

学術論文

永久磁石反発を用いた 1 軸制御アキシヤル磁気浮上モータの浮上回転実験

Single axis controlled levitation with axial gap combined motor-bearing and repulsive type magnetic bearings

上野 哲	(茨城大院)	金箱 秀樹	(茨城大院)
山根 隆志	(機械技術研究所)	岡田 養二	(茨城大学)

Satoshi UENO	Student Member
Hideki KANEBAKO	
Takashi YAMANE	
Yohji OKADA	Member

This paper reports the experimental results of noncontact rotation by an axial gap combined motor-bearing and repulsive type passive magnetic bearings. The axial gap combined motor-bearing has both rotation and axial position control capabilities. Hence it can levitate with simpler configuration and control system than usual magnetic bearing and motor system. In order to confirm single axis controlled levitation, an experimental setup is made using both permanent magnet motor and induction motor. The permanent magnet motor rotates up to 1800 rpm and the induction motor rotates up to 1882 rpm without any physical contact. The motion of radial axes is stable while the rotor is rotating.

Key Words: Rotary machinery, combined motor-bearing, permanent magnet motor, induction motor, repulsive type magnetic bearing.

1 はじめに

近年の工業技術の発展に伴い、軸の高速回転、高出力化が要求され、軸の支持に磁気軸受が使用されるようになってきている [1]。しかし通常の磁気軸受では、5 軸の制御を行うため、多数の電磁石やセンサ、制御回路が必要となり、高価で複雑なシステムとなる問題がある。しかし永久磁石の反発力を利用すると、アキシヤル軸の 1 軸のみを制御することで安定な浮上を行うことができ、コストの削減や省電力、省スペース化が実現できる。山田氏は永久磁石反発型磁気軸受を用いた 1 軸制御磁気軸受を構成し、反発力の特徴について解析を行っている [2][3]。山根らは永久磁石反発型磁気軸受とモノピットを用いて、機械的接触部

分を 1 点のみとした遠心型血液ポンプを構成している [4][5]。しかし、これらは 1 軸の制御と回転力の発生を独立に行うため、制御のための機構とモータが別々に必要になる問題がある。

また、磁気軸受の小型化、高性能化を目指し、磁気軸受と交流モータを一体化した磁気浮上モータが提案されている [6]-[9]。磁気浮上モータは、ラジアル方向の 2 軸の位置制御を行うラジアル型と、回転軸方向の位置制御のみを行うアキシヤル型に大別される。このうちアキシヤル型磁気浮上モータは、位置制御と回転トルクの発生を同一の巻線で行うため、ラジアル型に比べ、簡単な構造で位置制御と回転力の発生を行うことができる。よって永久磁石反発型磁気軸受とアキシヤル磁気浮上モータを組み合わせることで、非常に簡単な構造と制御系で非接触浮上回転を実現することが可能となる。

連絡先: 上野 哲, 〒 316-8511, 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部, E-mail: ueno@mech.ibaraki.ac.jp

本論文では、実際に永久磁石反発型磁気軸受を用いたアキシヤル磁気浮上モータを構成し、浮上回転実験を行い、提案する方法により非接触浮上回転が実現できることを示す。また、2極と4極の永久磁石モータと誘導モータについて実験を行い、モータのタイプや極数がラジアル軸受に与える影響を検討する。

2 アキシヤル磁気浮上モータの構成

2.1 基本構成

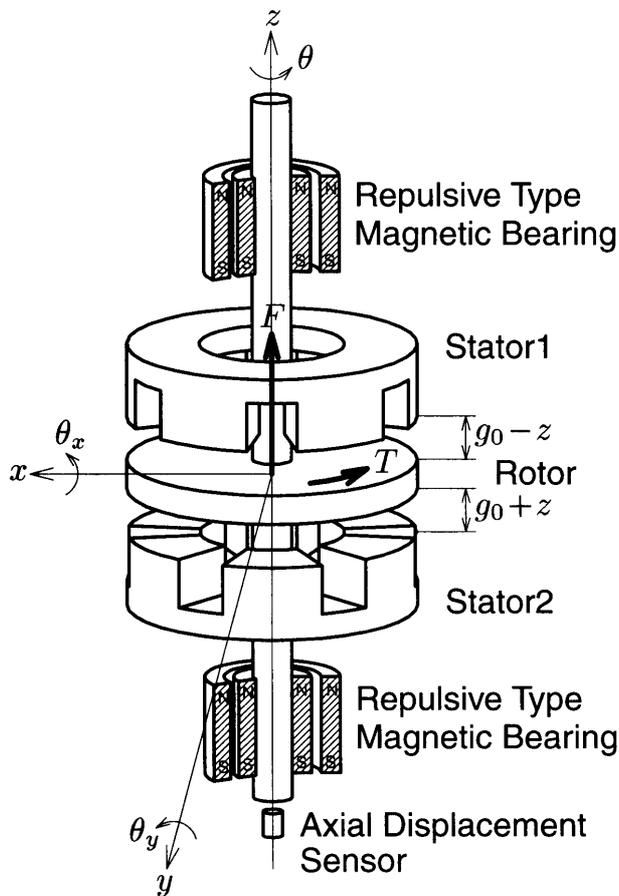


Fig. 1 Axial gap combined motor-bearing with repulsive type magnetic bearings.

永久磁石反発型磁気軸受を用いたアキシヤル磁気浮上モータの概略を Fig.1 に示す。中央がアキシヤル磁気浮上モータである。アキシヤル磁気浮上モータは、ディスクロータとその片側あるいは両側に配置したステータにより構成される。ロータの片側のみにステータを配置したものをシングル型 [10]、両側に配置したものをプッシュプル型 [11] と呼ぶ。ステータはそれぞれ三相巻線を持ち、エアギャップに回転磁界を発生

させ、ロータに回転トルクを与える。そして、この回転磁界の大きさを変化させることによりロータに働く吸引力を制御する。シングル型では、一組の駆動回路により回転トルクの発生とロータのアキシヤル方向の位置制御が行え、最も簡単な構造で非接触浮上回転を実現することができる。しかし外部からロータにアキシヤル方向の力（バイアス力）を加える必要があり、バイアス力の大きさにより最大トルクが制限される。このためシングル型ではバイアス力の大きさが重要な設計パラメータとなる。一方、プッシュプル型では駆動回路が二組必要となるが、バイアス力を必要とせず、アキシヤル方向力の大きさに関係なく回転トルクを発生させることができる。また上下方向に力を加えることができるため、シングル型に比べ優れたアキシヤル方向の動特性を得ることができる。今回は、プッシュプル型のアキシヤル磁気浮上モータを構成した。

永久磁石反発型磁気軸受は、アキシヤルモータの上下に配置される。永久磁石はロータ側、ステータ側とも軸方向に着磁し、同じ極が対向するように配置する [5]。一組の永久磁石のラジアル方向の並進運動に対する復元力は、永久磁石の長さによって、また回転運動に対する復元力は、永久磁石の長さ、ロータ重心と磁石間の距離によって決まる。よって一組の永久磁石で支持する場合は比較的長い永久磁石と軸間距離が必要となる。また片持ちロータとなるため、ロータに近い側の静的安定性が劣ると考えられる。これに対し、Fig.1 のように二組の永久磁石を用いた場合、軸受荷重が比較的均等になるため良好な性質が得られる。またロータ全体の軸方向の長さは、軸方向長さの短い永久磁石を用いることで短縮することができる。しかし組立や応用上は、片持ち型の方が有利となるため、これらの構成は応用上、最も望ましい形とする必要がある。

永久磁石反発型磁気軸受では、永久磁石の反発力によりロータのラジアル方向は安定となるが、軸方向は不安定となる。よってアキシヤル磁気浮上モータにより軸方向の位置を制御する。またアキシヤル方向の位置制御を行うため、変位センサによりロータの変位を検出する。

アキシヤル磁気浮上モータは、永久磁石モータ、誘導モータ、リラクタン্সモータで実現できるが [7]、今回は、永久磁石モータと誘導モータで実験を行った。それぞれのロータの構造を Fig.2 に示す。Fig.2 (a) が永久磁石ロータを、(b) が誘導モータに用いるロータを表している。永久磁石ロータは、ディスクの表面に永

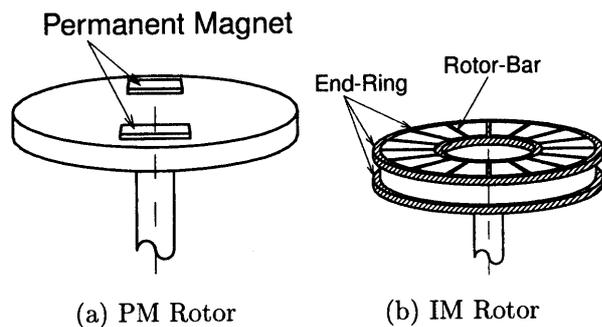


Fig. 2 Two types of rotor.

久磁石を貼り付けた構造となっている。界磁磁束を永久磁石で作るため、モータの効率は高くなるが、磁石の形状によってはギャップ磁束に高調波が生じ、アキシシャル軸の位置制御に悪影響を及ぼすことが問題として挙げられる。またロータ内部での損失が小さいため、ラジアル方向の運動に対する減衰は小さいと考えられる。誘導ロータは、かご形ロータを平面上に展開した構造のものを用いる。ロータ表面に溝を掘り、その溝に電気抵抗の低い導体を埋め込み、その両端をエンドリングで短絡する。ロータに設けたスロットの影響により、ロータの角位置によってギャップのリラクタンسが変化するため、アキシシャル方向力が変化すると考えられるが、スロットの幅を小さくすることで影響を小さくすることが可能である。また永久磁石型ロータに比べて、滑らかな起磁力分布を得ることができ、またエアギャップを小さくすることができるため、優れたアキシシャル方向の制御性能を得ることができると考えられる。しかし二次巻線での損失のため永久磁石型に比べて、効率は低くなる。また渦電流が発生しやすい構造のため、ラジアル方向の運動に対して減衰力が発生すると考えられる。

2.2 アキシシャル方向力と回転トルクの制御

アキシシャル方向力と回転トルクの制御には、開ループトルク制御を用いる [10]。これは、ステータ電流を一定の周波数で駆動し、三相電流の波高値を変化させ、アキシシャル方向力を制御する方法である。この方法では、正確な回転トルクの制御を行うことはできないが、ロータの回転位置や回転速度を検出する必要がないため、制御系を簡単に構成することができる利点がある。ステータ 1 および 2 に流す電流は、以下の式で表さ

れる。

$$\begin{aligned} i_{U_n} &= I_n \cos(\omega t) \\ i_{V_n} &= I_n \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_{W_n} &= I_n \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで i_U, i_V, i_W は U, V, W 各相に流す電流、 I は電流の波高値、 ω は電気角速度、 t は時間を表し、添え字の $n (= 1, 2)$ は上または下側のステータを示す。ここで、電流の波高値 I_1, I_2 を次式のように制御する。

$$I_1 = I_m - I_c, \quad I_2 = I_m + I_c \quad (2)$$

I_m はモータリング電流、 I_c は位置制御コントローラによって計算される制御電流の大きさを表す。 I_m を一定値とすることで、 I_c に比例したアキシシャル方向力が発生する。この方法では負荷トルクの大きさによってアキシシャル方向力が変化するが、一定の速度で回転し、かつ負荷の変動の小さい場合には、アキシシャル方向力の変動は小さく、式 (2) の方法によってアキシシャル方向の制御を行うことができる。

回転トルクは、永久磁石形ではロータとステータ磁束の位相差によって、誘導形ではすべりによって変化する。

3 実験装置

実験装置の概略を Fig.3 に示す。回転軸が垂直になるように設置している。

ロータのモータ部は電磁ステンレス (比透磁率 4160, 電気抵抗 $95 \mu\Omega\text{-cm}$) を用いて製作し、その他の部分はアルミ材 (A5052) を用いて製作した。永久磁石ロータの外径は $\phi 55 \text{ mm}$ で、永久磁石は、 $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ の希土類磁石を片側に 2 枚貼り付けた 2 極ロータと、4 枚貼り付けた 4 極ロータを用いた。動作点でのエアギャップは、永久磁石を含めて片側 2 mm である。ロータ全体の質量は 0.42 kg 、ラジアル軸回りの慣性モーメントは $3.05 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ である。誘導形ロータの外径、内径は、エンドリングを除いて $\phi 55 \text{ mm}$, $\phi 26 \text{ mm}$ 、エンドリングを含めて $\phi 65 \text{ mm}$, $\phi 16 \text{ mm}$ である。ロータバーは、幅 1.3 mm 、深さ 5 mm のものを 16 本用いる。動作点でのエアギャップは 0.5 mm である。ロータ全体の質量は 0.543 kg 、ラジアル軸回りの慣性モーメントは $3.52 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ である。

モータステータの詳細を Fig.4 に示す。ステータはロータと同じ電磁ステンレスで制作した。外径は $\phi 55$

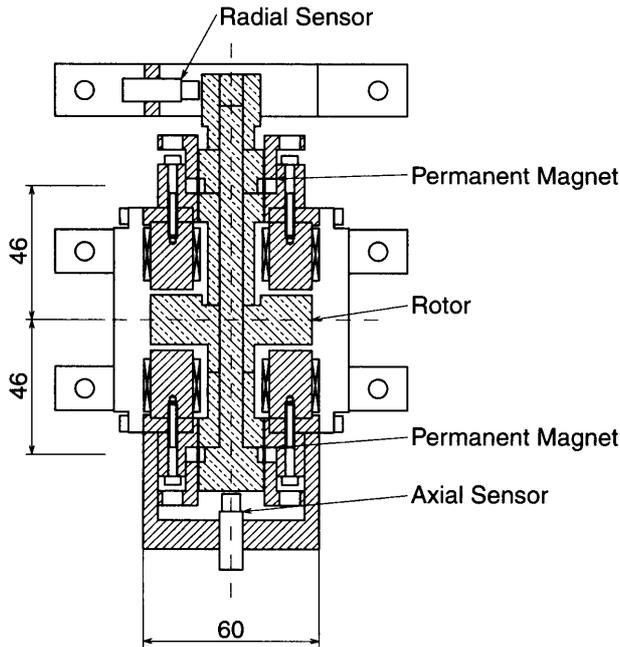


Fig. 3 Experimental setup.

mm, 内径は $\phi 26$ mm で, 扇形のコアを 6 個の配置した構成となっている. それぞれのコアには 120 巻のコイルが巻かれ, 図の U, V, W のように電磁石を結線することで, 2 極の回転磁界と 4 極の回転磁界を作り出す (4 極の場合は括弧内のように結線する).

ラジアル軸受の永久磁石は, ロータ側が, 外径 $\phi 22$ mm, 内径 $\phi 18$ mm, ステータ側が外径 $\phi 31$ mm, 内径 $\phi 23$ mm で, 厚みはそれぞれ 5 mm の希土類磁石を用いた. ロータが中心にある時のエアギャップは片側 0.5 mm である. 永久磁石の反発力は, 上下の磁極が対向するように配置することで大きくすることができる. よって, アキシャル方向の相対位置は, ラジアル方向の剛性を大きくするため, ステータ磁石とロータ磁石のずれがゼロとなる位置に設定した. ステータ磁石はアルミ材のホルダによってモータステータに取り付けられる.

アキシャル方向の変位を測定するため, 渦電流式センサ (新川電機 VC-202N) を 1 つ図の下に取り付けている. また, ラジアル方向の運動を測定するため, 2 つのセンサ (キーエンス EX-008(x 軸), 新川電機 VC-202N(y 軸)) を図の上の方に取り付けた.

制御系の構成を Fig.5 に示す. 制御には DSP (Mtt, LORY ACCEL: TI/TMS320C30) を用いた. アキシャル方向の変位信号を A/D コンバータ (DSP4110) を通して DSP に取り込む. また, ホストコンピュー

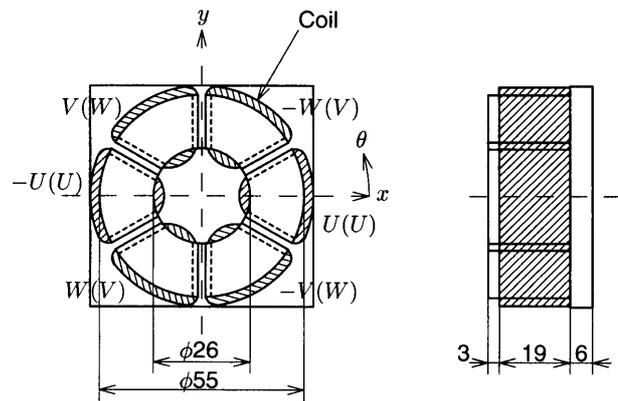


Fig. 4 Stator.

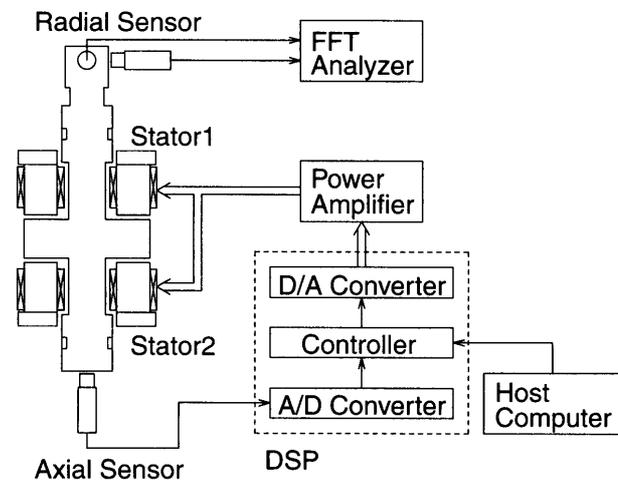
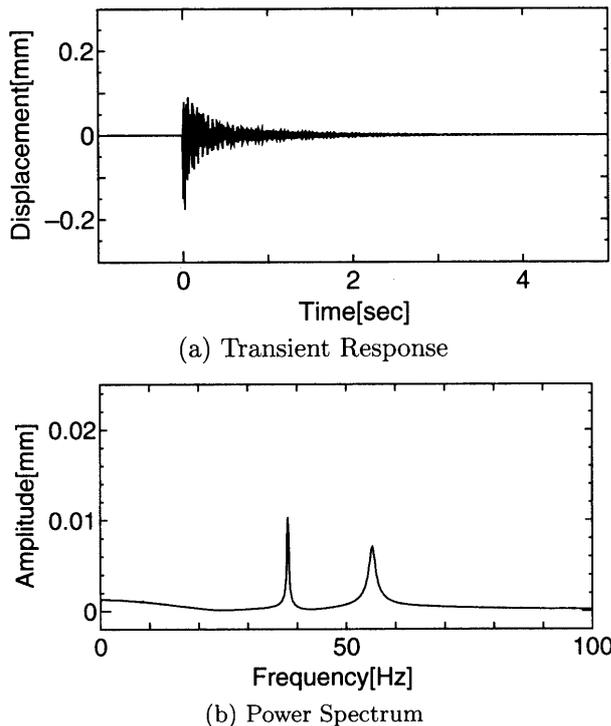
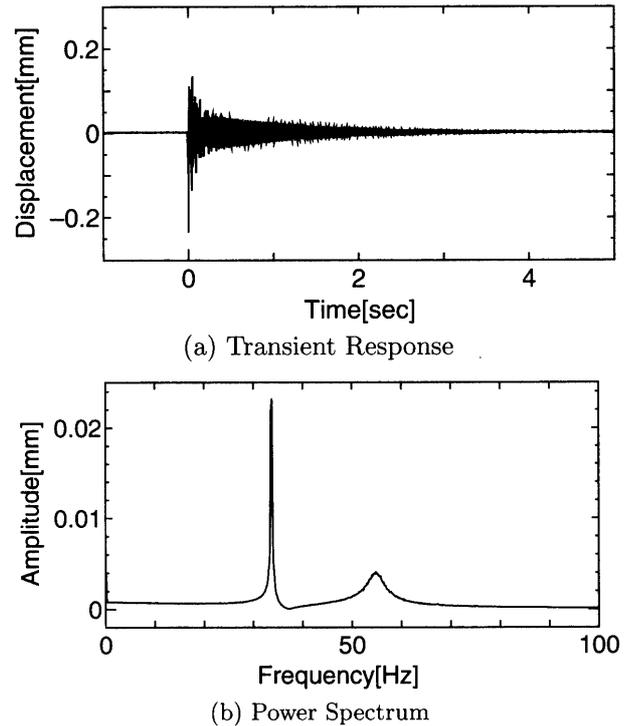


Fig. 5 Control system.

タ (NEC PC-9821Xe) から同期速度を与える. DSP は, これらの信号からステータの各相に流す電流をコントローラにより計算し, D/A コンバータ (DSP4020) を通してパワーアンプに出力する. アキシャル方向の位置制御には, PID コントローラを Tustin 法により離散化したものを用いた. パワーアンプには, リニアアンプ (Apex PA12) を用い, 電流フィードバックを用いて各コイルを駆動する. ラジアルセンサは制御には用いず, FFT アナライザ (小野測器 CF-5220) に接続し, 振動測定を行う. なお, ロータのアキシャル方向を z 軸, ラジアル方向のうち, ステータ U 相巻線方向を x 軸, x 軸に垂直な軸を y 軸, y 軸回りの回転を θ_x , x 軸回りの回転を θ_y とする.

Fig. 6 Impulse response (PM4, x -axis).Fig. 7 Impulse response (IM4, x -axis).

4 実験結果

実験は、永久磁石モータの 2 極 (PM2) と 4 極 (PM4), および誘導モータの 2 極 (IM2) と 4 極 (IM4) について行った。

4.1 浮上特性

まず、回転せずにロータを浮上させた状態 (式 (1) の $\omega=0$) で、ラジアルセンサターゲット部分にインパルス外乱を印加したときの応答を Fig.6,7 に示す。Fig.6 は PM4 の x 方向の結果を、Fig.7 は IM4 の x 方向の結果を表す。上のグラフは時間応答を表し、横軸は時間、縦軸はロータの変位を表す。下のグラフはそのパワースペクトルを表し、横軸は周波数、縦軸は振動の全振幅を表す。このパワースペクトルは FFT アナライザ (小野測器 CF-5220) により計算を行った。ラジアル方向は自由振動となるため、パワースペクトルにより周波数毎の振動の強さを調べることでラジアル方向の固有振動数を求めることができる。

時間応答の結果から、双方のタイプとも減衰が非常に小さく、整定するまで 2 秒以上かかっていることがわかる。また、この振動成分を見ると、PM4 で 38.1 Hz と 57.3 Hz, IM4 で 33.8 Hz, 55.1 Hz にピークが現れている。このうち低周波成分が並進運動、高周波成分がラジアル軸回りの傾き運動の固有周波数である。またパワースペクトルの形状から、永久磁石形、

Table 1 Stiffness.

Type	x	y	θ_x	θ_y
PM2	24418	24737	39.98	48.36
PM4	24100	24577	39.40	39.40
IM2	24418	24418	43.77	44.56
IM4	24417	24599	41.66	44.75
unit	[N/m]	[N/m]	[Nm/rad]	[Nm/rad]

誘導形の双方で傾きに対する減衰が並進運動に比べて大きいことが分かる。また、誘導形の方が傾きに対する減衰が大きいことが分かる。これは並進運動では、異なる磁極の向きに対してロータが同じ方向に運動するため、誘導起電力が磁極毎に逆向きとなり、起電力が相殺され、誘導電流がほとんど流れないためである。これに対し傾き運動では、ロータの外側と内側で磁束を横切る速度に差があるため、誘導電流が流れ、この誘導電流と磁束との相互作用により減衰力が生じたと考えられる。また誘導形ロータでは、ロータの誘導力を強める構造となっているため、永久磁石形に比べ大きな減衰力が発生したと考えられる。

次にインパルス応答の結果から、ラジアル方向の並進と傾きの剛性を計算すると Table 1 に示すように求まる。これらはパワースペクトルの一つ目のピークの

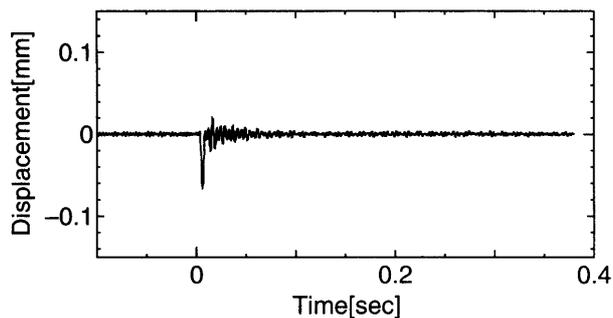


Fig. 8 Impulse response (PM4, z-axis).

現れる周波数 f_p および二つ目の周波数 f_a をグラフから求め、次式を用いて計算した。

$$k_p = (2\pi f_p)^2 m, \quad k_a = (2\pi f_a)^2 J \quad (3)$$

ここで k_p は並進運動の剛性, k_a は傾き運動の剛性, m はロータの質量, J はラジアル軸まわりの慣性モーメントを表す。この結果, 並進に対する剛性はすべてのタイプでほぼ同じ値となったが, 傾きの剛性はモータのタイプや極数によって異なる値となった。ロータに軸受力以外の力が作用していない場合, 傾きの剛性は並進の剛性により,

$$k_a = \frac{l^2}{2} k_p \quad (4)$$

と表される。ここで l はラジアル磁気軸受間の距離を表す。式 (4) を用いて, 並進の剛性から傾きの剛性を求めると約 51.63 Nm/rad となる。しかし, すべてのタイプでこの値より小さくなっている。これはモータ磁束によって, 負のバネ剛性が生じたためと考えられる。また θ_x と θ_y 軸の剛性は, PM2 以外はほぼ同じ値となったが, PM2 では θ_y の剛性が θ_x に対して約 1.2 倍となった。これは y 方向には永久磁石を貼り付けていないため, 負のバネ剛性が小さくなったためと考えられる。

Fig.8 と 9 に z 方向のインパルス応答を示す。双方のタイプで 0.1 秒以下で整定しており, 安定した位置制御が行われていることが分かる。

4.2 浮上回転試験

次にロータを浮上回転させた時の実験結果を示す。それぞれのタイプで非接触浮上回転に成功し, PM2 で最高 600 rpm, PM4 で 1800 rpm, IM2 で 1721 rpm, IM4 で 1882 rpm まで回転数を上げることができた。PM2 では最高回転数が低くなっているが, こ

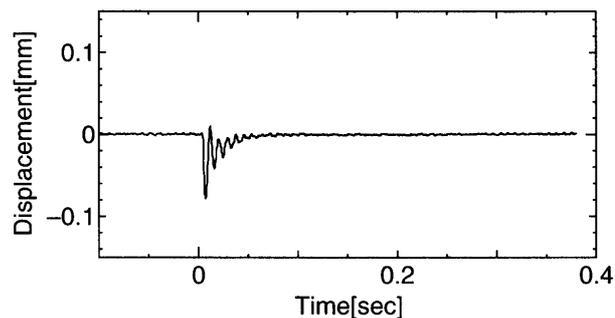


Fig. 9 Impulse response (IM4, z-axis).

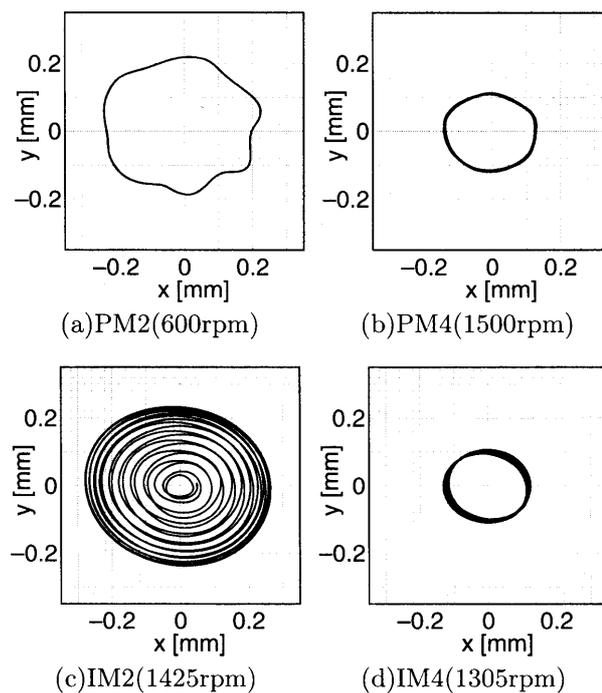


Fig. 10 Orbit trajectory of the radial motion.

れはロータに貼り付けた永久磁石の特性のアンバランスのため, 低回転で振動が大きくなったのが原因である。その他のタイプでは, 並進運動の共振周波数付近まで回転したが, 共振点を超過して回転することはできなかった。

次にそれぞれのタイプでの軸のふれまわりの運動の様子を, Fig.10 に示す。PM2 では 600 rpm での結果を示す。振動振幅が 0.2 mm を越え, また波形にひずみが現れており, ロータの回転位置がラジアル方向に影響を与えていることが分かる。PM4, IM2, IM4 では同期速度を 1500 rpm としたときの結果を示す。PM4 では振動振幅約 0.15 mm で安定に回転していることが分かる。IM2 のロータの回転数は 1425 rpm となり, すべりは 5% となった。振動振幅が最大約 0.3 mm と大きく, またうねりが生じており振動振幅が増

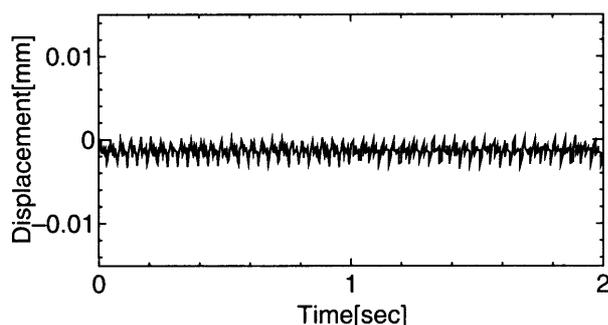


Fig. 11 Time response of PM4 motor (1500 rpm, z-axis).

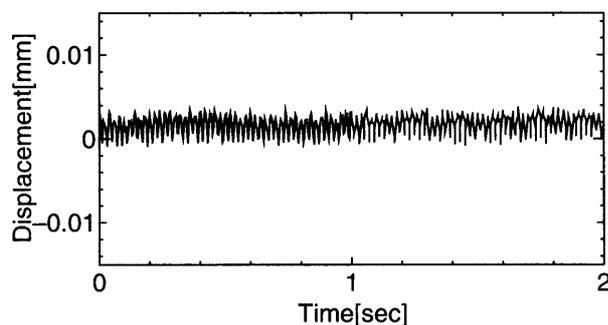


Fig. 12 Time response of IM4 motor (1305 rpm, z-axis).

減を繰り返す結果となった。誘導型モータでは、ロータは同期速度 (1500 rpm) と異なる速度 (1425 rpm) で回転を行うため、ロータのアンバランスと磁気回路のアンバランス力が加わる。二つの異なる周波数の外乱が加わるため、図に示すようなうねりが生じたと考えられる。しかし IM4 ではうねりは現れておらず IM2 のみの現象であることから、磁気回路のアンバランスは磁性材のヒステリシスの影響と考えられる。IM4 では、回転数は 1305 rpm となり、すべりは 13% と IM2 と比べて大きくなった。これは、今回ステータ磁界を 4 極としたことにより磁界のひずみが増え、ロータに誘導される電圧が小さくなり、効率が悪化したためと考えられる。このためステータで完全な 4 極磁界を発生させることにより、すべりの改善を行うことができると考えられる。ラジアル方向の振動は PM4 と同様に小さく、安定に回転することができた。

最後に浮上回転状態でのアキシャル方向の振動の様子を Fig.11 と 12 に示す。これらの結果から、回転時においても安定した位置制御が行われていることが確認できた。

5 まとめ

永久磁石反発型磁気軸受を用いたアキシャル磁気浮上モータを構成し、アキシャル方向の 1 軸制御によって完全非接触支持と回転が実現できることを実験により確認した。また、アキシャル磁気浮上モータは、ラジアル方向の並進運動にはほとんど影響を及ぼさないが、傾きに対して大きな影響を与えることがわかった。そして、浮上回転実験の結果より、永久磁石モータ、誘導モータの双方において、4 極モータが 2 極モータに比べて安定して回転することが判明した。

(1999 年 8 月 5 日受付)

参考文献

- [1] 日本機械学会編: 磁気軸受の基礎と応用, (1995), 養賢堂.
- [2] 山田, 大路, 宮本, 松村: 永久磁石反発型 1 軸制御磁気軸受の構成, 日本 AEM 学会誌, Vol.4, No.1 (1996), pp.40-45.
- [3] S.C. Mukhopadhyay, T. Ohji, T. Kuwahara, M. Iwahara, S. Yamada and F. Matsumura: Comparative Studies of Levitation and Control Performances of Two Types of Single-Axis Controlled Repulsive Type Magnetic Bearing, *4th International Symposium on Magnetic Suspension Technology*, (1998), pp.393-405.
- [4] 山根, 池田, 筒井, 軸屋: モノピボット磁気支持遠心血液ポンプの基本特性, 人工臓器 24(2), (1995), pp.323-326.
- [5] T. Yamane, M. Nishida, T. Kijima and J. Maekawa: New Mechanism to Reduce the Size of the Monopivot Magnetic Suspension Blood Pump: Direct Drive Mechanism, *Artificial Organs*, Vol.21, No.7 (1997), pp.620-624.
- [6] 大石, 志村, 岡田: 同期型および誘導型磁気浮上回転モータの研究, 電気学会論文誌 D, 115 巻, 3 号 (1995), pp.342-347.
- [7] 上野, 岡田: アキシャル型磁気浮上回転モータの開発と制御, 日本機械学会論文集 63 巻, 612 号 C 編 (1997), pp.131-137.
- [8] A. Chiba, et. al: Radial Force in a Bearingless Reluctance Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.27, No. 2 (1991), p.786.
- [9] 市川, 他: シャフトレスアキシャルギャップベアリングレスモータの軸方向吸引力とトルクを考慮した運転法, 第 9 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (1997), pp.525-528.
- [10] 上野, 岡田: 永久磁石アキシャル型セルフベアリングモータのアキシャル方向力とトルク特性およびその制御, 電気学会論文誌 D, 119 巻, 3 号 (1999), pp.282-290.
- [11] 上野, 岡田: アキシャル型磁気浮上モータのプッシュプル制御, 第 5 回シンポジウム運動と振動の制御講演論文集, (1997), pp.265-268.