

セルフセンシング磁気軸受を利用した 磁気浮上リニア搬送装置の開発

(研究課題番号 05650224)

平成6年度科学研究費補助金(一般研究(C))

研究成果報告書



平成7年3月

研究代表者 水野 毅
(埼玉大学工学部助教授)

目次

A. 研究組織	1
B. 研究経費	1
C. 研究発表	1
1. 学会誌など	1
2. 口頭発表	1
3. 印刷物	2
D. 研究内容	3
1. まえがき	3
2. 基本構想	4
2. 1 磁気浮上の原理	4
2. 2 リニア搬送装置の分類	4
2. 3 開発する搬送装置の基本構想	4
3. セルフセンシング磁気軸受の原理	6
3. 1 基本モデル	6
3. 2 制御系の設計	7
4. 塊状磁極を有する磁気軸受におけるセルフセンシング磁気浮上	9
4. 1 塊状磁極について	9
4. 2 モデル化	9
4. 3 制御系の設計	12
5. 実験装置	16
5. 1 装置の概略	16
5. 2 軸受部	16
5. 3 制御回路部	16
5. 4 アンプ	17
6. 実験結果	21
6. 1 パラメータの同定	21
6. 2 浮上実験	22
7. あとがき	27
E. 主要論文別刷	28

A. 研究組織

研究代表者：

水野 毅 (埼玉大学工学部 助教授)

研究分担者：

ハネス プロイレル (東京大学生産技術研究所寄付研究部門 客員助教授
期間：平成5年度)

B. 研究経費

平成5年度	1, 700千円
平成6年度	400千円
合計	2, 100千円

C. 研究発表

1. 学会誌など

- (1) MIZUNO, T. and BLEULER, H.: Self-Sensing Magnetic Bearing Control System Design Using the Geometric Approach, Control Engineering Practice (to appear).

2. 口頭発表

- (1) MIZUNO, T. and BLEULER, H.: A Geometric Approach to Control System Design of Self-Sensing Magnetic Bearings, Preprints of papers, IFAC 12th World Congress, Vol. 4, pp. 517-522 (1993).
- (2) 水野, プロイレル, クチェラ, 小松: 塊状コアを用いた磁気軸受の特性解析と変位センサレス浮上の検討, 第6回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, pp. 517-520 (1994).
- (3) 水野, プロイレル, 田中, 橋本, 原島, 上山: センサレス磁気軸受のターボ分子ポンプへの応用, 第6回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, pp. 379-382 (1994).
- (4) 水野, プロイレル, 橋本, 田中, 小松, 上山: センサレス磁気軸受の実用化に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 739-740 (1994).

- (5) 水野, 田中, プロイレル, 橋本, 原島, 上山: センサレス磁気軸受の実用機への応用, 第33回SICE学術講演会予稿集, pp. 317-318 (1994).
- (6) MIZUNO, T., BLEULER, H., TANAKA, H., KOMATSU, K., UYAMA, H., HASHIMOTO, H. and KUCERA, L.: An Industrial Application of Sensorless Magnetic Bearings, Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 317-320 (1994).
- (7) 水野, プロイレル, 田中, 橋本, 原島, 上山: センサレス磁気軸受の動剛性について, 平成6年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, pp. 926-929 (1994).

3. 印刷物

- (1) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会: 磁気浮上と磁気軸受, 5.5 制御系の設計 (2) レギュレータ理論 (分担執筆), コロナ社, pp. 192-210 (1993).

D. 研究内容

1. まえがき

最近の産業の各分野における技術革新に対応して、クリーンルームや真空環境など特殊環境下での搬送システムの必要が急速に高まっている。特に、次世代の半導体の開発・製造工場や医薬、バイオテクノロジーの分野では、無発塵・無潤滑搬送装置が不可欠となることが予想される。

磁気軸受は、磁気を利用して非接触で物体を支持するので、このような超清浄空間や高真空中での搬送装置の支持機構として適当な特性を備えている。さらに、吸引制御形磁気軸受は、制御パラメータを調節することによって剛性や減衰特性を任意に設定できるので、理想的な支持機構となる可能性を持っている。このため、磁気軸受を支持機構とする搬送装置の開発が、国内外において報告されている。しかし、従来の搬送装置と比較して、高価になってしまうことがその普及を妨げている。

セルフセンシング磁気軸受は、支持する物体の運動によってコイルに誘導される逆起電力の情報から、オブザーバによって物体の速度、変位を推定し、その推定信号を用いて安定な支持を実現する。したがって、磁気浮上状態を達成するのに変位センサを必要としないので、従来の磁気軸受のコスト面での問題を解消できる。特に可動体への給電装置をなくすために浮上用電磁石を固定子側に配置した形式の搬送装置では、多数のセンサを省くことができるので、セルフセンシング磁気軸受を導入するメリットは大きい。また、可動体が長時間停止する箇所に永久磁石を併用した浮上用電磁石を用いることによって、浮上に要する電力消費量が定常的には零となる省エネルギーシステムを実現することも可能になる。

本研究は、可動体を磁気吸引浮上させるのに、位置センサを必要としないセルフセンシング磁気軸受を支持機構に用いることによって、磁気浮上搬送システムを低コストで構築することを目的としてスタートした。そして、研究の進展に伴って、次のような点が重要なテーマとして浮かび上がってきた。

搬送装置においては、搬送経路が長くなると、多量の浮上磁石が必要となる。もし、浮上用電磁石のコアを積層しない構造とすることができれば、軌道部全体をフライス加工によって削り出して製作することができるため、より低コストなシステムを実現することができる。

以上のような観点から、本研究では、特に、塊状磁極を有する磁気軸受におけるセルフセンシング磁気浮上の可能性について、理論と実験の両面から検討を行った。

2. 基本構想

2. 1 磁気浮上の原理

電磁石の吸引力を利用した磁気浮上の原理を図2. 1に基づいて説明する。図に示すような系において、電磁石の起磁力が一定であるならば、電磁石と支持される物体（強磁性体）との間の吸引力は、その距離が小さくなると大きくなり、逆に、その距離が大きくなると小さくなるので、安定に支持することはできない。したがって、安定に支持するためには、支持される物体の運動を検出し、その信号に基づいて電磁石の吸引力を調整するというフィードバック制御によって復元力を得る必要がある。このようなフィードバック制御を伴う支持方法を能動的（active）な方法という。

能動的な支持方法の利点は、制御系を構成要素として含むため、振動減衰能力、位置制御能力、可変剛性機能（支持のかたさを状況に応じて変える機能）などを実現できることである。欠点は、センサ、コントローラ、アンプを必要とするので、機械式の支持機構に比較すると、コストがかかり、装置が大きくなることである。

2. 2 リニア搬送装置の分類

従来の磁気浮上を利用したリニア搬送装置は、構造的には、つぎの二つに大別できる。

(1) 磁気浮上用電磁石、変位センサを移動体側に搭載するタイプ

(2) 磁気浮上用電磁石、変位センサを固定子側に配置するタイプ

(1)の形式のものは、電磁石・センサを基本数だけ用意すればよいので、コストの面では優れているが、制御に必要な電力を外部から供給する必要があり、集電部から発生する塵埃のため、無発塵性が失われてしまう。

(2)の形式のものは、電力供給に伴う問題がなく、磁気浮上のメリットを生かした理想的な搬送システムを実現できる。しかし、軌道の全面にわたって電磁石とセンサを設置する必要があり、製作費がかかることが実用化を進める上での大きな障害となる。また、磁気浮上用センサとしては、コスト、応答性、精度の点から、渦電流形あるいはインダクタンス形のものがよく使用されるが、この場合には、電磁石との磁気的な干渉を避けるために、電磁石からセンサをある程度離して設置する必要がある。このため、装置全体が大きくなるという問題が生じる。また、センサを設置するときには、個々のセンサについての零点の調整を行う必要があるため、非常に手間がかかってしまうことも実用上の大きな問題点である。

2. 3 セルフセンシング磁気軸受を利用した搬送装置

本研究は、セルフセンシング磁気軸受を利用することによって、上記に述べたような(2)の形式の搬送装置の問題点を解決しようとするものである。このような構想に基づいた搬送装置の概略を図2. 2に示す。この装置では、両端にはステーションを設け、磁気浮上用の磁石に加えて、推進・位置決め用誘導モータの固定子を設備する。実際に搬送装置が利用される場合を考えると、ステーションには可動体が長く停止することが想定されるので、浮上用磁石と

しては永久磁石を併用した浮上用電磁石を用いて、浮上に要する電力消費が定常的には零となる省エネルギーシステムを実現する。

ステーション間には、浮上用磁石だけを配置し、惰性を利用して可動体を走行させる。可動体は、磁力によって非接触に支持されているので、走行に伴うロスは極めて小さく、このような駆動方法で十分であると考えられる。

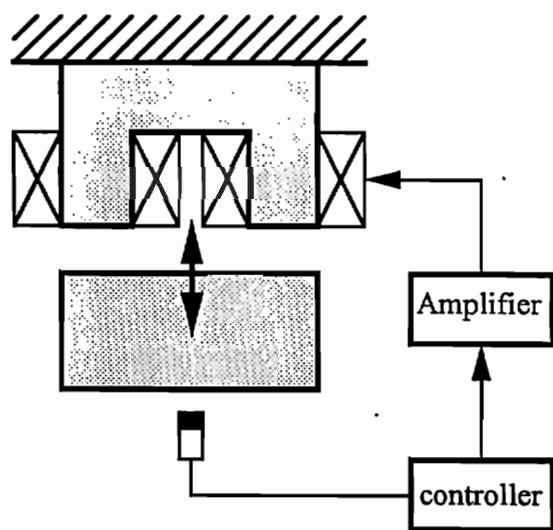


図 2. 1

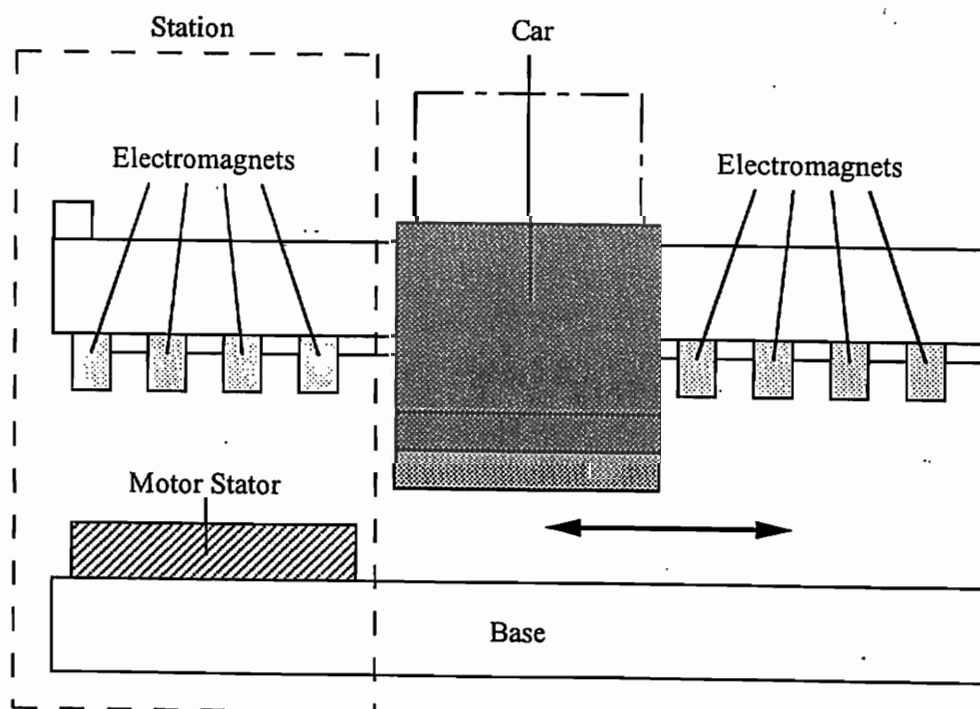


図 2. 2

3. セルフセンシング磁気軸受の原理

3. 1 基本モデル

図3. 1に示すような磁気浮上系を考える。これは、浮上対象物を一対の電磁石によって、両側から吸引して、浮上させる構造となっている。この系の運動方程式は、次式によって与えられる。

$$m\ddot{x} = F_1 - F_2 \quad (3.1)$$

ここで、

F_1, F_2 : 電磁石の吸引力

ここでは、電磁石のコア及び浮上体の吸引力が働く部分は積層されていて、これらの部分に流れる渦電流の影響は無視できるものとする。このとき、各電磁石の吸引力は、次式によって近似することができる。

$$F_k = K \frac{I_k^2}{D_k^2} \quad (k=1, 2) \quad (3.2)$$

ここで、

$$K = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \quad [\text{Nm}^2 / \text{A}^2]$$

μ_0 : 真空の透磁率 ($=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

N : コイル巻数

S : 鉄心断面積

I_k : 電磁石 k の励磁電流

D_k : 電磁石 k と物体間の空隙

空隙および励磁電流の定常値を D_0, I_0 、また、励磁電流の変動分を i_k と表すと

$$D_1 = D_0 - x \quad (3.3)$$

$$D_2 = D_0 + x$$

$$I_1 = I_0 + i_1 \quad (3.4)$$

$$I_2 = I_0 + i_2$$

各変動分は定常値に比べて微小であるとして、(3.2)式を線形化すると、次式が得られる。

$$F_1 = F_0 + K_i i_1 + K_d x \quad (3.5)$$

$$F_2 = F_0 + K_i i_2 - K_d x \quad (3.6)$$

ここで、

$$F_0 = K \frac{I_0^2}{D_0^2}, \quad K_i = 2K \frac{I_0}{D_0^2}, \quad K_d = 2K \frac{I_0^2}{D_0^3}$$

式(3.5)、(3.6)式を(3.1)式に代入して整理すると、次式を得る。

$$m\ddot{x} = 2K_i i + K_d x \quad (3.7)$$

各電磁石の回路方程式は、次式のように求められる。

$$Li_1 + Ri_1 + K_b \dot{x} = u_1 \quad (3.8)$$

$$Li_2 + Ri_1 - K_b \dot{x} = u_2 \quad (3.9)$$

ここで,

u_k : 電磁石 k への制御入力 (端子電圧の変動分) $(k=1, 2)$

$$L = \frac{2K}{D_0}, \quad K_b = 2K \frac{I_0}{D_0^2}$$

式 (3.7) ~ (3.9) から、次の状態方程式が得られる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ 0 & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u$$

ここで,

$$i = i_1 - i_2, \quad u = u_1 - u_2$$

$$a_{21} = \frac{2K_d}{m}, \quad a_{23} = \frac{K_i}{m}, \quad a_{32} = \frac{2K_b}{L}$$

$$a_{33} = \frac{R}{L}, \quad b = \frac{1}{L}$$

3. 2 制御系の設計

セルフセンシング磁気軸受では、電磁石の励磁電流だけをセンサによって検出する。したがって、出力方程式は、次式のようなになる。

$$y = Cx \quad (3.11)$$

ここで,

$$C = [0 \quad 0 \quad 1] \quad (3.12)$$

式 (3.10), (3.12) で記述されるシステムは、

可制御かつ可観測

な系となっている。したがって、オブザーバに基づいた補償器によって、閉ループ系の任意の極配置が可能となる。具体的な制御系設計の手順は、つぎのようなになる。

[ステップ1] (状態フィードバックによる安定化のための極配置)

状態変数がすべて観測でき、直接フィードバック制御に利用できるものとして、つぎのような閉ループ系が安定になるように、フィードバック行列 F を定める。

$$\dot{x} = (A - BF)x \quad (3.13)$$

可制御性から、行列 F を適切に選ぶことによって、行列 $(A - BF)$ の固有値を任意の値に設定することが可能である。

[ステップ2] (オブザーバによる状態変数の推定)

本研究では、同次元オブザーバを用いて状態変数を推定する。オブザーバは、次式のような

に表される.

$$\dot{\hat{x}} = (A - EC)\hat{x} + Bu + Cy \quad (3.14)$$

可観測性から, 行列 E を適切に選ぶことによって, 行列 $(A - EC)$ の固有値を任意の値に設定することが可能である.

[ステップ3]

実際の制御入力は, 状態変数の代わりにオブザーバによる推定値をフィードバックするように定められる.

$$u(t) = -F\hat{x}(t) \quad (3.15)$$

以上のように設計された制御系のブロック線図は, 図 3. 2 に示されるような構成となる.

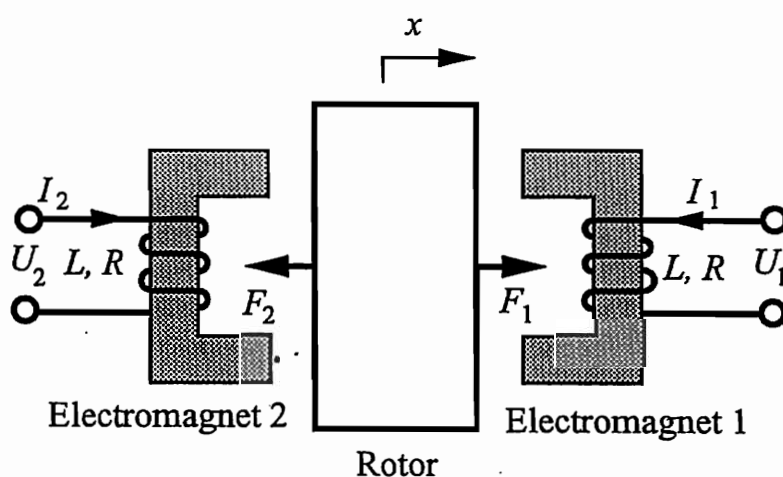


図 3. 1

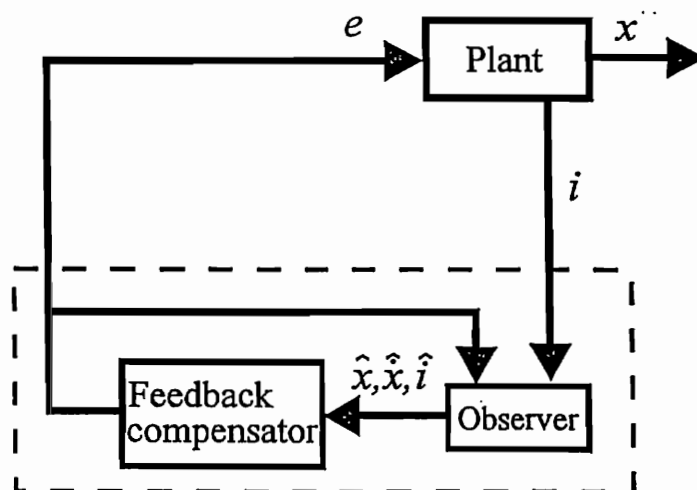


図 3. 2

4. 塊状磁極を有する磁気軸受におけるセルフセンシング浮上

4. 1 渦電流について

磁気軸受において、電磁石の吸引特性は性能を決定する重要な因子である。浮上対象物の運動を制御するには、その位置・速度などに応じて、浮上対象物に作用する吸引力を速やかに変化させる必要がある。

磁気浮上系では、浮上体が希望の位置から変動したとき、復元力が作用するように制御入力が増加する。この結果、電磁石の励磁電流が増加し、磁極を貫く磁束が増加する。磁束が増加すると、この変化を打ち消す方向に電流を流そうとする誘導電圧（逆起電力）が生じる。この逆起電力によって図4. 1に示すように磁極内部に渦電流が流れると、これは制御入力による磁束の変化を妨げるような磁場を発生させるので、結果として吸引力の変化が遅れてしまうことになる。このような現象が生じると、制御系の応答は劣化するので、系の不安定化の要因となる。したがって、通常の磁気軸受では、電磁石のコア及び吸引力が作用する部分を積層構造としている（図4. 2）。磁極を互いに絶縁された珪素鋼板を積層する構造とすると、磁極の内部抵抗が大きくなり、逆起電力による渦電流が流れにくくなるので、渦電流の影響を極めて小さくすることができる。

しかしながら、搬送装置のように、単品生産されることが多い製品の場合には、磁極を積層構造とすることは、コストを引き上げる大きな要因となる。加工や組立の手間を考慮すると、積層せずに塊状のままのコアや吸引鉄片を利用することができれば、より安価な搬送装置を実現することができる。本研究では、以上のような観点から、塊状磁極を持つ磁気軸受におけるセルフセンシング磁気浮上の検討を行った。

4. 2 モデル化

電磁石のコアおよび吸引部を塊状磁極とした場合には、磁極の内部抵抗が極めて小さくなるので、逆起電力によって生じる渦電流の影響が無視できなくなる。実際の磁極の中を流れる渦電流の分布は複雑であるが、ここでは、簡単のため、磁極に巻かれた仮想的なコイルの中を渦電流が流れるとしたモデルに基づいて議論を進める。

4. 2. 1 運動方程式

解析に用いたモデルを図4. 3に示す。浮上体の運動方程式は、次のように求められる。

$$m\ddot{x} = F_1 - F_2 \quad (4. 1)$$

各電磁石の吸引力 F_1, F_2 は、次のように表すことができる。

$$F_1 = \frac{\Phi_1^2}{\mu_0 A} \quad (4. 2)$$

$$F_2 = \frac{\Phi_2^2}{\mu_0 A} \quad (4.3)$$

ここで,

A : 磁極断面積

μ_0 : 空気透磁率

Φ_k : 電磁石 k の磁束 ($k=1, 2$)

4. 2. 2 回路方程式

ここでは、各電磁石の電気回路、磁気回路に関する方程式を導出する。最初に、右側の電磁石に着目する。図中央の塊状コア内部に、点線で示されるような渦電流の流れる仮想的な回路を考え、この回路を流れる電流を I_{e1} 、回路抵抗を R_{e1} とすると、以下のような関係が成立する。

$$E_1 = RI_1 + N\dot{\Phi}_1 \quad (4.4)$$

$$0 = R_{e1}I_{e1} + \dot{\Phi}_1 \quad (4.5)$$

$$NI_1 + I_{e1} = R_{m1}\Phi_1 \quad (4.6)$$

ここで,

E_1 : コイルの端子電圧

I_1 : コイルの電流

R : コイル抵抗

N : コイルの巻数

R_{m1} : 磁気抵抗

また,

$$R_{m1} \cong \frac{2d_1}{\mu_0 A} \quad (4.7)$$

d_1 : 空隙距離

式(4.4) ~ (4.6) 式より次の式が導かれる。

$$\left(N + \frac{R}{NR_e} \right) \dot{\Phi}_1 + \frac{RR_{m1}}{N} \Phi_1 = E_1 \quad (4.8)$$

左側の電磁石に関しても、同様に以下の式を得る。

$$\left(N + \frac{R}{NR_e} \right) \dot{\Phi}_2 + \frac{RR_{m2}}{N} \Phi_2 = E_2 \quad (4.9)$$

ここで,

$$R_{m2} \cong \frac{2d_2}{\mu_0 A} \quad (4.10)$$

d_2 : 空隙距離

4. 2. 3 変数 Q の導入

ここで、九州大学の深田らによって提案された、次のような変数を導入する。

$$Q_1 \equiv \frac{R_{m1}}{N} \Phi_1 \quad (4.11)$$

この変数は、定常値は電流値と等しく、磁束と同じ特性を持つものである。式(4.11)を用いて式(4.8)を書き直すと、次式のように表される。

$$\frac{1}{R_{m1}} \left(N^2 + \frac{1}{R_e} \right) \left(\dot{Q}_1 - \frac{R_{m1}}{R_{m1}} Q \right) + Q_1 = \frac{E_1}{R} \quad (4.12)$$

各変数を、定常値とそれからの変動量とに分けて、以下のように表す。

$$E_1 = E_0 + e_1 \quad (4.13)$$

$$Q_1 = Q_0 + q_1 \quad (4.14)$$

$$R_{m1} = R_{m0} + r_{m1} \quad (4.15)$$

定常値に比較して変動量が微小であるとき、式(4.15)は次式のように表すことができる。

$$R_{m1} = \frac{2d_0}{\mu_0 A} - \frac{2x}{\mu_0 A} \quad (4.16)$$

式(4.13)、(4.14)、(4.16)を式(4.12)に代入し、線形化して整理すると、次式が得られる。

$$L' \dot{q}_1 + Rq_1 + K_b' \dot{x} = e_1 \quad (4.17)$$

ここで、

$$L' = \frac{N^2}{R_{m0}} \left(1 + \frac{R}{N^2 R_e} \right) = L(1 + \Delta) \quad (4.18)$$

$$K_b' = \frac{N^2 I_0}{R_{m0} d_0} \left(1 + \frac{R}{N^2 R_e} \right) = K_b(1 + \Delta) \quad (4.19)$$

$$\Delta = \frac{R}{N^2 R_e} \quad (4.20)$$

同様にして、左側の電磁石についても、次のような式を求めることができる。

$$L' \dot{q}_2 + Rq_2 + K_b' \dot{x} = e_2 \quad (4.20)$$

ここで、 q_2 は、

$$Q_2 \equiv \frac{R_{m2}}{N} \Phi_2 \quad (4.21)$$

によって定義される変数 Q_2 の変動分である。

さらに、 Φ_1, Φ_2 についても、定常値の周りで線形化すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{N}{R_{m0}} Q_1 \\ &\cong \frac{NQ_0}{R_{m0}} \left(1 + \frac{q_1}{Q_0} - \frac{r_{m1}}{R_{m0}} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{NQ_0}{R_{m0}} + \frac{N}{R_{m0}} q_1 + \frac{NQ_0}{R_{m0}d_0} x \\ \varphi_2 &= \frac{NQ_0}{R_{m0}} + \frac{N}{R_{m0}} q_2 - \frac{NQ_0}{R_{m0}d_0} x \end{aligned} \quad (4.23)$$

式(4.1), (4.2), (4.3), および式(4.22), (4.23)から,

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{\mu_0 AN^2 I_0}{2d_0^2} (q_1 - q_2) + \frac{\mu_0 AN^2 I_0^2}{d_0^3} x \\ &= K_i (q_1 - q_2) + 2K_d x \end{aligned} \quad (4.24)$$

4. 2. 4 状態方程式

式(4.17), (4.20), (4.24)から, 次に示す状態方程式が得られる。

$$\dot{x}_e = A_e x_e + B_e u \quad (4.25)$$

ここで,

$$x_e = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ q \end{bmatrix}, \quad A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2K_d}{m} & 0 & \frac{K_i}{m} \\ 0 & -\frac{2K_b}{L'} & -\frac{R}{L'} \end{bmatrix}, \quad B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L'} \end{bmatrix}$$

$$q = q_1 - q_2 \quad e = e_1 - e_2$$

上記の状態方程式を見ると明らかなように, Q という変数を導入することにより, 従来用いられているセンサレス磁気浮上の状態方程式と全く同じ構造の係数行列となっていることがわかる. このような解析結果に基づいて, 渦電流を考慮した場合のセンサレス浮上について考える.

4. 3 制御系の設計

まず, 式(4.25)で記述される系において, 変数 q が直接観測できると仮定する. このとき, 出力方程式は, 次式のようなになる.

$$q(t) = C_e x_e(t) \quad (4.26)$$

ただし,

$$C_e = [0 \quad 0 \quad 1]$$

この場合, (C_e, A_e) は可観測である. もちろん, (A_e, B_e) は可制御である. したがって, 前章

で述べたセルフセンシング磁気軸受の制御系設計方法をそのまま適用することができる。しかも、係数行列の形から、オブザーバなどの補償器の構成も全く同じになる。

しかし、実際には、直接 q を測ることは困難である。また、セルフセンシング磁気軸受の意義からも、コイル電流だけを観測出力として、制御系を構成することが望ましい。そこで、以下では、制御入力であるコイルの端子電圧 e と励磁電流 i から q を求めることが可能であることを示す。

式(4.4), (4.5), (4.6), (4.11)などから、つぎの式が得られる。

$$\begin{aligned} E_1 &= RI_1 - NR_e I_{e1} \\ &= (R + N^2 R_e) I_1 - N^2 R_e Q_1 \end{aligned} \quad (4.27)$$

式(4.27)から、

$$Q_1 = \left(1 + \frac{R}{N^2 R_e}\right) I_1 - \frac{1}{N^2 R_e} E_1 \quad (4.28)$$

同様にして、

$$Q_2 = \left(1 + \frac{R}{N^2 R_e}\right) I_2 - \frac{1}{N^2 R_e} E_2 \quad (4.29)$$

式(4.28), (4.29)から、

$$q_1 - q_2 = \left(1 + \frac{R}{N^2 R_e}\right) (i_1 - i_2) - \frac{1}{N^2 R_e} (e_1 - e_2) \quad (4.30)$$

式(4.30)から、コイルの端子電圧 e と励磁電流 i から q を求めることができることがわかる。このことから、塊状磁極を持った磁気軸受の場合のセルフセンシング浮上用の制御回路は、図4.4のようになる。図3.2のブロック線図と比較しても明らかなように、オブザーバは、渦電流の影響がない場合のものと同じ構成とし、コイルの端子電圧 e と励磁電流 i から q を求め、オブザーバへの入力とすればよい。つまり、図3.2と図4.4において、点線で囲まれた部分は、共通の構成となっている。

また、式(4.30)あるいは図4.4から明らかなように、磁極部の内部抵抗 R_{e1}, R_{e2} が無限大のときには渦電流が流れなくなるが、この場合には $q = i$ となり、従来のセルフセンシング磁気浮上用の制御回路と全く同じになる。

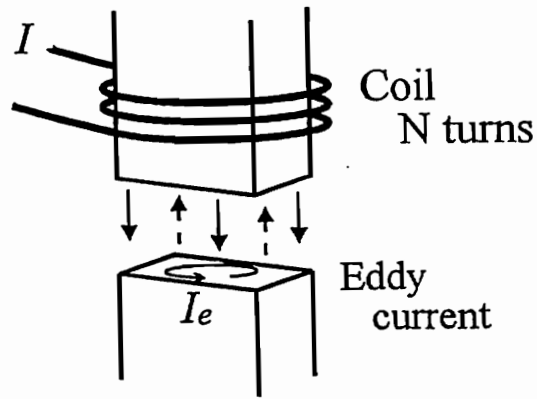


图 4. 1

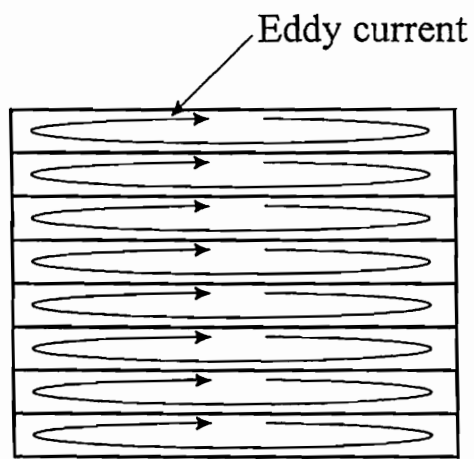


图 4. 2

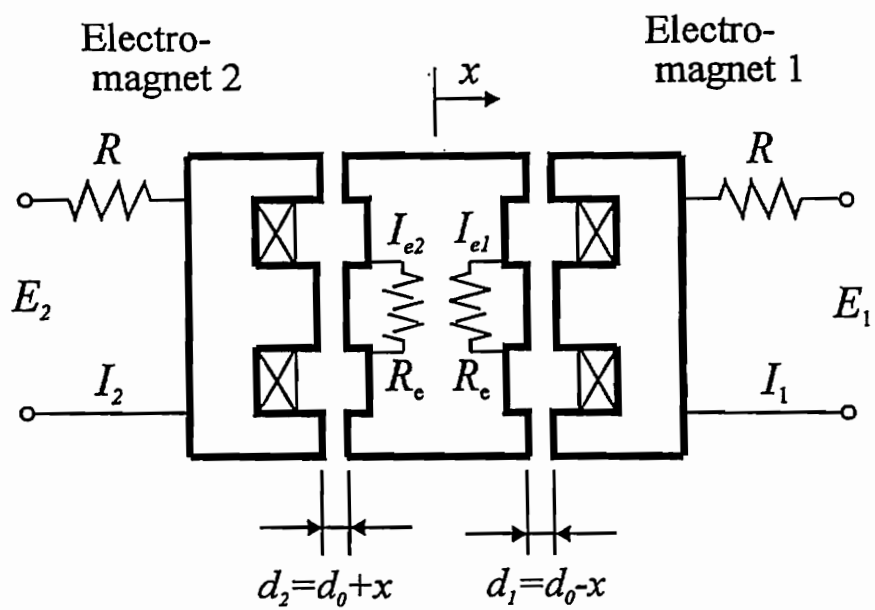


图 4. 3

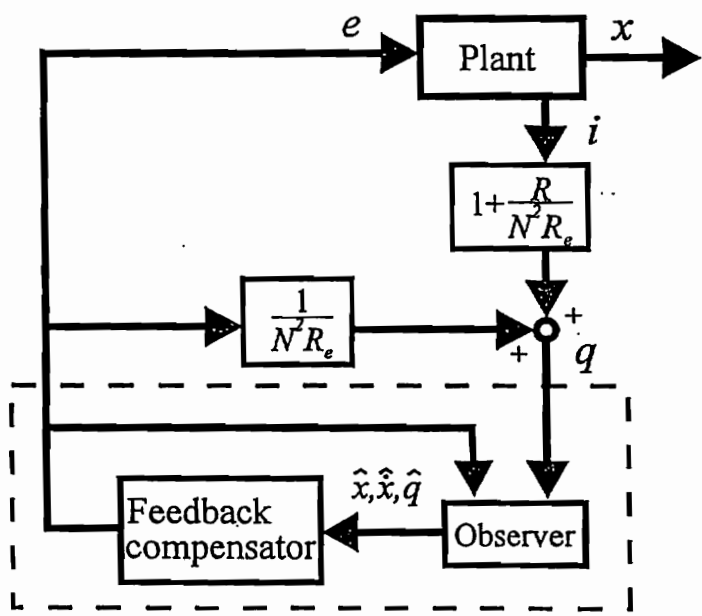


图 4. 4

5. 実験装置

理論的な考察では、電磁石のコアなどが積層されていないため、渦電流の影響が大きいと考えられる場合でも、変位センサレス浮上が可能である。しかし、理論的な結果は、あくまでも線形化されたモデルに基づいたものであり、実際の系においてこのモデルが妥当であるかどうかについては考慮の余地を残している。また、実際の渦電流は、流れの経路が定まっているわけではないので、この点についても検証する必要がある。そこで、実際に塊状磁極を有する磁気浮上系の基本モデルを試作し、実験的な検討を行った。

5. 1 装置の概略

装置全体の概略を図5. 1に示す。装置は大別すると、1自由度の軸受部、制御回路部、励磁用アンプ等から構成されている。

また、近年、急速にデジタル信号処理が注目されており、従来アナログ的手法で行っていた信号処理をデジタル的手法で処理するケースが多くなってきている。デジタル信号処理によるシステムを構成すると、複雑な処理、解析をソフトウェアで実現できるという大きなメリットが得られる。そこで、本研究においても、マイクロプロセッサに比べ、命令の実効速度、乗算速度の点で圧倒的に高速な処理能力を有するDSP (Digital Signal Processor) を用いて制御を行った。

5. 2 軸受部

軸受部の構成を図5. 2に示す。中央の1.625 kgの浮上体を上下2個の電磁石で吸引し、浮上させる。ロータ部形状を図5. 3に示す。また、上下電磁石はリング状の形状をしており、下側電磁石の中央には、位置検出用のセンサがとりつけられるようになっている。

5. 3 制御回路部

制御回路部は、ホスト用コンピュータ、DSP (Digital Signal Processor) 部、ホストとDSPをつなぐ拡張ボックスなどからなる。それぞれの構成を以下に記す。

5. 3. 1 ホスト用コンピュータ

ホスト用コンピュータには、EPSON社製PC-386 NOTE AEを使用した。制御用プログラムの作成やDSP部側とのプログラムなどのやりとりは、すべてこのコンピュータを用いて行う。CPUには、intel社製i386SX 16MHz CPUを搭載している。このコンピュータ本体はノート型で、拡張ボードを直接接続できないため、拡張用コネクタを通し拡張ボックスへと接続されている。

5. 3. 2. DSP (Digital Signal Processor) 部

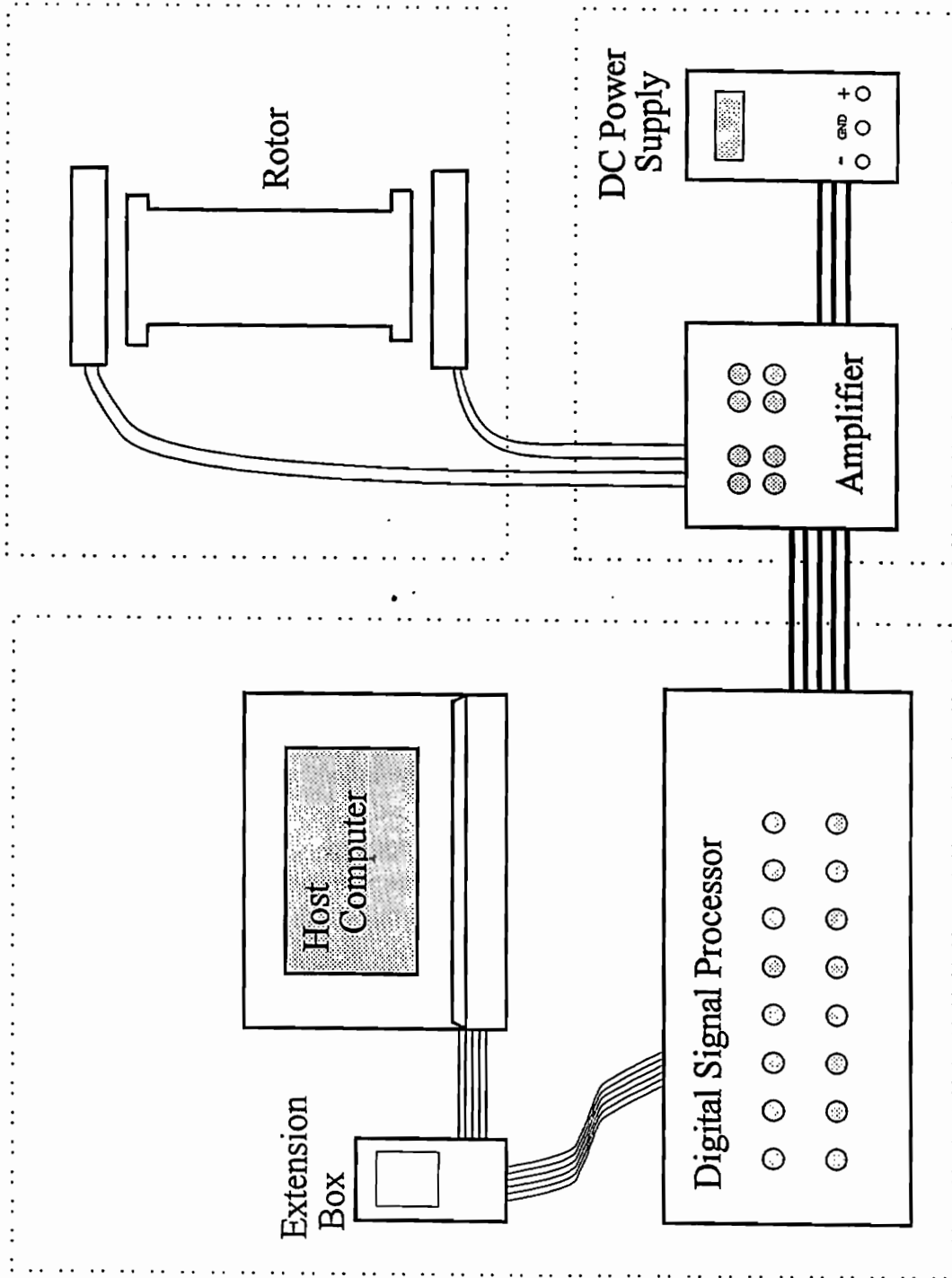
高速な信号処理を実現するため、制御演算部および入出カインターフェース装置としては、購入したエムティティ社製LORY ACCEL/DSP4200シリーズを使用した。LORY ACCELには、デジタル信号演算素子として、Texas Instruments 社製 TMS320C30が搭載されている。TMS320C30は、32bit浮動小数点DSPデバイスで、毎秒3300万回にも及ぶ浮動小数点処理能力を持つ高速なハードウェアによる演算ユニットが使われている。さらに、8ch A/Dボード (DSP4110)、8ch D/Aボード (DSP4020)、クロックボード (DSP4040)などのボードが、LORY ACCELシステム専用のDSPバスで接続され、専用のラックケースに収納されている。入出力信号はPCバスを介することなく、DSPバスによりボード相互にデータ交換が行われるため、より高速な信号処理を可能にしている。

5. 3. 2 拡張ボックス

DSP用の拡張ボードは、直接コンピュータに接続できないため、この拡張ボックスに接続した後、コンピュータに接続される。拡張ボックスとしては、CONTEC社製FA-PAC (98) H-4Aを用いた。

5. 4 アンプ

励磁用アンプは、市販されているターボ分子ポンプ用のアンプの回路を1部修正し、電圧制御形アンプとして動作するものを使用した。



☒ 5. 1

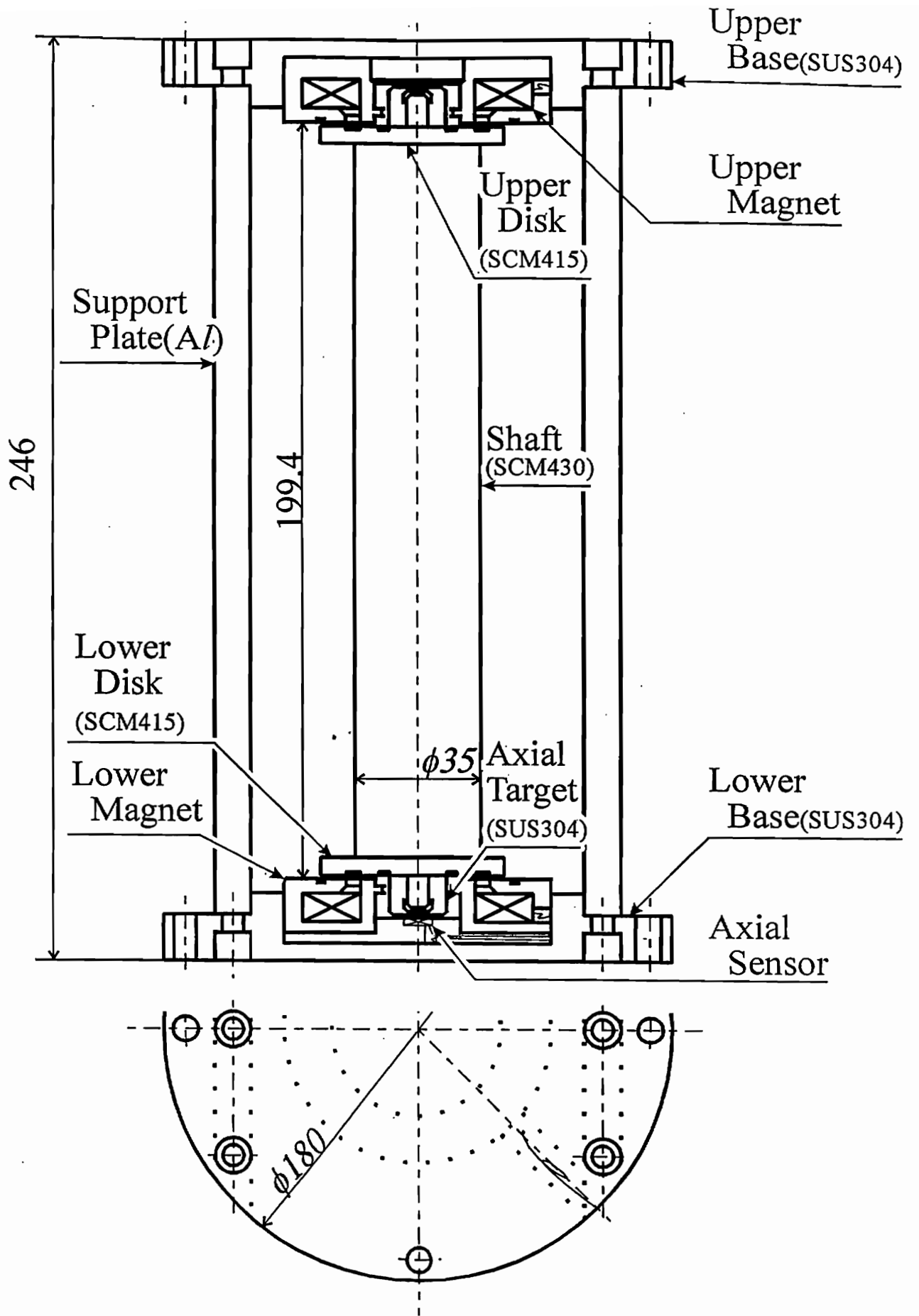


図 5. 2

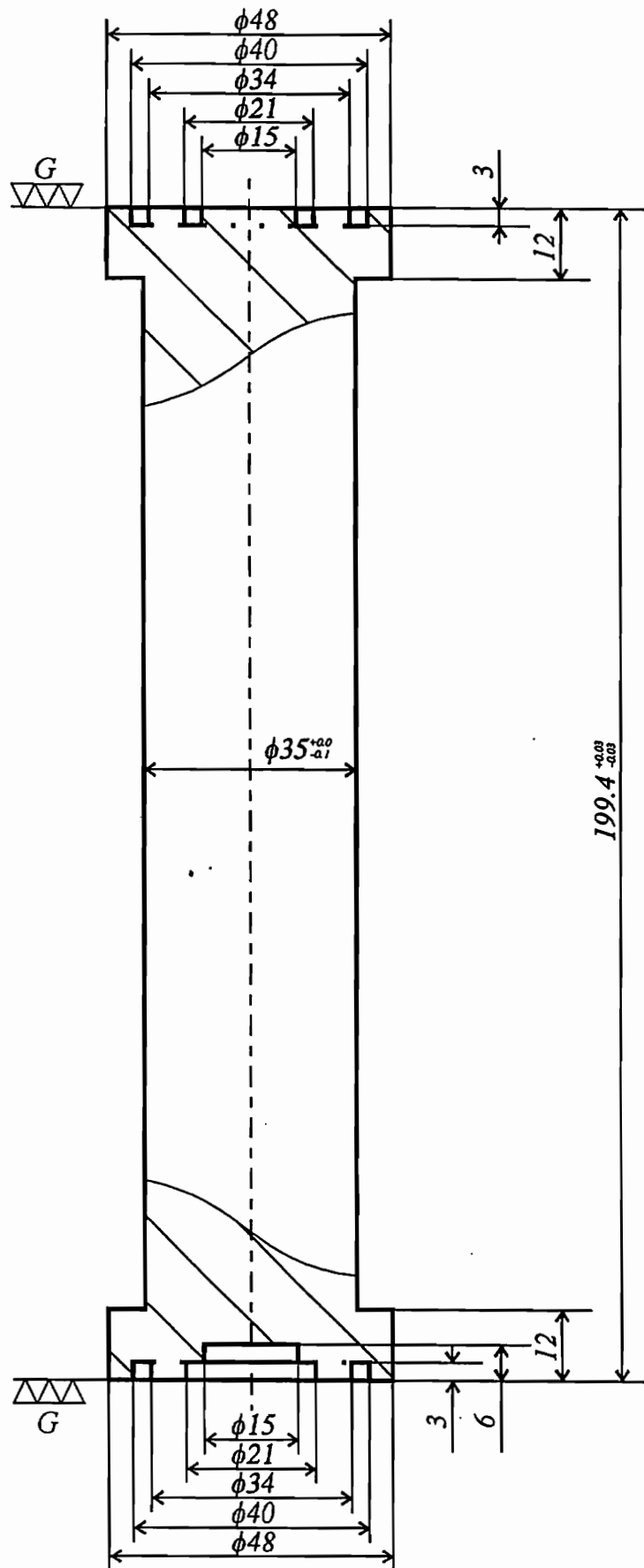


图 5. 3

6. 実験結果

6. 1 パラメータの同定

セルフセンシング磁気浮上では、オブザーバによって状態変数を推定し、その推定値をフィードバック制御に用いることによって、系全体を安定化する。オブザーバを構成するには、系のパラメータをかなり正確に同定する必要がある。

6. 1. 1 仮想うず電流回路の抵抗値 R_e の測定

コイル電流とコイル端子電圧から状態量 q を推定するためには、 R_e の値が必要となる。ここでは、コイル電流-磁束間の周波数応答特性を測定し、この結果から R_e の値を求めた。

磁束の測定には、サーチコイルを用いた。サーチコイルは、0.2mmの導線50turnを浮上体端面にある溝に沿わせて埋め込んだ。また、電磁石を駆動するアンプ部には、一つの電磁石につき、二つの入力端子があるため、一方には、バイアスとして3Vの電圧を与え、残りの一方をファンクションジェネレータにつなぎ、1Vの正弦波振幅を与えた。そして、ファンクションジェネレータから与える正弦波の周波数を徐々に変えて測定を行った。

測定の結果を図6. 1に示す。図から、周波数が100Hzのときに、磁束の電流に対する位相遅れは、約30 [deg] であることがわかる。

つぎに、求めた周波数特性から、 R_e を推定する方法について述べる。式(4. 6)から、

$$I_{e1} = R_{m1} \Phi_1 - NI_1 \quad (5. 1)$$

これを、式(4. 5)に代入すると、次式が得られる。

$$0 = R_{e1}(R_{m1} - NI_1) + \dot{\Phi}_1 \quad (5. 2)$$

式(5. 2)から、コイル電流を入力、磁束を出力とみなしたときの伝達関数は、次式のように求められる。

$$\frac{\Phi_1}{I_1} = \frac{R_e N}{s + R_e R_{e1}} \quad (5. 3)$$

式(5. 3)から、直流ゲインから直接 R_{m1} を求めることができることがわかる。また、各周波数でのゲインまたは位相の値から、 R_{e1} を求めることができる。

以上のようにして計算した各周波数での R_e の値を図6. 2に示す。図から、 R_e の値は、

$$R_e \cong 3.0 \times 10^{-4} \Omega$$

程度であると推定される。しかし、測定する周波数によって、かなり変化している。

6. 1. 2 a_{21}, a_{23} の測定

電流制御形磁気浮上系において、渦電流の影響を無視すると、位置フィードバックゲイン p_d と系の固有振動数 ω との間に次式のような関係が成立する。

$$\omega^2 = a_{23} p_d - a_{21} \quad (5. 4)$$

ただし、制御電流 i は、次式のように定められているとする。

$$i = -(p_d x + p_v \dot{x}) \quad (5. 5)$$

実際に測定した結果を図 6. 3 に示す。 a_{21} および a_{23} の値は、このグラフの切片および傾きから、以下のように求められる。

$$a_{21} = 3.4 \times 10^4 \text{ [N/m]} \quad (5.6)$$

$$a_{23} = 3.3 \times 10^1 \text{ [N/A]} \quad (5.7)$$

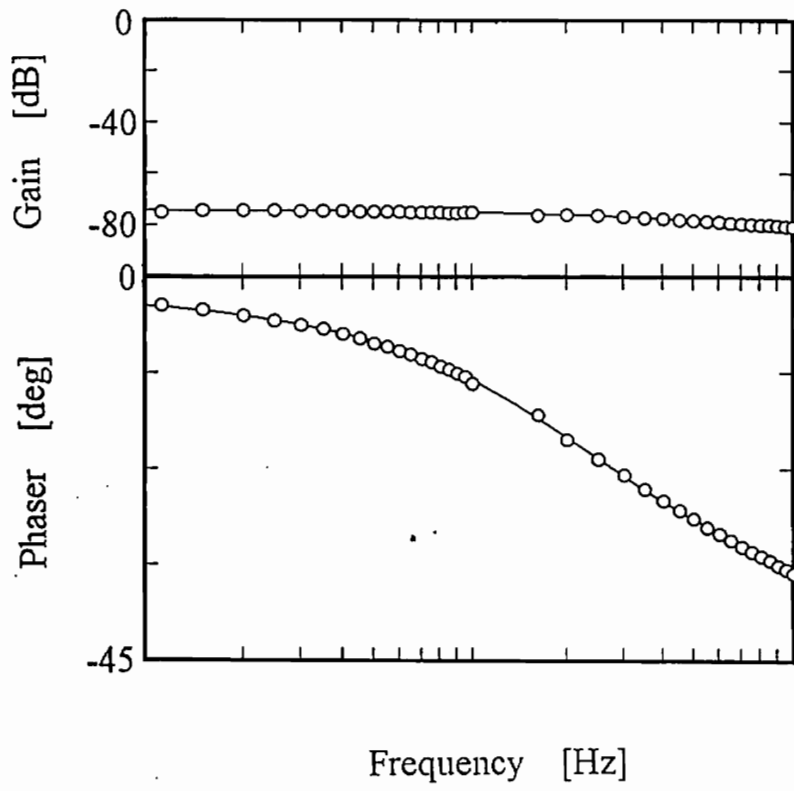
この場合、式 (5.4) の関係は、実際にもかなりよく成立していることがわかる。

6. 1. 3 a_{32} の測定

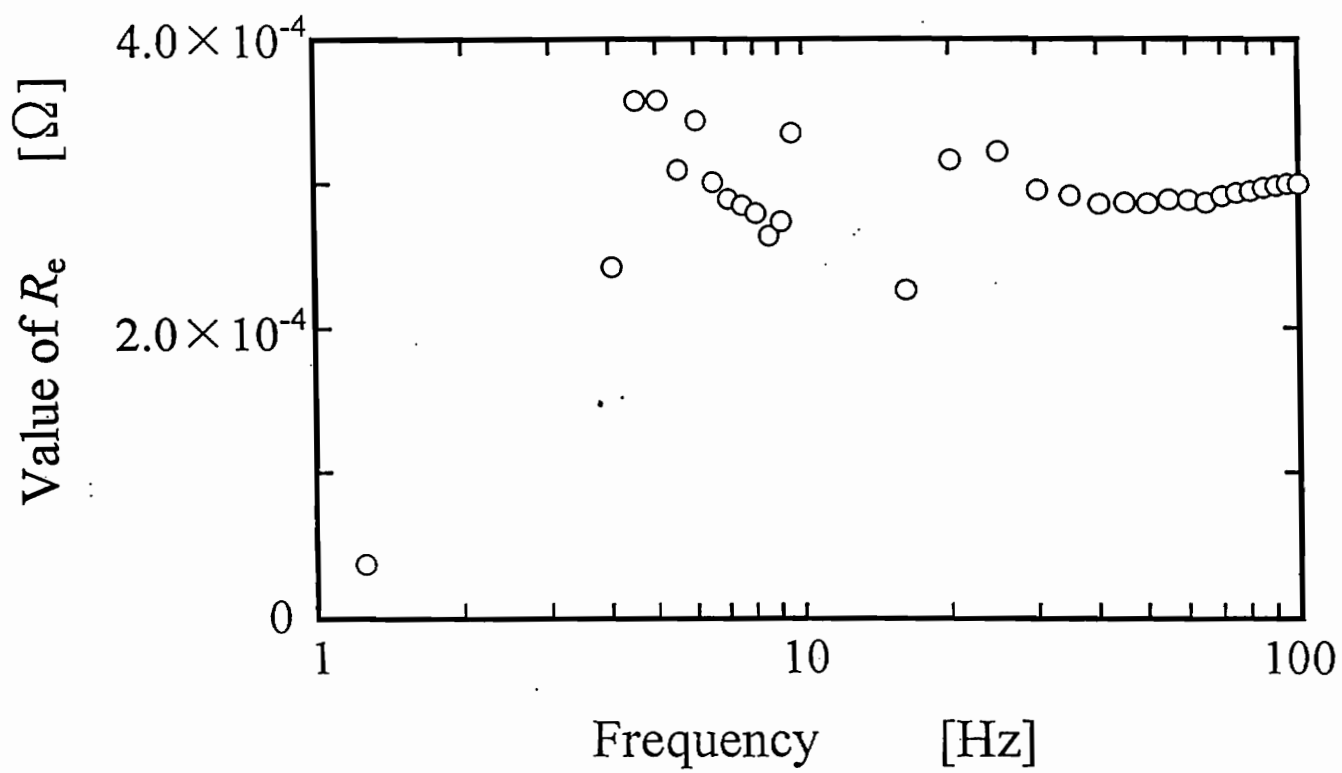
a_{32} は、浮上体を浮上した状態で振動させ、このときコイルを流れる電流の振幅と浮上体の振幅との比から求めた。各周波数における測定値を図 6. 4 に示す。図で、 a_{321} 、 a_{322} は、それぞれの電磁石における係数である ($a_{32} = a_{321} + a_{322}$)。図から、これらのパラメータは、周波数に依存して変化していることがわかる。

6. 2 浮上実験

以上のようにして求めたパラメータに基づいて、セルフセンシング浮上を試みたが、成功には至らなかった。この原因としては、制御の設計に必要なパラメータが周波数によって、大きく変動することが挙げられる。これに対する対策の一つとして、ロバスト制御系設計理論を適用することが考えられる。



⊗ 6. 1



⊠ 6. 2

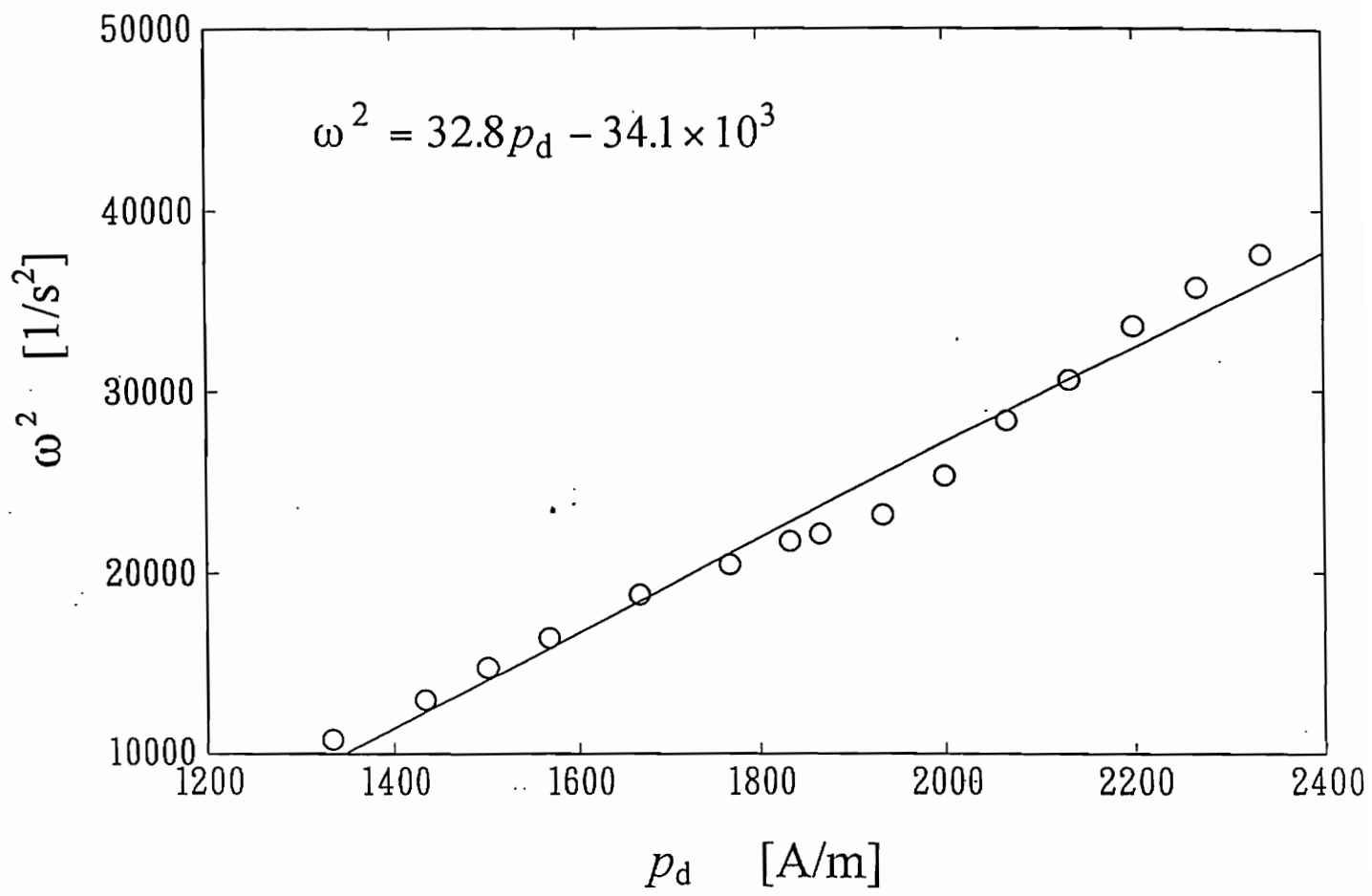


图 6. 3

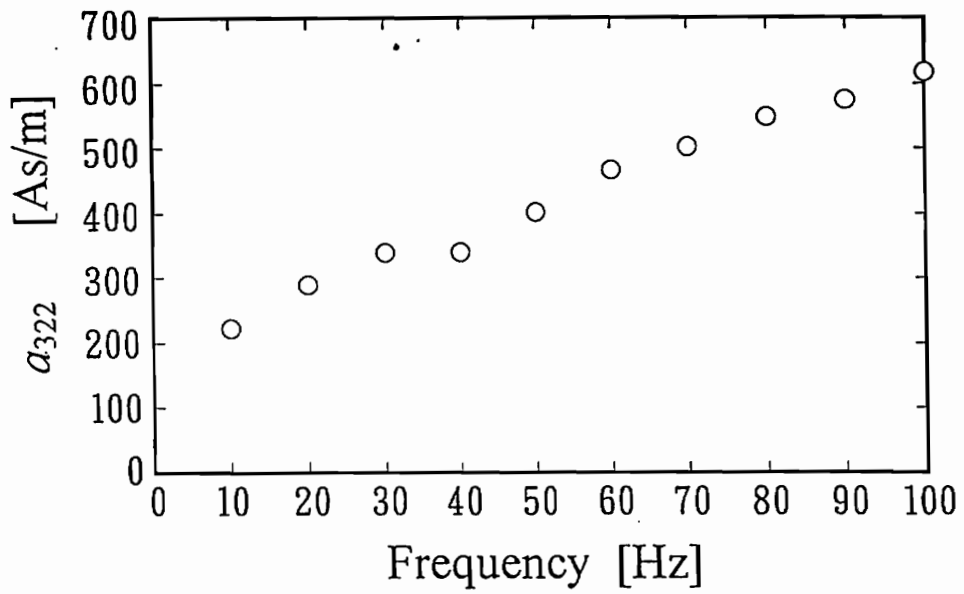
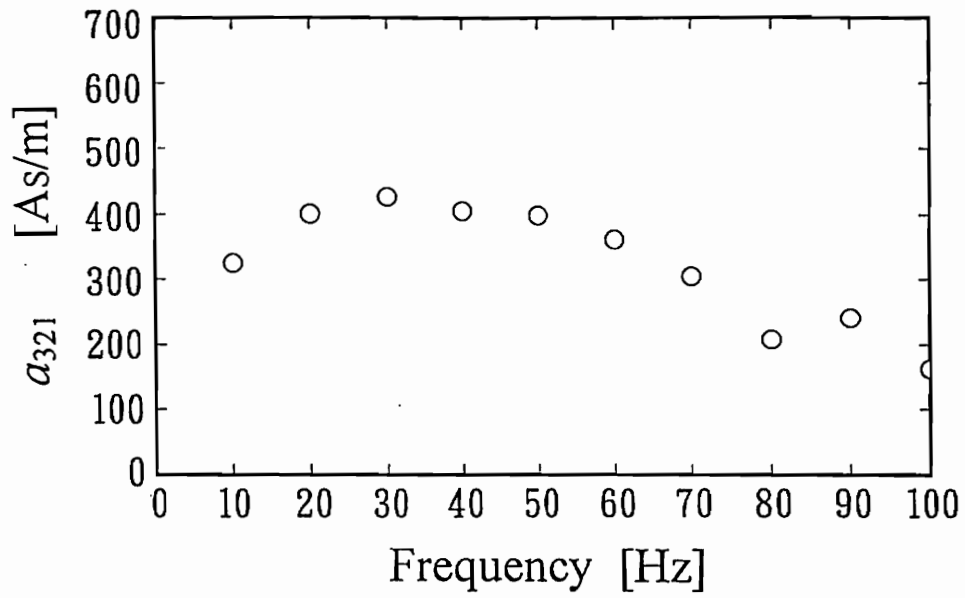


图 6. 4

7. あとがき

本研究では、セルフセンシング磁気軸受を支持機構とすることによって、磁気浮上リニア搬送装置を低コストで実現することを提案した。さらに、より低コスト化を図るために、電磁石のコアおよび吸引部を塊状磁極とすることを提案し、理論・実験の両面から検討を行った。

理論的には、従来のセルフセンシング磁気浮上系の制御回路と全く同じ構成の制御回路を用いることによって、セルフセンシング磁気浮上が可能になることが示された。しかしながら、実際には、系の幾つかのパラメータが周波数によって大きく変動するため、セルフセンシング磁気浮上を実現することは、非常に難しいことが確認された。

以上の結果から、現状では、提案する磁気浮上搬送装置を塊状磁極を持つ電磁石で実現することは技術的に困難であり、積層磁極を持つ電磁石を用いるべきであるとの結論が得られた。このような知見は、実際の搬送装置を設計・試作する上で、非常に重要かつ貴重なものである。

積層磁極を持つ電磁石を用いた場合には、セルフセンシング方式であっても質量変動などに対してロバストな浮上系が得られることが実験的に示されている。したがって、このような磁極構造を持つ電磁石を用いれば、提案する方式の搬送装置が実現できると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご協力をいただいたスイス連邦工科大学チューリッヒ校Ladislav Kucera氏、埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程学生小松賢治君に感謝の意を表します。また、実験装置の試作にご協力を賜った光洋精工（株）上山拓知氏に感謝の意を表します。