

円盤磁石の回転を用いた磁路制御形非接触浮上機構の開発*

孫 鳳^{*1}, 岡 宏 一^{*1}Development of Noncontact Suspension Mechanism Using
Flux Path Control by Disk Magnet RotationFeng SUN and Koichi OKA^{*2}^{*2}Department of Intelligent Mechanical System Engineering, Kochi University of Technology,
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-shi, Kochi, 782-8502 Japan

This paper describes a new type of magnetic suspension system using a rotary geared motor and a disk magnet. In this suspension system, the suspension force is provided by a disk-type permanent magnet and is controlled by a magnetic flux path control mechanism, which rotates the disk magnet to change the flux passing through the suspended object. This suspension system may realize zero attractive force to avoid the uncontrollable adhesion, changing the polarity of the stator poles for complex applications, and zero-power levitation with the constant air gap. In this paper, suspension principle and the experimental prototype of this proposed system are introduced, the basic experiments using the prototype are examined, and the modeling and simulation are carried out. Finally, some suspension experiments for verifying the suspension performance are executed.

Key Words: Magnetic Suspension, Permanent Magnet, Rotary Geared Motor, Variable Flux Path Control

1. 結 言

磁気浮上機構は、浮上体を非接触で支持する機構である。機械的な接触がないため摩擦や塵埃の問題を発生しないため、高速回転のための軸受、磁気浮上列車、クリーンルーム中の搬送装置などに利用されている。磁気浮上機構には様々な形式があるが、永久磁石を用いた磁気浮上機構はコイルがなく、発熱の問題が無視できる。この形式の磁気浮上機構は、支持力として永久磁石の起磁力を用いており、浮上力の調整方法には二つのものが考えられる⁽¹⁾。それらは、(1)永久磁石と浮上体との間の空隙の長さを制御する方法と、(2)磁気回路内にリラクタンス(磁気抵抗)調整機構を設ける方法である。

方法(1)を利用した磁気浮上システムの例として、リニアアクチュエータを用いて永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力を制御する方式を用いた懸垂型磁気浮上機構⁽²⁾⁻⁽⁴⁾や、永久磁石の反発力を用いた磁気軸受⁽⁵⁾が提案されている。しかし、これらの磁気浮上システムは、永久磁石の発生力を調整できない、装置の

磁極を変えられない、浮上体が一度吸着してしまうと制御できないなどの欠点がある。

方法(2)を応用した磁気浮上システムの例として、磁歪素子と圧電材料を用いて磁路を制御する磁気浮上装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾、磁路中に挿入した強磁性体の位置を変化させることによって永久磁石から浮上体に到達する磁束の大きさ、方向を変化させることにより、浮上力を調整する磁気浮上装置⁽⁸⁾⁽⁹⁾などが提案されている。しかし、これらの磁気浮上装置は、磁極を変えることができない。多自由度の浮上装置やモータなどの駆動装置に用いるためには不十分な場合があると考えられる。

本研究は、円盤磁石と回転モータを用いて浮上システムを構成することを提案する。この浮上システムは、回転モータに取り付けられた円盤磁石の回転角度を制御することにより、円盤磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を制御するものである。円盤磁石の回転角度を変えることにより、磁束の大きさだけでなく、向きも変化させることが可能である。さらに、回転モータには減速機構が取り付けられているため、モータ電流に比較して大きな浮上力を得ることができ

る。本論文では、まず円盤磁石を用いた浮上原理を説明する。次に、試作装置を紹介し、浮上システムの特

* 原稿受付 2010年4月21日。

^{*1} 正員, 高知工科大学システム工学群(〒782-8502 香美市土佐山田町宮ノ口185)。

E-mail: oka.koichi@kochi-tech.ac.jp

を考察するため、試作装置を用いて発生する磁束密度と吸引力を計測し、それらの結果を示す。次に、試作装置のモデル化と浮上のための数値シミュレーションを行う。最後に、本機構の浮上性能を示すための浮上実験の結果を示す。

2. 回転モータを用いた可変磁路制御形浮上機構

提案する可変磁路制御形磁気浮上機構の原理を図1に示す。この磁気浮上機構は、円盤磁石と左右二つのF字型の強磁性体コアと直方体の浮上体から構成されている。円盤磁石は、ある90度の部分がN極、反対側の90度がS極であると仮定する。

まず、図1(a)のように円盤磁石のN極が真上に、S極が真下にあるとき（この状態の円盤磁石の角度を 0° とする）、上部のN極から出発した磁束の半分は右側のコアに、半分は左側のコアに流れ込むと考えられる。これらの磁束は各コアとS極が面した部分からS極に入る。よって、円盤磁石からの磁束は浮上体を通過することはない。従って、コアと浮上体間では吸引力は発生しない。

次に、図1(a)の状態から、円盤磁石が右に回転したときの様子を図1(b)に示す。この時、上部のN極と面するコアの面積は、左側のコアより右側のコアの方が大きいので、N極から流出する磁束は左側のコアより右側のコアの方が多い。一方、下部のS極と面する左右のコアの面積関係は、N極側とは逆になっている。従って、右側のコアに流出する磁束は二つの部分に分かれる。一部の磁束は右側のコアと面するS極に流れ、他の磁束は浮上体を通して、左側のコアと面するS極に流れる。コアと浮上体間に磁束が流れるため、吸引力が発生する。

上記より、図1(a)の状態から90度までの間では、円盤磁石の回転角度が大きくなるに従って、浮上体を通過する磁束が大きくなり、吸引力も大きくなる。このことから、円盤磁石の回転角度を制御することによって浮上力を調整することが可能であると考えられる。また、逆方向に円盤磁石を回転させることにより、磁束を逆に流すことが可能であり、コアの磁極の極性を変化させることができる。

3. 試作装置と諸特性

3-1 試作装置 今回提案する磁路調整形磁気浮上機構の略図を図2に、浮上システム全体の構成を図3に示す。この浮上機構は、円盤磁石、回転モータ、パーマロイのコア、直方体の浮上体、二つの渦電流センサーで構成される。装置の中央の円形のもの磁石で

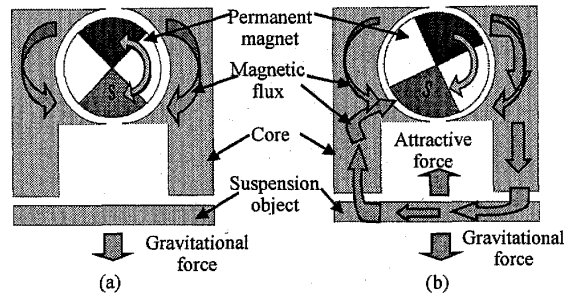


Fig.1 Principle of variable flux path control mechanism using rotary magnet

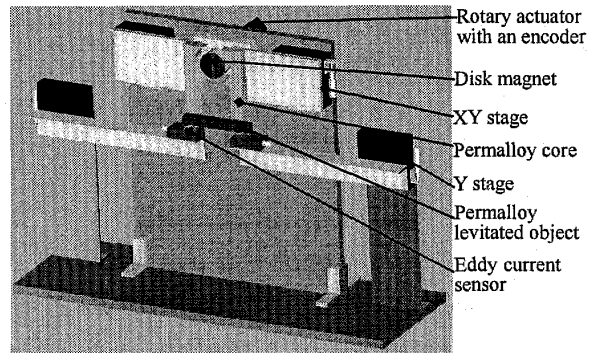


Fig.2 Illustration of the experimental prototype

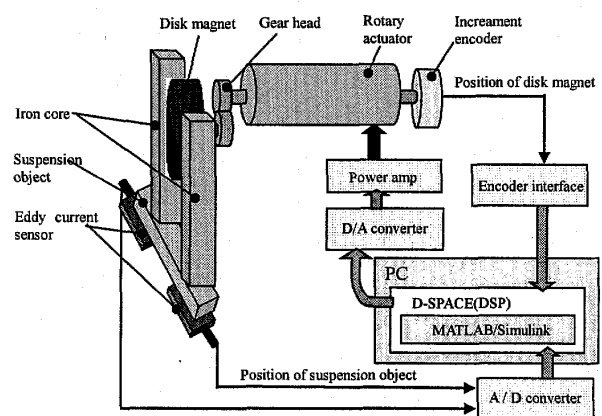


Fig.3 Configuration of suspension system

あり、直径が30mm、厚さが10mm、直径方向上に磁極が磁化されている。この円盤磁石はネオジウム磁石であり、垂直固定板の裏側に取り付けてある回転モータによって回転駆動される。回転モータは、ハーモニックドライブ機構を用いたDCモータであり、ハーモニックドライブの減速比は50であり、最大回転速度は180rpmである。角度の検出用にエンコーダを用いており、その分解能は360p/rである。

円盤磁石の両側にある二つのF字型のコアは、厚さが10mmのパーマロイである。F字型のコアの下にある直方体はパーマロイの浮上体である。パーマロイは、透磁率が非常に高く、また保磁力が極めて低く残留磁気の影響が少ない。磁石の回転により、浮上力を調整

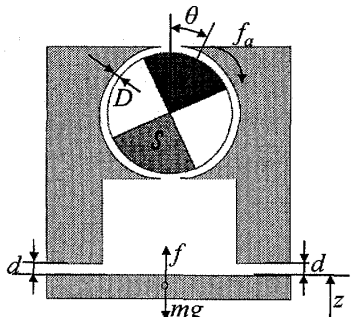


Fig.4 Schematic of symbols clarification

する本提案機構では、残留磁気の影響が少ないことは、浮上力をゼロに設定するために重要な要素である。浮上体の位置はその下に取り付けられた渦電流センサによって計測される。渦電流センサの精度は $10\mu\text{m}$ である。

制御システムは DSP を用いたデジタル制御であり、モータのエンコーダと渦電流センサの値に基づいて、円盤磁石の回転角度を制御し、磁路を制御する。それにより、浮上体とコアとの間の吸引力を調整する。

なお、用いる記号の説明を図 4 に示した。

3-2 磁束密度の測定 提案した磁気浮上システムにおける浮上力の変化を確認するため、浮上体とコアとの空隙距離 d 、および円盤磁石の角度 θ を変化させたときの磁束密度と吸引力 f の測定を行った。角度 θ は N 極が真上にあるときが原点とした。測定のために Gauss メータと力センサを用いた。測定方法は、円盤磁石と両コアの隙間 D を 2mm に調整し、浮上体とコアとの空隙 d は 1mm ごと、円盤磁石の角度 θ は 10° ごとに、計測した。浮上体とコアとの空隙 d は、磁束密度の測定では 3mm から 10mm までを、吸引力の測定では 2mm から 8mm までを測定した。

磁束密度の測定結果を図 5 と図 6 に示す。図 5 は磁束密度と円盤磁石の回転角度 θ の関係である。図からわかるように、磁束密度は、円盤磁石の回転によりほぼ正弦波状に変化している。また、永久磁石を 180° 回転すると、左右コアの磁束密度は正負が逆となっており、浮上体を通る磁束の方向が逆になっていることがわかる。この結果、提案した磁気浮上機構によりコアの磁極の極性を変化させられることが確認できた。しかし、磁束密度がゼロになる点の円盤磁石の角度は左右のコアで少し違いが見られた。

図 6 は浮上体とコアの空隙 d と磁束密度の関係を示している。図からわかるように、磁束密度は、円盤磁石の回転角度 θ と空隙 d によって変化する。距離 d が小さくなると、磁束密度は大きくなることがわかった。

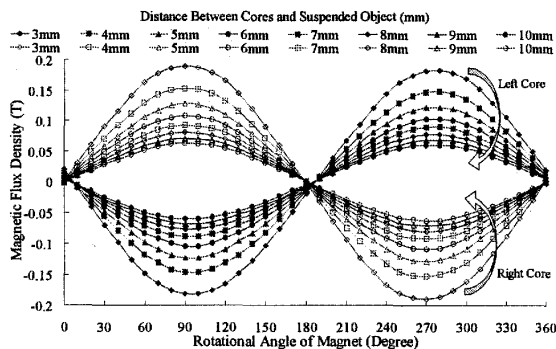


Fig.5 Relationship between flux density and angle

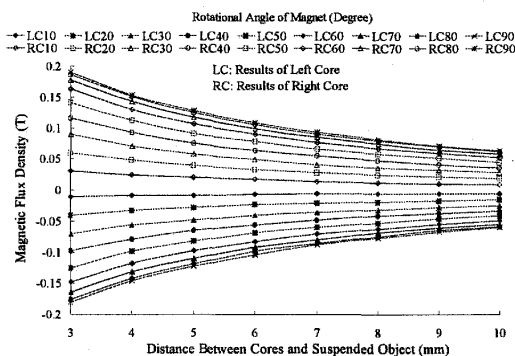


Fig.6 Relationship between flux density and air gap

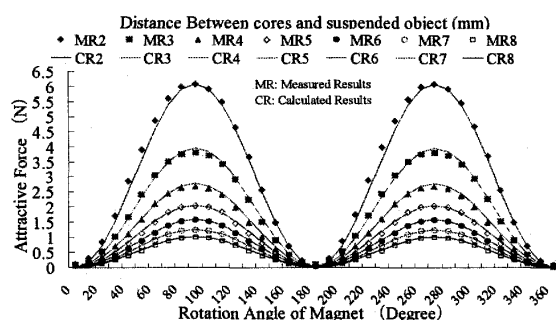


Fig.7 Relationship between attractive force and angle

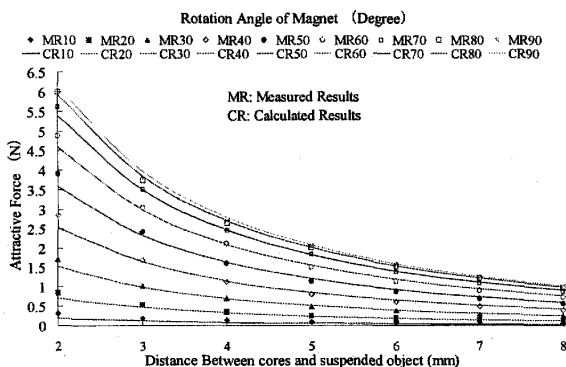


Fig.8 Relationship between attractive force and air gap

3-3 吸引力の測定 吸引力の測定結果を図 7 と図 8 に示す。図 7 は吸引力 f と円盤磁石の回転角度 θ の関係を示している。浮上体とコアとの空隙 d をパラ

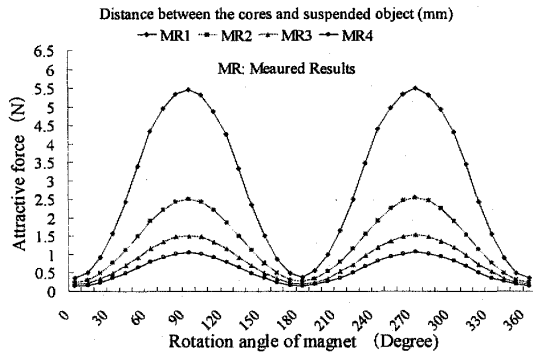


Fig.9 Suspension force when the distance between the permanent magnet and the cores is 10 mm

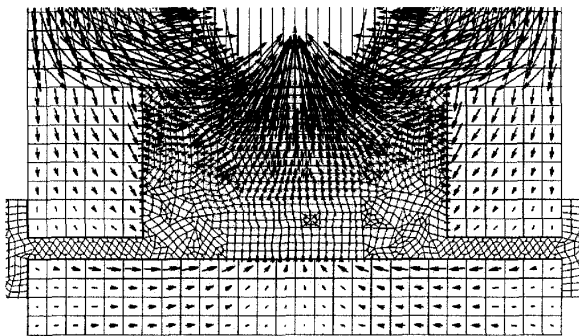


Fig.10 IEM analysis when the magnet angle is 0 degree

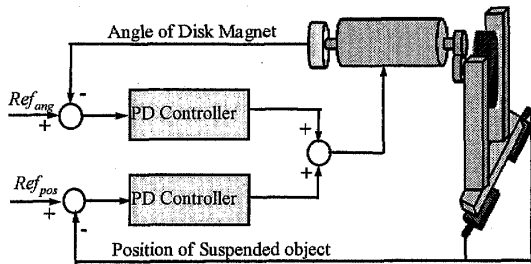


Fig.11 Structure of control system

モータとして、磁石の角度が変化したときの吸引力を示している。図からわかるように、円盤磁石の回転角度が0° または 180° であるとき、つまりN極とS極が上下方向にあるとき、吸引力はほぼ0になっていることがわかる。また、角度が90° と270° のとき、吸引力が最大値になっている。図8は浮上体とコアの空隙 d と吸引力 f の関係を示している。図からわかるように、距離が小さくなると、吸引力は大きくなる。

しかし、図7を詳細に観察すると、吸引力の最小値は0となっていないことが確認された。このことは、磁束密度を計測した図5の結果の左右の磁束密度が0になる地点がずれていることとも合致する。

また、浮上力を0にできない理由として、永久磁石からコアを通過せずに浮上体に達する磁束の漏れが影響しているのではないかと推測した。このことを確認するために、円盤磁石とコアの空隙 D を10mmに広

げ、吸引力を計測した。結果を図9に示す。空隙 D が2mmである図7と比べると吸引力の最小値が大きくなっていることがわかる。この結果、磁束の漏れが原因という推測が確認されたと考えられる。

より詳しく調べるために、(株)エルフのエルフマジックを用いて、磁石角度が0であるときの磁束の分布を解析した。結果を図10に示す。図はコアの下部と浮上体を通る磁束だけを示してある。図からわかるように浮上体の中央付近から永久磁石に達する磁束があり、このために吸引力が働くことがわかった。

以上の結果、円盤磁石の回転角度により、浮上体の支持力を調整することが可能であることがわかった。しかし、浮上体に働く吸引力を完全に0にすることはできないことがわかった。今回提案する浮上機構では浮上力を0にできることを特徴の一つと考えたが、今回の試作装置では厳密にはこのことを実現するのは不可能であった。しかし、浮上体の吸着を回避するという目的を考えると、この程度の値は浮上体の重力より十分小さい値のため、本来の目的としては問題ないと考えられる。

4. モデル化と数値シミュレーション

4-1 浮上力のモデル化 試作装置を用いた磁束密度と吸引力の測定結果に基づいて磁気浮上システムのモデル化を行った。図5と図6の測定結果に基づいて浮上体中を通る磁束は、モータの回転角度 θ とは、ほぼ正弦波の関係があり、浮上体とコアの空隙 d とは、ほぼ反比例の関係になることが分かった。これらのことと、吸引力は磁束の自乗に比例することを考慮し、吸引力 f は次式で表されると仮定した。

$$f = k_m \frac{\sin^2 \theta}{(d + \Delta d)^2} \dots\dots\dots(1)$$

このとき図7と図8の測定結果から、比例定数 k_m の値は 1.06×10^{-4} (Nm²)、定数 Δd の値は2.17mmであると確認できた。図7と図8に示した実線は、このモデルの計算結果を示している。測定結果の各点非常によく表現しており、式(1)の仮定が正しいことが証明されたとと言える。

4-2 モータと浮上体の運動方程式 今回のモデル化ではモータの回転は、独立に回転可能であると仮定して、次式のように電流から磁石角度への方程式を用いた。

$$J\ddot{\theta} = c\dot{\theta} + \tau_p(\theta, z) + k_i \dots\dots\dots(2)$$

ただし, J は永久磁石部などを考えた等価慣性モーメント, c はモータの軸などに発生する減衰係数, $\tau_p(\theta, z)$ は円盤磁石とコアの間に発生するトルク, k_f は減速比を考えた等価トルク定数である. また, 浮上体の運動方程式は吸引力を f として以下のように表すことができる.

$$m\ddot{z} = f - mg \dots \dots \dots (3)$$

4.3 コントローラ 制御システムの構成を図 11 に示す. 図に示すように, コントローラは円盤磁石の目標値 Ref_{ang} 上と浮上体位置の目標値 Ref_{pos} の二つの目標値を持ったシステムである. それぞれの目標値に対して PD 補償の二つのループがあり, 補償された結果を加えあわせた信号が, 円盤磁石駆動用モータに入力される. 駆動用モータは電流指令によって駆動される.

4.4 数値シミュレーション 式(1)から(3)に示されるモデルを用いて, 浮上システムの数値シミュレーションを行った. シミュレーションでは, (2)式の右辺第 2 項のトルクは無視して行った. また, 初期値として, 円盤磁石の目標値 Ref_{ang} に 35° , 浮上体目標値 Ref_{pos} に 0mm を設定し, 開始から 0.2 秒のとき, 浮上体目標値 Ref_{pos} に -0.4mm のステップ (目標値が下方へ変化する) を入力したときの応答を記録した.

シミュレーションの結果を図 12 に示す. 図は上から回転モータの電流, 磁石の回転角度及び浮上体の位置を示す. 図から分かるように, ステップ応答の前後で安定浮上が実現されている. これより, 提案した磁気浮上システムの安定浮上が示されたといえる. 浮上体の最終的な変位が入力幅より大きくなっているが, これは, 制御対象である磁気浮上システムが負の剛性を持った不安定なシステムのためである.

5. 試作装置における浮上実験

5.1 リニアレールを用いた浮上実験 試作した磁気浮上装置では, 左右コアの発生力が等しくないために, 直方体の浮上体をリニアレールに取り付け, 浮上体の自由度を上下だけに制限して実験を行った. この結果, 上下方向の浮上に成功した. 浮上体の重量は 0.232kg である. このときの写真を図 13 に示す.

次に, 浮上の安定性を評価するためにステップ応答実験を行った. 実験は, シミュレーションと同様に浮上体に -0.4mm のステップ入力を加え, 応答を記録した. 結果を図 14 に示す. 上から回転モータへの入力電流, 円盤磁石の回転角度, 及び浮上体の変位を示している. 実験結果もシミュレーション結果とほぼ同様

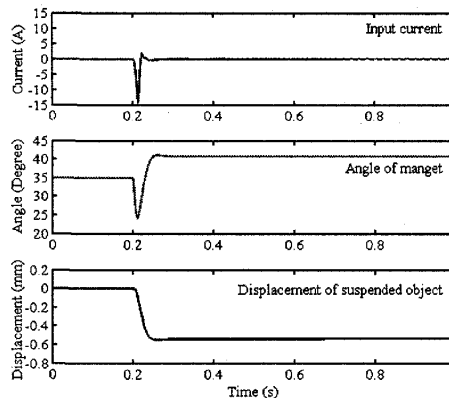


Fig.12 Simulation results of step response

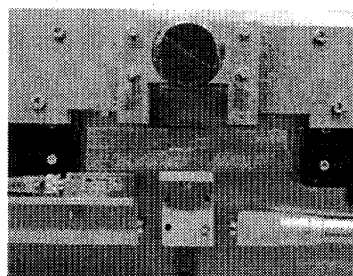


Fig.13 Suspending photograph with a linear rail

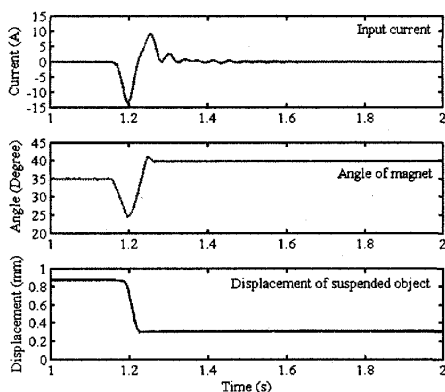


Fig.14 Experimental results of step response

の動きをしていることが確認された. 今回のステップ入力に対する応答は約 30ms 程度であった.

磁石の回転角度は, まず, 安定状態から小さくなり, 浮上力を小さくし, 浮上体を下方方向に移動させる. その後, 回転角度を大きくし, 安定状態になっている. 最後の角度は, ステップ入力前より大きくなった. これは変位後の浮上体とコアとの空隙が大きくなったためであり, 同じ浮上力を得るために必要な動きである. さらに, ステップ入力前後の定常状態では, 回転モータの入力電流がほぼゼロになっていることが分かる.

5.2 浮上体の質量を変化させたときの浮上実験 つぎに提案した浮上システムの評価として, 浮上体の

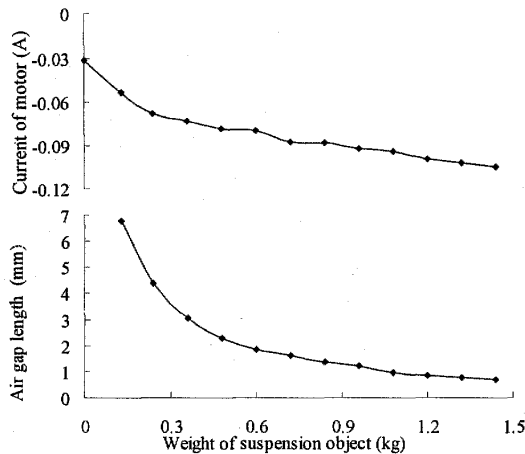


Fig.15 Characteristics of motor current and air gap about suspension force

質量を変化させたときに必要なモータ電流を調べた。永久磁石位置が 40° となるようにし、浮上体質量を変化させてモータ電流とそのときの浮上体の空隙を測定した。

結果を図15に示す。上の図がモータ電流であり、下の図が浮上体とコアのギャップである。図に示すように浮上体の質量が増えるにつれて、ギャップが小さくなり、モータの電流が増えていることがわかる。浮上体重量が増えると、ギャップを小さくして磁気回路を流れる磁束を増やし、支持力を増す制御が行われている。この磁束の増加は、円盤磁石とコアの間に働くポテンシャルによるトルクを変化させ、結果的にモータ電流を増加させたと考えられる。つまり、浮上体の重量はモータ電流に影響を与えることがわかった。

また、浮上体の重量が0のとき（浮上体をコアの下から取り去った場合）でもモータには電流が流れている。浮上体がないときに永久磁石を回転させどの程度の電流が流れるかを調べた結果、永久磁石の回転角によりモータの保持トルクのための電流が変化することがわかった。これより永久磁石の角度および浮上体の重量は、モータのトルクに影響を与えることが確認された。しかし、その消費電力は非常に小さいことが確認された。

今回の実験では、永久磁石の角度を一定として実験を行ったが、ギャップを一定にして浮上体の重量を変化させることが可能である。これは、空隙一定でのゼロパワー制御の可能性を示している。

6. 結 言

本論文では、円盤磁石と回転モータを用いた磁気浮上システムを提案した。まず、磁路調整形磁気浮上原理を説明し、試作した上装置を紹介した。試作装置の

特性を知るための基礎実験を行い、数値モデルによるシミュレーションを行った。最後に、試作装置による浮上実験を行い、これに成功した。以上の結果によって、今回提案した浮上システムにおいて得られた知見は下記のようにまとめられる。

(1) 回転モータに取り付けられた円盤磁石の回転角度を制御することにより、円盤磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力の制御が可能である。

(2) 円盤磁石の回転角度の変化により、磁束の大きさだけでなく、磁極の極性を変化させることが可能である。このことは今後の多自由度浮上や駆動機構などを構成するときに利点となることが考えられる。

(3) 円盤磁石を一定の回転角度に回転させると、浮上力をほぼゼロにすることができたが、漏れ磁束のために完全にゼロにすることはできなかった。

(4) 提案した可変磁路制御形磁気浮上機構を用いて安定浮上に成功した。

(5) 機械的な磁気浮上機構において、初めての減速機を用いた浮上方式を提案し安定浮上を成功した。

(6) 回転モータには減速機構が取り付けられているため、モータ電流に比較して、重量物の浮上体を非接触で支持できることを浮上実験により確認した。

(7) 永久磁石の角度および浮上体の重量はモータのトルクに影響をおよぼすことがわかった。

(8) ギャップを一定に保ったまま、浮上のための消費電流をほぼ0にできるという画期的な浮上機構の可能性を示した。

今後の課題としては、モデルの改良、浮上体の支持重量に関する性能評価、および消費電流に関する詳細な検討を行う予定である。

文 献

- (1) Oka K. and Higuchi T., Magnetic Levitation System by Reluctance Control: Levitation by Motion Control of Permanent Magnet, *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials*, Vol. 4 (1994), pp.369-375.
- (2) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 133, No. 3 (2000), pp.63-70.
- (3) Sun F. and Oka K., Zero Power Control for Hanging Type Maglev System with Permanent Magnet and VCM, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No.753 (2009) pp 1383-1388
- (4) Fujiwara Y., Cui T.S., Chen L and Oka K., Manipulation by Linear Driving Permanent magnet-Rotation Control of Ironball-, *The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 14, No. 1 (2006), pp.126-131.
- (5) Mizuno T., Sekiguchi H. and Araki K., Repulsive Magnetic Bearing Using Motion Control of

- Permanent Magnets (Stabilization in the Axial Direction), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 64, No.628 (1998), pp. 187-192.
- (6) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.40, No.3 (2004), pp.1601-1605.
- (7) Ueno T., Qiu J., Tani J., Magneto-Electric Composite Element of Giant Magnetostrictives and Piezoelectric Materials and Its Application of Magnetic Force Control to Magnetic Levitation System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No.658 (2001), pp. 1897-1904.
- (8) Mizuno T., Hoshino H., Takasaki M. and Ishino Y., Proposal and Basic Experimental Study of Flux Path Control Magnetic Suspension, *Transactions of the Japan Society Applied Electromagnetic and Mechanics*, Vol. 14, No.3 (2006), pp. 346- 352.
- (9) Mizuno T., Hirai Y., Ishino Y. and Takasaki M., Flux Path Control Magnetic Suspension -Development of a System Using Voice Coil Motors- *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No.721 (2006), pp. 185-192