衰定数と支持軸受の変位 z との関係を図 8 に示す。図から, 粘性減衰定数は支持軸受の変位 z の増加にしたがって若干の増加傾向は認められるものの, 定性的な増加傾向は認められなかった。これは超電導磁気軸受におけるロータの振動減衰が超電導体表面の磁束密度の変化と超電導体内部の複雑な減衰機構に関係しているためと考えられ, 定量的な減衰機構の解明は今後の課題と考えられる。

傾斜運動におけるばね定数の変化, 粘性減衰定数の変化をそれぞれ図 9, 10 に示す。この結果, 並進運動における実験結

Fig.9 Relationship between the stiffness and the displacement

Fig.11 Relationship between the displacement and the rotation speed.

Fig.10 Relationship between the damping coefficient and the displacement

Fig.12 Relationship between the rotation angle and the rotation speed.

果と同様に、傾斜運動におけるばね定数は支持軸受の変位の増加にしたがって増加することが認められた。傾斜運動における粘性減衰定数は、並進運動における粘性減衰定数と同様に単調な傾向を示さず、支持軸受の変位による顕著な効果は見受けられなかった。

3.3 回転特性 回転実験におけるロータの浮上方法は先の静特性や動特性における浮上方法と全く同じである。回転実験では、初期変位 $z = 0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ で高温超電導体を磁場中冷却し、その浮上状態で圧縮空気によってロータを 20,000rpm 程度まで回転上昇させた。その後、素早く支持軸受

を変位 $z = 0\text{mm}$ の位置に戻した。そして、圧縮空気によるロータの回転駆動を止め、ロータの自然回転減衰を行った。この自然回転減衰時における垂直方向の並進運動および傾斜運動の振動振幅を測定・評価した。

そのときの測定結果を図 11, 12 に示す。図 11 はロータの並進運動における振動変位、図 12 は傾斜運動における回転角度をそれぞれ示している。また、図 11, 12 では支持軸受の変位が $z = 0, 0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$ の場合について評価・検討している。図 11 から、ロータは 5,000~5,100rpm 付近に並進運動における共振回転数を持っていることがわかる。これは図 4 における減

減衰振動が約 85Hz であることにも対応している。図 11 から、支持軸受の変位 z が増加するにしたがって、共振回転数の値も若干増加していることがわかる。この主な理由として、図 3 や図 6 の測定結果に示すように変位 z の増加にしたがって支持軸受のばね定数が増加し、結果的に共振回転数の値も若干増加したと考えられる。また、変位 z が増加するにしたがって共振回転数におけるロータの振動振幅は小さくなっていることがわかる。これは、減衰定数が本質的に一定ではなく周波数依存することや、共振回転数では振動振幅が大きくなるため磁束フローが粘性減衰定数に影響を与えるためと考えられる。また、図 12 から、ロータは 5,000~6,000rpm 付近に傾斜運動における共振回転数を持っていることがわかる。これは図 5 における減衰振動が約 102Hz であることにも対応している。図から、支持軸受の変位が増大するにしたがって回転角度も小さくなっていることがわかる。これも、前述の並進運動の場合と同様の現象が起きているためと考えられる。加えて、共振回転数の差が認めにくい実験結果となっているため、ロータの振動振幅の変化が顕著に現れたとも考えられる。何れにしても、超電導磁気軸受の減衰比は 0.1 以下程度と非常に小さいため⁽⁷⁾、変位 z に対する粘性減衰定数の効果は現れ難いと考えられる。

4. まとめ

静特性の実験結果において、支持軸受の変位が増えるにしたがって超電導磁気軸受のばね定数が上昇していることから、支持軸受を軸方向に変位させる方法は、ばね定数を増加させる効果のあることがわかった。また、並進運動と傾斜運動におけるインパルス応答の結果から、どちらの運動においても左右の支持軸受を変位させることによりばね定数の向上が認められた。また、粘性減衰定数については明らかな向上が見られなかった。さらに、ロータの回転実験においては、左右の支持軸受を変位させることにより、並進運動と傾斜運動におけるロータの振

動振幅を共に減小させることができた。同時に、共振回転数にも変化が見受けられた。また、粘性減衰定数の向上はインパルス応答の場合と同様にあまり顕著ではなかった。

文 献

1. Ogiwara, H., Azukizawa, T. and Morishita, M., A Novel Use of Superconducting Oxides in a Non-contact Carrier for VLSI Plants, *Applied Superconductivity*, 1-7/9 (1993) 1185-1192.
2. Fukuyama, H., Endo, S., Takizawa, T., Sakaguchi, K., Takaichi, H., Sakai, N. and Murakami, M., High precision superconducting magnetic bearings using advanced MPMG-YBaCuO, *Advances in Superconductivity*, 6 (1994) 1341-1344.
3. Higasa, H., Ishikawa, F., Kawauchi, N., Yokoyama, S., Nakamura, S., Imaizumi, H. and Ito, N., Experiment of a 100Wh-class power storage system using high-Tc superconducting magnetic bearing, *Advances in Superconductivity*, 6 (1994) 1249-1252.
4. Komori, M., Tsuruta, A., Fukata, S. and Matsushita, T., Superconducting bearing systems using high T_c superconductors, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 5, (1995) 634-637.
5. 吉田義勝, 陳振茂, 出町和之, 宮健三, 樋笠博正, 高温超電導磁気浮上における浮上力特性の改善, 機論, 62-599, C (1996) 2633-2639.
6. Okano, M., Tamada, N., Fuchino, S., and Ishii, I., Characteristics of high-stiffness superconducting bearing, *IEEE Trans. on Magnetics*, 32 (1996) 2679-2682.
7. Komori, M., Matsuoka, S., and Fukata, S., Development of a hybrid-type superconducting magnetic bearing system, *Applied Superconductivity*, 4 (1997) 253-259.