

98年度特別実験 I

磁気浮上の基礎的実験

古徳純一

共同実験者 河野能知

平成10年9月20日

目次

1	目的	5
2	原理	6
2.1	永久磁石で物を安定して浮かすことができるか	6
2.1.1	Earnshaw の定理	6
2.1.2	磁場に対する Earnshaw の定理	6
2.2	U-CAS はなぜ浮かせるのか	7
2.3	磁石を安定に浮かせるための周りの磁石の配置	9
2.3.1	磁石の作る磁場	9
2.3.2	磁石の配置	10
2.3.3	本実験で採用した磁石の配置	11
3	実験	12
3.1	磁場の強さをはかる	12
3.1.1	ガウスメーターの制作	12
3.1.2	ガウスメーターの校正	12
3.1.3	磁場の測定	13
3.2	磁気浮上装置の作成	21
3.2.1	台の作成	21
3.2.2	浮かす磁石の作成	21
3.2.3	制御系に使うセンサーの作成	21
3.3	カップリングの強さ	25
3.3.1	磁石とコイルのカップリング	25
3.3.2	磁石と磁石のカップリング	28
4	結果と考察	29
4.1	ハイトセンサーの特性	29
4.1.1	ピンホールハイトセンサー	29
4.1.2	反射式ハイトセンサー	29
4.2	オープンループ伝達関数の測定	31
5	まとめ	37
6	感想	38

図目次

1	U-CAS の磁場の概念図	7
2	円形電流の作る磁場	8
3	厚みを持った円形磁石（上）とドーナツ型磁石（下）	10
4	考えられる磁石の配置	11
5	ガウスメーターの回路	12
6	ガウスメーターの校正	13
7	校正直線	14
8	中心軸上の磁場（測定値と理論曲線）	14
9	高さ 11mm で x 軸方向にそつてみた z 軸方向の磁場	15
10	高さ 11mm で y 軸方向にそつてみた z 軸方向の磁場	16
11	高さ 20mm で x 軸方向にそつてみた z 軸方向の磁場	16
12	高さ 20mm で y 軸方向にそつてみた z 軸方向の磁場	17
13	高さ 30mm で x 軸方向にそつてみた z 軸方向の磁場	17
14	高さ 10mm で x 軸方向にそつてみた x 軸方向の磁場	18
15	高さ 10mm で y 軸方向にそつてみた y 軸方向の磁場	18
16	高さ 20mm で x 軸方向にそつてみた x 軸方向の磁場	19
17	高さ 20mm で y 軸方向にそつてみた y 軸方向の磁場	19
18	高さ 30mm で x 軸方向にそつてみた x 軸方向の磁場	20
19	高さ 30mm で y 軸方向にそつてみた y 軸方向の磁場	20
20	台の概念図（横から見たもの 図中の数字の単位は mm）	22
21	浮かす磁石の概念図（図中の数字の単位は mm）	23
22	制御系の概念図	24
23	ピンホールハイトセンサー	24
24	ピンホールの開いた板の回転をタングステンワイヤー（ $\phi 0.1\text{mm}$ ） で止める	26
25	磁石とコイルのカップリングの強さをはかる	26
26	コイルの高さと受ける力の関係（横軸はボビンから突き出た 磁石の長さを表す。）	27
27	磁石同士の距離と力との関係をはかる	27
28	磁石の高さと力との関係	28
29	ピンホールの高さと出力電圧の関係をはかる	29
30	ピンホールハイトセンサーの高さと出力電圧の関係	30
31	反射式ハイトセンサー	30
32	反射式ハイトセンサーの距離と出力電圧の関係	31
33	オープンループ伝達関数の測定のための回路の概念図	32
34	周波数と絶対値との関係	33
35	周波数と位相遅れとの関係	33
36	周波数と磁石の高さとの関係	34

37	周波数と地面の震動の関係	35
38	図 36 と図 37 を重ねたグラフ	35
39	周波数とコヒーレンスとの関係	36

1 目的

当研究室では、重力波を捕らえる研究をしている。重力波検出の手段として、レーザー干渉計の製作を行ってきた。重力波は非常に振幅が小さい波である。そのため、レーザー干渉計は高い精度で防振されていなくてはならない。従来、反射鏡の部分は、防振のため、ワイヤーで吊すのが一般的であった。しかし、ワイヤーで吊せば、反射鏡とワイヤーは必ず接触していることになる。そのため、ワイヤー固有の振動が、どうしても反射鏡に伝わってしまう。また、低周波が防振しづらいという欠点もある。ところで、適当な重力波源の候補として考えられる、ブラックホール連星などから生じる重力波は、低周波の波である。こういった現象を重力波で捕まえるには、反射鏡自身が非接触で浮いていることが望ましい。非接触浮上の候補としては、磁力を使った浮上（磁気浮上）が考えられる。本実験は、この磁気浮上の実現のための基礎実験である。具体的には、台に対して磁石が安定に浮くような装置の開発を目的とした。

2 原理

2.1 永久磁石で物を安定して浮かすことができるか

2.1.1 Earnshaw の定理

電荷のない空間の中では、試験電荷に対する安定な釣り合いの位置は存在しない。

(*) p_0 が安定な点だとする。 p_0 のまわりに p_0 を取り囲む微小領域を考える。周りの電場は、 p_0 に向いていなければならない。このとき、

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \neq 0$$

これは、この系に電荷が存在しないと仮定に反する。

2.1.2 磁場に対する Earnshaw の定理

電場に対する Earnshaw の定理を参考にして次のような磁場に対する Earnshaw の定理が導かれる。

磁荷のない空間の中では、試験磁荷に対する安定な釣り合いの位置は存在しない。

磁位 ϕ を次のように定義する。

$$-\nabla\phi \equiv \mathbf{B}$$

すると、

$$\phi(x) = -k \frac{q}{r} \quad (q \text{ は磁荷}) \quad (1)$$

$$= -k \int d^3y \frac{\rho(y)}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|} \quad (2)$$

$$= -k' \int d^3y G(|\mathbf{x} - \mathbf{y}|) \rho(y) \quad (G \text{ はグリーン関数}) \quad (3)$$

両辺に Δ を作用させると、

$$\Delta \phi(x) = k' \int d^3y \delta(|\mathbf{x} - \mathbf{y}|) \rho(y) \propto \rho(x)$$

両辺を体積分して、

$$\int \Delta \phi(x) dV \propto \int \rho(x) d^3x$$

ガウスの公式から、

$$\int \nabla\phi(x) \cdot d\mathbf{S} \propto Q$$

試験磁荷が安定に存在できるためには、左辺の発散が 0 であってはならないが、そうであるとすると、磁荷のない空間という仮定に反する。

2.2 U-CAS はなぜ浮くのか

U-CAS (ユーカス) とは、銀色のコマが、回転しながら、黒い台の上に数センチ離れて浮遊するというおもちゃである。(発売元：増田屋コーポレーション) 一旦浮いてしまえば、2分程も空中で姿勢を保って浮き続けることができる。永久磁石だけからなる系なのに、どうしてこのようなことが可能なのだろうか。

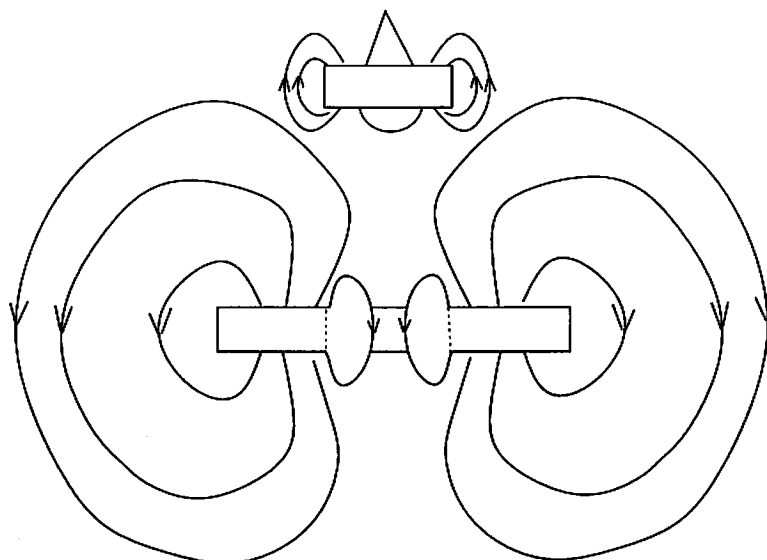


図 1: U-CAS の磁場の概念図

U-CAS の構造を調べると、コマの方に小さいドーナツ型の磁石が入っており、台の方も円形ではないが、磁場の分布はドーナツ型とよく似た正方形の形をした磁石が入っていることがわかる。これから予想される磁力線の様子を図 1 に示す。ここで、コマの作る磁力線が、台の磁石の作る内側の磁力線に反発されるところが、コマの浮くところである。

U-CAS の特徴のうちもっとも本質的なものは、コマが回転しているということである。回転しているコマは、ジャイロスコープと同じように空中で姿勢を保とうとする。そのため、台座となるような極小ポテンシャルが存在するなら、その台座が小さくても、うまく乗せてやることで、コマを空中に浮かせることができるのである。

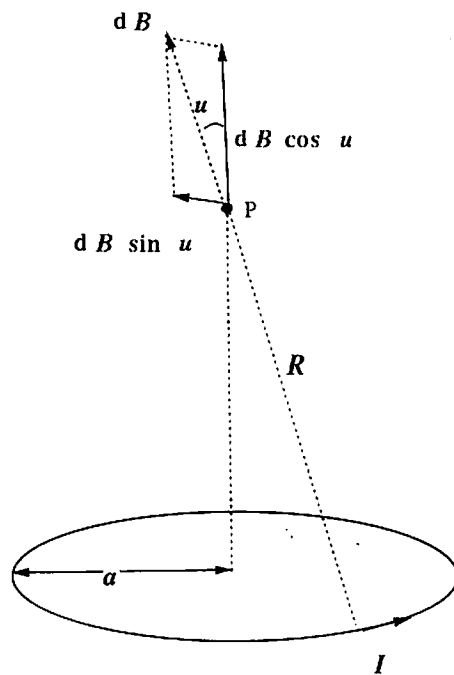


図 2: 円形電流の作る磁場

2.3 磁石を安定に浮かせるための周りの磁石の配置

2.3.1 磁石の作る磁場

円形磁石の作る磁場を、磁石と同じ半径の円形コイルが作る磁場と同じであると考え、¹円形コイルの厚みは、円形磁石の厚みと同じである。このとき、仮想的なコイルに流れる電流のことを磁化電流と呼ぶ。こう考えるのは、次のような理由による。

磁化は小さな磁気双極子から構成されている。これらの磁気双極子は1つ1つをループ電流で置き換えられる。磁化が一樣ならば隣り合った電流は大きさが同じで、しかも逆向きなので、互いに相殺し、結果として表面の電流だけ残る。

そこで、まず図2のように半径 a の円形コイル内を強さ I の定常電流が流れているときの、円の中心軸上の点 P における磁場を求めてみよう。このとき、電流の向きと電流から見た観測点 P の方向は常に直交しているので、電流素片 $I ds$ の P 点に作る磁場の大きさは、

$$dB = \frac{\mu_0 I ds}{4\pi R^2}$$

で与えられる。この磁場のうち水平方向の成分 $dB \sin u$ は、対称性により、円形回路の1周の積分で消える。したがって、全体の磁場 $B(P)$ に寄与するのは垂直方向の成分 $dB \cos u$ だけである。これから、

$$B(P) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\cos u}{R^2} \int ds = \frac{\mu_0 I a^2}{2(z^2 + a^2)^{3/2}}$$

をうる。

そこで、今度は厚さ L の磁石の作る磁場を求めることができる。仮想したコイルの単位長さあたりの巻き数を N とすると、 P 点における磁場 B_L は、

$$B_L(P) = \frac{N}{L} \int_0^L \frac{\mu_0 I a^2}{2\{(z-l)^2 + a^2\}^{3/2}} dl \quad (4)$$

$$= \frac{N}{L} \int_{\arctan \frac{z}{a}}^{\arctan \frac{z-L}{a}} \frac{\mu_0 I a^2}{2\{a^2(1+\tan^2)\}^{3/2}} \frac{-a d\theta}{\cos^2 \theta} \quad (5)$$

$$= \frac{N}{L} \int_{\arctan \frac{z}{a}}^{\arctan \frac{z-L}{a}} \frac{-\mu_0 I \cos \theta}{2} d\theta \quad (6)$$

$$= \frac{N}{L} \frac{\mu_0 I}{2} \left\{ -\sin \left(\arctan \frac{z-L}{a} \right) + \sin \left(\arctan \frac{z}{a} \right) \right\} \quad (7)$$

と求められる。

次に、ドーナツ型の磁石の作る磁場を求めよう。ドーナツの外半径を a 、内半径を b 、厚みを L とする。この磁石の作る磁場は、半径 a 、厚さ L の作る円形磁石の作る磁場と、中心は同じで極性が逆向きの半径 b 、厚さ L の作る

¹ この近似が妥当であることは、3.1.3 節で明らかになる

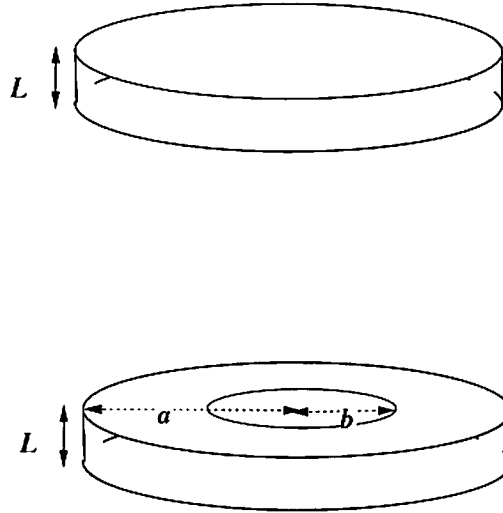


図 3: 厚みを持った円形磁石 (上) とドーナツ型磁石 (下)

円形磁石の作る磁場を足し合わせたものである。よって、P 点における磁場 $B_D(P)$ は、

$$B_D(P) = \frac{N}{L} \frac{\mu_0 I}{2} \left\{ -\sin \left(\arctan \frac{z-L}{a} \right) + \sin \left(\arctan \frac{z}{a} \right) \right\} - \frac{N}{L} \frac{\mu_0 I}{2} \left\{ -\sin \left(\arctan \frac{z-L}{b} \right) + \sin \left(\arctan \frac{z}{b} \right) \right\} \quad (8)$$

と求められる。

2.3.2 磁石の配置

磁石が安定して浮くような、周りの磁石の配置として、どのようなものが考えられるだろうか。図 4 に 3 つの候補を示した。

(a) は、もっともシンプルな構造をしている。真ん中の磁石の N 極が上の S 極と、S 極が下の磁石の N 極とそれぞれ引き合うので、不安定な平衡点しかあり得ない。たとえば、真ん中の磁石が浮上ポイントからわずかでも上にずれば、上の N-S 間の引き合う力はますます強まり、下の S-N 間の引き合う力はますます弱まる。つまり、(a) の配置にポテンシャルが極小の点は存在しない。また、この系は磁石が回転するのを止めることができない。

(b) は、(a) の構造を 3 つつないだものである。この構造の利点は、浮かす磁石の回転の一部を抑えられることにある。例えば、真ん中の磁石のうちの 1 つが沈みそうになると、ほかの 2 つの磁石がそれに反発する向きに力を受ける。それゆえ、水平方向を軸とするような回転に対してこの系は安定である。

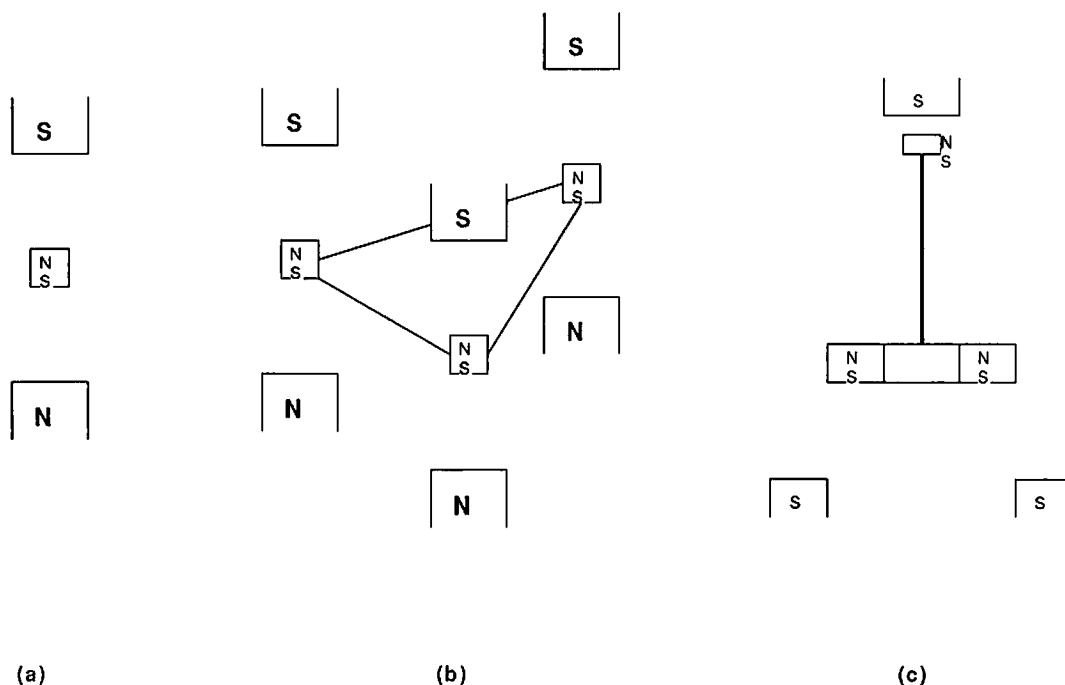


図 4: 考えられる磁石の配置

(c) は、ドーナツ型の磁石を使って、下の磁石の反発力で、浮かそうとしたものである。ただこれだけだと、浮かそうとするドーナツ型の磁石がひっくり返って下の磁石に張り付いてしまうので、回転を抑えるためにずっと上の方に引き合う磁石を取り付ける。

2.3.3 本実験で採用した磁石の配置

本実験で採用した磁石の配置は、基本的に U-CAS の原理を使いながら、コマを回さなくても浮くように改良したものである。(配置の概念図は 3.2.1 図 20) 具体的には次のようになった。一番下にコイルがあり、その上にドーナツ型磁石、一番上に小さな円形磁石がある。磁石は、主に、真ん中のドーナツ型磁石から上向きの方と中心方向の力を受ける。ここの部分は、U-CAS そのものといっても良い。コイルは鉛直方向 (z 方向) の制御用、一番上の磁石は浮かす磁石の軸の傾きを防ぐ役目をする。つまり、永久磁石の配置だけで、 x, y 方向の並進運動及び傾きは抑えられるようになっており、 z 方向の動きをコイルに流す電流を変えることで制御する。

3 実験

3.1 磁場の強さをはかる

実際に、理論的に予想したような適当な配置を構成するためには、磁石やコイルの作る磁場が、実際にどの程度であるのか知らなければならない。そのためには、磁場の強さをはかる道具が必要である。

3.1.1 ガウスメートルの制作

この実験では、磁極の極性を含めた磁場の測定が可能なホール素子（東芝 THS119）を用いたガウスメートルを製作することにする。回路図は図5のようである。

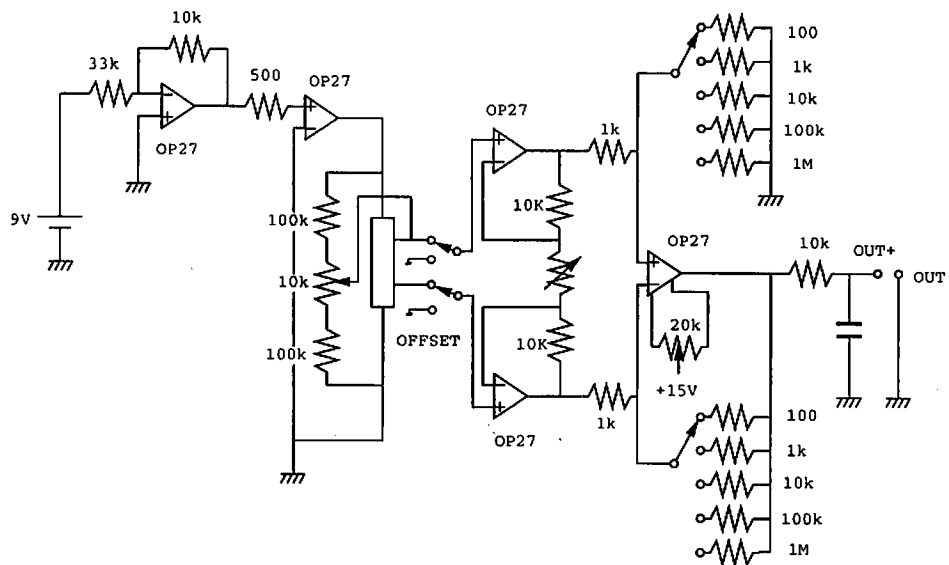


図 5: ガウスメートルの回路

3.1.2 ガウスメートルの校正

円形のコイルを用いて、理論的に予測される磁場の強さと実際に測定される電圧から、装置の校正をする。

校正に使用した装置は、図6のようなものである。

円形コイルの作る磁場は、流れる電流と巻き数がわかれば簡単に求めることができる。導線をステンレス製のピーカーに巻き付けることで円形コイルを作り、中心軸上の磁場を電圧の関数として測定した。円形コイルの半径は41.2mm、厚みは9.1mm、巻き数100。

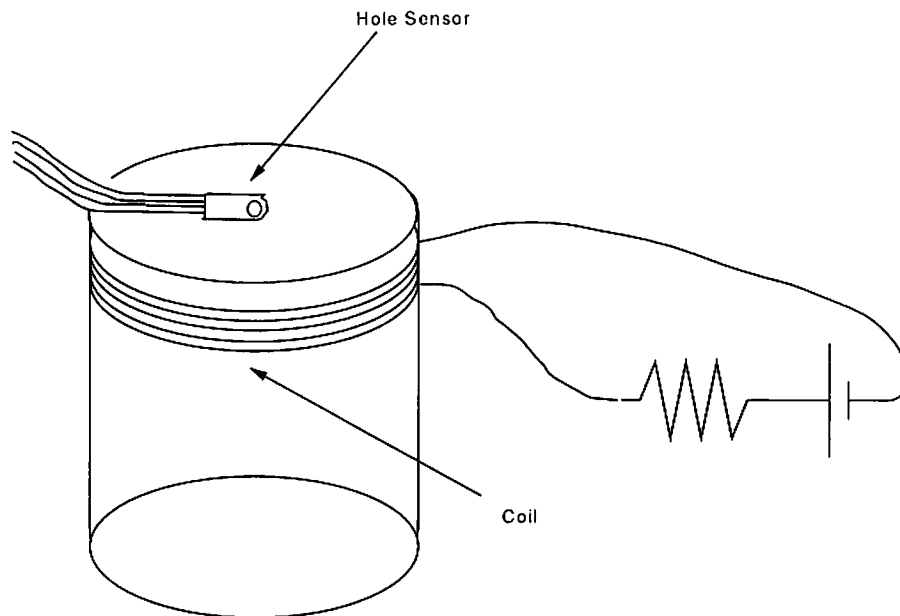


図 6: ガウスメートルの校正

測定された電圧と理論的に予測される磁場の強さのグラフを次の図 7 に示す。

磁場の強さは、式 (8) を使って求める。最小 2 乗法で直線にフィットすると、センサーの OutPut を x [mV], 磁場の強さを B [gauss] として、

$$B[x] = -24 + 15x$$

と求められる。これが校正直線の式である。

3.1.3 磁場の測定

当研究室には、“殺人マグネット”の異名を持つ、非常に強い円形ネオジウム磁石がある。この磁石の磁場を、作製したガウスメートルを使って測定した。

磁石の半径は 35mm、厚さは 8mm。中心軸上の磁場の測定値に、式 (8) の計算結果を重ねたものを図 8 に示す。これからも、円形磁石を同じ大きさのコイルと近似することは正しいと思われる。

中心軸上の磁場、及び高さをいろいろ変えて x 軸方向、 y 軸方向に沿ってはかった磁場の様子を図 8 から図 19 に示す。

円形磁石だけでも、表面付近では、 z 軸方向の磁場に窪み（磁場極小の点）があるのが、興味深い。 x 軸、 y 軸方向の磁場のグラフを見ると、原点付近は、磁場が 0 で、原点から離れるにしたがって、磁場の力が強くなっている。

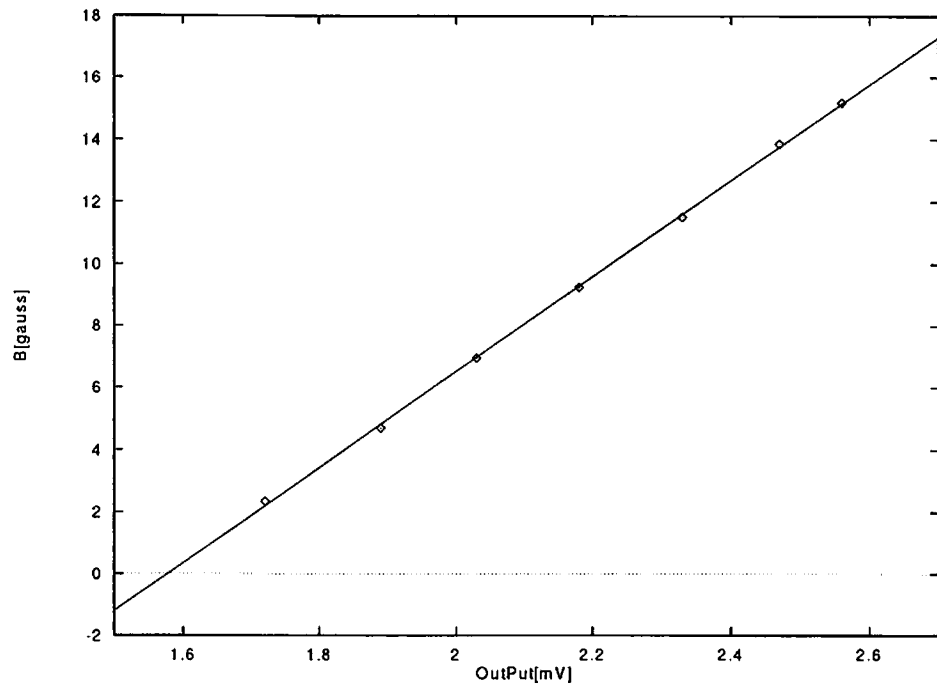


図 7: 校正直線

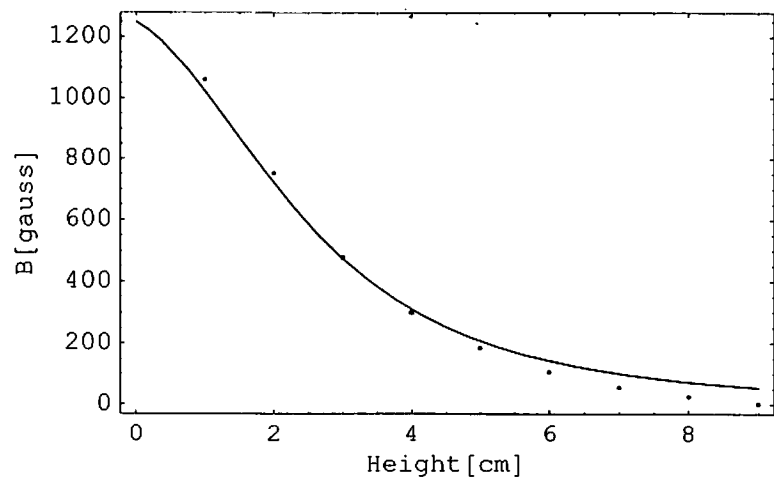


図 8: 中心軸上の磁場 (測定値と理論曲線)

これから、表面付近に、わずかではあるが、鞍点のようなポテンシャルが形成されていると推測できる。

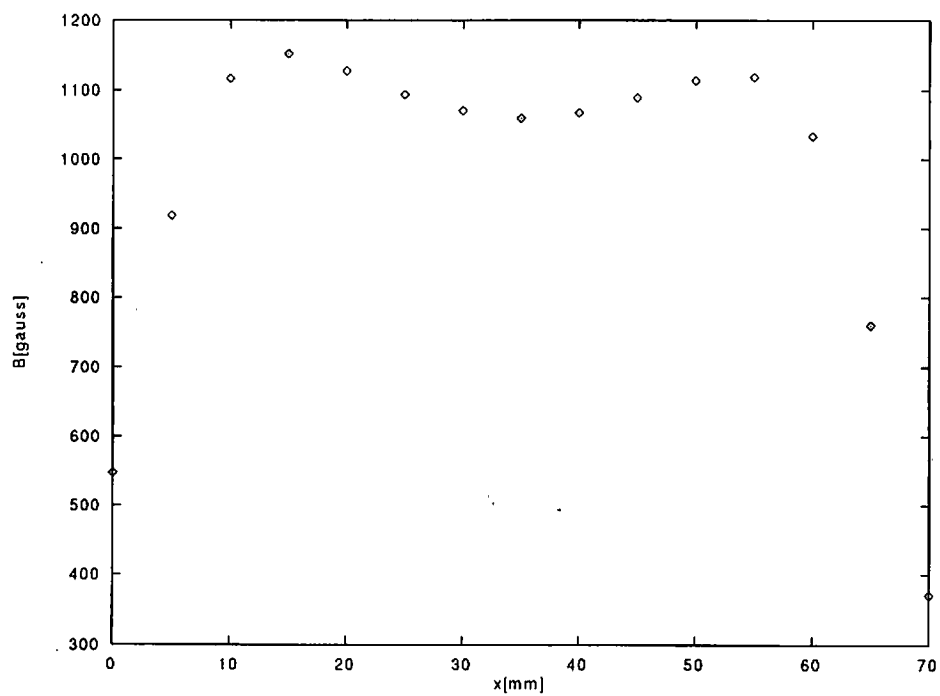


図 9: 高さ 11mm で x 軸方向にそって見た z 軸方向の磁場

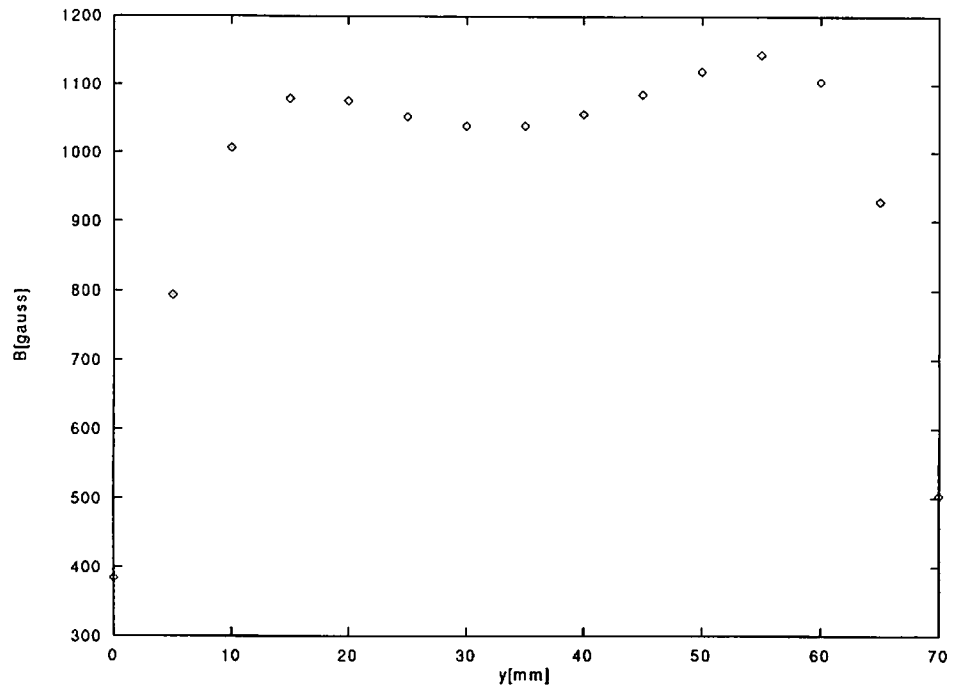


図 10: 高さ 11mm で y 軸方向にそって見た z 軸方向の磁場

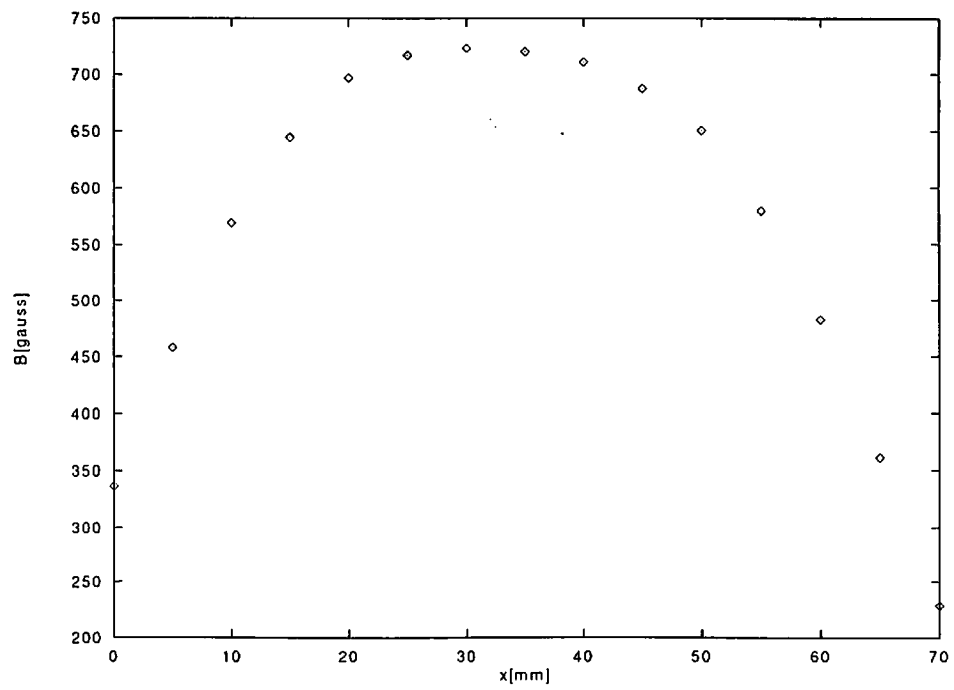


図 11: 高さ 20mm で x 軸方向にそって見た z 軸方向の磁場

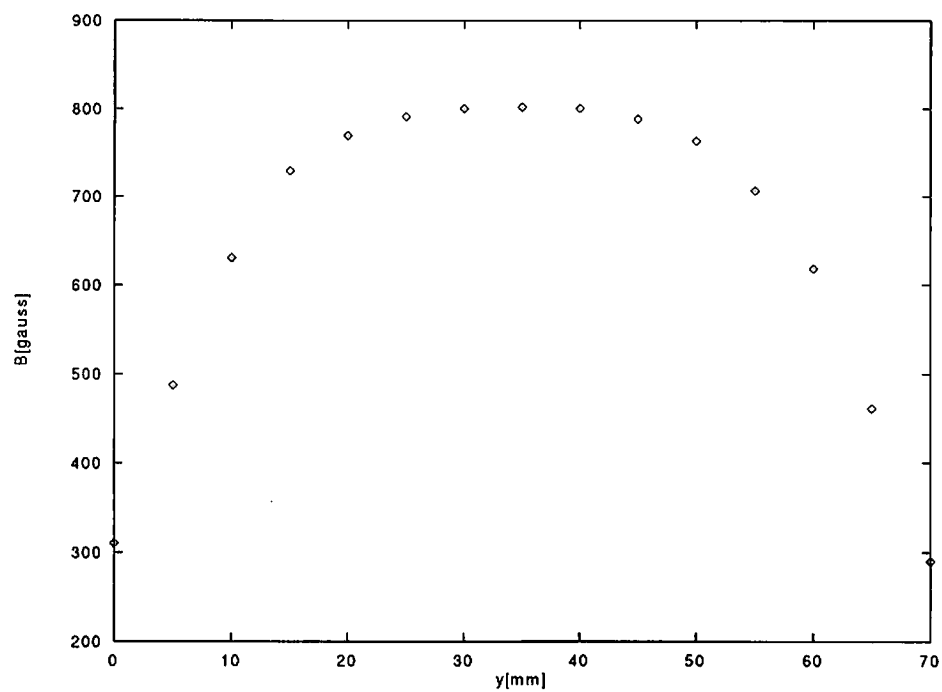


図 12: 高さ 20mm で y 軸方向にそって見た z 軸方向の磁場

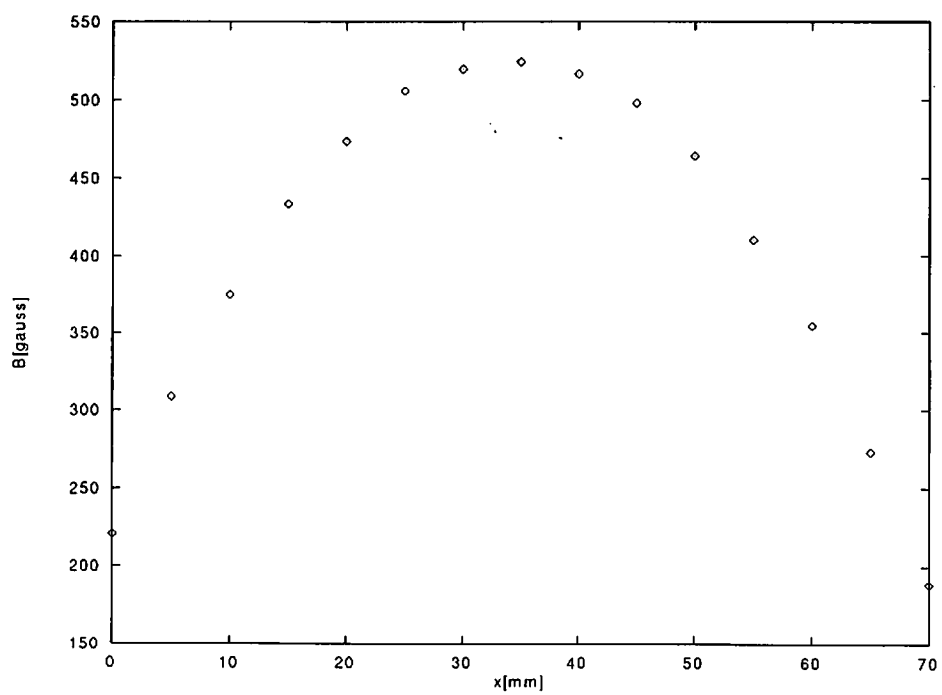


図 13: 高さ 30mm で x 軸方向にそって見た z 軸方向の磁場

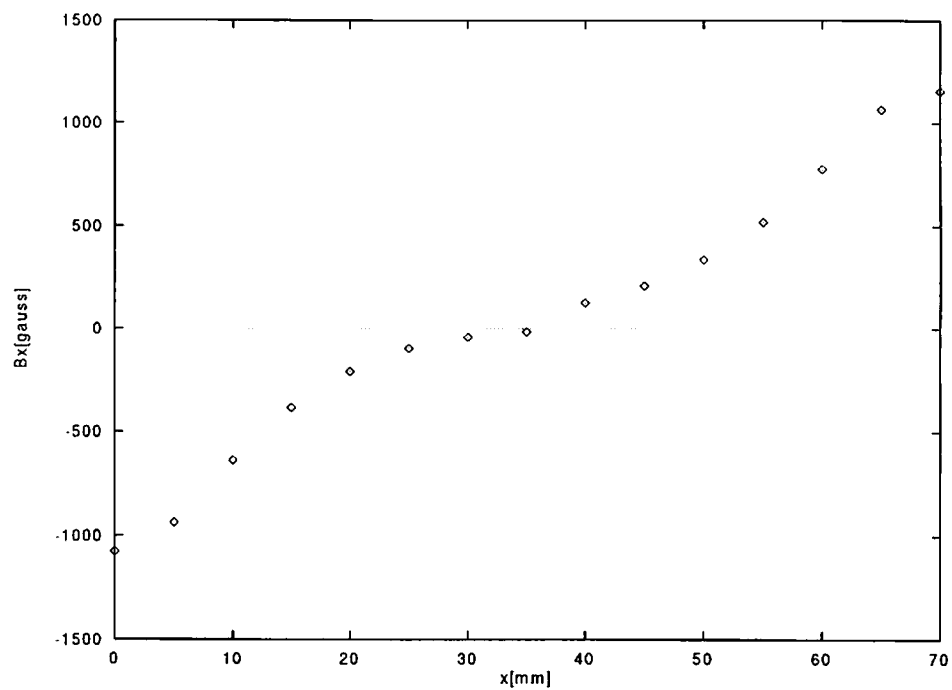


図 14: 高さ 10mm で x 軸方向にそって見た x 軸方向の磁場

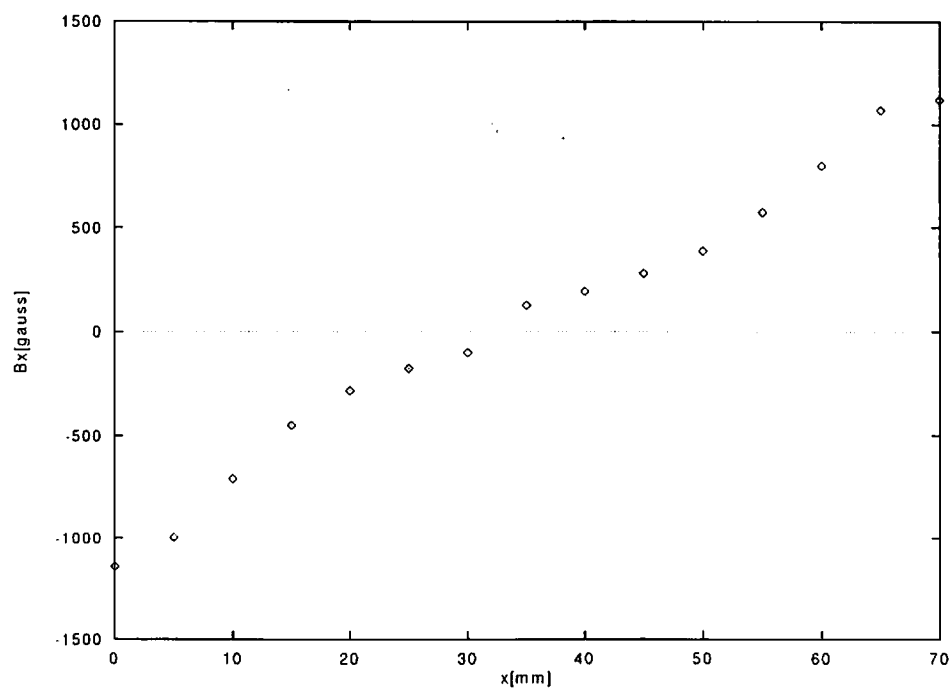


図 15: 高さ 10mm で y 軸方向にそって見た y 軸方向の磁場

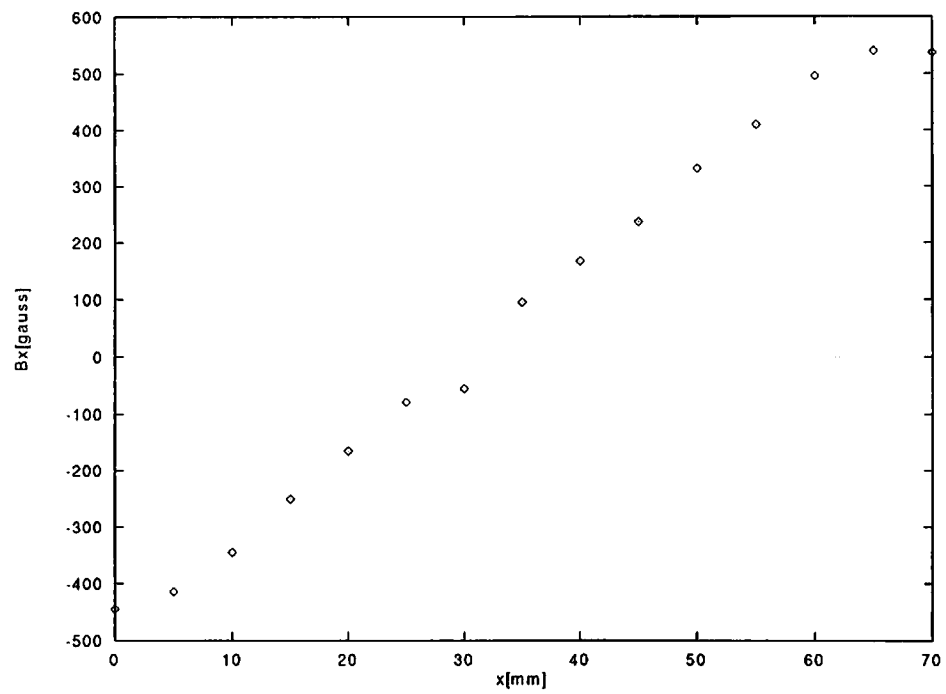


図 16: 高さ 20mm で x 軸方向にそって見た x 軸方向の磁場

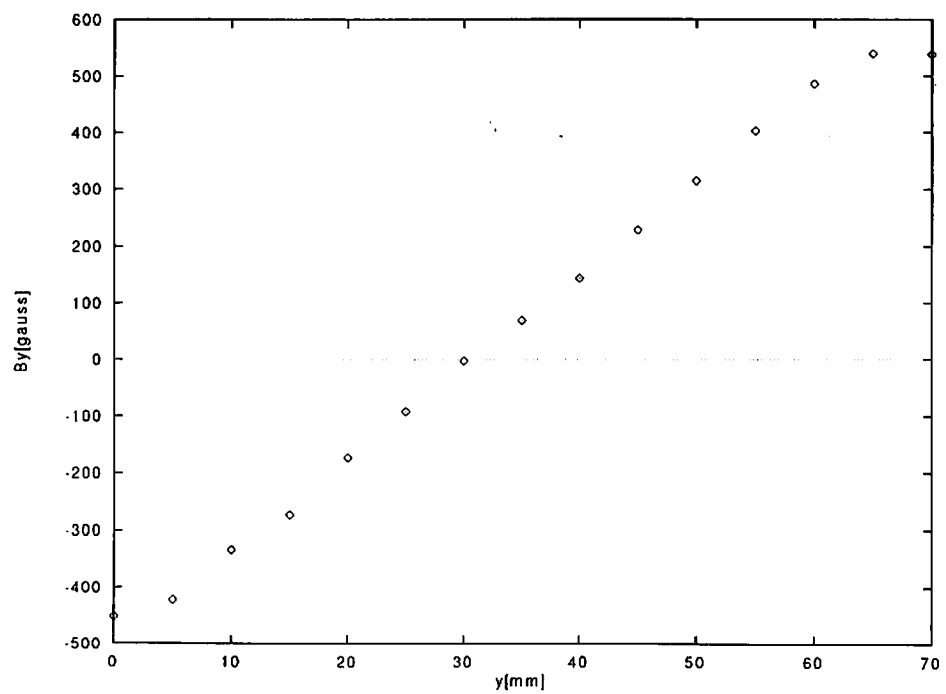


図 17: 高さ 20mm で y 軸方向にそって見た y 軸方向の磁場

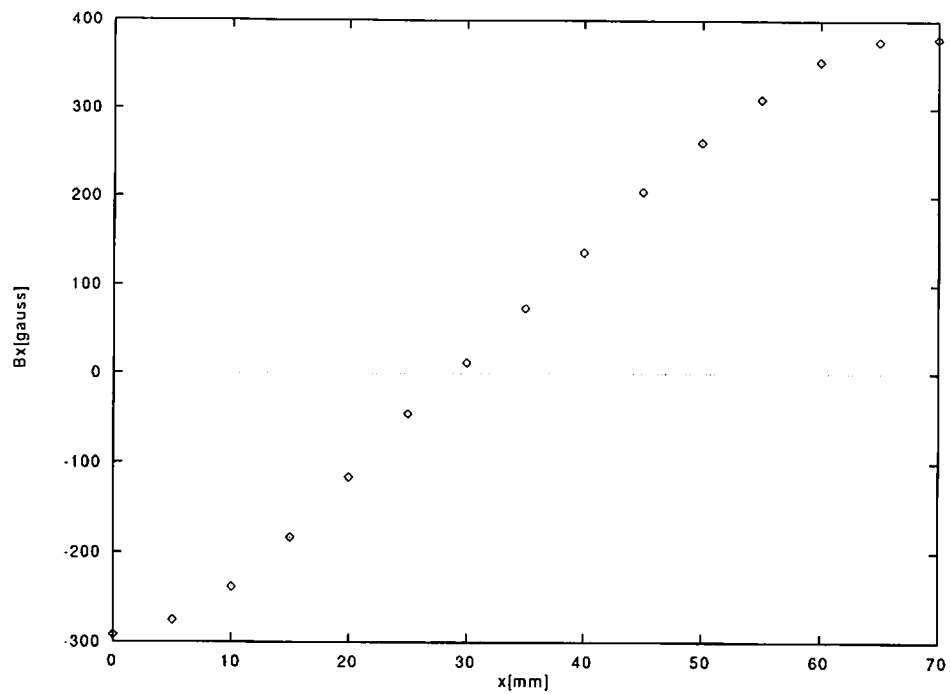


図 18: 高さ 30mm で x 軸方向にそって見た x 軸方向の磁場

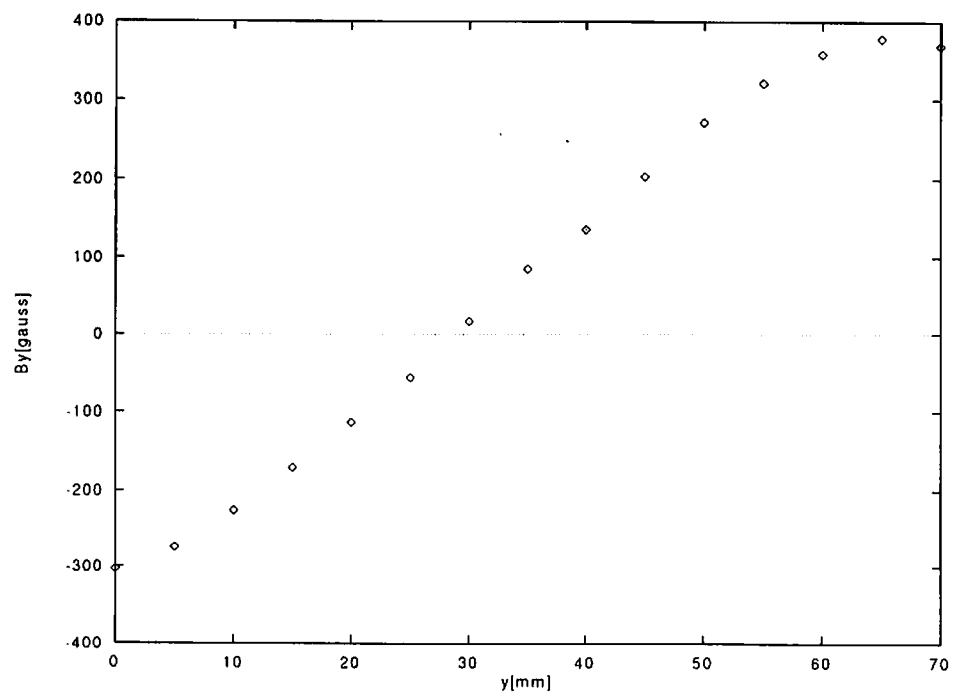


図 19: 高さ 30mm で y 軸方向にそって見た y 軸方向の磁場

3.2 磁気浮上装置の作成

3.2.1 台の作成

台は、3本の支柱と、そこにはめ込まれたアクリル板、及びアクリル板に取り付けられたコイル、磁石、ハイトセンサー²からなる。(図 20 参照)

3本の支柱のうち1本はステンレス製、2本は真鍮製である。ステンレスと真鍮を混ぜたことに特別な意味はない。真鍮は、微弱だが磁化するので使わないのが理想的だが、ちょうど良い長さのステンレス棒がなかったので、間に合わせに使った。支柱と垂直にはめ込まれる板の材料としてのアクリル板は、おそらく理想的と思われる。まず、アクリルは磁化しない。さらに、金属板だと、コマの移動による磁束密度の変化で渦電流が発生し、系のエネルギーが失われてしまうが、アクリル板ではそういうことはない。一番底のコイルは、磁石を制御するための部分である。そのための必要な力を出せなければならない。下から2段目の板に取り付けられたフェライト磁石は、ドーナツ型をしており、今回浮かす磁石をそのまま大きくした形をしている。この部分は、U-CAS そのものといっても良い。一番上の小さな円形磁石は、浮かす磁石に取り付けられたアルミ棒の傾きを押さえ、中心に引き込もうとする役目をする。

3.2.2 浮かす磁石の作成

浮かす磁石の構造は、図 21 のようである。

真ん中にアルミ棒が通っている。アルミ棒にはねじ山が切っているので、棒の周りに構造物を取り付けることができる。棒の一番下には、円筒状の小さいネオジウム磁石がある。これは、コイルと相互作用する。棒の下から2番目にはU-CASのコマと同じドーナツ型のフェライト磁石がある。これは、台のドーナツ型フェライト磁石と相互作用する。棒の真ん中の板は、中心にピンホールが開けてある。これは、ハイトセンサーに位置を知らせる光を供給する。その上のストッパーは、浮上に原理的に必要なものではない。しかし、実際に浮上ポイントを探していくには、かなりの試行錯誤が必要であり、その際便利なのでつけてある。棒の一番上のアルニコ磁石は、台の一番上の磁石と引き合う。全体の重さは28g程である。

3.2.3 制御系に使うセンサーの作成

制御系は、図 22 のようにコイルドライバ、フィルター、差動アンプ、ハイトセンサーからなる。図 22 は、図中の左側から、系に外乱が加わり、それ

² このレポートでは、高さを測定するポジションセンサーのことをハイトセンサーと呼ぶことにする。

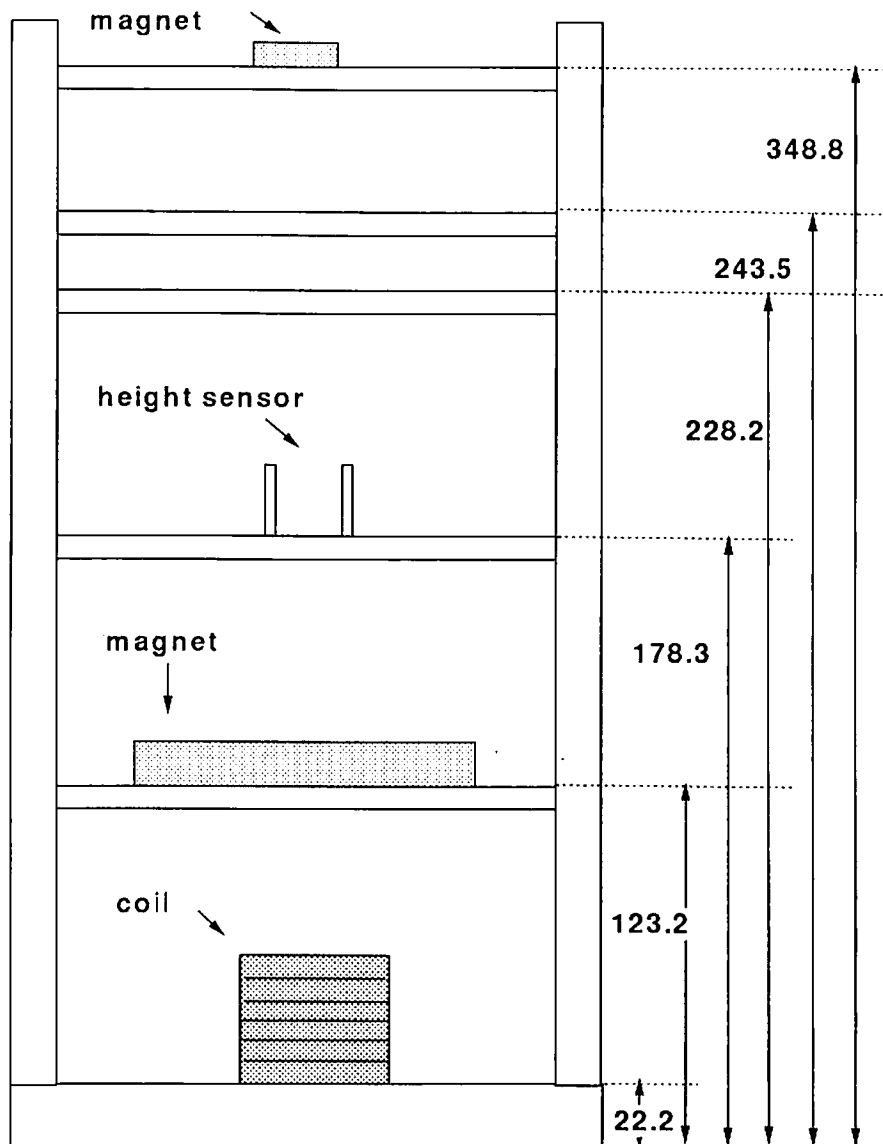


図 20: 台の概念図 (横から見たもの 図中の数字の単位は mm)

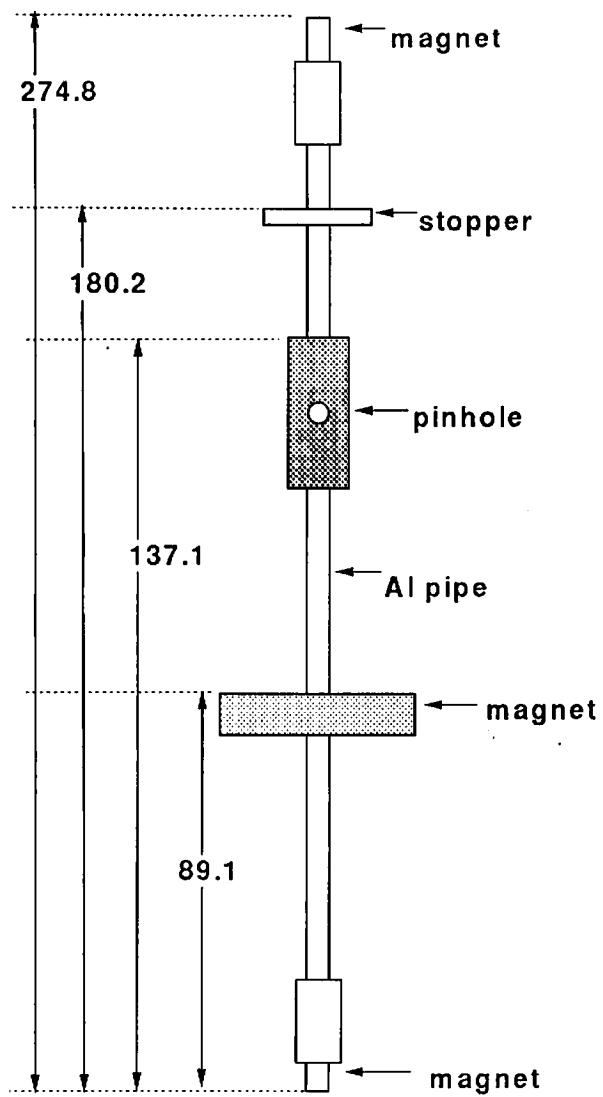


図 21: 浮かす磁石の概念図 (図中の数字の単位は mm)

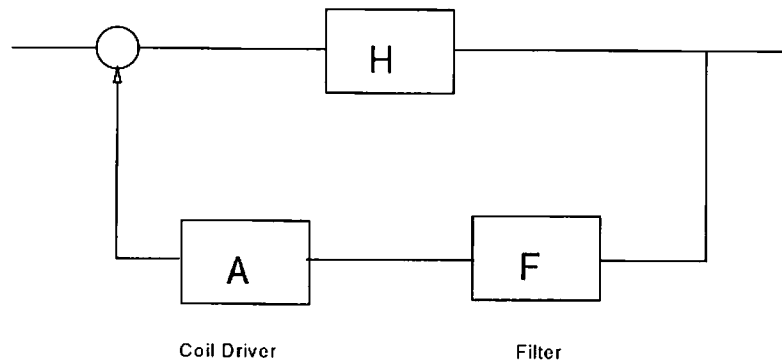


図 22: 制御系の概念図

をうち消す向きに負のフィードバックをかける様子を示している。図中の H は、機械-磁石系を表す。

今回使用するハイトセンサーとしては、図 23 のようにピンホールから受ける光で、ピンホールの高さをはかるタイプのものをまず考えた。

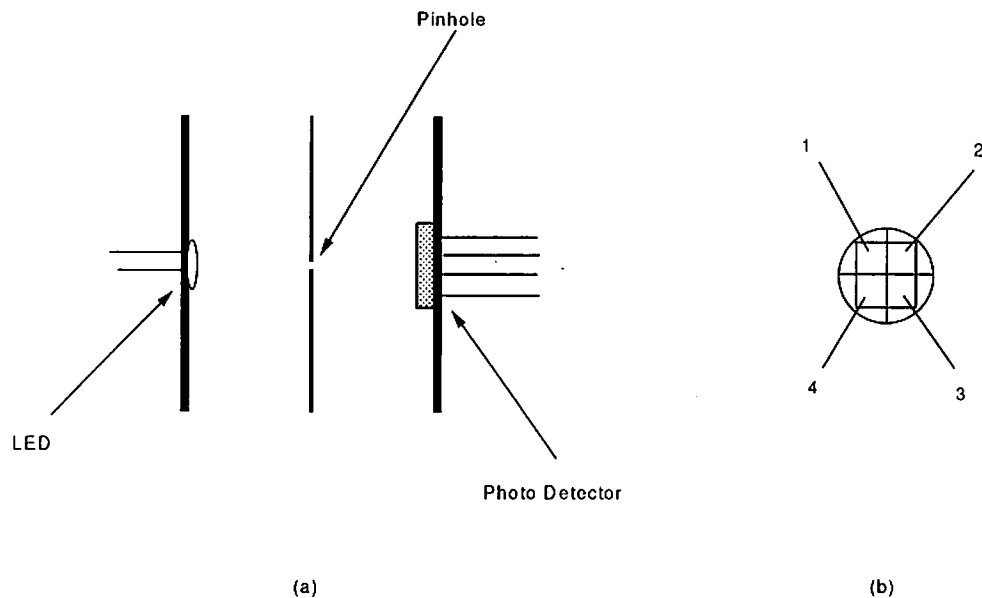


図 23: ピンホールハイトセンサー

ピンホールハイトセンサーは図 23 のような構造をしている。手前の LED (L2656 浜松ホトニクス) から奥の Photo Detector (S4349 浜松ホトニクス) に向けて赤外線が常に照射されている。Photo Detector は 4 つの受光素子からなっていて、それぞれの部分が受ける光の量の差から、ピンホールの垂直方向と水平方向の動きを読むことができる。このような Photo Dector は、

Quadrant Photo Dector (QPD) と呼ばれる。(出力電圧と高さの関係を測定したものは 4.1.1 図 30) ピンホールハイトセンサーは、磁石が同じ高さにあるときは、常に同じだけの光の量をピンホールから受けていなければ、制御はうまくいかない。ところが、アルミ棒は、恐らくそれ自身の構造の非対称性のために、安定して制御できるポイントにあっても、軸の周りに回転してしまう。すると、磁石の高さは変わらないのに、ピンホールから Photo Detector に届く光の量に急激な変化が生じるので、うまく制御できなくなる。

そこで、回転しても制御できるハイトセンサーとして、反射式ハイトセンサーを試してみた。

反射式ハイトセンサーは、4.1.2 図 31 のような構造をしている。真ん中の LED (L2656 浜松ホトニクス) から発射された赤外線は、鏡に当たって一部がセンサーの方向に返ってくる。その反射光は LED の両側の Photo Detector (S1190 浜松ホトニクス) に入る。2つの PD の出力の和が、センサーからの出力電圧となる。それを鏡までの距離に換算する。(距離と出力電圧の関係を測定したものは 4.1.2 図 32)

このセンサーを赤外線の向きが鉛直方向になるように取り付ければ、浮かす磁石のアルミ棒の周りの回転に対して影響を受けずに制御できるように思われる。ところが、試してみると、棒の傾きを磁石の高さの変化と区別できないという欠点があることがわかった。棒が x, y 方向に傾くと、磁石の高さが変化しなくても帰ってくる光の量に変化が生じるので、誤った制御をかけてしまい、磁石が発振して、安定して浮かないのである。

それで、間に合わせとして回転は直径 1mm のタングステンワイヤーで止めることにし、結局ピンホールハイトセンサーを使うことにした。ワイヤーで止めている様子を図 24 に示す。

3.3 カップリングの強さ

3.3.1 磁石とコイルのカップリング

コイルに一定の電流を流していても、ボビンの中の磁石の位置が変化すると相互作用が変わって受ける力が変化してしまう。図 25 のように磁石の位置と力の関係を測定したところ、図 26 のようになった。これからわかるように、磁石がコイルから 6mm ほど出ている状態のときに力が最大になる。また、位置の変化による力の変化が最小となるから、磁石の位置が変化してもほぼ同じ力がフィードバックされる。そこで、磁石がコイルから 6mm ほど出ているように装置を作った。

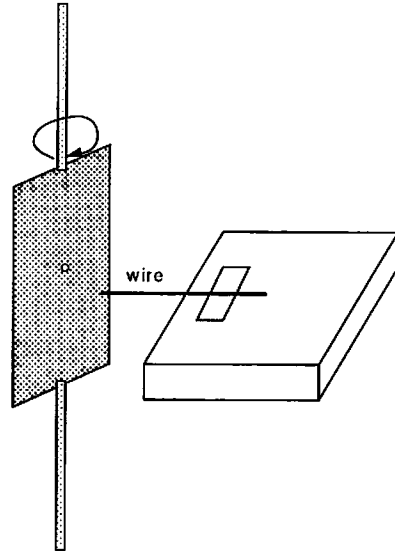


図 24: ピンホールの開いた板の回転をタングステンワイヤー ($\phi 0.1\text{mm}$) で止める

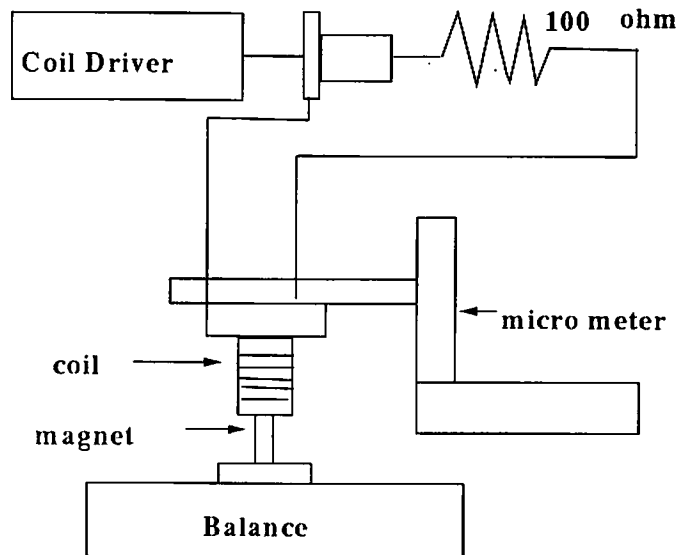


図 25: 磁石とコイルのカップリングの強さをはかる

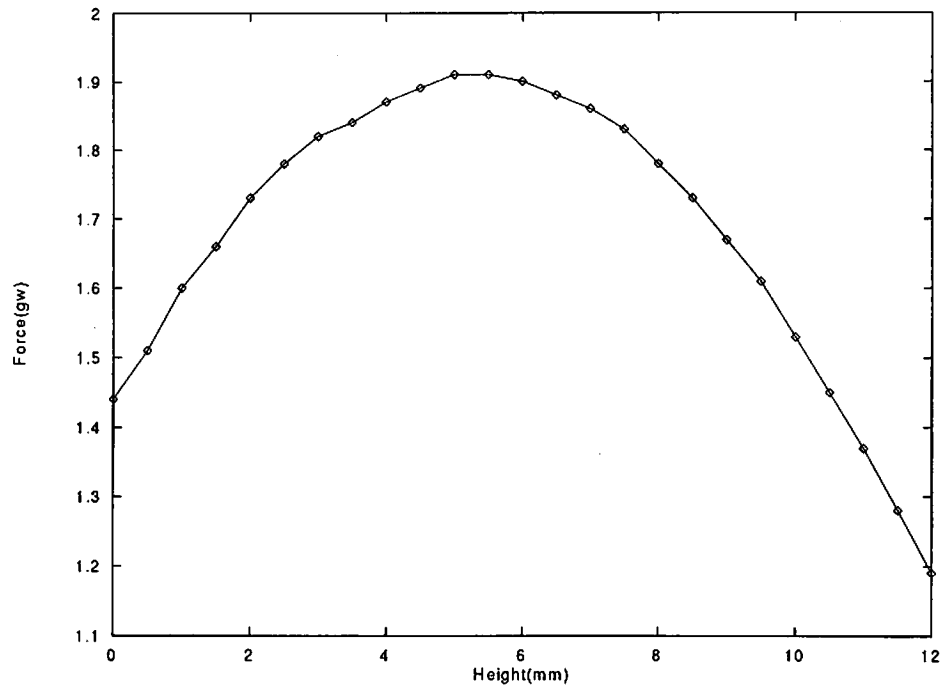


図 26: コイルの高さと受ける力の関係 (横軸はポピンから突き出た磁石の長さを表す。)

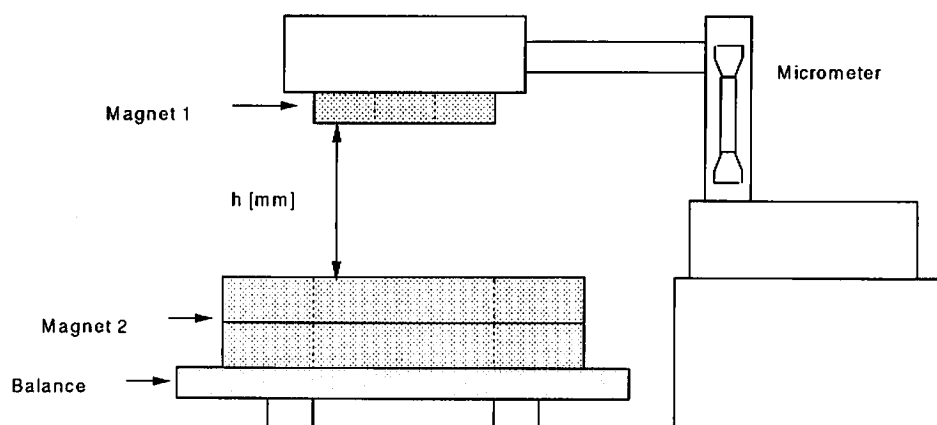


図 27: 磁石同士の距離と力の関係をはかる

3.3.2 磁石と磁石のカップリング

図 27 のように、浮かすドーナツ型磁石と台のドーナツ型磁石の距離と力の関係を測定した。結果を、図 28 に示す。

これからわかるように、磁石は、高さが 22mm から 24mm の間でもっとも強く力を及ぼし合う。この高さで 2 つの磁石を配置したかったが、ここは、 x, y 方向に対して不安定であった。 x, y 方向に安定な領域は、もっと低い高さの領域にある。

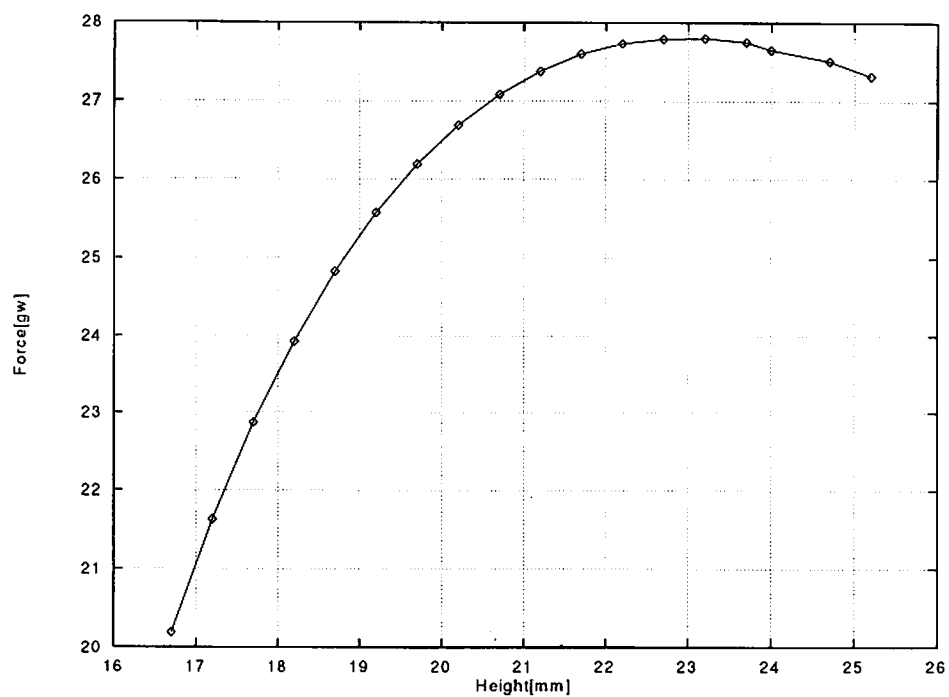


図 28: 磁石の高さと力の関係

4 結果と考察

4.1 ハイトセンサーの特性

4.1.1 ピンホールハイトセンサー

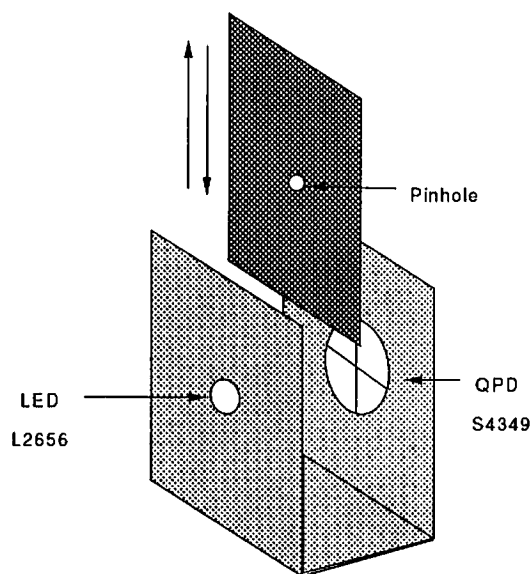


図 29: ピンホールの高さとお出力電圧の関係をはかる

ピンホールハイトセンサーで、ピンホールの高さと出力電圧の関係を測定した。結果を図 30 に示す。

実際に制御をかける際には、特性がリニアな領域で使用する。ここでは、高さが 6.56 mm から 6.38 mm の範囲で使用するとして、この領域での高さ h [m] と出力電圧 V [Volt] の関係は、

$$h = -3.33 \times 10^3 V$$

と近似できる。

4.1.2 反射式ハイトセンサー

反射式ハイトセンサーの距離と出力電圧の関係を、図 31 のようにマイクロメーターで距離を変えながら測定した。結果は、図 32 のようになった。

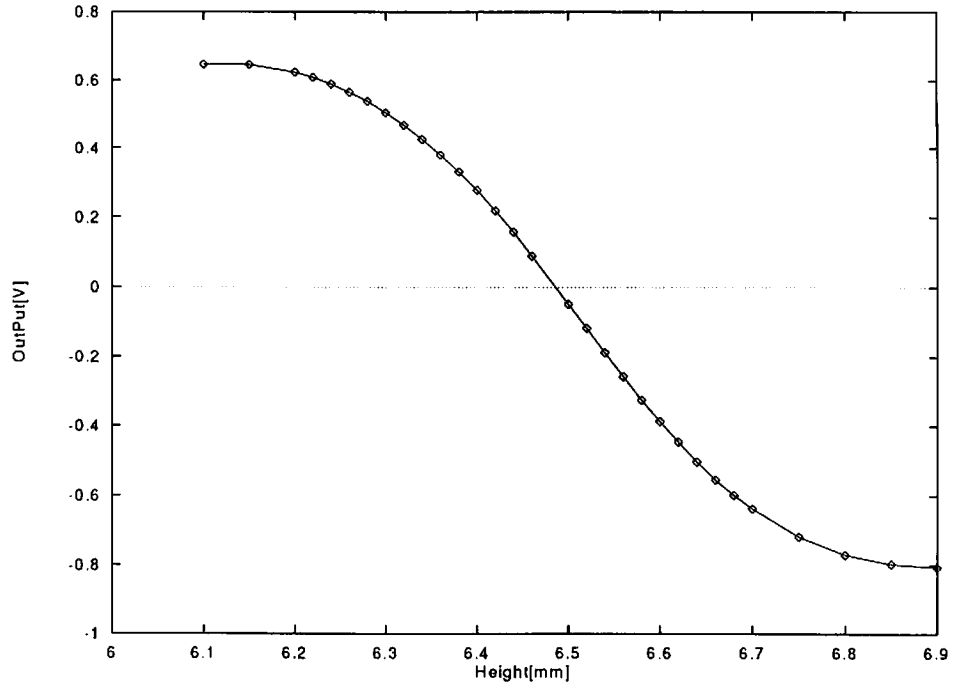


図 30: ピンホールライトセンサーの高さと出力電圧の関係

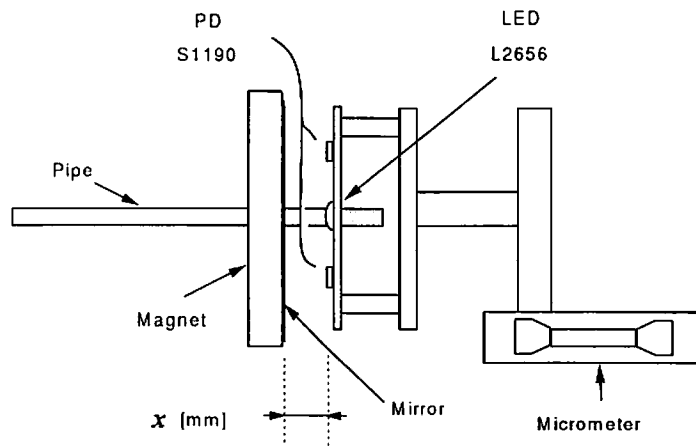


図 31: 反射式ハイトセンサー

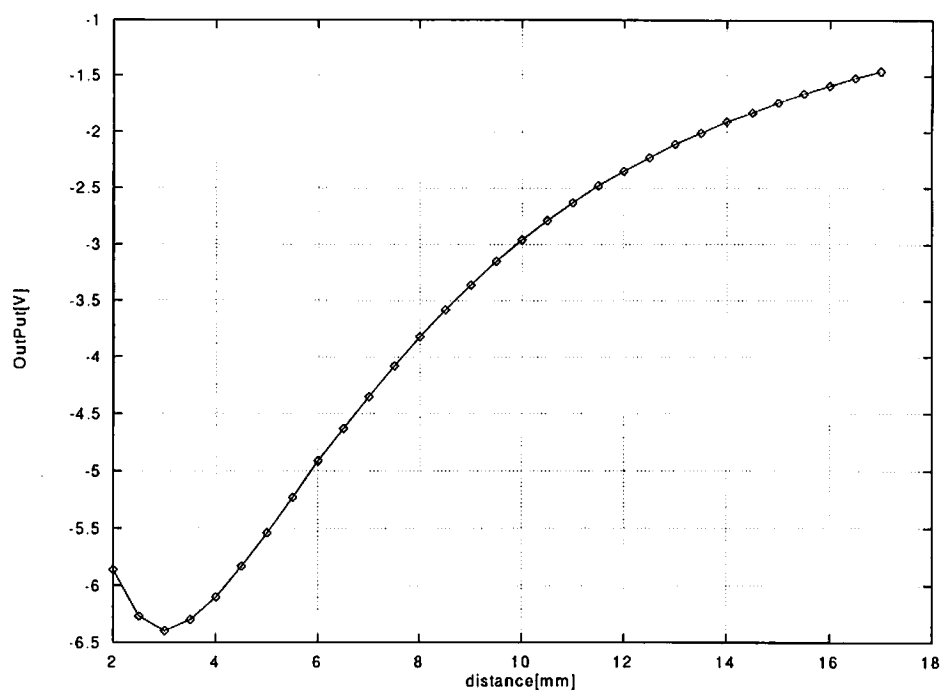


図 32: 反射式ハイトセンサーの距離と出力電圧の関係

4.2 オープンループ伝達関数の測定

図 33 のようにオープンループ伝達関数の測定を行った。ただし、浮かす磁石の回転が抑えきれなかったため、ワイヤーで回転を止めて測定を行った。

図 33 の中では、具体的に、

$$\frac{(SG + chB) \times (\text{open loop})}{SG + chB} = (\text{open loop})$$

を測ることになる。

図 34、図 35 より、

$$\text{ユニティゲイン周波数} = 70 \text{ Hz} \quad (9)$$

$$\text{位相余裕} = 15^\circ \quad (10)$$

と求められる。

つまり、この系は、

オープンループゲインが 1 となる周波数 (ユニティゲイン周波数) までは、位相が 180° 以上遅れない

という無条件安定条件を満たしている。

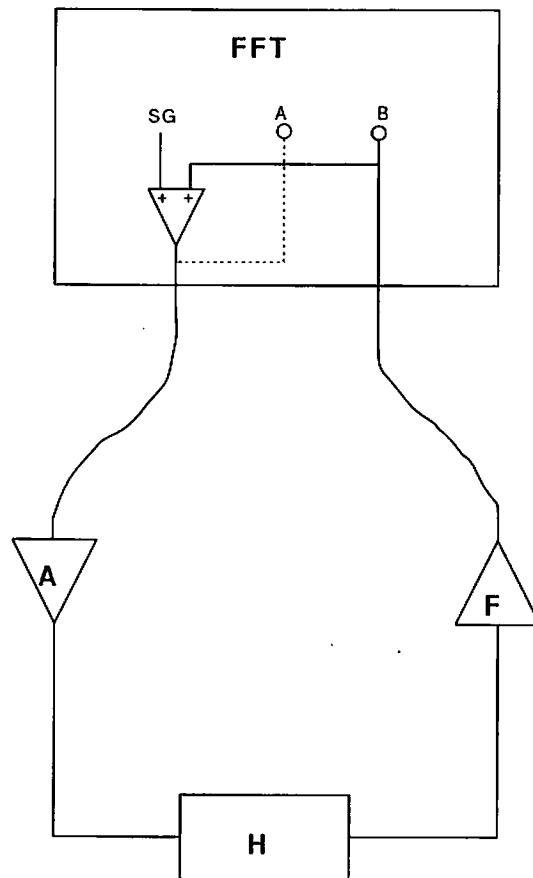


図 33: オープンループ伝達関数の測定のための回路の概念図

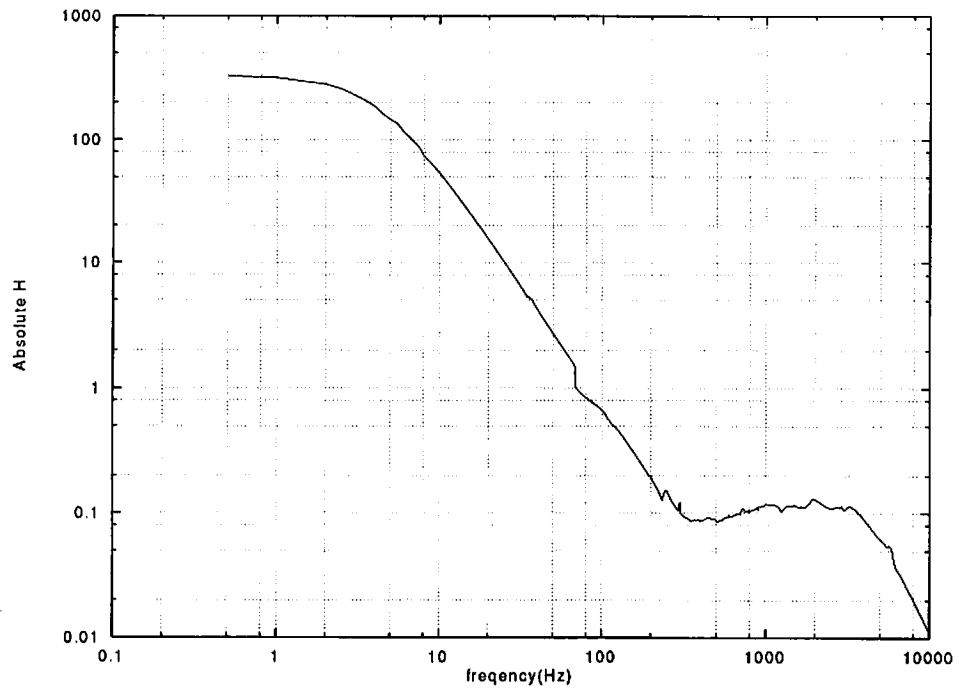


図 34: 周波数と絶対値との関係

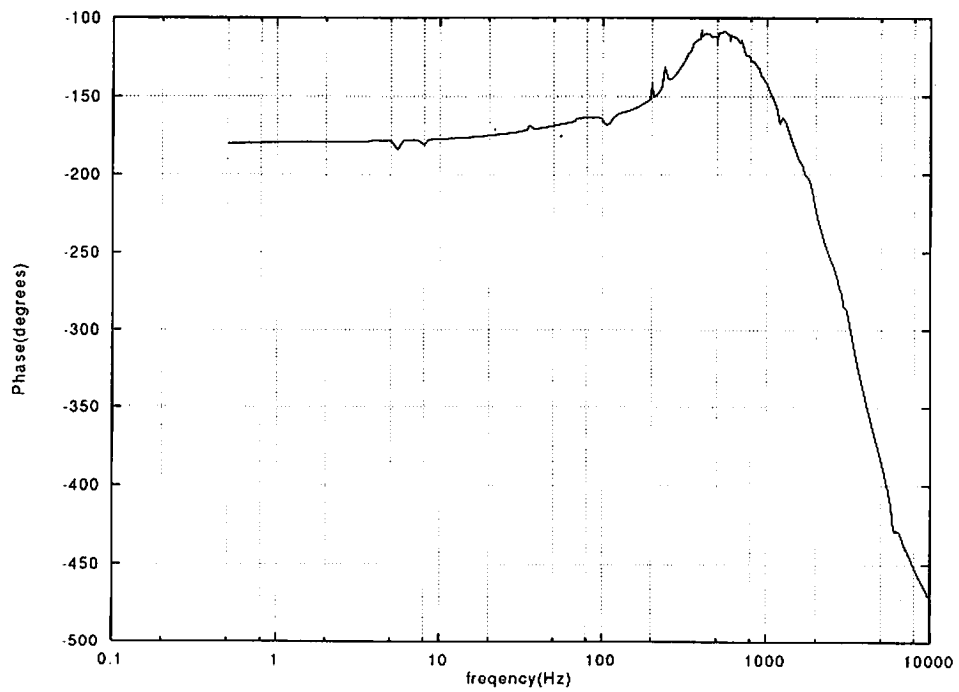


図 35: 周波数と位相遅れの関係

次に、磁石の変位と地面振動の周波数特性を測定した。磁石の変位は、ピンホールライトセンサーを使って、測定した。その際、磁石の回転は、タングステンワイヤーで止めた。(図 refwire 参照) 地面振動は、地震計を使って、地面の揺れの加速度を測定した。加速度から、地面の揺れに変換する。ただし、この地震計は、100Hz 以下の測定のためのものなので、100Hz より、高い周波数でのデータはあまり信用できない。

測定の結果のグラフを示す。(図 36、図 37) 図 36 と図 37 を重ねたものを図 38 に示す。グラフより、ユニティゲイン周波数より低い周波数域では、磁石は台に対して一定の高さを保つように制御できていることがわかる。ユニティゲイン周波数よりも高い周波数域では、地面の震動が減衰しているのに磁石の振動が減らないように見えるが、これは種類のノイズのためであると思われる。例えば、100Hz 及びその倍振動にピークが出ているのは、恐らく蛍光灯のためである。その他にラインノイズも考えられる。

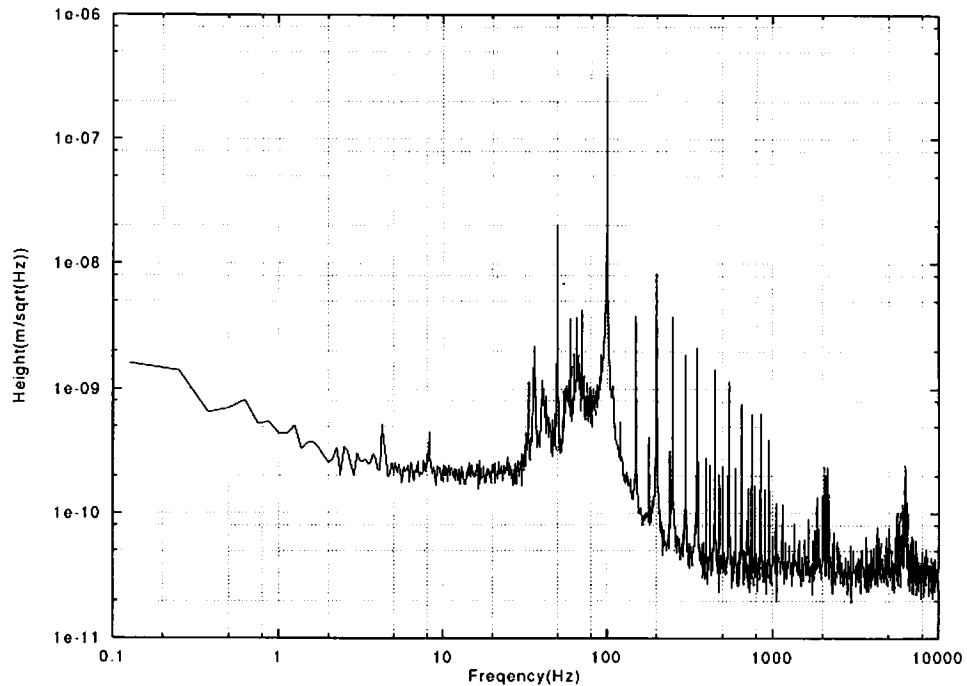


図 36: 周波数と磁石の高さの関係

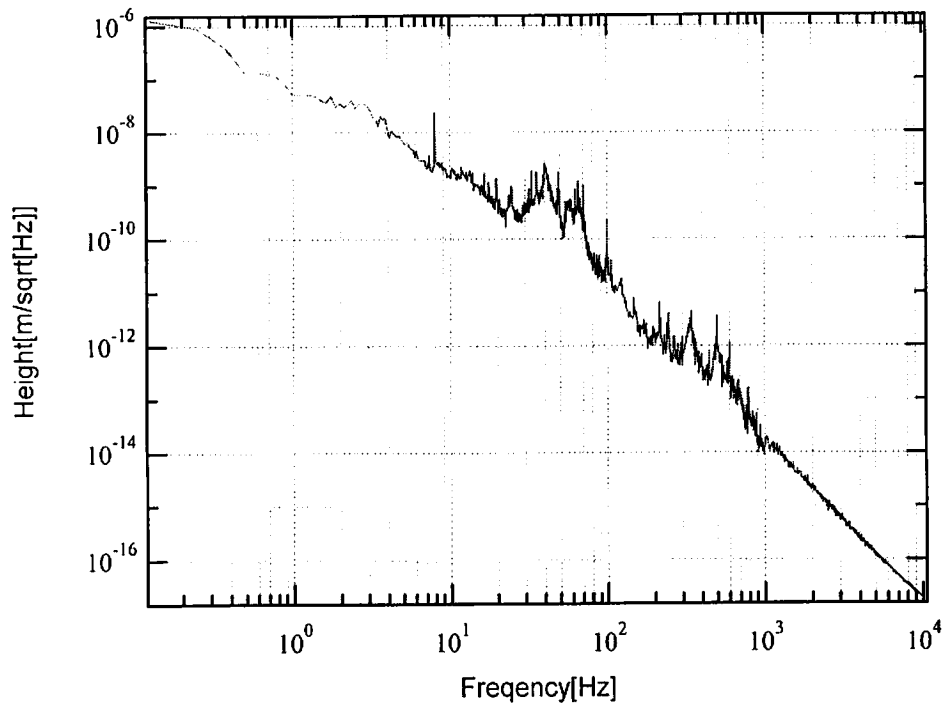


図 37: 周波数と地面の震動の関係

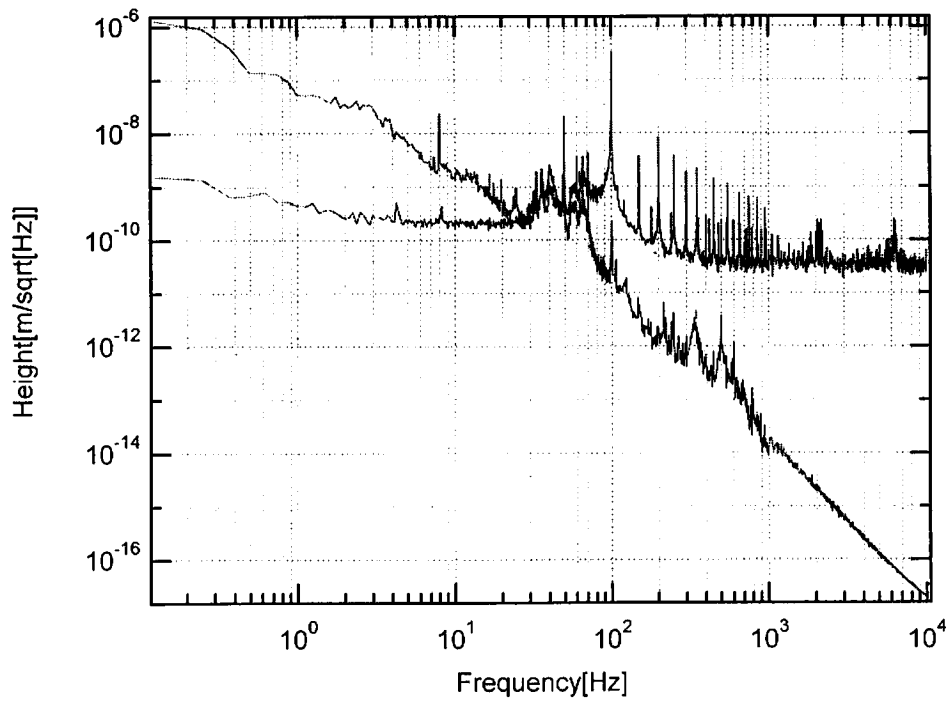


図 38: 図 36 と図 37 を重ねたグラフ

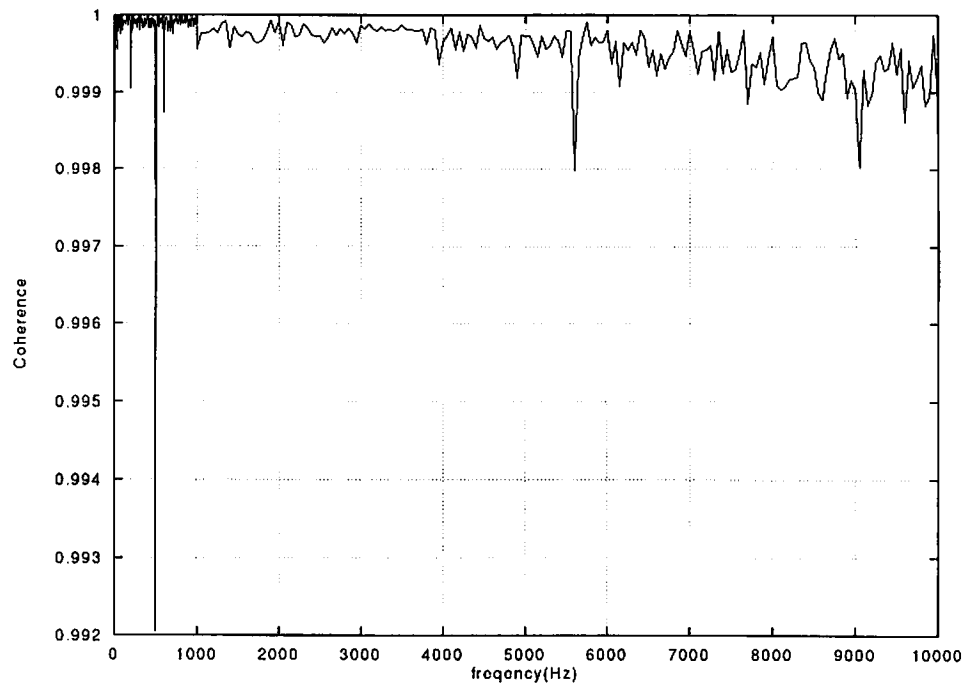


図 39: 周波数とコヒーレンスとの関係

さらにフィルター、コイルドライバーの伝達関数を $F(\omega)$, $A(\omega)$ 、機械-磁石系と系全体の伝達関数を $H_M(\omega)$, $H(\omega)$ とすると、

$$H_M(\omega)F(\omega)A(\omega) = H(\omega)$$

であるから、 $H_M(\omega)$, $F(\omega)$, $A(\omega)$ がわかれば、系全体の伝達関数 $H(\omega)$ を計算でき、実験で求めた値との比較ができるのだが、そこまでは時間の制約のため、やることができなかった。

5 まとめ

この実験で、行ったことは次のようにまとめられる。

1. 永久磁石だけでは磁石を安定に浮かせることはできない。(磁場に対する Earnshaw の定理)。
2. この実験での磁気浮上のシステムは、U-CAS 型の磁場を使い、さらに鉛直軸方向の制御と、回転を抑制する構造を持たせたものである。(ただし、鉛直軸周りの回転は抑えられていない。)
3. ガウスマーターを製作した。
4. “殺人マグネット”の磁場を測定した。
5. 鉛直軸周りの回転を除けば、安定に磁石が浮く装置を開発した。
6. 系のオープンループ伝達関数を測定した。ユニティゲインは 70Hz、位相余裕は 15° であった。

6 感想

これまで僕は、リニアモーターカーや、ガリヴァー旅行記に登場する飛島ラピュータが磁石の反発力で浮上し移動できるように、物を浮かせるとしたら磁気的な力で、それもそれほど難しくないと思っていました。ところが、この一見簡単なことは、実はとても難しいことなのだということが、この実験を通してよくわかりました。

この実験の間、ずっと面倒を見てくださった高森さんをはじめ、多くの研究室の方々のお世話になりました。有り難うございました。