

学術論文

## 駆動コイルによる磁気浮上機能を有する磁気浮上モータの開発

### Development of levitating and driving motor with single driving coil system

村上 岩範<sup>\*1</sup>(正員), 小林 祐介<sup>\*1</sup>, 吉澤 明訓<sup>\*1</sup>, 安藤 嘉則<sup>\*1</sup>(正員), 山田 功<sup>\*1</sup>(正員)

Iwanori MURAKAMI (Mem.), Yusuke KOBAYASHI, Akinori YOSHIZAWA, Yoshinori ANDO (Mem.)  
Kou YAMADA (Mem.)

In this research, it proposes the drive and levitation method by giving to alternating current magnetic flux to magnetic material disc. When the magnetic material disc receives the a.c. magnetic field, we can observe there is a phase difference between the impressed magnetic field and the magnetized disc. And, because an axially attraction force is generated between the current magnetic field and the disc, driving and levitation can be done at the same time. We clarified the cause of the phase advancement by measuring and analyzing the leakage flux. And we executed the levitation drive experiment, and we achieved a steady levitation and the drive by controlling the amplitude of driving a.c.. As a result, because measurements and the analytic value were corresponding well, it was confirmed that this analysis was useful. We developed a new motor that achieved the drive and levitation with a single driving coil system and clarified this fundamental characteristic by the analysis.

*Keywords:* axial motor, driving method, electromagnetic actuator, magnetic material plate, levitation control.

### 1 緒言

現在, 様々なデバイスの小型化, 軽量化, 省力化が求められており, 様々なモータについての研究・開発が行われている。これらのモータの中で, 軸方向からの駆動力によってロータが回転する超音波モータや, ステッピングモータなどのアキシヤル型モータは, それぞれ高トルクが得られる, 回転数の制御が容易などの利点がある。しかし, 欠点として, 低回転に限定される, 短寿命, 脱調などの点が挙げられる。しかしながら, これらのアキシヤル型モータはモータが扁平となることから, ごくわずかなスペースに配置ができ, 様々な分野での応用が行われている。これに対し, この様なモータの新たな駆動方法に関する研究はあまり見受けられない。このようなアキシヤル型モータに関する新しいモータ研究として筆者らはこれまで超電導浮上モータの駆動に関する研究[1,2]を行ってきた。これらは, ラジアル方向の安定性が低いという高温超電導浮上系の問題点に対してラジアル方向の起振力が発生しない, もしくはラジアル方向力が打ち消し合うような駆動方法を開発したものである。しかしながらこれらの駆動方法は超電導浮上系に特化した部分が多く, 一般的な条件下での応用に適さない部分がある。

連絡先: 村上 岩範, 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, 群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻,  
e-mail: murakami@gunma-u.ac.jp

<sup>\*1</sup> 群馬大学

そこで本研究ではこのようなアキシヤル型モータの新しい駆動方法として円環形の磁性材料板に軸方向から回転磁場を与え, 回転磁場と磁性材料円板の漏洩磁場との位相差を利用し, 磁気吸引力により磁性材料円板を浮上駆動させる浮上機構を有した磁気浮上モータを提案する。本報では, 非接触の磁気浮上モータの前段階の研究として, シャフトホルダを用いて半径方向を拘束し, 軸方向を制御し, 浮上機構を有した磁気浮上モータの研究を行う。こまた, このように単一の駆動コイルによって駆動と浮上を行う研究はほとんど見受けられない[8-10]。また, 単一の駆動システムでアキシヤル方向の制御力を有するモータとしてアキシヤルギャップセルフベアリングモータ(AGBM)[11]が挙げられるが, これは, 基本的に PM 型同期駆動もしくは電磁誘導を利用しており, 本提案のモータに比して, コスト面や構造の複雑さ, 発熱などの問題がある。

このように, 外部から非接触で, 単なる磁性材料板を駆動する方法としてインダクション方式が考えられるが, この方法は巻き線構造を有さない単なる強磁性板材の駆動は非常に困難となる。このため通常, 円板を誘導方式で駆動する場合は常磁性体の板材を用いる。また誘導電流が発生するため, ロータが加熱される問題が発生する。これに対し, 本研究で提案する駆動方法は, 基本的に駆動と浮上を磁気吸引力を利用して実行するものであり, 誘導電流の発生はわずかとなる。

このため、ロータが加熱されることがほとんどない構成となっている。さらに非常に薄い円板を駆動することが可能となるため、これまで配置が困難であった箇所への設置が可能となる。これらの特徴は、人工心臓のように、安全性の観点から通電部分を外部に設置し、かつ熱を嫌う条件や、密閉された容器内の攪拌、非常に狭隘のスペースでのアクチュエータとして応用を考えた場合の重要な要素であり、このような研究は有用であると考えられる。

本研究では以上のような構成の元、実験装置を製作し、駆動原理である位相差の測定及び解析を行う。また、浮上機構を考えた際に必要な駆動コイルの基本性能を知るための吸引力測定及び解析を行う。さらに、フィードバック制御による浮上駆動実験と運動解析により、今回提案する、駆動コイルによる磁気浮上機能を有する磁気浮上モータの有用性を検証する。

## 2 実験装置

本研究で制作した、実験装置概念図を Fig. 1 に示す。ロータは磁性材料円板④、スペーサ⑤、アクリル板で構成されている。ロータ上側には、9 個の駆動コイル③を円形状に配置し、これを 2 個おきに並列接続し、この並列接続した駆動コイルの三つの組に位相を  $2/3\pi\text{rad}$  ずつずらした 3 相の交流電流を印加することにより回転磁場を創出する。この駆動コイルが創出する回転磁場の吸引力によりロータは浮上力・駆動力を得る。本駆動方法はロータに生成される局所的磁荷を用いて駆動を行うため、磁性材料円板内部で磁気回路を構成しないようにするため、磁気飽和し易いことが望ましい。このため②亜鉛鉄板の薄板を利用した。レーザ変位計⑥はロータ中央部のスペーサ下部に配置することで、ロータの軸方向変位の計測を行う。また、シャフト②とシャフトホルダ①はロータの半径方向変位を拘束している。装置の諸元を table 1 に示す。

## 3 駆動原理

### 3.1 磁性材料円板の漏洩磁束密度測定及び解析

主磁束と漏洩磁束のモデル図を Fig. 2 に、漏洩磁束密度解析のモデル図を Fig. 3、印加電流 2.5A、120Hz での磁性材料板の漏洩磁束密度測定結果を Fig. 4、その解析結果を Fig. 5 に示す。磁性材料円板の磁場変動と、回転磁場の位相を比較するため、ロータを固定して、磁性材料円板の軸方向漏洩磁束を測定する。駆動コイルをロータ上部に設置し、回転磁場を与えた際の一つの駆動コ

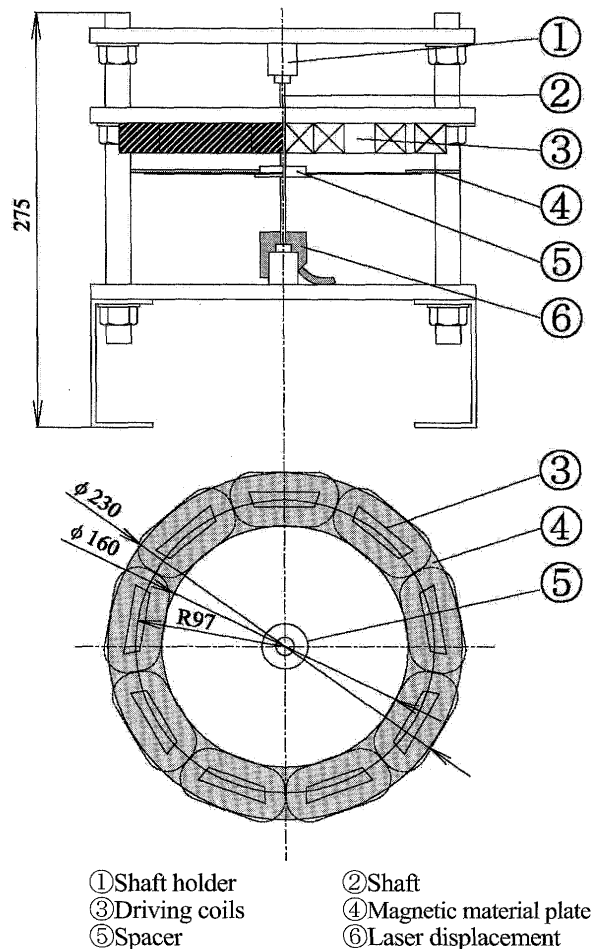


Fig. 1 Geometry of experimental equipment.

Table 1 Dimensions of experimental equipment

Inside diameter of magnetic material plate [m]	$230.0 \times 10^{-3}$
Inside diameter of magnetic material plate [m]	$160.0 \times 10^{-3}$
Thickness of magnetic material plate [m]	$0.50 \times 10^{-3}$
Weight of magnetic material plate [kg]	$145.0 \times 10^{-3}$
Diameter of rotor shaft [m]	$3 \times 10^{-3}$
Gap between magnetic material plate and driving coil [m]	$4.0 \times 10^{-3}$
Breadth of the experimental apparatus [m]	$250.0 \times 10^{-3}$

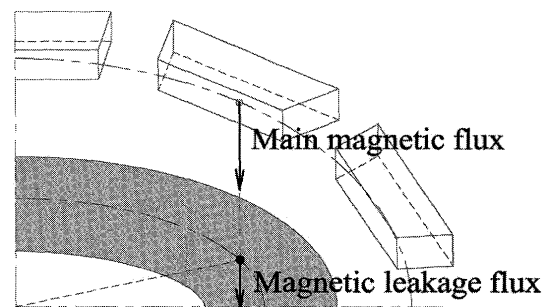


Fig. 2 Geometry of magnetic flux.

イルの中心位置の磁束密度とその真下の磁性材料円板の漏洩磁束を、ホール素子を用いて同時に測定する。このときの漏洩磁束と駆動コイルの磁束を比較することで位相差を求める。

本系はスピンの与えられた磁場変動に対して瞬時に追従するわけではなく緩和時間が必要となり、磁化遅れが生じる。しかし、Fig. 4 より実際の測定値では位相が進んでいることが確認できる。

本系は、この位相の進みが、9個の駆動コイルの作る合成磁場によって磁性材料円板が磁化されるために生じたと考え解析を行う。まず、Fig. 3 のような台形コイルに任意の電流を印加したときに任意の計測点に発生する磁束密度を考える。このコイルには、Fig. 3 のように微小直線部分に電流が流れていると仮定すると、微小線電流から中心軸までの距離を  $Rc$ 、直線電流を  $I$  (A) とし、中心軸を  $Z$  軸にとったとき、電流素片  $Ids$  が  $P$  点に作る磁場の大きさ  $dB$  は、ビオ・サバルの法則(Biot-Savart law)を用いて次式で表される[3-7]。

$$dB = \frac{\mu_0 Ids}{4\pi\sqrt{Rc^2 + z^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\sqrt{Rc^2 + z^2}$  は電流素片と計測点  $P$  の距離である。また、駆動コイルには3相の交流電流が流れることとなるが、ここではその交流電流の振幅  $I_0$  を用いることで、磁束密度変動の振幅を求めることとする。測定結果と比較するため磁束密度の軸方向成分  $B_{Cz} = dB \cos \alpha$  を考える。

$$\begin{aligned} B_{Cz} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\cos \alpha}{(Rc^2 + z^2)} \int_{a1}^{a2} ds \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi(Rc^2 + z^2)} \frac{Rc}{\sqrt{Rc^2 + z^2}} \\ &= \frac{\mu_0 IRcL}{2(Rc^2 + z^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (2)$$

駆動コイルの直線部 1 が  $a1$  から  $a2$  まで流れた範囲を  $L$  とし、それを  $b$  の範囲で  $i$  層、コイル高さ  $hc$  の範囲で高さ方向に  $j$  回巻かれた  $n$  番目の駆動コイル 1 つの直線部からつくられる磁束密度は、式(2)より

$$\sum \sum B_{cz1}(z, a) i, j \quad (3)$$

直線部は全部で4つあるため、駆動コイル1個からつくられる磁束密度  $B_1$  は

$$\begin{aligned} B_1 &= [B_{cz1}(z, a) i, j + B_{cz2}(z, a) i, j \\ &\quad + B_{cz3}(z, a) i, j + B_{cz4}(z, a) i, j] \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

次に、式(4)を用いて9個の駆動コイルが任意の点に

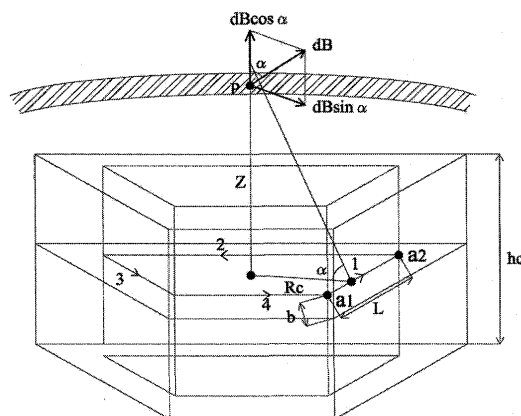


Fig. 3 Static magnetic field influence of slight line to magnetic material plate.

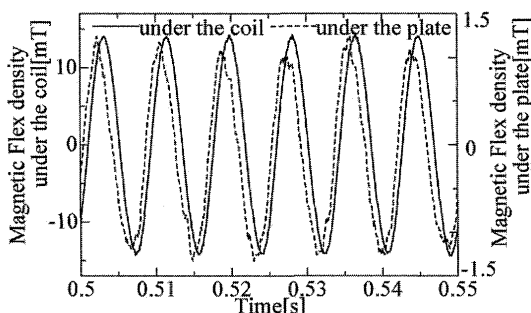


Fig. 4 Experimental result of magnetic flux density by 120Hz.

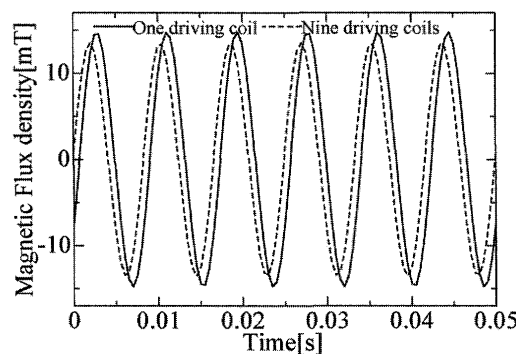


Fig. 5 Theoretical result of magnetic flux density by 120Hz.

作る合成磁場を考える。各組の駆動コイルに流れる電流をそれぞれ  $I_1, I_2, I_3$  とし、印加する電流を以下のようにする。

$$\begin{cases} I_1 = I \cos(2\pi ft) \\ I_2 = I \cos(2\pi ft + \frac{2}{3}\pi) \\ I_3 = I \cos(2\pi ft + \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $f$ は印加電流の周波数、 $t$ は時間とする。これを式(2)に代入することで計測点Pに作る合成磁場を求めることとする。

また、本系は電流値と周波数が上昇するほど、磁化遅れにより位相差は減少していくと考えられる。そこで実験値より同定した電流と周波数に依存する磁化遅れを考慮した磁束密度の式を求め、それを以下に示す。

$$B_0 = B \cos(2\pi ft - \phi - \xi) \begin{cases} \phi = k_I I \\ \xi = k_f f \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $B_0$ は9個の駆動コイルが計測点に作る合成磁場、 $I$ はコイルに印加する電流、 $k_I$ は実験により同定した電流に依存する定数、 $f$ は印加電流の周波数、 $k_f$ は実験により同定した周波数に依存する定数である。

式(6)を用いて、9個のコイルが測定点の位置に作る合成磁場を求める。Fig. 4とFig. 5より測定値と解析値はほぼ一致している事がわかる。

さらに、式(6)を用いて、印加電流 2.0A, 2.5A, 3.0A で、コイルへの印加電流の周波数を 40Hz 刻みで 40~200Hz としたときの位相差の解析結果及び測定結果を Fig. 6 に示す。グラフの直線は最小二乗法を用いて近似したものである。Fig. 6より測定値及び解析値はよく一致している。また、Fig. 6から位相差は 200Hz までは周波数が高くなるにつれて小さくなるが見取れる。位相差に影響するスピンによる磁化遅れは、通常、周波数が増大するにつれて大きくなる。一方、位相差は周波数の増加とともに小さくなっている。計測点では、その付近の主に隣接する3個の駆動コイルの作る合成磁場によってロータが磁化される。この合成磁場は駆動コイルの磁場より、位相が進んでいるため、この位相進みから周波数の増加に伴って増大する位相遅れ分が差し引かれるためこの様な結果となると考えられる。

### 3.2 トルク測定及び解析

本系のトルク測定において、本系はトルクが小さい系であるため、回転速度の上昇から角速度  $\omega$  の変化分を求め、慣性モーメント  $I_p$  をかけることでトルクを算出する。つまり

$$T(t) = \tau(t) - c\omega = I_p \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

とした際の減衰項を含めたトルク  $T(t)$  である。

今回は磁性材料円板の下部に駆動コイルを9個設置し、測定を行う。また、印加電流を変化させた時の最

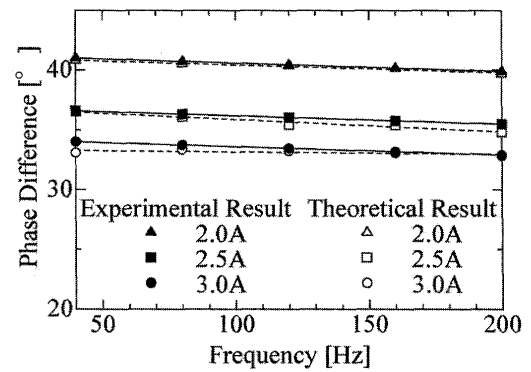


Fig. 6 Phase difference of magnetic flux density.

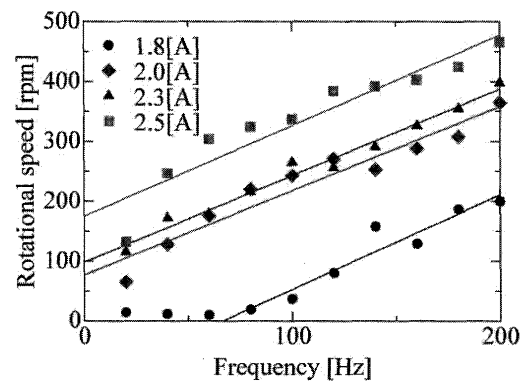


Fig. 7 Relationship of settling rotational speed and current frequency.

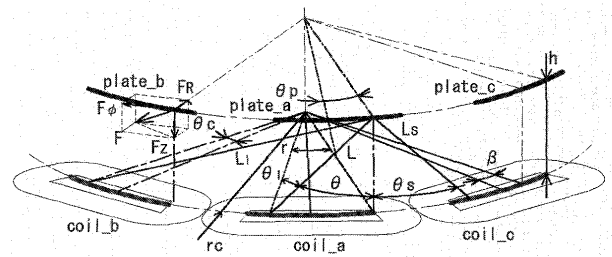


Fig. 8 The direction of force between driving coils and the magnetic material disc.

大回転数と交流電流の周波数との関係を最小二乗法で近似した直線と合わせて Fig. 7 に示す。Fig. 7 からトルクは回転磁場の磁場強度と回転周波数に依存していることがわかる。各印加電流の周波数と回転数のグラフの傾きはどれも同じであることが確認できる。このため回転数は磁場強度に対して線形であるといえる。また、印加電流 1.8A では、60Hz まで回転しなかった。これは発生したトルクは極めて小さく、回転抵抗がトルクよりも大きかったため、回転しなかったと考えられる。

トルク解析のモデル図を Fig. 8 に示す。本系は磁性

材料円板の磁化の位相差により、回転磁場と磁性材料円板の磁化ピークがずれ、これにより吸引力が発生し、回転力を得ると考えて解析を行う。駆動コイルの作る磁場のピークを  $q_{mc}$ 、磁性材料円板が回転磁場に最も強く磁化された位置を  $q_{mp}$  とすると、両者の吸引力は、クーロンの法則より、

$$dF = \frac{1}{4\pi\mu_0\mu} \frac{dq_{mc}dq_{mp}}{L^2} \quad (8)$$

ここで  $\mu_0$  は真空中の透磁率、 $\mu$  は磁性材料円板の比透磁率、 $L$  は駆動コイルの作る磁場のピーク  $dq_{mc}$  と磁性材料円板が回転磁場に最も強く磁化された位置  $dq_{mp}$  の距離である。今、駆動コイルの作る磁場のピーク  $q_{mc}$ 、磁性材料円板が回転磁場に最も強く磁化された位置  $q_{mp}$  の磁荷は、それぞれの駆動コイルの磁束密度  $B_{cz}$ 、磁性材料円板の磁束密度  $B_{pz}$  と面積  $A$  との積となるため

$$\begin{cases} q_{mc} = AB_{cz} \\ q_{mp} = AB_{pz} \end{cases} \quad (9)$$

となる。

ここで磁荷が存在する範囲を求めることとする。任意の時間における駆動コイルから発生する磁束密度分布を再現するために各組の駆動コイルにそれぞれ  $I_0 \sin \pi/2$ 、 $I_0 \sin(\pi/2 + 2\pi/3)$ 、 $I_0 \sin(\pi/2 + 4\pi/3)$  の定電流を印加し、駆動コイル上の一周分の磁束密度測定を行う。測定条件は印加電流  $I_0 = 2.5A$ 、駆動コイルから高さ 4mm の位置である。測定結果より、コイル中心付近の変動が少なく、この変動が少ない範囲はグラフからコイル中心を基準に約  $\pm 0.21\text{rad}$  ( $=\pm 12^\circ$ ) であることがわかった。これは台形コイルのコイル芯が存在する範囲とほぼ同じであるので、駆動コイル側はコイル中心から  $\pm 0.21\text{rad}$ 、磁性材料円板側はコイル中心から  $- \beta \pm 0.21\text{rad}$  の位置に磁荷が存在していると仮定し、解析を行う。またこの範囲での磁束密度の変動はほとんど存在しないため、解析では一定として計算を行うこととする。駆動コイルの中心と、駆動コイルが作る磁荷のある位置との角度を  $\theta_c$  と置き、磁性材料円板のコイル中心位置から位相差  $\beta$  ずれた位置を基準に、その点と磁性材料円板が作る磁荷のある位置との角度を  $\theta_p$  と置くと、距離  $L$  を決定することができる。ただし  $-0.21\text{rad} < \theta_c$ 、 $\theta_p < 0.21\text{rad}$  である。

$L$  については Fig. 8 の磁性材料円板の coil\_a, coil\_b, coil\_c により磁化した位置を plate\_a, plate\_b, plate\_c と置くと各磁性材料円板と駆動コイルの距離は磁性材

料円板と駆動コイルの空隙  $h$ 、コイル設置半径  $r_c$ 、コイル間角度  $\alpha$ 、位相  $\beta$  を用いて表すことができる。

$$\begin{cases} L = \sqrt{h^2 + 2r_c^2 \{1 - \cos(\beta + \theta_c + \theta_p)\}} \\ L_l = \sqrt{h^2 + 2r_c^2 \{1 - \cos(\alpha + \beta + \theta_c + \theta_p)\}} \\ L_s = \sqrt{h^2 + 2r_c^2 \{1 - \cos(\alpha - \beta + \theta_c + \theta_p)\}} \end{cases} \quad (10)$$

$L$ : plate\_a と coil\_a, plate\_b と coil\_b, plate\_c と coil\_c との距離

$L_l$ : plate\_a と coil\_b との距離

$L_s$ : plate\_a と coil\_c との距離

ここで、クーロンの法則から求める吸引力  $F$  は  $q_{mc}q_{mp}$  方向の力であるため軸垂直方向  $F_z$ 、軸半径方向  $F_R$ 、周方向  $F_\phi$  に分解すると

$$\begin{cases} F_z = F \cos \theta \\ F_\phi = F \sin \theta \cdot \sin \frac{\phi}{2} \\ F_R = F \sin \theta \cdot \cos \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (11)$$

となる。 $\phi$  は軸中心から見た磁性材料円板の磁荷と各駆動コイルの磁荷との角度であり、軸方向と直線  $L$ 、 $L_l$ 、 $L_s$  が作る角度  $\theta$ 、 $\theta_l$ 、 $\theta_s$  は

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{\sqrt{L^2 - h^2}}{L}, \quad \cos \theta = \frac{h}{L} \\ \sin \theta_l = \frac{\sqrt{L_l^2 - h^2}}{L_l}, \quad \cos \theta_l = \frac{h}{L_l} \\ \sin \theta_s = \frac{\sqrt{L_s^2 - h^2}}{L_s}, \quad \cos \theta_s = \frac{h}{L_s} \end{cases} \quad (12)$$

とする。このとき吸引力の分力のうち水平方向の力は合計すると 0 となる。駆動コイルと磁性材料円板の空隙を  $h$ 、両者の磁荷がある角度を  $\gamma$ 、 $L$  と垂線の角度を  $\theta$  とおくと求める吸引力の周方向の分力は

$$dF_\phi = dF \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \sin \theta \quad (13)$$

となるため、これを積分することで周方向に働く力を

$$F_\phi = \iint \frac{1}{4\pi\mu_0\mu L^2} \frac{\sqrt{L^2 - h^2}}{L} \sin(\gamma/2) dq_{mc} dq_{mp} \quad (14)$$

と仮定する。今、磁性材料円板の磁荷は磁化させたコイルの吸引力  $F_{\phi_n}$  とその両側のコイルの吸引力 ( $F_{\phi_{n-1}}$ 、 $F_{\phi_{n+1}}$ ) から力を受けるとすると、この力はそれぞれのコイルから発生するため 9 箇所から力を受けることとなる。これが単位時間当たり相対周波数  $f_l'$

の回数が作用すると、回転トルク  $T$  は

$$T = 9f_I' r_c (F_{\phi_{n-1}} + F_{\phi_n} + F_{\phi_{n+1}}) + a \quad (15)$$

と仮定ができる。ここで  $a$  は初動トルクである。ただし、 $f \geq 20\text{Hz}$  の場合であり直流域に関しては当てはまらない。この  $f$  の範囲は実験から同定した物である。ここで  $r_c$  はコイル設置半径である。Fig. 9 に印加電流 2.3A で駆動を行った際の、ロータ回転数 50rpm におけるトルクに回転抵抗値を加えた結果と、その解析値をともに示す。測定値と解析値はよく一致していることから、この仮定は有用であると考えられる。

### 3.3 駆動原理

本論では、アキシアル型モータの新しい駆動方法として、回転磁場による磁性材料円板の駆動方法の開発をした。その駆動原理はこれまでの計測結果および解析結果から次のようになる。

駆動コイルによって生成される磁場が最も強い点は、コイルの中心となる。一方、磁性材料円板の漏洩磁束密度分布では磁場の最も高い地点の極座標は位相差のため駆動コイルの中心とずれが生じる。この位相差は、ロータ円板が全ての駆動コイルによる合成磁場すなわち、着目する駆動コイルの磁場変動に対して、位相が進んだ磁場によって磁化されるためである。そのため、Fig. 10 左図のように位相差が存在しない場合は、磁性材料板に働く吸引力は軸方向のみであるが、Fig. 10 右図のように位相差がある場合は、軸方向成分、周方向成分および半径方向成分の力も働く。ここで、本系では、駆動コイルの配置から半径方向の力は打ち消しあうこととなるため、軸方向、周方向の力のみが作用することになる。この周方向吸引力によって回転トルクが発生する。また印加する磁場の周波数が増大すると共に、単位時間当たりの周方向吸引力が発生する回数が多くなることから回転トルクは、この周波数に比例する。さらに、周方向吸引力は、磁場の強度に比例するので、トルクはこれに対しても比例することとなる。

### 4 浮上力の計測と解析

本研究の駆動方法は磁性材料板に交流磁場を印加することで駆動を行うことができることを述べてきたが、交流磁場を印加する対象が磁性材料であるため、ロータと駆動コイル間には常に吸引力が働く。この吸引力を制御することで、ロータは浮上力を得る。そこで、

この浮上力の解析を行い、計測結果と比較することとした。

3.2 節より、磁性材料円板に働く吸引力の軸方向の分力は、式(11)より、

$$dF_z = dF \cos \theta \quad (16)$$

となるためこれを積分することで軸方向に働く力を

$$F_z = \iint \frac{1}{4\pi\mu_0\mu L^2} \frac{h}{L} dq_{mc} dq_{mp} \quad (17)$$

と仮定する。式(17)を用いて計算した結果と測定値と比較したものを Fig. 11 に示す。Fig. 11 より測定結果と

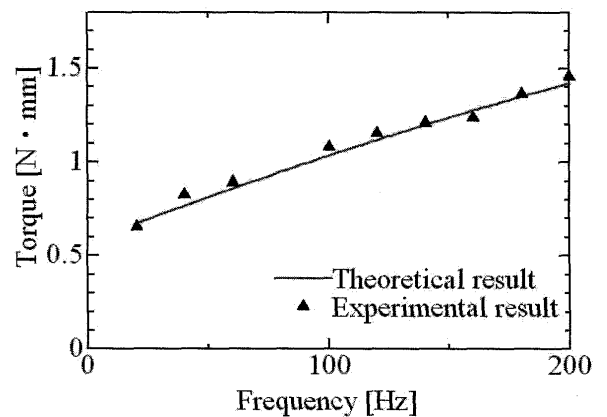


Fig. 9 Result of driving torque analysis at 50rpm in 2.3A.

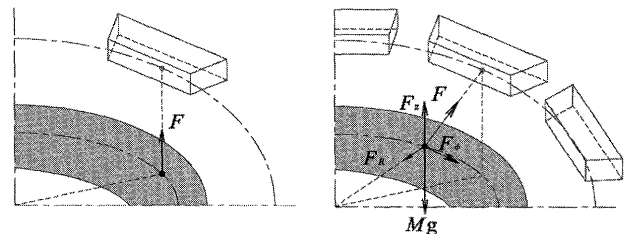


Fig. 10 The direction of force between driving coils and the magnetic material disc.

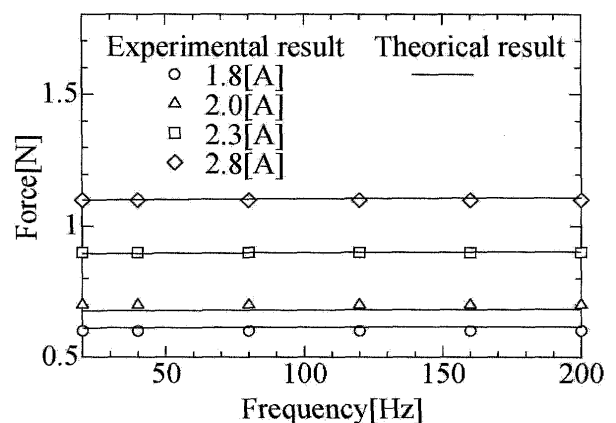


Fig. 11 Result of attraction force.

理論解析結果はほぼ一致していることから、この解析は有用であると考えられる。ここで、吸引力は交番磁界によって生じるため、印加する駆動電流に同期して変動することとなるが、本系では、3 相交流を用いているため、その吸引力は平滑化される。このため本論ではその平均値を用いることとした。

## 5 駆動浮上実験

### 5.1 吸引力の制御方法

本系の浮上力は、交流磁場の振幅によって変化する。また、磁気吸引力は距離の二乗に反比例するので、レーザ変位計により磁性材料円板の軸方向変位を計測し、目標高さとの偏差の二乗を印加電流の振幅にフィードバックすることにより、浮上制御を行う。本実験においてコイルに印加する電流の基本波形は正弦波であり、以下の式で表される。

$$I_{out} = (I + I_c) \sin(2\pi ft) \quad I_c = I_p + I_d \quad (18)$$

$$\begin{cases} I_p = k_p e^2 \\ I_d = k_d v \end{cases} \begin{cases} e > 0 & k_p > 0 \\ e < 0 & k_p < 0 \end{cases}$$

ここで、 $I$  はモータの駆動電流、 $k_p$  は P ゲイン、 $k_d$  は D ゲイン、 $e$  は目標値と計測値との偏差、 $v$  を軸方向の速度とする。浮上高さにおいては常に振動を起こす可能性があるため、このような制御を行うことでこの振動を抑制することとした。ただし  $I > I_c$  を常に満たすこととする。

### 5.2 実験及び解析結果

ロータの目標高さが軸方向へ 2mm、駆動コイルと磁性材料板の空隙 4mm、コイルへの印加電流の周波数 100Hz の条件における、ロータ高さの P 制御での時刻歴応答及び解析結果を Fig. 12 に、過渡応答を拡大したものを Fig. 14 示す。同様に、PD 制御時の各結果を Fig. 13, Fig. 15 に示す。実験では P 制御、PD 制御共に、回転数は 10 秒で約 180rpm まで上昇し、その後 800rpm まで駆動を行った。

運動解析は運動方程式を Runge-Kutta-Gill 法を用いて解くことにより行った。本研究では、非接触モータの前段階として、半径方向は拘束してあるため、軸方向のみの運動について考えると、磁性材料円板の運動方程式は、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_v \frac{dx}{dt} = F_z \quad (19)$$

ここで、 $m$  はロータの質量、 $x$  は軸方向変位、 $c_v$  は

減衰係数、 $F_z$  は軸方向の吸引力である。

Fig. 12 から、P 制御時の定常状態において実験値に振動がみられるが、これは測定面が変形していたため

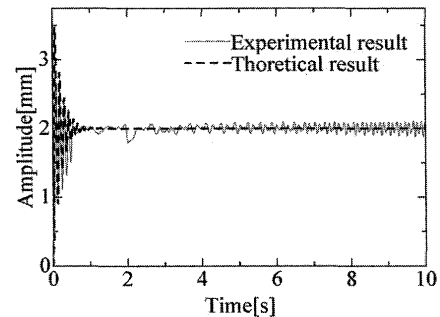


Fig. 12 Time response in vertical direction at the levitation position with P control.

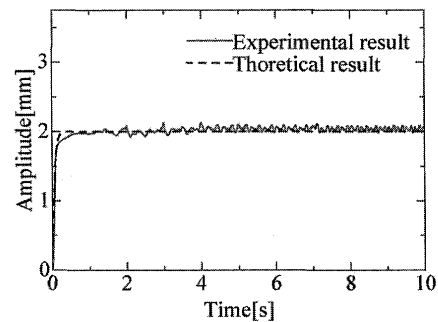


Fig. 13 Time response in vertical direction at the levitation position with PD control.

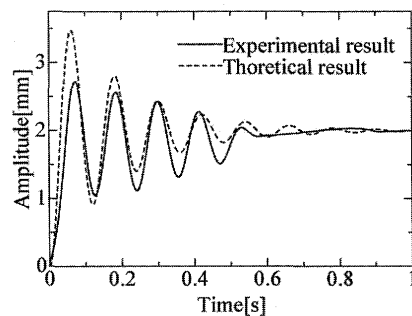


Fig. 14 Close up of time response in vertical direction at the levitation position with P control.

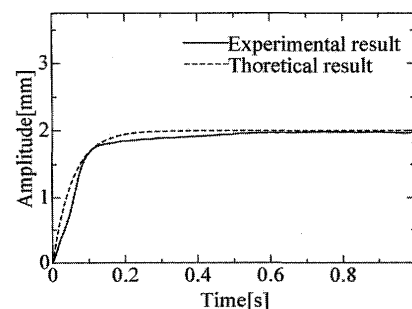


Fig. 15 Close up of time response in vertical direction at the levitation position with PD control.

ロータが回転することによって変位が生じたものと考えられる。また、実験値の振動が増大傾向にあるのは、この変形による振動をフィードバックするため発生すると考えられる。Fig. 14 の過渡状態においては実験値と解析値は定性的に一致している。

Fig. 13 の実験結果において目標位置付近での振動が確認出来る。この振動も測定面が変形していたためロータが回転することによって変位が生じたものである。また、Fig. 15 より理論解析結果と実験結果は定性的には良く一致している。このことから本浮上系の運動は、運動解析で示したような簡単な運動方程式で同定できることが確認された。以上より、本系は駆動コイルへの印加電流の振幅をコントロールすることで目標位置での安定浮上、駆動を行える系であることを確認した。

## 6 結言

本研究では駆動コイルによる磁気浮上機能を有した磁気浮上モータの開発を行い、位相差解析、吸引力解析、運動解析及び測定を行った。その内容を要約すると、

- (1) 磁性材料板の漏洩磁束密度測定と磁場解析により、駆動磁場と磁性材料板の磁化にずれが生じていることを確認した。また、トルク測定および解析から、回転トルクは印加される回転磁場の大きさ、周波数、位相差に依存していることが確認し、以上から提案した駆動方法の駆動原理を明らかにした。
- (2) 本研究の駆動方法が磁性材料円板に交流磁場を印加する点に着目し、この吸引力を制御する方法で駆動と同時に浮上を行うことを提案し、浮上位置をフィードバックすることにより安定した浮上と駆動を実現できることを実験的に確認した。

(2010年5月31日受付, 2010年7月19日再受付,  
2010年10月15日再々受付)

## 参考文献

- [1] I. Murakami, S. Tomaru, Y. Goto and T. Sekiguchi, Development of High-Tc Superconducting Levitation Compact Flywheel (Review), *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.17, No.1, 2009.
- [2] I. Murakami, Y. Mitsuura, M. Suto, Damping of Hi-Tc Superconducting Levitation with Magnetic Gradient Drive Motor (Review), *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.14, No.4, 2006.
- [3] H. Yamada, E. Miyazawa, K. bessyo, *Magnetics Fundamentals (Review)*, *Gakkensha*, 1975.
- [4] S. Sunakawa, *Electromagnetism*, *Iwanamishoten*, 1977.

- [5] T. Hyoudou, *Electromagnetism*, *Shokabo*, 1999.
- [6] K. Ohta, *Application of Magnetic*, *Kyoritsu*, 2000.
- [7] S. Kano, *Introduction to physics*, *Tokyokagakudouzin*, 2005.
- [8] S. Ueno, Y. Okada, Control of an Axially Levitated Rotating Motor, *Journal of the Japan Mechanical Engineers*, Vol.63, No.612, 1997.
- [9] N. Kurita, Y. Okada, R. Kondo, Development and Application of Flux Smoothing Magnetic Bearing, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.14, No.3, 2006.
- [10] Y. Okada, Vibration control of Magnetic Levitation and Flexible Rotor Bearing System, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.64, No.5, 1998.
- [11] Quang Dih NGUYEN and Satoshi UENO, Performance Comparison of Salient and Non-Salient Rotor Type Axial Gap Self-Bearing Motor, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.18, No.2, pp.85-91, 2010.