ハルバッハ磁石を用いたローレンツ型磁気浮上モータの研究*

神 部 拓 郎^{*1}, 岡 田 養 二^{*2}Development of Lorentz Force Type Self-Bearing Motor
using Halbach MagnetTakuro JIMBU and Yohji OKADA^{*3}^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

This paper proposes a new type of self-bearing motor which uses Lorentz force with Halbach magnet. It is expected to have a good dynamic response and high levitation capability. For realizing high magnetic flux airgap, Halbach magnet is used for the rotor. First, the fundamental principle is introduced how the motor produces rotating torque and radial levitation force. Next, Halbach magnet is introduced and the motor is designed. However, the control forces for x and y directions are quite different and the levitation is unable. For the stable levitation two sets of three phase coils are used. The levitated rotating test is carried out successfully. The top speed of 4 410 rpm and the maximum motor efficiency of 72% are recoded.

Key Words: Rotary Machinery, Magnetic Bearing, Electromagnetic Actuator, Magnetic Levitation, Digital Control

1. は じ め に

近年、生産性と品質向上のため、モータの高速回転、高出力化、メンテナンスフリーが要求され、接触型の軸受に代わり、非接触支持可能な磁気軸受が使用環境や使用目的に応じて使用され始めている⁽¹⁾。しかし、磁気軸受を用いた回転軸は、駆動モータを別に必要とするためシステム全体の大型化や軸長の増加による危険速度の低下といった新たな問題が生じる。

そこで、ACモータと磁気軸受の構造が類似していることから、これらを一体化したセルフベアリングモータが開発された⁽²⁾⁽³⁾。

従来開発されたセルフベアリングモータは、浮上力をリラクタンス力により発生させるため、PM型モータに適用した場合、薄い永久磁石を使わなければならない。このことにより、製造コストが高くなること、磁石の強度が弱くなること、永久磁石が減磁しやすいことなどの問題が生じてくる⁽⁴⁾。

この問題を解決するために、浮上力にローレンツ力を用いるセルフベアリングモータが提案された⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この場合、回転制御、浮上制御共にローレンツ力を用いているので、ロータ上の永久磁石は必要なだけ厚く取ることが可能であり、減磁などの心配が無いという

長所がある。しかし、永久磁石を厚く取ること、磁路を構成するバックヨークも厚くしなければならず、装置を小型化するにあたり問題となる。また、ロータの面着磁された永久磁石は、エアギャップ中の磁束密度が矩形波状に変化し、正弦波に近似された理想的な磁束密度分布を得ることが難しい。

本研究ではこれらの問題を解決するために、ロータ部にハルバッハ磁石⁽⁶⁾を用いたセルフベアリングモータを提案する。ハルバッハ磁石は、永久磁石の起磁力を連続的に方向を変えて着磁することで、磁石の片側には強力な正弦波磁界を作り、他の面には磁界を作らないという極めて良好な性質を持つ。本論文では外側にロータ、内側にステータを配したアウトロータ型のセルフベアリングモータを試作し、浮上回転制御に成功し、良い特性を得る事ができたので報告する。

2. 浮上回転理論

2.1 回転トルクと浮上力の発生原理 図1は、本セルフベアリングモータのステータ上に巻かれる回転用巻線の対向する2組と、ロータ軸方向断面図を模式的に示したものである。

ステータとロータ間のエアギャップには、ロータ上に貼られた永久磁石により8極の磁界が作られる。巻線は軸方向に巻かれ、ステータ外周面に界磁磁束と直交するように貼りつけられている。従って、フレミング

* 原稿受付 2004年3月9日。

^{*1} 茨城大学大学院機械工学専攻(☎316-8511 日立市中成沢4-12-1)。^{*2} 正員、茨城大学工学部機械工学科。

E-mail: okada@mech.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 Principle of Giving Rotary Torque

Fig. 2 Principle of Giving Levitation Force

グの左手の法則により巻線にはローレンツ力が図の矢印のように働く。巻線はステータ上に固定されているため、その反作用でロータには発生したローレンツ力の方向と逆向きの回転力が働く。

浮上巻線は、回転用巻線と $\frac{\pi}{6}$ ずれた位置に置かれる。図2は力の発生を示すため、ロータ・ステータを $\frac{\pi}{6}$ ずらした界磁の最も強い位置で示している。力の発生原理は回転原理と同様であるが、対抗する巻線に互いに逆相の電流を流すことで、ローレンツ力は図の矢印の方向に発生する。この反力としてロータには上向きの力が働く。この巻線を円周に沿って6個配置することにより、ロータに任意のラジアル方向力を働かせることができる。

2.2 理論解析 図3に、本セルフベアリングモータのラジアル方向の展開図を一周期分示す。巻線は、浮上用巻線が回転用巻線に対して $\frac{\pi}{6}$ ずれた位置にあり、それぞれ交互に全周にわたって配置されている。このように配置することで、巻線のスペース効率を向上する事ができる。各相の巻線の行きと帰りは、ロータ上の8極の永久磁石による界磁磁束分布にあわせて、最大トルクを発生するように $\frac{\pi}{4}$ の間隔で巻かれ、各巻線のU、V、W相間隔は $\frac{\pi}{3}$ である。

ロータとステータ間のエアギャップにおいて、永久磁石によって発生する磁束密度分布を正弦波状であると仮定し、次式のように表す。

$$B_g = -B \sin(\omega t + 4\theta) \quad (1)$$

Table 1 Definition of Variables

A	Magnitude of Motoring Current
B	Flux Magnitude by Permanent Magnet
C	Magnitude of Levitation Current
l	Effective Length of Coils
r	Diameter of Rotor
t	Time
θ	Coordinate Angle
ψ	Phase of Motoring Current
ϕ	Phase of Levitation Current
ω	Electric Frequency

各変数の定義を表1に示す。

2.2.1 回転制御 回転用巻線の各相には式(2)で示す3相交流電流を流す。

$$\begin{aligned} I_{U_m} &= A \cos(\omega t + \psi) \\ I_{V_m} &= A \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \psi) \\ I_{W_m} &= A \cos(\omega t + \frac{4}{3}\pi + \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)から円周上を流れるモータ電流の一周期分をDiracのデルタ関数を用いて求めると、発生するトルクは式(3)の様に表される。

$$T = 2rl_m \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} B_g i_1 d\theta = 6rl_m AB \cos \psi \quad (3)$$

以上より、本セルフベアリングモータはロータの位置、及び時間に関係なく、一定のトルクを発生させることができる。

2.2.2 浮上制御 浮上用巻線には式(4)で表される3相交流電流を流す。

$$\begin{aligned} I_{U_b} &= A \cos(\omega t + \phi) \\ I_{V_b} &= A \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \phi) \\ I_{W_b} &= A \cos(\omega t + \frac{4}{3}\pi + \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)から、円周上を流れるラジアル方向力発生用の一周期分の電流分布は回転制御と同様に求めると、発生する浮上力は次のように計算される。

[y方向の力]

$$F_y = l_b \int_{-\frac{\pi}{8}}^{\frac{\pi}{8}} B_g i_2 \cos \theta d\theta = \frac{3\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} B l_b C \cos(\phi - \frac{7}{6}\pi) \quad (5)$$

[x方向の力]

$$F_x = l_b \int_{-\frac{\pi}{8}}^{\frac{\pi}{8}} B_g i_2 \sin \theta d\theta = -\frac{3\sqrt{2+\sqrt{2}}}{2} B l_b C \sin(\phi - \frac{7}{6}\pi) \quad (6)$$

Fig. 3 Arrangement of Motor and Bearing Coils

式(5)(6)より、浮上制御はロータの回転角に関係なく回転制御と干渉せず、浮上用巻線電流の波高値 C と位相差 ϕ を変化させることで制御可能であることが示された。

3. ハルバツハ型モータの設計

従来の面着磁された永久磁石を用いたローレンツ型セルフベアリングモータの欠点は、磁束を通すためにバックヨークを厚く取らなければならないので重くなってしまうことと、エアギャップ中において正弦波に近似された理想的な磁束密度分布を得にくいということである。これらはハルバツハ磁石の特徴である磁束の自己ループ性と正弦波磁束発生によって解決できる。図4左図に示すように、理想的なハルバツハ磁石はその内部に連続的に回転する起磁力を持つため、磁石のみで磁路を構成できる。しかし、連続的に回転する起磁力の磁石は製作が不可能である。そこで図4右図に示すように、半径方向に着磁したものを主極、円周方向に着磁したものを補極とし、これら2種類のセグメントを交互に組み合わせることでハルバツハ磁石に近似した磁場を得る。

実験装置を設計するために、有限要素解析ソフト ANSYS を用いて磁場解析を行った。その解析モデルを図5に示す。解析モデルはステータ、巻線、ロータをモデル化し、ロータには主極と補極の長さの比が3:2のハルバツハ磁石を用いた。解析結果として図6にエアギャップ中における磁束線図を示す。図はモデルの対称性を利用し全体の $\frac{1}{4}$ の解析結果を示す。解析結果から、エアギャップ中において正弦波に近似された磁束密度分布が得られている事が分かる。これより、本モータのロータには主極と補極の長さの比が3:2のハルバツハ磁石を用いる。

4. 浮上実験

4.1 実験装置 磁場解析の結果を元に、実験装置を製作した。図7にモータの概要図を示す。本モータは外側にロータ、内側にステータのアウトロータ型である。ロータは機械的には支持されず、ラジアル2

Fig. 4 Flux Lines of Ideal and Segmented Magnets

Fig. 5 Analytical model

Fig. 6 Flux Lines

方向とアキシヤル3方向に自由度を持つが、アキシヤル3方向は永久磁石の吸引力による受動安定性で支持し、ラジアル2方向のみを制御する。ステータはケイ素鋼板を厚さ 8.05[mm] 積層し、ロータは厚さ 3.0[mm] の

軟鉄の内側に厚さ 3.5[mm] の磁石を貼り付けた。エアギャップはコイルを含め片側 5.0[mm] とするが、ロータがステータ巻線に直接接触するのを防ぐために、ロータ外側にタッチダウンプレータを設けている。タッチダウン部分において、ロータとのギャップは片側 0.5[mm] である。また巻線は浮上用、回転用共にスロットレスの状態、つまり空芯で各 96 巻、48 巻ずつ巻かれている。本モータでは、浮上用巻線が回転用巻線から $\frac{\pi}{6}$ ずれた位置に配置し、1 つの空芯部分に別の巻線を通してさせる。つまり、浮上用巻線と回転用巻線を交互に配置し、巻線のスペース効率を向上している。巻線を張り付けたステータの概略図を図 8 に示す。巻線は内側が浮上用、外側が回転用となっており、回転用巻線は U, V, W 相の順に 120° 間隔で配置し、対向する相を同相に結線した。浮上用巻線は U, V, W 相の順に 120° 間隔で配置し、対向する相を逆相に結線した。

このような実験装置を用いて浮上実験を行ったが、浮上制御を行うには至らなかった。その原因として、浮上制御するラジアル 2 方向において、制御力が強く発生する方向と弱く発生する方向が存在する為である。

4.2 原因の考察 本モータの浮上制御にはローレンツ力を用いているため、界磁磁束の半径方向成分と浮上制御電流が直交することにより、理論に沿った浮上力が発生する。しかし、スロットレス巻線を貼り付けた広いエアギャップのため、エアギャップ中において界磁磁束の円周方向成分が、通常のスロット付の狭いエアギャップより強く発生する。浮上制御を行う場合には浮上制御用巻線の 1 相以上が必ず界磁磁束の円周方向成分と強く交わる配置となっている。この影響により浮上力が理論どおりに発生せず、ラジアル 2 方向において制御力の発生しやすい方向と発生しにくい方向ができ、安定した浮上制御が得られないものと考えられる。

図 9 に、有限要素法によりラジアル 2 方向の制御力を計算した結果を示す。結果から、ラジアル 2 方向で発生できる制御力に約 2 倍の差があることが分かる。そこで、浮上回路の構成を変更する事でこれらの問題の解決を図る。

5. 浮上回路の改良

従来の装置では浮上制御と回転制御をそれぞれ別巻線で行っていた。この回転制御用巻線を浮上制御にも用いることで、制御力の出にくい方向の浮上制御をサポートする。今、浮上制御用だった巻線をメインコイル、回転制御用だった巻線をサブコイルとする。また、図 10 にメインコイルとサブコイルにより発生する制

Fig. 7 Schematic of Experimental Setup

Fig. 8 Schematic of Stator

Fig. 9 Analytical Results

御力の関係を示す。

サブコイルはメインコイルに対して $\frac{\pi}{6}$ ずれた位置に巻いてある。図 10 に示すロータ位置において、メインコイルは y 方向に対して理論どおりの制御力を発生するが、 x 方向の制御力は弱い。反対に、サブコイルは x 方向に対して理論どおりの制御力を発生するが y 方向の制御力が弱い。従って、全体的な制御力の和はラジアル 2 方向においてほぼ等しくなると考えられる。

5.1 制御システム 駆動回路の改良に伴い、コントローラも変更した。図 11 にコントローラのブロック線図を示す。メインコイルとサブコイルで制御力が強く出る方向が違うため、 x, y 方向それぞれからのセンサー入力に対して PID コントローラを設けた。また、PID コントローラからの出力を各コイルに配分するための 2 相 3 相変換も別々のものを用意した。

5.2 回転制御 装置の構成を変更したことで、巻線全てを浮上制御に用いるため、メインコイルに回転制御電流と浮上制御電流を加算して流さなければなら

ない。しかし、D/A ボードのチャンネル数の制限 (1 チャンネル不足) のため、アナログ回路を用いて加算する必要がある。図 12 に信号の流れを示す。図のように浮上制御電流と回転制御電流を分け、それぞれを各相ごとに加え合わせる。また、回転制御電流は D/A ボードのチャンネル数の制限により、U 相と V 相しか出力できないため、3 相電流の和が 0 になる事を利用して W 相を作る。

5.3 制御系の構成 図 13 に制御系の全体構成を示す。浮上制御は、装置に取り付けた x, y 方向のセンサによりロータ位置を検出し、センサからの出力を A/D コンバータを介して dSPACE(DS1104) に取り込み、先に述べたコントローラにより浮上制御電流を計算する。そして D/A コンバータからパワーアンプを介して各巻線に浮上制御電流を出力する。メインコイルには回転電流と浮上制御電流が加算された電流を出力する。

回転制御は指令回転速度に応じた 3 相交流電流をデジタルコントローラにより計算し、その内の 2 相を出力する。また、その 2 相を加算器に通すことで 3 相交流電流を得、メインコイルに出力する。

6. 浮上回転実験

以上の実験装置を用いて浮上実験を行う。今回は x, y 方向それぞれの入力に対して PID コントローラを用いている。そのため、PID ゲインは 2 通りあり、それぞれ実験的に求め表 2 の値を使用する。

6.1 基本特性の測定 まず、基本特性として制御力を測定した結果を図 14 に示す。測定方法はロータを浮上させた状態で、ロータをデジタルフォースゲージで十分時間をかけながら x, y 方向の外周方向に力を与えた時に、ロータを中心に維持できる最大力を測る。ここで、x, y 方向は図 10 のようなロータとステータの位置に対して、図の矢印のように定める。制御電流制限値は 1.0[A] から 1.0[A] 刻みで 4.0[A] まで変化させて測定した。測定結果から、理論値とほぼ同様な制御力を確認する事ができ、制御電流 4.0[A] の時、y 方向で最大約 9[N]、x 方向で最大約 8.5[N] の制御力を得る事ができた。また、当初製作した装置で問題になった、制御する方向によって発生できる制御力に差が出るという問題もほぼ解決する事ができた。制御電流 4.0[A] の時、実験値が理論値よりも大きな力が記録されているが、フォースゲージの測定誤差によって発生したものと考えられる。

6.2 浮上回転実験 次に浮上回転実験を行い、アンバランス応答を測定した。測定はモータの回転数を

Table 2 Control Parameters

	Main	Sub	
K_p	16.0	25.0	[A/mm]
K_d	0.05	0.05	[A·sec/mm]
K_i	6.0	6.0	[A/(sec·mm)]
τ	0.1	0.1	[msec]
T_d	0.8	0.8	[msec]

Fig. 10 Arrangement of Main and Sub Coils

Fig. 11 Block Diagram

Fig. 12 Schematic of Signal Processing

Fig. 13 Schematic of Control System

200[rpm] ずつ上昇させていき、ロータが安定した時に、ロータの振動振幅の P-P 値を FFT アナライザ (小野測器: CF-5220) で測定した。測定結果を図 15 に示す。測

定結果から、最高回転数 4410[rpm] が得られた。この時点でロータはまだタッチダウンを起こしていなかったが、パワーアンプの過熱やコントローラにおける制御指令電流の飽和のため、測定を回転数 4410[rpm] で中止した。しかし、共振周波数付近においても最大振幅が 0.1[mm] 未満であり、安定した浮上回転制御が得られているといえる。

6.3 モータ回転特性 本モータの回転特性を確かめるために動的なトルク、モータ効率を測定した。その結果を図 16、図 17 に示す。動トルクは自作の負荷トルク装置を用いて、ロータを玉軸受で支持した状態で測定し、モータ効率は得られた動トルクから算出した。結果から、最大動トルク 0.01[Nm]、最高モータ効率 72[%] を得る事ができた。このことから、本モータがセルフベアリングモータとして高トルク、高効率であると言える。

7. ま と め

本論文では、正弦波状で強力な磁束を発生できるハルパッハ磁石をロータに用いたローレンツ型セルフベアリングモータを提案し、安定した浮上回転制御を得る事ができた。

浮上回転実験の結果、良好な浮上特性が得られ、最高回転数 4410[rpm]、最大動トルク 0.01[Nm]、最高モータ効率 72[%] を得る事ができた。

これらの結果から、本モータは高速・高トルクなセルフベアリングモータとしての有用性を見出すことができた。今後は、本モータを人工心臓やハードディスクドライブへ応用する事が考えられる。

本研究費の一部は、科学研究補助金基盤(B)(1) 課題番号 13555059 によることを附記し、関係各位に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 岡田養二, 他: 磁気軸受の基礎と応用, 日本機械学会編, 養賢堂 (1995)
- (2) A. Chiba, et al.: IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, 1994, pp. 61-67
- (3) R. Schöb and N. Barletta: Proc. of 5th Int. Symp. on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp. 313-318
- (4) 小西 他: 機論 66-646C, 2000, pp. 1861-1866
- (5) 岡田養二 他: 電気学会資料, LD-99-156, (1999), pp. 51-56.
- (6) D. Howe and Z.Q.Zhu: Proceedings of the Sixteenth International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, The Japan Inst. of Metals, 2000, pp 903-922

Fig. 14 Control Force

Fig. 15 Unbalance Response

Fig. 16 Dynamic Torque

Fig. 17 Motor Efficiency