

磁路制御形磁気浮上の提案と基礎実験

Proposal and Basic Experimental Study of Flux Path Control Magnetic Suspension

水野 毅^{*1} (正員), 星野 博^{*2}, 高崎 正也^{*1} (正員), 石野 裕二^{*1} (正員)

Takeshi MIZUNO (Mem.), Hiroshi HOSHINO, Masaya TAKASAKI (Mem.), Yuji ISHINO

A new magnetic suspension system equipped with flux path control mechanisms was proposed in this paper. The flux path control mechanism has a ferromagnetic plate and an actuator for driving the plate. The lateral position of the plate, which is inserted into the gap between a permanent magnet and a suspended object (floator), is changed by the actuator. The flux from the permanent magnet to the floator and resultantly the attractive force acting on the floator are controlled with the mechanism. An experimental apparatus was fabricated which has two pairs of flux path control mechanisms. Stable suspension was realized in the apparatus. It was demonstrated that three-dimensional positioning is possible by the proposed magnetic suspension method.

Keywords: magnetic suspension, magnetic bearing, permanent magnet, flux path control.

1 緒言

磁気浮上は、磁石の力を利用して浮上対象物を非接触で支持する技術である。磁気浮上では、浮上側と支持側に用いる物質の組み合わせによって、いろいろな方式が可能である[1, 2]。この中で、最も広く使われているのが、電磁石が強磁性体を吸引する性質を利用する方式である。この方式では、電磁石の電流が一定のままでは不安定なので、浮上対象物の運動に応じて電流を変化させるというフィードバック制御を施して安定な浮上を達成する。また、通常、浮上対象物の重量を支持したり、制御性を高めるために、電磁石に一定電流を流すようにしていることが多いが、これによって定常的にジュール熱が発生することが利用上問題になることがある。この問題を解決する一つの方法として、一定の電流を流す代わりに永久磁石を電磁石と併用するゼロパワー磁気浮上が提案され、宇宙用機器や無集電型磁気浮上搬送装置に利用されている。

上記したように、磁石の吸引力を利用した通常の磁気浮上では、磁気回路中の起磁力を変化させることによって、安定化を達成している。これに対し、樋口・岡は、磁気回路中のリラクタンス（磁気抵抗）を制御するリラクタンス制御形磁気浮上を提案し、その吸引力を調整する方法をつぎの二つに分類している[3]。

連絡先: 水野 毅, 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255 埼玉大学大学院理工学研究科,

e-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

^{*1} 埼玉大学 ^{*2} 埼玉大学 (現在, ㈱コア勤務)

(1)磁気回路内にリラクタンス調整機構を設ける。

(2)浮上対象物との空隙の長さを制御する。

方法(1)を実現した例としては、上野らが磁歪材料と圧電材料とを複合したデバイスを用いた磁気浮上システムを提案している[4, 5]。このシステムでは、永久磁石と浮上対象物とから形成される磁路と並列な磁路に複合デバイスを挿入し、圧電材料による圧縮力によって磁路中の磁歪材料のリラクタンスを変化させて、吸引力を制御する。圧電素子を利用することによって、制御電磁石を用いる磁気浮上で問題となるジュール熱による損失をほとんど零にできることがメリットとして挙げられている[5]。

方法(2)を利用した磁気浮上システムの例としては、リニアアクチュエータを用いて永久磁石を駆動し、浮上対象物（強磁性体）とのギャップを制御する方式が提案され、アクチュエータとしてボイスコイルモータ[6]や圧電素子[7]を用いた装置によって完全非接触支持を実現している。この場合にもアクチュエータとして圧電素子を用いることによってジュール熱による損失を回避することができる。しかしながら、提案されている構成では、浮上対象物に作用する重力がそのままアクチュエータにかかるので、大きな質量の浮上対象物を支持する場合には、大出力のアクチュエータが必要となる。

本研究では、永久磁石の吸引力を利用した磁気浮上において、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、永久磁石から浮上対象物に到達す

る磁束の大きさ及び方向を調整する新しい方式の磁気浮上システムを提案する。このシステムでは、磁力源である永久磁石から浮上対象物に到達する磁路に対して、並列に磁路を設けて吸引力の調整をしていることになる。したがって、吸引力調整の原理としては、前述した磁歪材料の逆磁歪効果を利用した磁気浮上システム[4]の原理と類似している点もある。しかしながら、後述するように、永久磁石から浮上対象物に到達する磁束の大きさだけでなく、その空間的な配置も変えることができるので、本研究では磁路制御形磁気浮上と呼び、これまでの磁気浮上システムとは区別することにする。

本論文では、まず、提案する磁路制御形磁気浮上システムにおける浮上原理および水平方向の位置制御の原理を述べる。つぎに、提案したシステムが実現可能であることを実証するために試作した実験装置を紹介し、さらにこの装置を用いて行った実験結果について報告する。

2 磁路制御形磁気浮上の原理

Fig.1 に提案する磁路制御形磁気浮上機構の原理を示す。永久磁石の磁路を強磁性体内に形成し、磁路を制御する磁性体の開閉により磁路を制御する。磁路中に挿入する強磁性体は、磁気源である永久磁石から浮

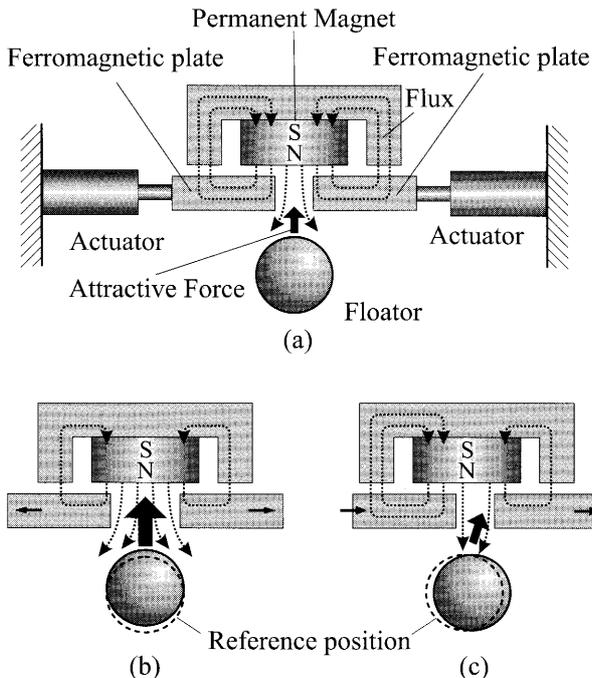


Fig.1 Principles of magnetic suspension using a flux path control mechanism.

上対象物へ磁束が到達するのを妨げる働きをするので、以下では「遮束板」と呼ぶことにする。Fig.1(a)のように一対の遮束板の間隔を狭くすると、遮束板を通る磁束が増加し、浮上対象物に作用する吸引力が減少する。逆に、Fig.1(b)のように遮束板の間隔を広くすると、遮束板を通る磁束が減少し、浮上対象物に作用する吸引力が増加する。このように、浮上対象物の位置や速度に応じて一対の遮束板の間隔を調整することで安定浮上を実現することが可能となる。

永久磁石あるいは常電導磁石の吸引力を利用した磁気浮上系では、通常、支持力と垂直な方向 (Fig.1では、水平方向) の運動に関しては、端効果などによって、アクティブに制御しなくても安定な系となる。Fig.1(c)は、この力を利用して、浮上対象物の水平方向の位置を調整する原理を示している。図に示すように、一対の遮束板を同じ方向 (同相) に動かすと、水平方向のつり合い位置も遮束板と同じ方向に移動するので、前述した復元力の作用によって、浮上対象物は新たなつり合い位置まで移動することになる。これが提案する磁気浮上機構による水平方向の位置制御の原理である。

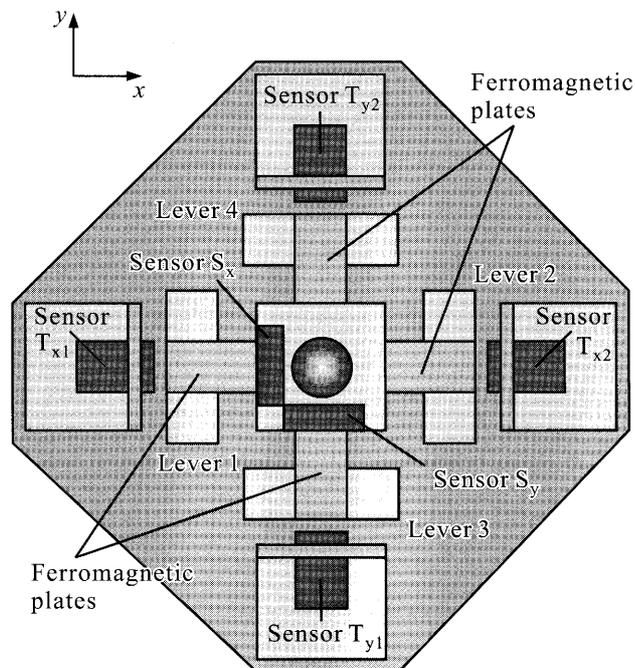
提案する方式の磁気浮上システムでは、遮束板の運動方向が吸引力を生み出す磁束の方向と直交しているため、遮束板を駆動するアクチュエータは、浮上対象物の重量を支持する力を発生する必要がない。したがって、発生力の小さなアクチュエータを用いて、質量の大きな物体の完全非接触支持を実現できる可能性がある。ただし、遮束板も永久磁石に引きつけられることになるので、遮束板の案内機構はこの影響を考慮したものが必要となる。

3 実験

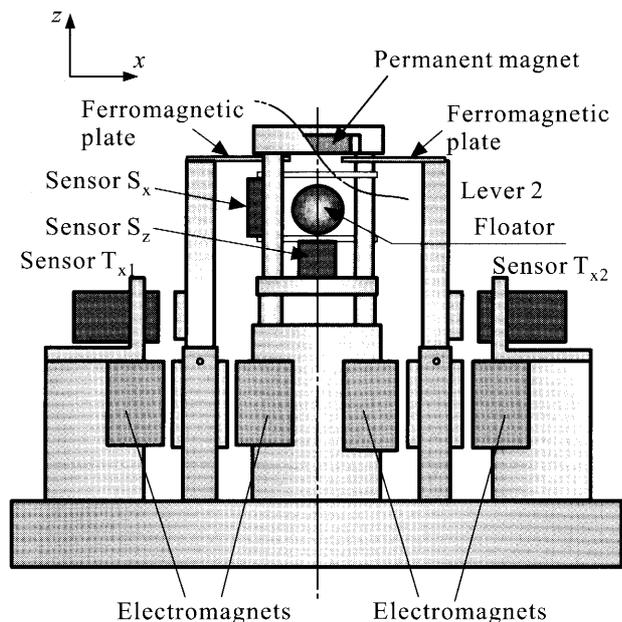
3.1 実験装置

提案する磁気浮上機構によって、安定な磁気浮上及び水平方向の位置決めを達成できることを実証するため、Fig.2 に概略を示すような磁路制御形磁気浮上実験装置を試作した。また、Fig.3 はその写真である。Fig.2(a)の上面図からわかるように、可変磁路機構が90度おきに4台配置されている。可変磁路機構は、遮束板とその運動を制御する機構とからなる。遮束板は、永久磁石と浮上対象物の鉄球の間に挿入されている。浮上対象物の運動に応じて、遮束板の開閉を調整することによって、浮上対象物の垂直方向 (z 軸方向) の並進運

動及び水平方向の2自由度 ($x \cdot y$ 軸方向) の並進運動の合計 3 自由度の運動を能動的に制御する。なお、Fig.2(b)で浮上対象物の上下にある薄い板状のものは、浮上対象物が永久磁石およびセンサ S_z に直接接触することを防ぐためのストッパである。また、遮束板の運動を制御する機構については後述する。



(a) Top view

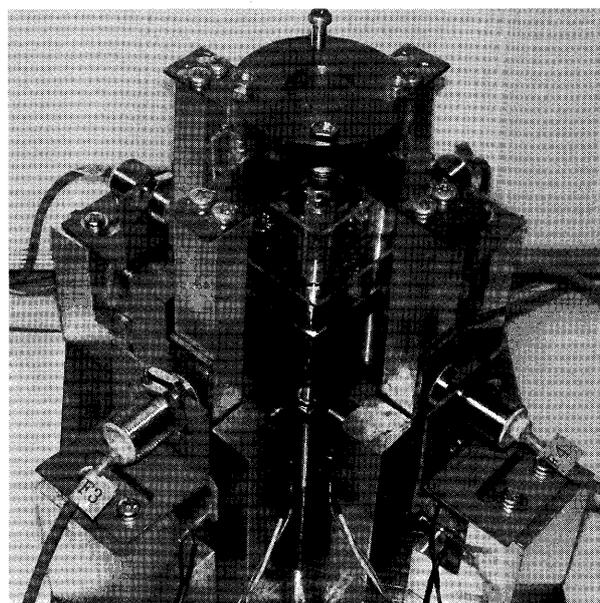


(b) Front cross-section view

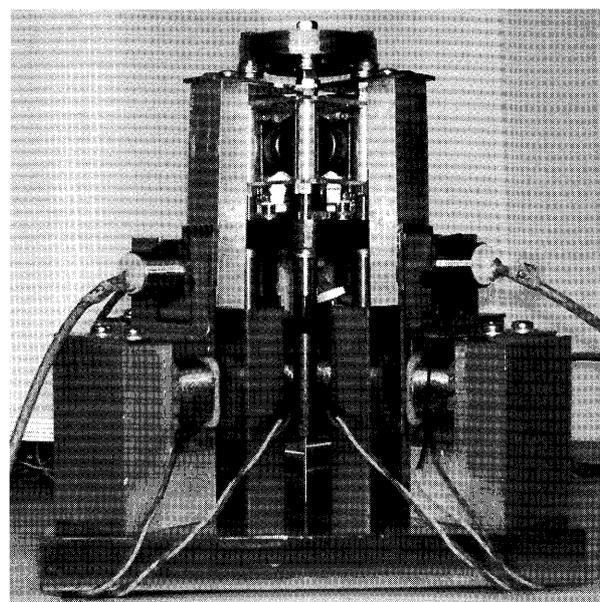
Fig.2 Schematic drawing of the manufactured experimental apparatus.

浮上対象物は、直径 30 mm、質量 110g の鉄球 (SS400 製)、永久磁石は、円筒状のネオジウム磁石 (直径: 40mm, 高さ: 10mm, 表面磁束密度: 380mT)、遮束板は、矩形状 (長さ: 55mm, 幅: 20mm, 厚さ: 2mm) の鉄板 (SS400 製) である。

各遮束板は球軸受によって支持されたレバー (長さ: 163mm, 幅: 20mm, 厚さ: 15mm) の上端に取り付けられており、それぞれのレバーの角変位を制御することによって遮蔽板の開閉を調整する。レバーの運



(a) Top perspective view



(b) Front perspective view

Fig.3 Photographs of the apparatus.

動を制御するアクチュエータとしては、電磁石を用いている。電磁石は、レバーの回転中心に関して遮束板と逆側 (Fig.2 では下側) に、レバーを挟み込むように2個配置されている。電磁石部でのレバーの変位は、この原理によって、遮束板を取り付けた位置では約6倍に拡大されており、遮束板の可動範囲は約±2.5[mm]となっている。遮束板が取付けられているレバーは、軽量化を図るため、電磁石の吸引力が作用する箇所以外はアルミ製としている。

浮上対象物の垂直方向の変位は、浮上対象物の下部に取付けた渦電流形変位センサ S_z によって検出している。以下では、その出力を s_z と表すことにする (他のセンサについても同様の記号を用いる)。浮上対象物の水平方向の変位は、水平方向に90度の角度をもって配置された渦電流形センサ S_x , S_y で検出している。また、各可変磁路機構において、レバーの角変位を渦電流形変位センサ T_{x1} , T_{y1} , T_{x2} , T_{y2} で計測している。

各センサの出力は、A/Dコンバータを介してDSPを核とするデジタルコントローラ (dSPACE社製・DS1104) に入力される。コントローラでは、次節で述べる制御則にしたがって制御入力を計算し、D/Aコンバータを介して、各電磁石を励磁するPWMアンプに出力する。

3.2 制御方式

本研究では、制御系の構成を

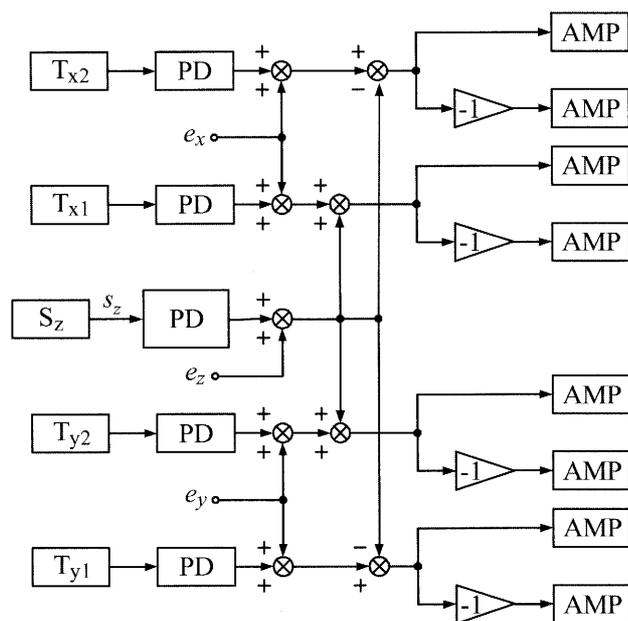


Fig.4 Block diagram of the control system.

- (1) レバー位置制御系
- (2) 浮上対象物の運動制御系の2層構造とした。

可変磁路機構は、電磁石をアクチュエータとしているので、開ループの状態では不安定な系となっている。そこで、PD制御によって、レバー位置制御系を安定化し、適度な剛性と減衰特性を持つようする。

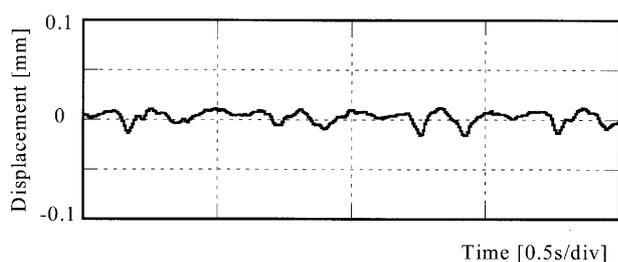
浮上対象物の運動に関しては、垂直 (z 軸) 方向には不安定、水平 (x 軸, y 軸) 方向には安定な系となっている。そこで、前者に関しては、変位の検出信号 s_z からPD補償回路によって安定化に必要な信号を生成し、この信号と z 軸方向の指令信号 e_z と合わせてレバー位置制御系へ入力する。後者に関しては、フィードバック制御は行わずに、フィードフォワード的に指令信号 e_x , e_y を与えることによって、水平方向の位置を調整することとした。

以上で述べた制御系の構成をまとめてブロック線図として Fig.4 に示す。なお、以下の実験では、PD制御のチューニングは、試行錯誤的に行った。具体的には、まず、レバー位置制御系において比例ゲインを大きくしていき、レバーが指令信号に対して遅れることなく追従する周波数帯域ができるだけ広くなるようにする。ただし、比例動作だけでは共振が顕著となるので、これを抑制するように微分動作を加える。つぎに、浮上対象物の z 方向の変位に合わせてレバーを動かすことによって、浮上体に復元力が作用するようにする。このときも、比例動作だけでは、浮上体が上下に振動してしまうので、微分動作を加えて振動を抑制し、安定な磁気浮上状態を実現する。

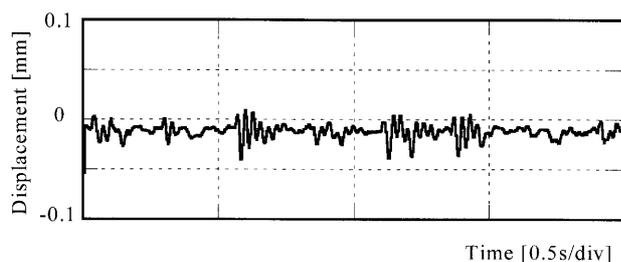
なお、浮上対象物を所定の位置に正確に保持するには積分動作を導入すべきであるが、本論文では、安定な磁気浮上の実現を主目的としているので、積分補償は用いていない。

3.3 実験結果

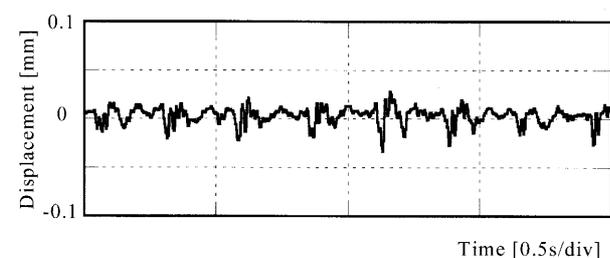
まず、 x 軸方向の二つの対向する遮束板の開閉によって、安定な磁気浮上を実現した結果を Fig.5 に示す。この実験では、制御の対象としていない y 方向の一对の遮束板は、それぞれ中心から9.2mmの位置に固定している (遮束板間の間隔は18.4mm)。この場合、磁気浮上を達成しているときの x 方向の遮束板の間隔は平均25.0mmで、中心から各遮束板までの距離は約12.5mmとなっている。Fig.5では、この平衡位置から遮束板が外側から中心に向かう方向を正として、レバ



(a) Floator



(b) Lever 1



(c) Lever 2

Fig.5 Motions of the floator and the levers when stable suspension is achieved.

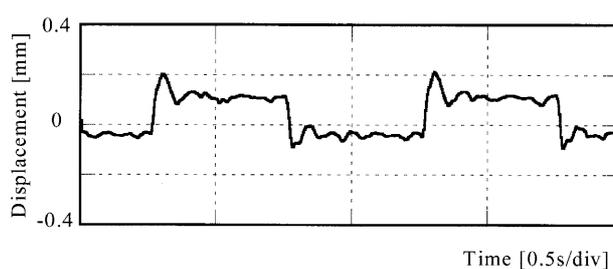
一の変位を表している。なお、以下に示す Fig.6 および Fig.7 のグラフにおいても、レバーの変位を同様に表している。

Fig.6 は、レバー位置制御系への指令値 e_z にステップ状の信号を与えたときの応答である。Fig.6 から、浮上対象物の変位と遮束板の開閉運動がよく対応していることがわかる。また、この結果から、遮束板の開度を変えることによって、浮上対象物の z 軸方向の位置を調整できることが確認できる。

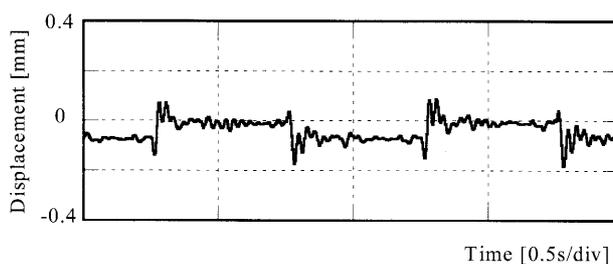
つぎに、二つの遮束板を同相に動かして、浮上対象物の x 軸方向の位置を変化させる実験を行った。その結果を Fig.7 に示す。この実験では、

$$e_x = 0.3 \sin \pi t \quad [\text{V}]$$

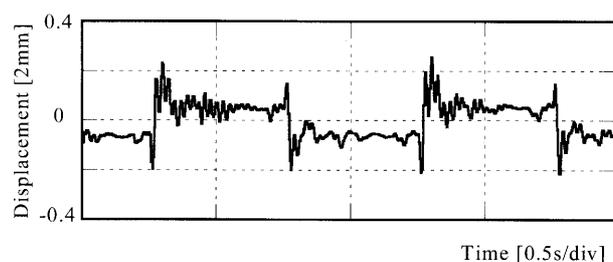
としている。また、前述したように制御の対象としない y 方向の一对の遮束板の間隔は 18.4mm と固定している。この結果から、二つの遮束板の位置を変え



(a) Floator



(b) Lever 1



(c) Lever 2

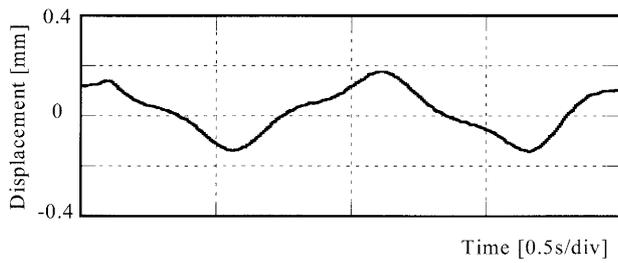
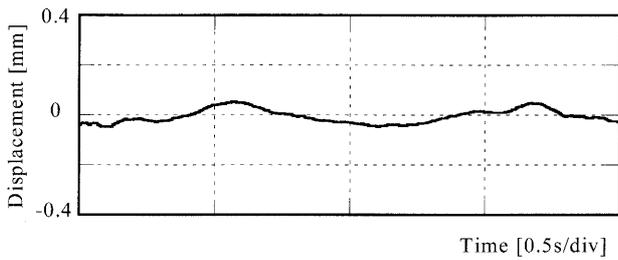
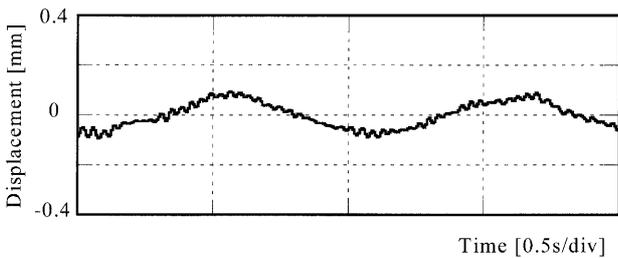
Fig.6 Step response.

ることによって、浮上対象物の水平方向の位置が調整できることが確認できる。ただし、浮上対象物の水平方向（この場合には x 方向）の変位に関してはフィードバックしていないので、浮上体の振動が重畳しているような応答となっている。また、水平方向だけではなく、垂直方向（ z 方向）の変位も変動している。このことから、水平方向の運動と垂直方向の運動とは連成していると考えられる。なお、浮上対象物の水平方向の位置を正確に設定するには、水平方向の変位についてもフィードバック制御を行い、かつ積分動作を導入すべきである。

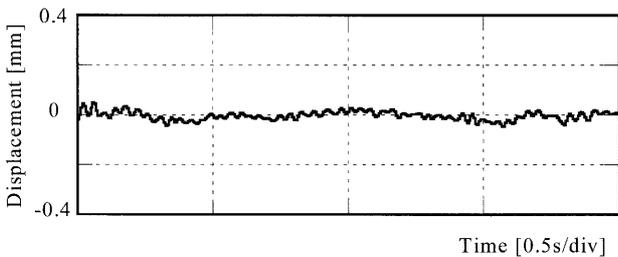
つぎに、 x - z 平面内で浮上対象物に閉軌道を描かせるため、

$$e_x = 0.3 \sin \pi t \quad [\text{V}], \quad e_z = 0.2 \cos \pi t \quad [\text{V}]$$

としたときの x - z 平面内での運動のリサージュ図を Fig.8 に示す。この結果から、二つの遮束板によって、浮上対象物の 2 次元的位置を積極的に変化させられ

(a) Displacement of the floator in the x -direction(b) Displacement of the floator in the z -direction

(c) Lever 1



(d) Lever 2

Fig.7 Response of the floator when sinusoidal signal is superimposed on the position control system of the levers in the x -direction.

ることがわかる。

Fig.9 は、 y 軸方向の 2 枚の対向する遮束板を動かして、同様の実験を行ったときのリサージュ図である。この実験では、レバー制御系に重畳する信号は、

$$e_y = 0.3 \sin \pi t \text{ [V]}, \quad e_z = 0.2 \cos \pi t \text{ [V]}$$

としている。また、制御の対象としていない x 方向の一对の遮束板は、それぞれ中心から 8.7mm の位置に固

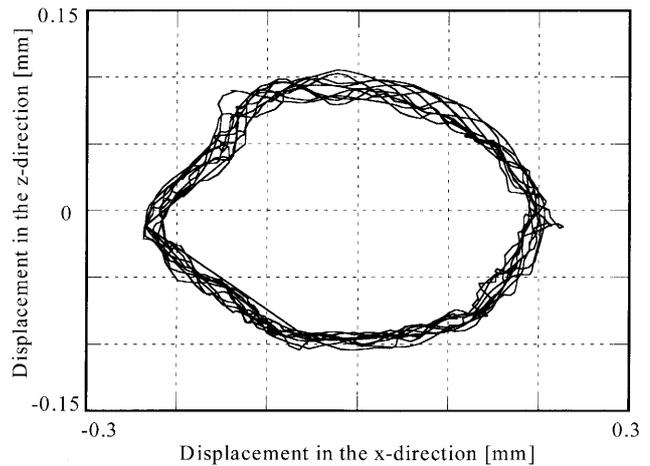


Fig.8 Motions of the floator when sinusoidal signal is superimposed on the position control system of the levers in the x -direction.

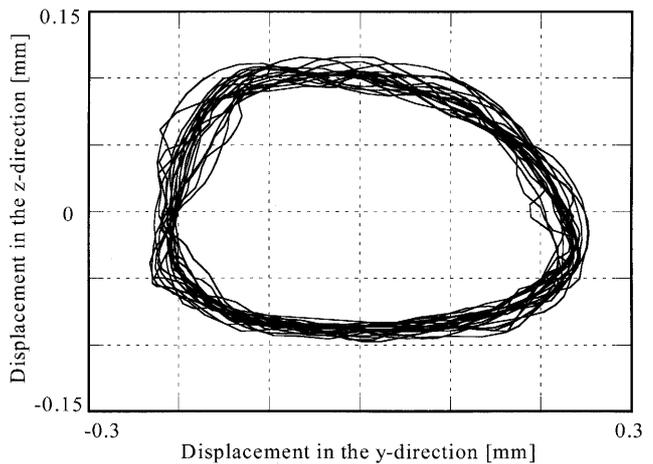


Fig.9 Motions of the floator when sinusoidal signal is added to the position control system of the levers in the y -direction.

定している（遮束板間の間隔は 17.4mm）。この場合、平衡状態における y 軸方向の一对の遮束板の間隔は、平均 27.1mm である。

これらの結果から、試作した磁路制御型磁気浮上装置において、制御対象物を安定に磁気浮上させ、かつその 3 次元的位置を積極的に変化させられることが確認できる。

4 あとがき

磁路を制御することで安定浮上を実現する磁気浮上方式を提案した。つぎに、試作した磁路制御型磁気浮上装置の概要について述べ、この装置において、実

際に磁気浮上を実現し、さらに浮上対象物の3次元的位置を積極的に変化させる実験結果を示した。

提案する磁気浮上機構では、遮束板の運動制御系が重要な役割を果たす。本研究では、アクチュエータとして電磁石を用いたが、ボイスコイルモータ[8,9]や圧電素子を利用することも可能である。また、浮上対象物の3次元位置制御を実現するのに4台の可変磁路機構を用いたが、3台の可変磁路機構でも実現することができる[8,9]。また、本研究では、浮上対象物の水平方向の変位も渦電流センサによって検出しているが、制御にはこの情報は用いていない。水平方向の変位に関してもフィードバック制御を実施すれば、3次元的位置を任意に設定できるようになると考えられる。

(2005年11月18日受付, 2006年9月6日再受付)

参考文献

- [1] Jayawant, B.V., *Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques*, Edard Arnold, pp.1-17, 1981.
- [2] 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会(編), *磁気浮上と磁気軸受*, コロナ社, pp.8-13, 1993.
- [3] 樋口俊郎, 岡宏一, *リラクタンス制御形磁気浮上システム—永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上機構*, 電気学会論文集, Vol. 113-D, No.8, pp.988-994, 1993.
- [4] Ueno, T., Qiu, J. and Tani, J., *Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect*, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.40, No.3, pp.1601-1605, 2004.
- [5] 上野俊幸, 樋口俊郎, *磁歪材料と圧電材料の積層体を用いた磁気力制御素子による零パワー磁気浮上制御*, 電気学会論文誌, Vol. 124 -D, pp. 724-729, 2004.
- [6] 岡宏一, 樋口俊郎, *永久磁石とリニアアクチュエータを用いた3自由度平板浮上システム*, 電気学会論文集, Vol. 115-D, No.3, pp.294-300, 1995.
- [7] 岡宏一, 樋口俊郎, 白石卓也, *永久磁石の運動制御による懸垂形磁気浮上機構*, 電気学会論文誌, Vol. 119-D, No.3, pp.291-297, 1999.
- [8] 平井雄三, 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, *可変磁路式磁気浮上に関する研究(第4報: Voice Coil Motor を用いた装置の試作)*, 第16回「電磁力関連のダイナミックシンポジウム」講演論文集, pp.241-244, 2004.
- [9] 水野毅, 平井雄三, 石野裕二, 高崎正也, *磁路制御形磁気浮上に関する研究(ボイスコイルモータを用いたシステムの開発)*, 日本機械学会論文集C編, Vol. 72, No. 721, pp.2869-2876, 2006.