

## 磁石の運動制御を利用した反発形磁気浮上機構\*

水野 毅<sup>\*1</sup>, 大内 泰平<sup>\*2</sup>  
石野 裕二<sup>\*3</sup>, 荒木 獻次<sup>\*1</sup>Repulsive Magnetic Levitation Systems  
Using Motion Control of MagnetsTakeshi MIZUNO, Taihei OUCHI,  
Yuji ISHINO and Kenji ARAKI

Repulsive magnetic levitation systems with magnets driven by actuators were studied in this paper. In one system, a levitation magnet was driven in the direction of repulsive force to control the position and vibration of the levitated object. In another, a levitation magnet was moved in the lateral directions to stabilize the system in the manner of an inverted pendulum. The first type was studied experimentally with an experimental setup using a magnetostrictive actuator. The damping characteristic was modified well by driving the actuator in proportion to the velocity of the levitated object. The I-PD control was adopted for obtaining desired characteristics of floating position control and active damping of vibration.

**Key Words:** Magnetic Bearing, Magnetic Levitation, Actuator, Permanent Magnet, Positioning, Magnetostrictive Actuator, I-PD control

## 1. まえがき

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となる<sup>1)</sup>。代表的な方式としては、

- ①常電導電磁石と強磁性体(吸引力を利用)
- ②永久磁石と永久磁石(反発力を利用)
- ③永久磁石と超電導体(マイスナー効果あるいはピン止め現象を利用)

が挙げられる。①は無制御では不安定であるので、制御回路を必要とするが、変位駆動を含めて多様な制御が可能である。これに対し、②、③は制御しなくても安定であるという利点を持つが、一般に減衰特性が悪い。また、浮上力の調整もできないので、単独では微小移動機能を実現できない。

いっぽう、磁気軸受と並ぶ代表的な非接触軸受である空気軸受において、支持用の静圧パッドを圧電素子によって駆動・制御することによって、浮上方向の位置・振動の精密制御を実現した例が報告されている<sup>2)</sup>。また、吸引制御形磁気浮上システムにおいて、浮上体の運動に応じて支持側の磁石の位置を変化させることによって、安定な磁気浮

上を実現した例が報告されている<sup>3)</sup>。これらに共通するのは、軸受の支持部(あるいは浮上部)をアクチュエータによって支持・駆動することによって、能動制御を実現していることである。

本研究では、このような点に着目して、上述の②、③の形式の磁気浮上において、支持側あるいは浮上側磁石をリニアアクチュエータで駆動・支持する形式の磁気浮上機構を提案する。この機構では、反発力の働く方向にアクチュエータを挿入することによって、浮上方向の位置と振動の精密制御が可能となる。また、②の永久磁石反発形磁気浮上では、反発力と垂直な方向(横ずれ方向)には不安定な系となるが、この方向にアクチュエータを挿入すると、倒立振り子と同じ原理によって安定化することが可能となることを指摘する。さらに、浮上方向にアクチュエータを挿入する形式の磁気浮上機構に関しては、超磁歪材をアクチュエータとして用いた基礎実験装置を試作し、浮上方向の位置と振動の制御を試みた結果を示す。

## 2. 基本原理

## 2. 1 微小変位機能を持つ反発形磁気浮上機構

提案する機構の一例を図1(a)に示す。これは、永久磁石反発形磁気浮上機構の支持側磁石と直列にリニアアクチュエータを挿入し、非接触性を損なうことなく、浮上方向の位置と振動の制御を可能としたものである。リニアアクチュエータとしては、必要とする可動範囲、応答速度、機械的強度などに応じて、

\* 1994年7月13日 第6回電磁気力関連のダイナミックシミュレーションにおいて講演, 原稿受付 1995年1月12日.

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保 255).

<sup>\*2</sup> 三桜工業(株) (〒306 古河市鴻巣 758).

<sup>\*3</sup> 埼玉大学工学部.

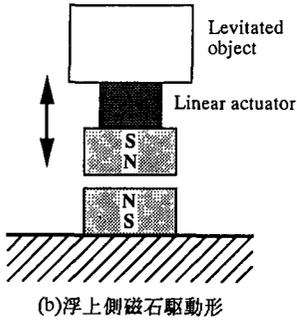
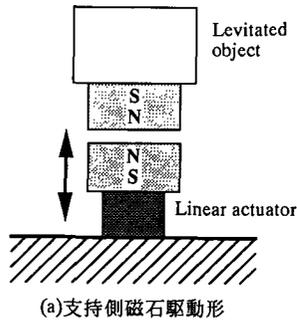


図1 位置・振動制御機能を備えた永久磁石反発形磁気浮上機構

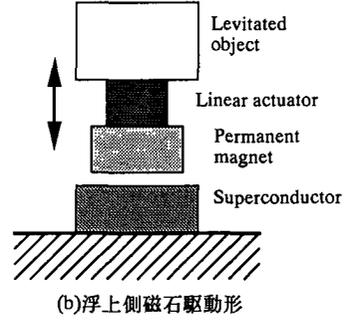
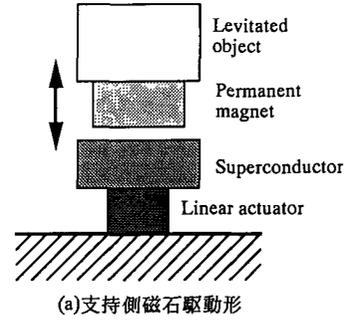


図2 位置・振動制御機能を備えた超電導磁気浮上機構

- ①圧電アクチュエータ
- ②磁歪アクチュエータ
- ③ボイスコイルモータ

などを選択的にあるいは組み合わせて利用する。また、図1(b)に示すように、浮上側にリニアアクチュエータを挿入しても、浮上体（正確には、支持しようとする質量部）の運動の制御が可能となる。この場合に浮上体への配線避けたいときには、磁歪アクチュエータを用いて、駆動用コイルをステータ側におく構造とすればよい。

以上のような機構は、超電導方式の磁気浮上にも適用することが可能である（図2）。超電導体を利用すると、全方向無接触、無制御の磁気浮上が実現できるが、精密機構に応用するには、微小変位機能が不可欠となる。図2に示した機構において、アクチュエータとして圧電素子を用いれば発熱の問題もなく、高い保持・位置決め精度を実現することができる。

2. 2 永久磁石反発形磁気浮上機構の横ずれ方向の安定化

永久磁石間の反発力を利用する浮上機構では、反発力の働く方向と直角な方向（横ずれ方向）には不安定な系になる。図3に、支持側磁石をリニアアクチュエータによって駆動することによって、この方向の運動を安定化する機構を示す。この機構の動作原理は、何もしないと平衡点から横方向にずれていってしまう浮上体を、その動きに基づい

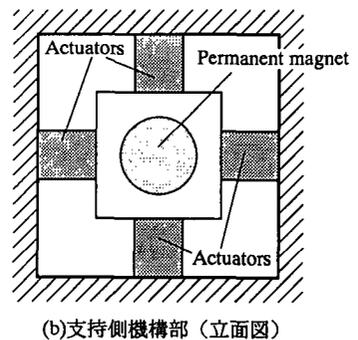
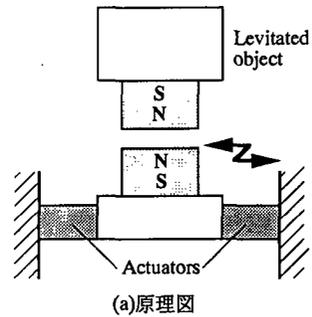


図3 支持側磁石の運動を利用した横ずれ方向の安定化

て支持側の永久磁石を動かすことによって、ずれていかないようにするというものである。この機構は、支点の左右の動きによって棒が倒れないようにする倒立振り子と類似した動作原理を持っている。

反発力による受動的な浮上と横ずれ方向の安定化のための能動的な支持の組み合わせによって、いろいろな形式の浮上機構が可能となる。図3のような構成の場合、浮上体は2次元的な横すべり運動をするので、系全体を安定化するには、支持側永久磁石を平面的に動かさなければならない (b)参照)。このような運動を実現するには、駆動機構にかなりの工夫を要する。図4は、回転体を支持する磁気軸受に提案する機構を利用したもので、半径方向の4自由度の運動を永久磁石の反発力によって受動的に支持し、回転軸方向の1自由度の並進運動を支持側磁石の位置を制御することによって安定化している。このような構成では、1自由度の運動だけを能動的に制御すればよいので、実現が容易である。この場合にアクチュエータとして圧電素子を用いると、駆動用コイルを巻く必要がないので、小型・コンパクトな非接触浮上機構となり、マイクロメカニズムへの応用が期待できる。

### 3. モデル化と制御系の設計

#### 3.1 基本モデル

以下では、図1(a)の構成の磁気浮上機構についての基本方程式を導出する。図5に示すように、アクチュエータの駆動による支持側の磁石の変位を $z_b$ 、浮上部の変位を $z_a$ とし、永久磁石間に作用する反発力を減衰のないバネで近似すると、浮上部の運動は、次式のように表される。

$$m\ddot{z}_a = k_z(z_b - z_a) + p_z(t) \quad (1)$$

$m$  : 浮上部の質量

$k_z$  : 浮上方向のバネ定数

$p_z$  : 浮上体に作用する外乱力 ( $z$ 成分)

アクチュエータは、駆動回路への入力信号と変位とがほぼ比例するように駆動されているとする。すなわち、駆動回路への入力を $u_z$ とすると、つぎのような関係が成立する。

$$z_b(t) = k_a u_z(t) \quad (2)$$

$k_a$  : 駆動機構部の伝達関数 (定数)

式(2)を式(1)に代入すると、次式が得られる。

$$m\ddot{z}_a + k_z z_a = k_z k_a u_z + p_z(t) \quad (3)$$

なお、ここでは支持側磁石の質量が小さく、その位置がアクチュエータによって位相遅れなどを生じることなく制御できているが、対象としている系は、厳密には支持側磁石部の質量と浮上体とが連結した2自由度の振動系であるので、アクチュエータや駆動回路などの条件によっては2自由度振動系としての取扱いが必要となる<sup>3)</sup>。

#### 3.2 制御方法

ここでは、浮上体の変位を検出し、フィードバックしてアクチュエータの伸びを変化させて、浮上体の位置の補正

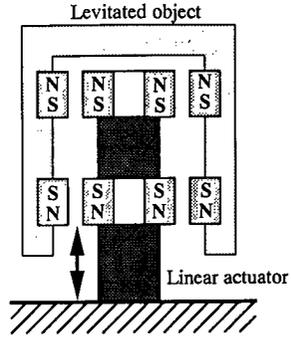


図4 支持側磁石の運動による横ずれ方向の安定化を利用した1軸制御形磁気軸受

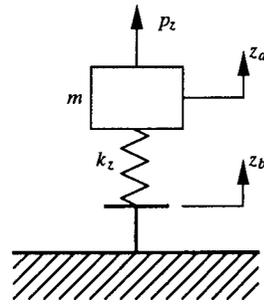


図5 基本モデル (図1(a)の機構に対応)

および制振を行う場合の制御系設計について述べる。

浮上特性を改善する場合に基本となるのはPD制御である。この場合には、制御入力は次式のように定められる。

$$u_z(t) = -(p_d z_a(t) + p_v \dot{z}_a(t)) \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入すると次式が得られる。

$$m\ddot{z}_a + k_z k_a p_v \dot{z}_a + k_z (k_a p_d + 1) z_a = p_z(t) \quad (5)$$

式(5)から、変位、速度のフィードバックによって剛性、減衰特性を調整できることがわかる。

精度のよい位置制御を行うためには積分補償を導入する必要がある。実用的にはPID制御が広く用いられている。また、近年、類型の制御方法としてI-PD制御系が提案されている<sup>4)</sup>。PID制御が縦続補償だけを用いるのに対し、I-PD制御は、フィードバック補償(PD)によって安定性と速応性を達成し、縦続補償(I)によって定常偏差を零にするもので、PID制御系に比べて外乱に強いことが指摘されている<sup>5)</sup>。本論文では、このI-PD制御を適用する。制御入力は次式のように定められる。

$$u_z(t) = p_i \int (z_r(t) - z_a(t)) dt - p_d z_a(t) - p_v \dot{z}_a(t) \quad (6)$$

$z_r(t)$  : 目標値

式(6)を式(3)に代入し、伝達関数を用いて動特性を表わすと、次式ようになる。

$$Z_a(s) = \frac{k_z k_a p_i}{ms^3 + k_z k_a p_v s^2 + k_z(k_a p_d + 1)s + k_z k_a p_i} Z_r(s) + \frac{s}{ms^3 + k_z k_a p_v s^2 + k_z(k_a p_d + 1)s + k_z k_a p_i} P_z(s) \quad (7)$$

式(7)から、一定の目標値に対しては、ステップ状の外乱が作用したとしても、定常偏差が零になることがわかる。さらに、制御系が適切な減衰特性を持つようにするため、目標値伝達関数(=  $Z_a(s)/Z_r(s)$ )が、例えばつぎのような伝達関数<sup>4)</sup>と一致するように、各フィードバック係数を定めることにする。

$$G_m(s) = \frac{1}{1 + \sigma s + 0.5\sigma^2 s^2 + 0.15\sigma^3 s^3} \quad (8)$$

$\sigma$ : 立ち上がり時間を指定するパラメータ

式(8)と、式(7)の右辺第1項とを比較することによって、次式が得られる。

$$p_i = \frac{m}{0.15\sigma^3 k_a k_z}, \quad p_v = 0.5\sigma^2 p_i, \quad p_d = \sigma p_i - \frac{1}{k_a} \quad (9)$$

また、用途によっては精度がそれほど必要でない場合もある。永久磁石反発形磁気浮上機構では、浮上方向については安定な系であるので、位置決め制御にクローズドループ制御だけでなく、アクチュエータの変位機能をそのまま利用したオープンループ制御も利用することができる。特に、微小変位制御素子として活発に利用されている圧電素子や磁歪素子などの固体アクチュエータを利用する場合には、駆動回路を工夫したり、使用温度環境を整えることによって、オープンループ制御でもかなり高い分解能の変位量を得ることが期待できる<sup>6,7)</sup>。

## 4. 実験

### 4.1 実験装置

提案した機構の基本特性を把握するために、試作した実験装置の概略を図6に示す。これは、図1に示す方式において、アクチュエータとして超磁歪素子を用いたものである。

超磁歪材料は、従来の磁歪材料の100~1000倍と非常に大きな磁歪を示し、圧電素子に比較して周波数特性で劣るものの大出力で大変位が得られるので、近年アクチュエータへの応用が試みられている<sup>7,8)</sup>。

本実験で使用しているのは、Tb-Dy-Fe系の磁歪材料である。磁歪材の周りにはコイル(500巻き)を配置し、コイル電流によって磁界の強さを調整し、磁歪材を伸縮させる。磁歪材の周りにはコイル(500巻き)を配置し、コイル電流によって磁界の強さを調整し、磁歪材を伸縮させる。試作した装置では、永久磁石およびコイルのバイアス電流によって磁歪材に予めバイアス磁束を与えている。また、コイルの励磁回路は、電流フィードバックゲインを大

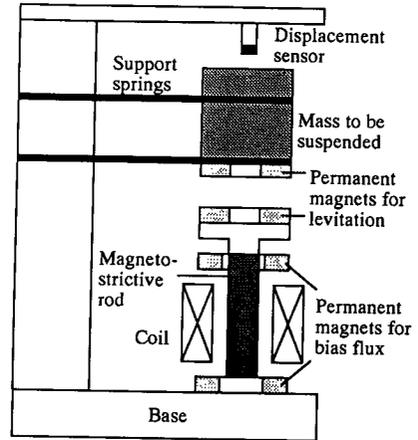
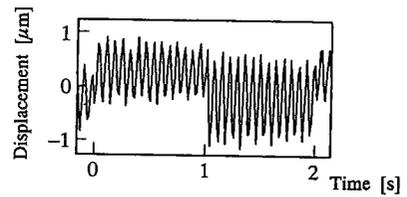
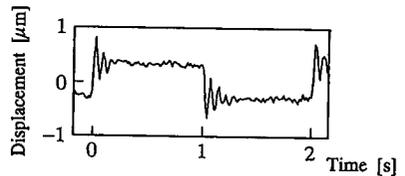


図6 実験装置



(a)無制御の場合



(b)速度フィードバックを施した場合  
( $p_v = 2.6 \times 10^3$  [Vs/m])

図7 浮上系のステップ外乱に対する応答

きくことによって電流出力形アンプとして動作するようにしている。したがって、平衡点の近傍では磁歪材の伸びと励磁回路への入力電圧とはほぼ比例し、近似的に式(2)で表される関係が成立している。

本実験では、提案した機構によって浮上方向の振動および位置の精密制御を実現することを目的としたため、平行板バネで浮上方向以外の浮上体の運動を拘束した。この場合、板バネによる復元力のため、浮上体の運動は、次式によって記述されることになる(式(3)参照)。

$$m\ddot{z}_a + (k_z + k_s)z_a = k_z k_a u_z + p_z(t) \quad (10)$$

$k_s$ : 板バネのバネ定数

浮上体の変位は、静電容量型変位計によって検出している。なお、装置の諸元は以下のとおりである。

$$m = 0.61 \text{ [kg]}, \quad k_a = 6.7 \times 10^{-6} \text{ [m/V]} \\ k_z = 7.1 \times 10^2 \text{ [N/m]}, \quad k_s = 13.2 \times 10^2 \text{ [N/m]}$$

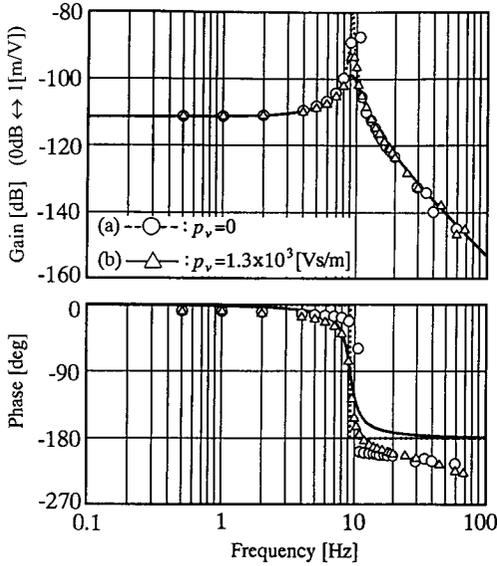


図8 浮上系の外乱に対する周波数応答  
(速度フィードバックの効果;  $p_d=0$ )

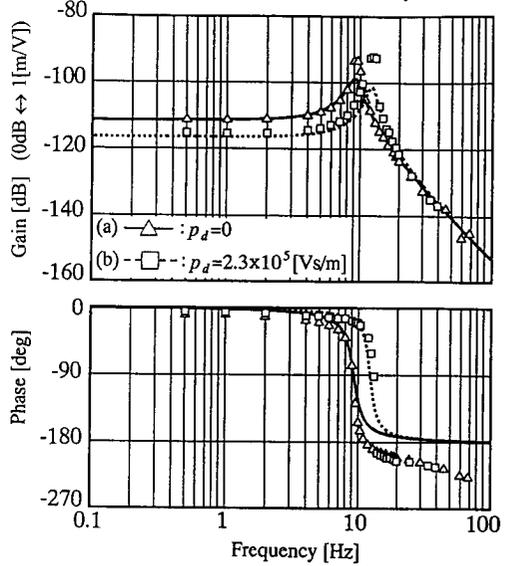


図9 浮上系の外乱に対する周波数応答  
(変位フィードバックの効果;  $p_v=1.3 \times 10^3$  [Vs/m])

4. 2 実験結果

最初に、PD制御系の応答を示す。図7では、無制御の場合と速度フィードバックを施した場合のステップ状外乱に対する応答を比較している。外乱は、PD補償回路の出力信号にステップ信号を重ね合わせた信号を駆動回路へ入力することによって発生させている。ここでは、浮上体のステップ幅が約 $0.7 \mu\text{m}$ となるように調整している。速度フィードバックの大きさは、つぎのように設定した。

$$p_v = 2.6 \times 10^3 \text{ [Vs/m]}$$

図から、速度フィードバックによって、振動成分の減衰係数を大きくし、過渡応答特性を改善できることがわかる。

図8、図9は、外乱に対する周波数応答の計算値(実線または点線で示す)および測定結果(○, △, □で示す)である。これらの図では、入力をPD補償回路に重畳する正弦波信号[V], 出力を浮上体の変位[m]としている。

図8では、

(a)無制御の場合:  $p_d=0, p_v=0$

(b)速度フィードバックを施した場合:

$$p_d = 0, p_v = 1.2 \times 10^3 \text{ [Vs/m]}$$

とを比較している。ただし、図8(a)において、無制御の場合には、共振点(9.2Hz)では、浮上体の振幅が過大となったため、実験値は省かれている。この結果からも、速度フィードバックによって浮上系の減衰特性を改善できることが確認できる。

図9では、

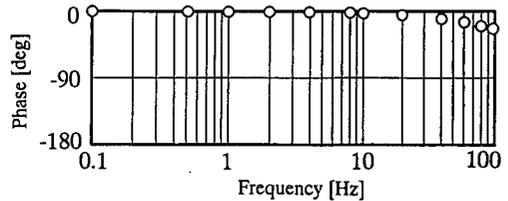
(a)速度フィードバックだけを施した場合:

$$p_d = 0, p_v = 1.2 \times 10^3 \text{ [Vs/m]}$$

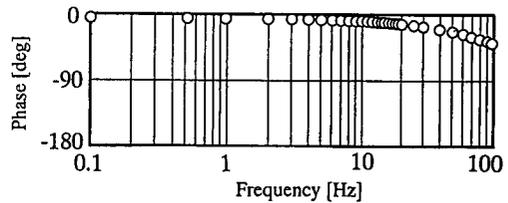
(b)さらに変位フィードバックを施した場合:

$$p_d = 2.3 \times 10^5 \text{ [Vs/m]}, p_v = 1.2 \times 10^3 \text{ [Vs/m]}$$

とを比較している。この結果から、変位フィードバックに



(a)励磁回路



(b)アクチュエータ

図10 励磁回路およびアクチュエータの周波数応答

よって浮上系の剛性を変化させ、固有振動数を調整できることがわかる。

これらの周波数応答の測定結果は、数学モデルに基づいて求めた計算値と比較的によく一致しているが、浮上系の共振周波数(約10Hz)より高い周波数で、位相遅れが $180[\text{deg}]$ より大きくなる傾向がある。この原因を調べるために、実験装置の浮上部を取り除いた状態で、励磁回路への入力信号に対する

(a)コイル電流

(b)アクチュエータの変位

の周波数応答を測定した結果を図10に示す。図10(a)から、電流出力形アンプを用いているにもかかわらず、100Hzで約25[deg]の位相遅れが生じていることがわかる。これは、励磁回路への印加電圧が制約されているため、コイルのインダクタンスの影響が現れているためである。注目すべきことは、磁界変化に対する磁歪現象の発現は $\mu\text{s}$ オーダーと言われている<sup>9)</sup>にもかかわらず、アクチュエータの変位の位相遅れは、100Hzで約45[deg]とさらに大きくなっていることである (b)参照)。この原因は、使用した実験装置では、閉磁路を構成するヨークの材料として一般構造用圧延鋼材 (SS400) を用いており、この中を磁界の変化を妨げる方向に渦電流が流れるため、コイル電流の変化に対して磁界の変化が遅れるためではないかと考えられる。

つぎに、I-PD制御系のステップ応答 (指令値のステップ幅:  $2\mu\text{m}$ ) を図11に示す。立ち上がり時間は、

$$\sigma = 45\text{msec}$$

と設定している。これらの図から、ほぼ設定した時間で立ち上がり、良好な減衰特性を持って、指令値に収束していることがわかる。これは、図12に示した周波数応答の測定結果からも確認できる。

以上の結果から、提案する機構によって、浮上体の振動および位置の精密制御が可能であることがわかる。

## 5. あとがき

本論文の結果は以下のようにまとめられる。

(1) 支持側 (あるいは浮上側) 磁石をリニアアクチュエータによって駆動・支持する方式の反発形磁気浮上機構を提案した。

(2) リニアアクチュエータを反発力の方向に挿入することによって、浮上体の浮上方向の振動・位置の制御が可能となることを指摘した。

(3) 永久磁石反発形磁気浮上機構において、支持側磁石の位置を、浮上体の横ずれ方向の運動に合わせて変化させることによって、この方向の運動を安定化することができることを指摘した。

(4) (2) の形式の磁気浮上機構については、超磁歪アクチュエータを用いた基礎実験装置によって、実際に浮上方向の位置・振動の制御を実現できることを確認した。

なお、横ずれ方向の運動の能動制御による安定化についても、試作した実験装置において実現に成功している<sup>10)</sup>

## 謝辞

実験装置の製作にあたってご助力をいただいた平成4年度埼玉大学卒論生佐藤一征君 (現、長瀬産業 (株) 勤務) に感謝の意を表す。

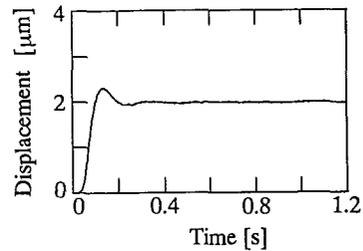


図11 I-PD制御系のステップ応答

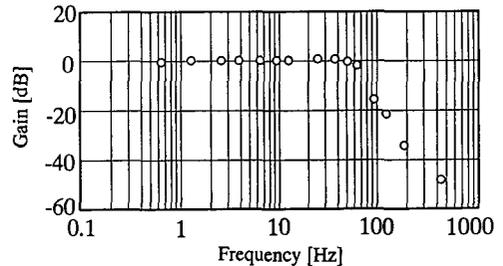


図12 I-PD制御系の指令信号に対する周波数応答

## 参考文献

- (1) 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, (1993), 8, コロナ社.
- (2) 渡辺, 青山, 下河辺: 能動空気軸受—浮上方向の位置と振動の超精密制御—, 精密工学会誌, 54-2(1988), 329.
- (3) 樋口, 岡: 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—, 電気学会論文誌D, 113D-8(1993), 988.
- (4) 北森: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計, 計測自動制御学会論文集, 15-4(1979), 549.
- (5) 原: P I D形制御系とI-PD形制御系の特性比較と設計指針, 計測自動制御学会論文集, 20-8(1984), 691.
- (6) 内野: 圧電/電歪アクチュエータ, (1986), 103, 森北出版(株).
- (7) 江田, 小野間, 佐橋, 小林: 超磁歪アクチュエータに関する研究—大出力・超精密位置決め装置の開発—, 精密工学会誌, 57-3(1991), 532.
- (8) 江田, 佐橋, 小林: 超磁歪に関する研究 (第1報) —超磁歪材料 $RFey$  ( $R=Tb, Dy$ )のアクチュエータとしての性能—, 精密工学会誌, 56-2(1990), 388.
- (9) 小林, 酒井: 超磁歪材料とアクチュエータへの応用, 精密工学会誌, 60-12(1994), 1695.
- (10) 大内: 固体アクチュエータを利用した永久磁石反発形磁気浮上機構の開発, 平成5年度埼玉大学大学院理工学研究科修士論文(1994).