

永久磁石を用いた懸垂形磁気浮上装置の開発

(ボイスコイルモータを用いた磁気浮上機構)

高知工科大学 知能機械システム工学科

1055074 吉田祐介

目次

- 1、 はじめに
 - 1 - 1、 背景
 - 1 - 2、 非接触浮上機構
- 2、 懸垂形磁気浮上機構
 - 2 - 1、 磁気浮上機構
 - 2 - 2、 磁気浮上機構の分類
 - 2 - 3、 磁気浮上機構の形
 - 2 - 4、 懸垂形磁気浮上機構
 - 2 - 5、 浮上させるための制御
 - 2 - 6、 研究の目的
- 3、 懸垂形磁気浮上装置の構成
 - 3 - 1、 圧電アクチュエータを用いた試作機
 - 3 - 2、 ボイスコイルモータを用いた試作機 1
 - 3 - 3、 ボイスコイルモータを用いた試作機 2
- 4、 理論的浮上可能性
 - 4 - 1、 モデル化
 - 4 - 2、 運動方程式
 - 4 - 3、 永久磁石の吸引力
 - 4 - 4、 線形化
 - 4 - 5、 PD 制御による安定性の検討
 - 4 - 6、 最適レギュレータ法による最適ゲインの検討
- 5、 シミュレーション
 - 5 - 1、 概要

- 5 - 2、浮上させるため PD 制御
- 5 - 3、結果
- 5 - 4、省エネのための定常電流零化制御
- 5 - 5、結果
- 5 - 6、VCM の可動範囲の真中で動作させるための制御
- 5 - 7、結果
- 5 - 8、シミュレーションの総合結果
- 6、 浮上実験
 - 6 - 1、ボイスコイルモータを用いた試作機 2 の浮上実験
 - 6 - 2、浮上実験結果
- 7、 おわりに
- 8、 参考文献
- 9、 謝辞

1、はじめに

1 - 1、背景

物品を搬送するために、多くの工場や倉庫では、台車やクレーンなどが使われている。現在、一般的に用いられている搬送装置や支持機構のほとんどは、減速機、ベアリング、車輪とレール等の転がり機構や、滑り機構などによって構成されている。これらの機構は多くの摺動部を持つ。これらは、必然的に摩擦が生じるため、適切な潤滑が必要である。このため宇宙などの高真空中では、潤滑剤の工夫、固体潤滑などが必要である。また、機械的な接触部は塵埃の発生源となるため、精密機械や半導体の製造業などのクリーンルーム内で搬送を行う際には、発生する塵埃を低減するような特別な考慮が必要である。

1 - 2、非接触浮上機構

塵埃を低減する方法として、原理上塵埃の発生しない非接触浮上機構を用いて搬送装置を構成する方法が考えられる。

非接触浮上機構には磁気力を用いた浮上機構、静電気力を用いた浮上機構、空気圧を用いた浮上機構などの種類がある。磁気浮上機構は磁石と磁性体との吸引力や磁石と磁石の斥力などを、静電浮上機構は静電気の正と負の吸引力を、空気圧を用いた浮上機構は空気によって吹き上げる力などを浮上力として用いている。

磁気浮上装置では、浮上対象物は強磁性体または磁石など、磁石との間に吸引力か斥力を生じるものに限定されるが、浮上するための力を得るのが非常に容易である。静電気などを利用すると、半導体ウエハや、アルミディスクなど絶縁体や磁性の弱い物の浮上搬送が可能である。非常にクリーンな環境を要求される半導体製造工程などでは、ウエハを搬送するときの搬送装置とウエハの接触によって生じる塵埃が問題となる。また、支持部分

に加わる力やたわみなどによって搬送物そのものの破壊にもつながる。静電気力を発生するための電極とそれを駆動するためのアクチュエータを用いた非接触搬送装置を利用することによって、クリーンな環境を保持したままで搬送を行うことができる。しかし、静電気力を得るためには高い電圧が必要であるため、コスト面ではあまり良くない。空気圧を用いた浮上機構は、浮上力を得るのは容易であるが、空気によって塵埃も一緒に巻き上げてしまうので、クリーンな搬送装置としては向いていない。

2、懸垂形磁気浮上装置

2 - 1、磁気浮上機構

磁気浮上機構とは磁力によって物体を非接触支持する機構であり、本質的には非接触で物体を支持することが可能である。機械的な接触部がないため、給油が不要であるなどの利点がある。現在、磁気浮上装置には多くの方式が提唱され、磁気軸受、磁気浮上搬送装置、及び磁気浮上列車などに利用されている。

2 - 2、磁気浮上機構の分類

本研究では、静電気などに比べ手軽に支持力を得ることができ、装置の構成も簡単な、磁力を用いた磁気浮上機構による搬送装置にすることにした。

磁気浮上機構には種々の形式があるが、浮上機構における浮上力の発生原理による分類として次のような方法が提案されている。それを Table1 に示す。

磁力を発生するものとして永久磁石、電磁石、超伝導磁石の3種類、電流や磁束を通しやすい物質として超伝導体、強磁性体、金属導体の3種類、以上6種類の物体の組み合わせにより各種の磁気浮上方式を構成できるが、片側には磁力を発生する物質が必要である。

磁気浮上機構を用いて搬送装置を構成する場合、コスト面などから汎用的なものでなければならない。超伝導は汎用として工場などで使用するにはコストが高すぎるため、搬送装置としては不向きである。電磁石を用いた場合、電流により強い磁力を生み出すことも容易で、また、磁力の強弱の調整も簡単である。しかし、電力を外部から供給するとなるとそのための施設、設備が必要となり塵埃の発生につながる。そのため蓄電池による可動が好ましいが、電磁石に電流を使用するために長時間の使用が望めない。蓄電池での長時間の使用を図るため、吸引力に永久磁石を用い、吸引力を調整するために、永久磁石と磁

性体とのギャップをアクチュエータなどで調節するものとした。

2 - 3、磁気浮上機構の形

永久磁石を用いた非接触搬送装置を構成する方法として、浮上に必要な磁石やセンサなどをレール側(固定側)に搭載する方法と、移動体に配置する方法が考えられる。しかし、レール側に浮上するために必要である磁石やアクチュエータやセンサを配置する方法は、搬送経路を作るために多数の磁石やセンサを必要とするために複雑で非常に高価なものになってしまう。また、浮上させる対象も強磁性体などの磁力によって引き寄せられる物に限られてしまう。一方、移動体側に浮上に必要な磁石やアクチュエータやセンサを搭載する方法では、浮上に必要な要素である磁石やアクチュエータやセンサは、移動体に搭載する分だけでよい。搬送経路となる固定側は、強磁性体であればよいので、コスト的に安くでき、搬送経路を作ることも簡単である。そのため、柔軟な経路の設定が可能である。よって、移動体側に磁石やセンサなど浮上要素を搭載する方法が望まれる。

磁力によって浮上する搬送装置というとすぐ想像できるのが、リニアモーターカーのようなレールの上を走る形のものがある。リニアモーターカーのようにレールなどの上に浮上する形では、浮上体が横に倒れないようになんらかの力で保持してやらなくてはならない。それを解決する方法として、レールの上に浮くのではなく、レールの下にぶら下がる形で浮上する方法がある。この方法では、鉛直上向きの磁石による吸引力と、鉛直下向きの重力によって力が釣り合っているため、倒れることはない。よって、搬送装置としては、天井に施設された強磁性体のレールに磁気力によって非接触でぶら下がる形で浮上する懸垂形磁気浮上機構を用いた搬送方法が有効である。

2 - 4、懸垂形磁気浮上機構

懸垂形磁気浮上装置とは、永久磁石、センサ、アクチュエータ及び質量を持つベース部で構成された浮上体と、強磁性体の天井とで構成されている磁気浮上機構のひとつである。アクチュエータやセンサ、永久磁石などが浮上体側に取り付けられ、搬送装置に適している。

浮上の自由度は上下方向である。永久磁石の吸引力と浮上体に働く重力とが釣り合う点が平衡位置で、この位置にあるとき浮上する。永久磁石は、アクチュエータに取り付けられており、上下方向の運動が可能になっている。これによって永久磁石は駆動力を与えられる構造になっており、位置決めされる。この磁石の運動により空隙を調整し、吸引力を制御するものである。略図を Fig.1 に示す。

浮上体の運動と比較して、より素早く永久磁石を駆動することができれば、浮上体に対する復元力が得られる。つまり、物体に働く力そのものの大きさを制御するのではなく、物体に働く力を他の物体の運動によって制御する。永久磁石の運動制御による非接触浮上機構は、機械的な制御で浮上の安定化を図ることができるという特徴をもっている。

この機構において、アクチュエータに入力を加えないと、浮上体が平衡位置より磁石に近づけば吸引力が大きくなりますます近づき、逆に遠ざかれば吸引力が小さくなりますます遠ざかる。このため、そのままでは安定な浮上はできない。浮上体の位置を検出し、能動制御を行うことによって浮上が可能となる。すなわち、浮上体が平衡位置より天井に近づけば下向きの力を、遠ざかれば上向きの力をアクチュエータが磁石に対して発生することにより、空隙の距離を変化させ、吸引力を調整し、浮上体を非接触支持することが可能であると考えられる。

2 - 5、浮上させるための制御

図に示したように浮上体には、鉛直上向きの力として強磁性体の天井と永久磁石の間に働く永久磁石の吸引力があり、鉛直下向きの力として、重力が働いている。この吸引力と重力が釣り合ったときに非接触浮上は実現する。このときの位置を平衡位置と呼ぶ。アクチュエータは鉛直方向に伸縮するもので、永久磁石と下部にある質量との間の長さを制御できるものとする。このアクチュエータを制御しないと安定な浮上はできない。すなわち、永久磁石と天井の空隙が平衡位置より小さくなれば、吸引力は大きくなり浮上体は天井に衝突し、空隙が大きくなれば吸引力は小さくなり浮上体は落下する。

平衡状態から浮上体が上方に動いたときには、アクチュエータを縮める方向に駆動すると、アクチュエータの下部に質量があるため永久磁石は下方に駆動され天井の空隙は広がる。これにより吸引力は小さくなる。同様に浮上体が下方に動いたときには、アクチュエータを伸ばすことによって磁石を天井に近づけて吸引力を大きくする。このようなフィードバック制御を行うことにより、浮上体に平衡位置への復元力を与えることができる。このことにより、本来不安定な浮上体の運動を安定化することができる。

2 - 6、研究の目的

本研究の目的は、永久磁石の運動をボイスコイルモータで制御し、浮上体との空隙を調整することにより吸引力を調整する形式の非接触浮上機構の浮上装置を試作し、その浮上可能性を理論上及び実験で確認し、搬送装置として実用できる非接触浮上機構を開発することである。

非接触浮上機構には種々の形式があるが、本研究では、搬送装置としての性質上、磁力による支持機構が好ましいと考え、懸垂形の磁気浮上機構とした。この懸垂形磁気浮上機構の浮上可能性を理論的に確認し、その後、実際の実験でも浮上可能か調べる。また、搬

送装置としての実用を目指すため、懸垂形磁気浮上機構を用いた浮上装置のロバスト性を高める制御方法について考察する。長時間の浮上を可能とするため、なるべく電流の消費を少なくすることを目的として、電流が零で浮上させる方法について考察する。また、できるだけ制御量を大きくとれることを目的として、ボイスコイルモータの可動範囲の真中を常に平衡点とする制御方法についても考察する。具体的にはボイスコイルモータへの入力電流をフィードバックさせることにより、アクチュエータへの入力電流を零にすることと、アクチュエータの可動範囲の中間位置で動作させることを試みるものである。それらの場合で浮上可能か、理論と実験の両方で確認する。

3、懸垂形磁気浮上装置の構成

3 - 1、圧電アクチュエータを用いた試作機

試作した装置の写真を Fig.2 に、浮上体の写真を Fig.3 に示す。示す。

懸垂形磁気浮上機構では、Fig.1 に示すように浮上体側にアクチュエータを配置するため、その自重を支持し、かつ伸縮の運動を行うための発生力が必要である。圧電素子は、小型軽量で発生力も大きいという特長を持っているが、変位量が小さいということと、引っ張り応力に弱いという欠点がある。これを補うために、変位拡大機構付き圧電アクチュエータ（秩父小野田（株）製）を用いた。この圧電アクチュエータの写真を Fig.4 に示す。これは、てこを 2 つ用いて圧電素子の動きを 14 倍に拡大して出力するものである。このようなアクチュエータを用いることにより、自重を支持することができ、アクチュエータやセンサなどを浮上体に搭載できる。このアクチュエータの仕様は、150V の電圧入力にて最大変位量 0.5mm、最大発生力約 10N、質量約 0.34kg であり、その形状は、縦 120mm、横 65mm、厚さ 5mm の板状である。また、このアクチュエータは機構上、負の電圧をかけると壊れてしまう。そのため正の電圧で使用する。

浮上体に取り付けたギャップセンサは、渦電流式のセンサで、応答周波数 20kHz、分解能 0.5 μm の電子応用製のものであり、対称に 2 つのセンサを取り付けた。この理由は、センサを対称に配置することにより、浮上体のアンバランスをなくして浮上体が傾斜することを防ぐ以外に、1 自由度浮上装置の場合、制御できない浮上体の振れがセンサ信号に与える影響を少なくするためである。浮上体に振れがあっても、位置信号として左右のセンサ信号の値を加えたものを用いれば、振れの影響によるノイズを除去できると考えたからである。この 2 つのセンサは高精度に位置を設定する必要があるため、マイクロメータで細かい位置決めができるようにした。

永久磁石は直径 10mm、高さ 5mm の円筒形の（株）マグナ製ネオジ磁石を用いた。表

面磁束密度は 0.35T である。浮上体には永久磁石とセンサが天井に衝突しないように、保護する構造を組みこんだ。具体的には、永久磁石のまわりをアクリルで覆い、アクチュエータが最も伸びたときでも永久磁石がアクリルの上になれないような構造とした。この保護の機構は、浮上体のベース部にとりつけられている。このため、浮上体と天井との浮上ギャップは、ベース部の運動で決定される。

3 - 2、ボイスコイルモータを用いた試作機 1

試作した装置の写真を Fig.5 に、浮上体の写真を Fig.6 に示す。

前の項では空隙を制御するためのアクチュエータとして圧電アクチュエータを用いたものを紹介した。しかし、圧電アクチュエータは変位量が 0.5mm と大変小さい。このように可動範囲が微小であるため、浮上状態にすることが容易でなく、外乱に弱いという欠点がある。また、構造上非常に弱く、壊れやすかった。そのため、空隙を制御するためのアクチュエータとして、圧電アクチュエータよりも変位量が大きく、圧電アクチュエータよりも丈夫なボイスコイルモータ (voice coil motor) を用いたものを試作した。ボイスコイルモータは、スピーカなどに利用されるローレンツ力を用いたアクチュエータで、直線運動が可能で、応答性に優れているという特徴を持っている。よって、本実験装置に用いるに適していると考えられる。ボイスコイルモータは住友特殊金属株式会社製の LV05-15 を用いた。写真を Fig.7 に示す。このボイスコイルモータの最大変位量は約 15mm で、最大推進力は約 10N、質量 366g である。最大変位量が圧電アクチュエータの約 30 倍なのでその分制御の幅が広がると考えられる。電流アンプは高砂 BPS120-5 を使用した。試作機は、浮上体の質量が 700g で、磁石部とベース部から成る。磁石部は磁石と、それとともに動く部分であり、質量は 60g である。その写真を Fig.8 に示す。ベース部は浮上体のその他の部分のことで、ボイスコイルモータやセンサやマイクロメータなどが含まれ、その質量は 640g である。永久磁石は円筒形で直径約 13mm、高さ約 10mm である。永久磁石の表

面磁束密度は 0.48 (T) である。また、ボイスコイルモータの推進力を補助する目的で圧縮バネを取り付けた。これにより、消費電力を抑えることができると考えられる。圧電アクチュエータを用いた試作機の時と同様に、浮上体の位置を検出するために渦電流センサを取り付けた。これは圧電アクチュエータを用いた試作機の時と同じものを使用した。これもマイクロメータによって細かい位置調整が可能である。永久磁石が直接天井にぶつからないように、アルミ製のガードをとりつけた。このガードはボイスコイルモータがいっぱい伸びたときに永久磁石がはみださないように位置決めする。このガードはネジ留めによって位置の調整が可能ないようにしてある。

3 - 3、ボイスコイルモータを用いた試作機 2

試作した装置の写真を Fig.9 に、浮上体の写真を Fig.10 に示す。

ボイスコイルモータを用いた試作機 1 号を改良した試作機 2 号を作った。新しい試作機は、浮上体の質量が 793.8g で、磁石部とベース部から成る。磁石部は磁石と、それとともに動く部分であり、質量は 73.8g である。磁石部の写真を Fig.11 に示す。ベース部は浮上体のその他の部分のことで、ボイスコイルモータやセンサやマイクロメータなどが含まれ、その質量は 720g である。1 号機ではボイスコイルモータを補助するためのバネが磁石を取り囲むように取り付けられていたため、バネが磁石に吸い着けられてバネと磁石部分が干渉して制御がうまくいかなかった。これを改善するため、バネを取り付ける位置をボイスコイルモータの下部に変更した。さらに、モータのシャフト下部にセンサターゲットをとりつけ、渦電流センサで磁石の動きを検出できるようにした。これにより、仮想バネと仮想ダンパを作り出し、より安定な制御を行えるようにした。渦電流センサは Baumer 社製 IWRM 30U9501 を使用した。このセンサの測定範囲が 5mm ~ 10mm なので、ボイスコイルモータを実際に使用する範囲はこのセンサの測定範囲での使用になる。

4、理論的浮上可能性

4 - 1、モデル化

試作した浮上システムが浮上可能であることを理論的に確認するため、Fig.12 に示すようにシステムをモデル化した。

ボイスコイルモータは2次系であるので、バネとダンパで置き換えた。システムの出力は浮上体ベース部の位置とする。解析に用いる記号を以下に説明する。

m_0 : 浮上体ベース部質量、

m_1 : 永久磁石部質量、

z_0 : 浮上体ベース部位置、

z_1 : 永久磁石位置、

f_a : アクチュエータの駆動力、

f_m : 永久磁石の吸引力、

f_{Lm} : 線形化したときの永久磁石の吸引力、

k_1 : アクチュエータのバネ定数、

ξ : アクチュエータのダンピング係数、

k_t : アクチュエータの推進力定数、

k_m : 永久磁石の吸引力定数、

k_{Lm} : 線形化したときの永久磁石の吸引力定数

i : 入力電流

h : 天井までの高さ

g : 重力加速度

d : 天井と磁石とのギャップ

4 - 2、運動方程式

このモデルより運動方程式を立てた。線形制御理論から浮上可能性を調べた。運動方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} m_0 \ddot{z}_0 = k_a(z_1 - z_0) + \xi(\dot{z}_1 - \dot{z}_0) - f_a - m_0 g \\ m_1 \ddot{z}_1 = -k_a(z_1 - z_0) - \xi(\dot{z}_1 - \dot{z}_0) + f_a + f_m - m_1 g \end{cases} \dots \dots \dots (1)$$

システムの入力はボイスコイルモータへの入力電流である。この電流によりボイスコイルモータが駆動する。入力電流と発生する駆動力とは比例関係にあると考えることができる。これを式(2)に示す。この駆動力は永久磁石部の質量 m_1 と浮上体ベース部質量 m_0 の両方に働く。ボイスコイルモータが発生させる駆動力の正の方向は伸びる方向とする。

$$f_a = k_t i \dots \dots \dots (2)$$

4 - 3、永久磁石の吸引力

浮上システムの解析のために、永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力について考察する。実験で使用した永久磁石の吸引力を式(3)に示す。吸引力は空隙を通過する磁束の二乗に比例する。磁束は空隙の距離と反比例の関係があるため、吸引力は

$$f_m = \frac{k_m}{d^2} \dots \dots \dots (3)$$

と考えることができる。実際の永久磁力の測定値と式(3)を用いた値のグラフを Fig.13

に示す。

4 - 4、線形化

浮上が実現するのは、浮上体の重量と永久磁石の吸引力が釣り合う平衡位置ただ一点のみである。式(3)でわかるように永久磁石の吸引力は二次曲線で表せるため、平衡位置より少しでもずれると永久磁石の吸引力が急激に変化し、天井にくっついてしまうか、落ちてしまう。そのため、永久磁石は平衡位置から微小範囲しか動かないと仮定する。この仮定より永久磁石の吸引力を平衡点で線形化すると式(4)のようになる。

$$f_{Lm} = -k_{Lm}d = -k_{Lm}(h - z_1) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

線形化した永久磁石の吸引力を Fig.14 に示す。このとき、定数 k_{Lm} は、計算的に求めた永久磁石の吸引力と浮上体重量の釣り合う平衡点で接線を引き、その接線の傾きに合わせるように決定した。

通常のパネの場合には右辺の係数は正となるが、吸引磁気浮上装置の系では負となる。言い換えれば、磁気浮上システムでは負のパネ定数で浮上体を支持しているといえる。

4 - 5、PD 制御による安定性の検討

線形制御理論から浮上可能性を調べた。ボイスコイルモータを用いた試作機 2 号では浮上体位置を検出し、その信号に基づいた PD 制御を行う。ここでは PD 制御を用いたときの安定性と理論によるフィードバックゲインの安定範囲を検討する。運動方程式(1)を状態方程式で表すと式(5)のように表せる。

$$\dot{x} = Ax + bi \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$$

$$y = cx \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6)$$

また、式(6)は可観測性を表している。ここで、

$$x' = (z_0 \quad z_1 \quad \dot{z}_0 \quad \dot{z}_1)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_a}{m_0} & \frac{k_a}{m_0} & -\frac{\xi}{m_0} & \frac{\xi}{m_0} \\ \frac{k_a}{m_1} & \frac{k_{Lm} - k_a}{m_1} & \frac{\xi}{m_1} & -\frac{\xi}{m_1} \end{pmatrix}$$

$$b' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_t}{m_0} & \frac{k_t}{m_1} \end{pmatrix}$$

$$c = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

である。ただし、 x' と b' はそれぞれ行列 x と行列 b 転置行列を表す。

浮上体位置検出によるPD制御を行うとき、ボイスコイルモータへの入力電流 i は浮上体の比例ゲイン k_p と微分ゲイン k_d を用いて次式のように表される。

$$i = k_p z_0 + k_d \dot{z}_0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7)$$

運動方程式をラプラス変換すると式(8)のように表せる。

$$\begin{cases} s^2 m_0 Z_0 = k_a Z_1 - k_a Z_0 + s\xi Z_1 - s\xi Z_0 - k_t I \\ s^2 m_1 Z_1 = -k_a Z_1 + k_a Z_0 - s\xi Z_1 + s\xi Z_0 + k_t I + k_{Lm} Z_1 \end{cases} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (8)$$

式(7)と式(8)より特性方程式は、

$$a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (9)$$

となる。ここで、

$$a_4 = m_0m_1$$

$$a_3 = m_0\xi + m_1\xi - m_1k_t k_d$$

$$a_2 = m_0k_a + m_1k_a - m_0k_{Lm} - m_1k_t k_d$$

$$a_1 = -\xi k_{Lm} + k_{Lm}k_t k_d$$

$$a_0 = k_a k_{Lm} + k_{Lm}k_t k_p$$

である。特性方程式の根の実数部が負であれば安定である。この特性方程式の係数を用いて、フルビッツの安定判別により安定な範囲のゲインを求める。フルビッツの安定判別法では正方行列が

$$\begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} \geq 0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (10)$$

$$\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} \geq 0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (11)$$

式(10)(11)のように正であれば安定であるので、この条件をみたすように k_p 、 k_d を求める。また、これらの係数が全て正であれば3行3列の正方行列が正であれば安定である。このときに使用したパラメータを以下に示す。

$$m_0 = 0.72(kg) ;$$

$$m_1 = 0.0738(kg) ;$$

$$k_{Lm} = 3654.12(N/m) ;$$

$$k_t = 4.65(N/A) ;$$

$$\xi = 0.01(Ns/m) ;$$

$$k_a = 290(N/m) ;$$

これによって求めた安定な k_p 、 k_d の範囲を Fig.15 に示す。

4 - 6、最適レギュレータ法による最適ゲインの検討

数値的なシミュレーションによって吸引力の非線形要素を取り入れた形で、浮上の可能性について検討する。制御対象を状態方程式 (5) のように表現する。最適ゲインのための評価関数は次のとおりである。

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + i^T R i) dt \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (12)$$

このとき Q は次のように定義する。

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 \end{pmatrix} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (13)$$

この場合評価関数 J は、

$$J = \int_0^{\infty} (q_1 z_0^2 + q_2 z_1^2 + q_3 \dot{z}_0^2 + q_4 \dot{z}_1^2 + r i^2) dt \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (14)$$

と計算される。よって、 z_0 の重みが q_1 、 z_1 の重みが q_2 、 \dot{z}_0 の重みが q_3 、 \dot{z}_1 の重みが q_4 、そして i の重みが r であることがわかる。最適レギュレータとは、レギュレータの中で与えられた評価関数を最小にするものといえる。評価関数を最小にする操作量は状態フィードバック制御として与えられ、そのフィードバックゲイン K は次式で与えられることを証明することができる。

$$K = R^{-1}B^T P \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (15)$$

ここで、行列 P は次のリカチ方程式の解である。

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (16)$$

リカチ方程式を解くために Matlab を用いた。それぞれのゲインは次のようである。求めたフィードバックゲインは次のようになった。

180.2 (A/m)、**1825.4** (A/m)、**8.6** (As/m)、**8.5** (As/m)

それぞれ z_0 、 z_1 、 \dot{z}_0 、 \dot{z}_1 に対応している。このときの重みは、 $q_1=10000$ 、 $q_2=0$ 、 $q_3=40$ 、 $q_4=0$ である。目標値への収束の具合を Fig.15 に示す。

5、シミュレーション

5 - 1、概要

運動方程式より、非線形のまま浮上可能性を確認するために4章で求めた最適ゲインを用いて数値シミュレーションを行った。制御方式は安定化のためのPD制御のみを行う以外に、浮上のロバスト性や省エネルギーのための補償を行った場合について考察を行った。シミュレーションは、それぞれ平衡状態にあるときから0.1秒後に外乱として浮上体ベース部の質量が10g増加すると仮定した。そのときの応答を、永久磁石位置と浮上体ベース部位置と入力電流について1秒間記録した。それぞれ平衡状態にあるときを0としてその変位を記録した。

5 - 2、浮上させるためのPD制御

浮上させるために天井とのギャップとボイスコイルモータの伸びに関してPD制御を行う。その制御のブロック線図をFig.16に示す。

5 - 3、結果

浮上させるために天井とのギャップとボイスコイルモータの伸びに関してPD制御を行ったときのシミュレーション結果をFig.17に示す。上から磁石部の位置の変位、浮上体ベース部の位置の変位、入力電流の変位を表している。外乱が加わったと同時に、永久磁石を上へ伸ばしているのがわかる。これは増加した質量を支持するために、永久磁石を天井に近づけるためである。もちろん永久磁石が鉄製の天井に近づいた分、吸引力は強くなる。そのままでは天井にくっついてしまう。そのため、磁石を引き下げる力も強くならなくて

はならない。そのため、ベース部を下に引き下げることによってボイスコイルモータを伸ばし、バネを圧縮している。このバネの力によって、磁石を引き下げる力を強くすることができ、浮上体の重量を支持できる。これにより、平衡状態を保ち浮上が可能であることがわかる。その制御のブロック線図を Fig.18 に示す。

5 - 4、省エネのための定常電流零化制御

平衡状態にあるとき、浮上体の重量をバネの力とつりあわせることによりボイスコイルモータの駆動電流を 0 にすることができる。このことにより電流をほとんど消費せずに浮上可能である。具体的には、PD 制御に加えてボイスコイルモータの駆動電流の積分制御を行う。

5 - 5、結果

浮上させるための PD 制御に加えて、電流零化制御を実現させるためにボイスコイルモータの駆動電流の積分制御を行った結果を Fig.19 に示す。上から磁石部の変位、浮上体ベース部の変位、入力電流を表している。まず浮上するために前項の PD 制御のみのときと同様に磁石を上を伸ばし、浮上体ベース部を下に引き下げているのが見て取れる。また、駆動電流が外乱前後で零に収束しているのが見て取れる。このとき、駆動電流が零に収束するにしがたい、浮上体ベース部を下に引き下げているのが見て取れる。これは、電流が零に近づくことによってボイスコイルモータの磁石を引き下げる力が弱くなってきているからであって、その分、バネの力を強くしなければ磁石の吸引力を支持できず天井にくっついてしまう。そのためボイスコイルモータを伸ばすことによってバネの力を強くして浮上体を支持している。

5 - 6、VCM の可動範囲の真中で動作させるための制御

VCM の可動範囲の両端では制御できる幅が狭くなり、大きな外乱に対応できないという欠点がある。この問題に対処するために VCM の可動範囲の中間位置を常に平衡点とする制御を行う。このために、磁石位置の目標位置を可動範囲の中間位置として積分制御を行う。その制御のブロック線図を Fig.20 に示す。

5 - 7、結果

浮上させるための PD 制御に加えて、VCM 可動範囲の中間位置で動作させるために、磁石位置の目標値を可動範囲の中間位置として積分制御したときのシミュレーションの結果を Fig.22 に示す。上から永久磁石位置、浮上体ベース部位置、VCM の伸び、入力電流を表している。VCM の伸びグラフの 0 は、VCM の可動範囲の真中である。まず浮上するために前 2 つのときと同様に磁石を上へ伸ばし、浮上体ベース部を下へ引き下げているのが見て取れる。しかし、前 2 つの制御のときと比べて、外乱が加わった後の浮上体ベース部の変位量は少ない。これは VCM の伸び量を制御しているからであり、外乱が加わると浮上体の重量を支持するために伸び、すぐ伸び量が 0 に収束しているのがわかる。これにより、常に可動範囲の真中で動作可能であるといえる。また、グラフの形はちょうど浮上体ベース部の変位のグラフを線対称に反転させたような形である。これは、平衡点は一箇所であるので磁石位置は変わらない。そのため、調整はほとんど浮上体ベース部で行われているためである。伸び量が 0 であるためにバネによる磁石を引き下げる力は働かない。その分 VCM に大きな電流が流れることによって磁石を引き下げている。これによって浮上体の重量を支持している。

5 - 8、シミュレーションの総合結果

すべての制御において、外乱として浮上体ベース部の質量増加後、増加分の質量を支持するために永久磁石を天井に近づけているのがわかる。その後、安定化のための動作を行っている。また、永久磁石を引き下げる力を強くするために、浮上体ベース部を引き下げているのがわかる。これにより浮上体を支持している。全ての場合において、ベース部の位置はまちまちだが、永久磁石の位置はだいたい同じところに収束している。これは平衡点が一箇所だけであるからである。すべてのシステムは、浮上体を非接触で安定に支持していることがわかる。これにより、提案した懸垂形磁気浮上機構の実現性が数値的な計算の上で確認できたといえる。また、今回行った制御を同時に行った場合も考慮してみる必要がある。

6、浮上実験

6 - 1、ボイスコイルモータを用いた試作機 2 の浮上実験

圧電アクチュエータを用いた試作機とボイスコイルモータを用いた試作機 1 は浮上させることができなかったので、4 章で求めた最適ゲインを用いて、ボイスコイルモータを用いた試作機 2 の浮上実験を行う。システムの構成を Fig.22 に示す。制御システムは図に示すように、浮上体の位置と永久磁石の位置をギャップセンサによって検出し、その信号に基づいて PD 制御を行い、結果をアンプによって増幅し、電流をボイスコイルモータへ出力する構成となっている。まず、永久磁石と浮上体との間の、吸引力と空隙の長さの関係を求める。浮上体の質量より吸引力の平衡点は 7.7872N であり、このときの空隙は約 3.5mm である。この平衡点での曲線の傾きより、 $k_{Lm} = -3.65412(\text{N}/\text{mm})$ と求めた。本来は求めた天井と永久磁石との空隙が目標値となる平衡点なのだが、試作機は直接この空隙の長さを計測することができない。そのため、浮上体ベース部についている渦電流センサをマイクロメータで調節して平衡点を探し出さなければならない。このように、マイクロメータで平衡点を探しながら浮上させる。

6 - 2、浮上実験結果

最適ゲインを用いて、ボイスコイルモータを用いた試作機 2 の浮上実験を行った。しかし、ベース部下部にとりつけたセンサのコードが床に干渉し、横方向に力を受けてしまうため浮上しなかった。そのため、同じような渦電流センサでコードの細いモノに変更して浮上実験を行った。計算で求めた最適ゲインでは弱すぎたようなので z_0 のゲインを大きくすることにより浮上できることを確認した。そのときの状態を Fig.23 に示す。また、シミュレーションの時と同様に安定してから、外乱として浮上体に重りをのせてみた。その時

の状態を Fig.24、Fig.25、Fig.26 に示す。Fig.24 は永久磁石の動きを、Fig.25 は浮上体ベース部の変位を、Fig.26 はボイスコイルモータへの入力電流を示す。ここで、Fig.25 はセンサと天井とのギャップを示している。そのため、Fig.25 の正の方向はギャップが大きくなる方向、つまり浮上体ベース部が下に移動することと同じである。シミュレーションの結果と見比べてみると、振動しているものの、変化量などは同じことが見て取れる。また、グラフの形も似ているといえる。これにより、理論と実質の実験場で浮上が確認できたと言える。

7、おわりに

ボイスコイルモータを用いて永久磁石を直接駆動する方式の懸垂形磁気浮上装置を試作した。試作装置は、永久磁石の1自由度の運動を制御することにより、浮上体である移動体を完全に非接触浮上できるものである。また、数値シミュレーションを行い、その浮上可能性を調べた。

数値シミュレーションで理論的に非接触浮上が可能なことを確認した。ただ浮上が可能であることだけでなく、省エネのための定常電流零化とVCMの可動範囲の真中で動作させるための制御でも、それぞれ、電流が零のときと、VCMの可動範囲の真中で浮上が可能であることを確認した。実際の実験でも、非接触浮上が可能であることを確認した。今後の目的は省エネのための定常電流零化とVCMの可動範囲の真中で動作させるための制御を行い、理論上では浮上可能だった制御を実験でも確認することである。

8、参考文献

1. Trans.IEE of Japan, Vol.119-D,No.3,March,1999
2. コロナ社 工学博士 杉江 俊治、藤田 政之 共著 「フィードバック制御入門」
3. 森北出版株式会社 土谷武士、深谷健一 共著 「メカトロニクス入門」

9、謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧な指導を賜りました、指導教官の岡宏一先生に、深く感謝致します。

最後に、助言や励ましの御言葉をいただいた多くの方々に感謝の意を表します。

Table1: Classification of magnetic levitation system,
 Classified by how to generate the levitation force

| | | 物体 | | |
|----|-------|------------|------------|------------|
| | | 永久磁石 | 電磁石 | 超伝導磁石 |
| 物体 | 超伝導体 | 反発力 吸引力 | 反発力 吸引力 | 反発力 吸引力 |
| | 強磁性体 | 吸引力 | 吸引力 | 吸引力 |
| | 金属導体 | 反発力 吸引力 | 反発力 吸引力 | 反発力 吸引力 |
| | 超伝導磁石 | 吸引力 反発力 | 吸引力 反発力 | 吸引力 反発力 |
| | 電磁石 | 吸引力 反発力 | 吸引力 反発力 | |
| | 永久磁石 | 反発力 吸引力 | | |

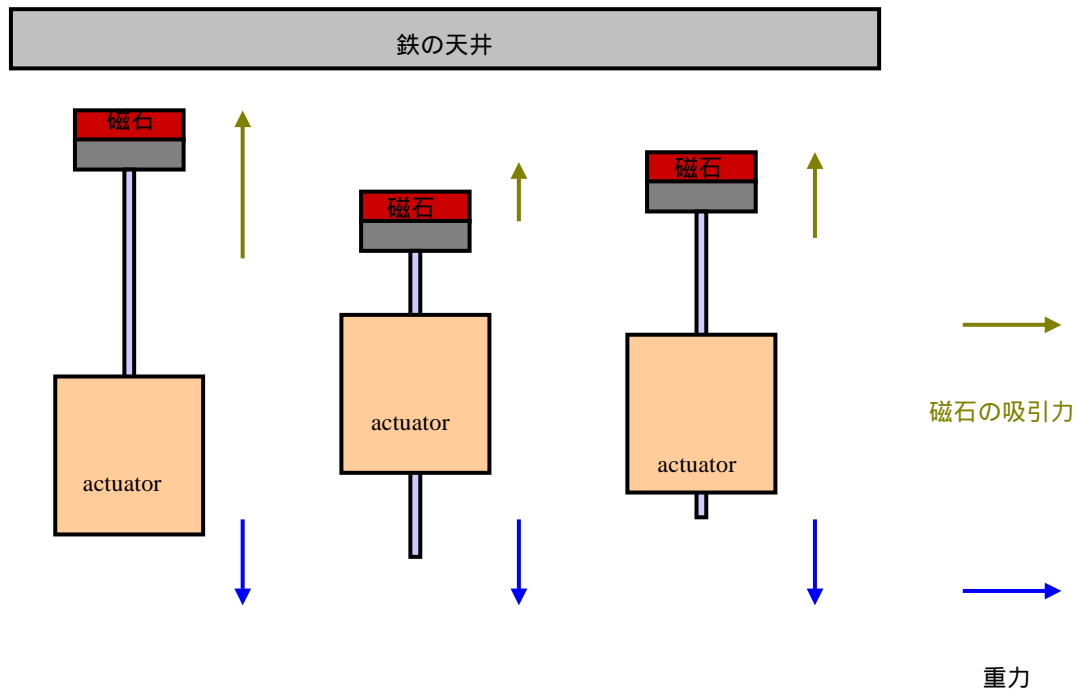


Fig.1. Motion of levitation system

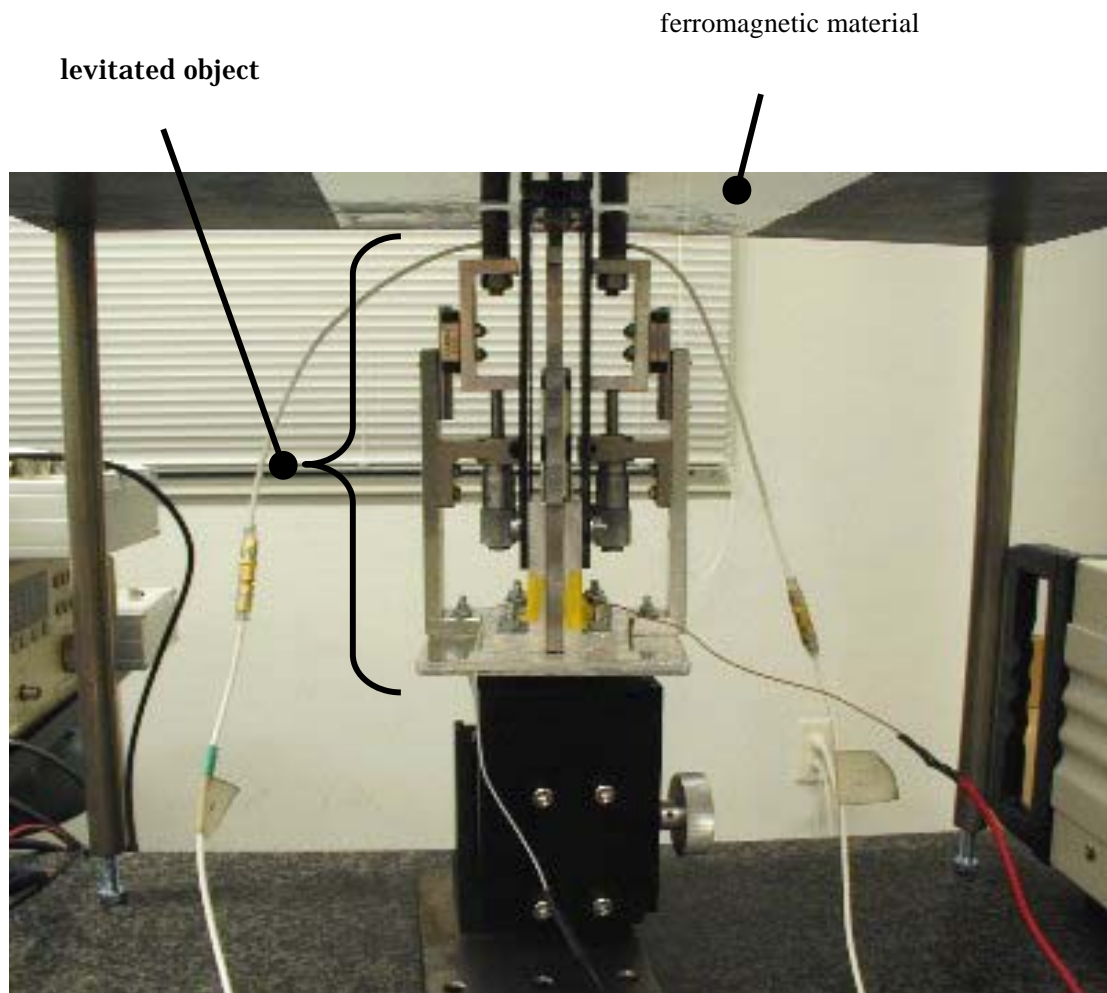


Fig.2. Levitation system uses of the piezo actuator

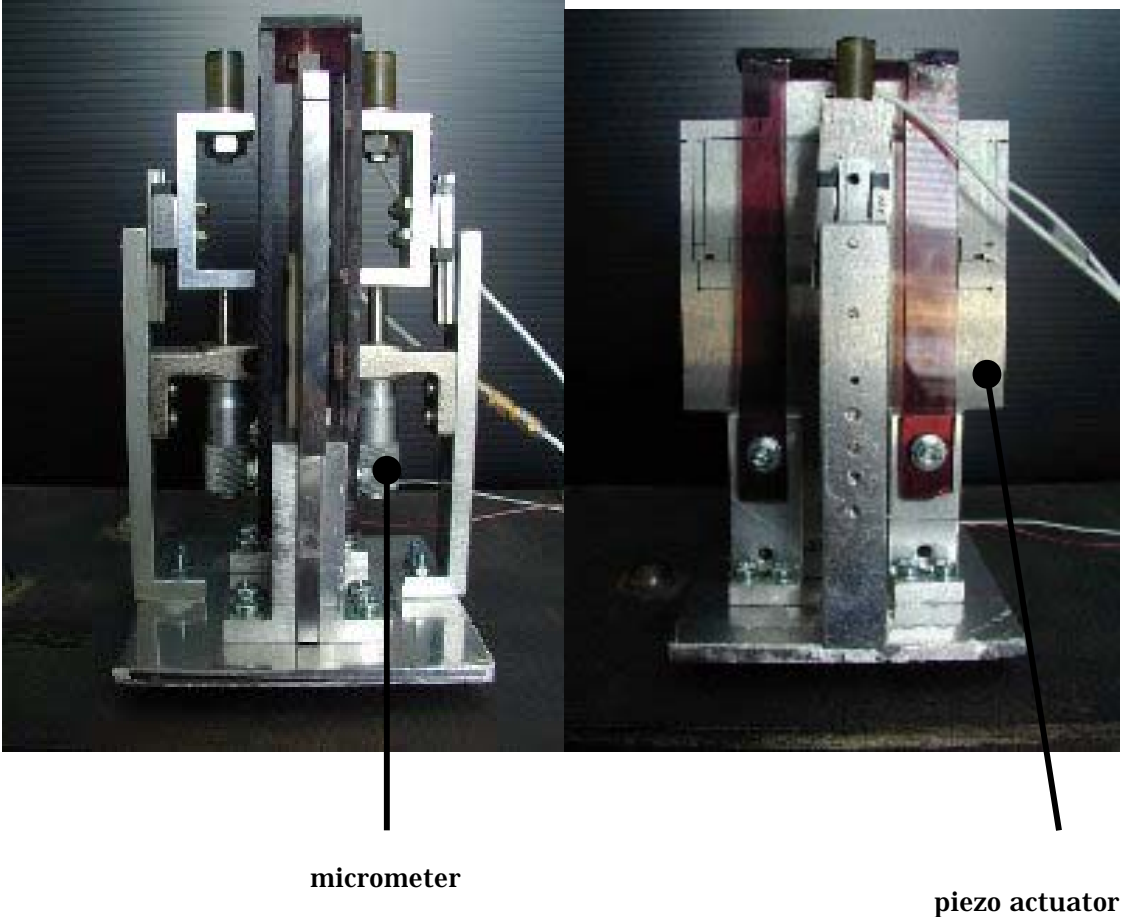
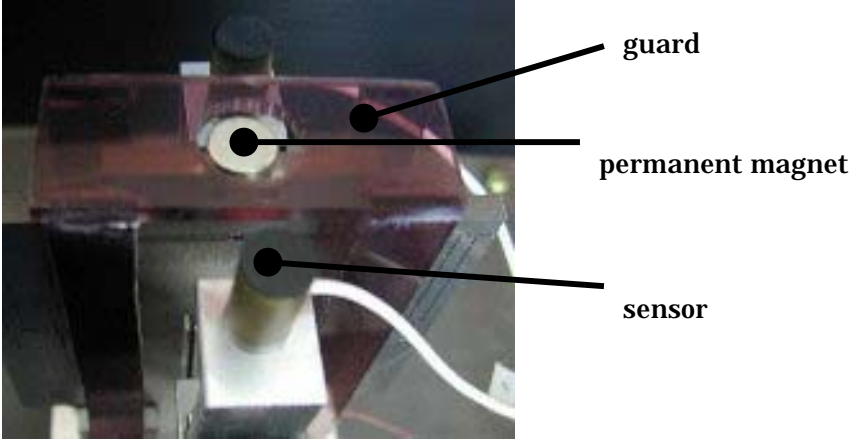


Fig.3. Photograph of levitated object uses of the piezo actuator

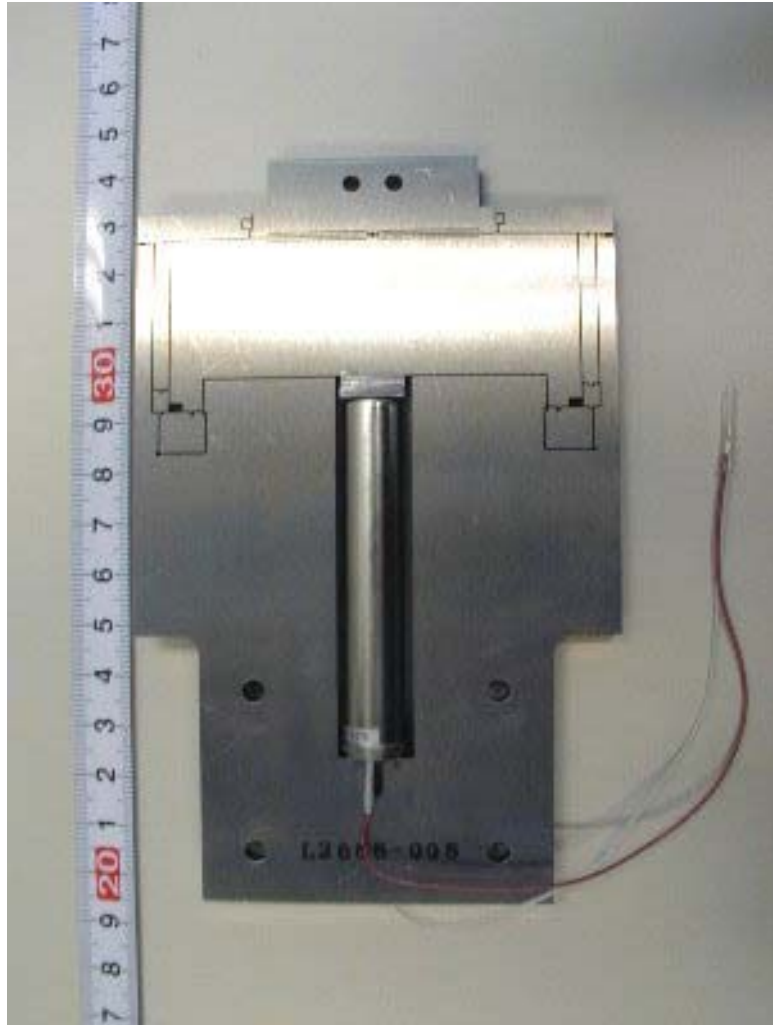


Fig.4. Photograph of piezo actuator

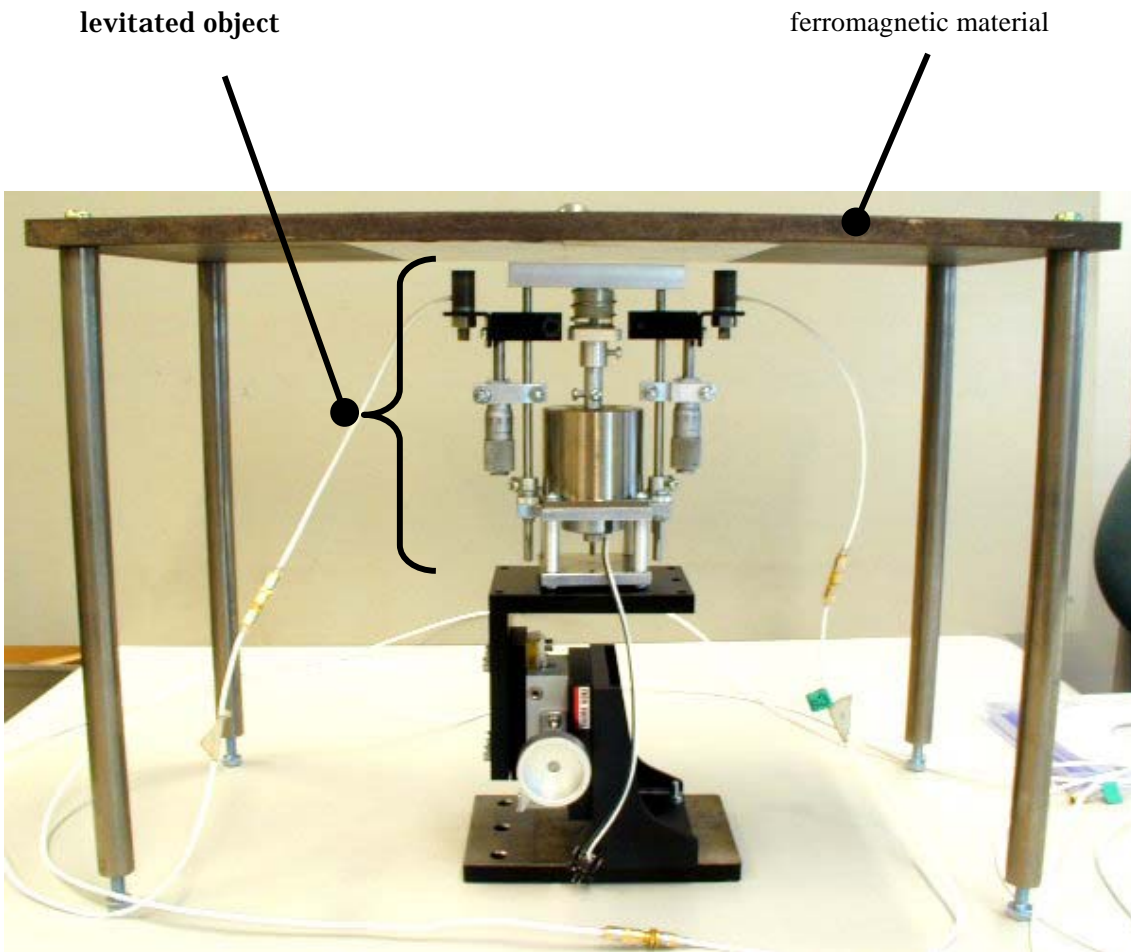


Fig.5. 1st Levitation system uses of the VCM

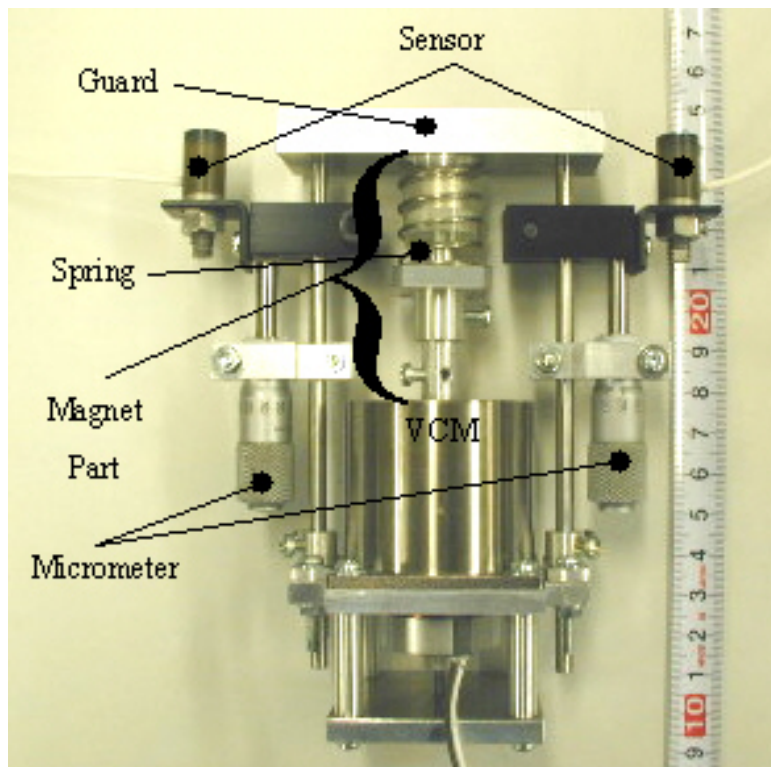
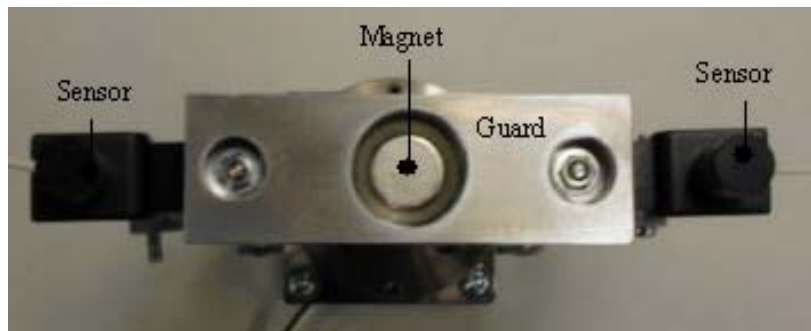


Fig.6. Photograph of levitated object uses of the VCM



Fig.7. Photograph of VCM



Fig.8. Photograph of part of magnet

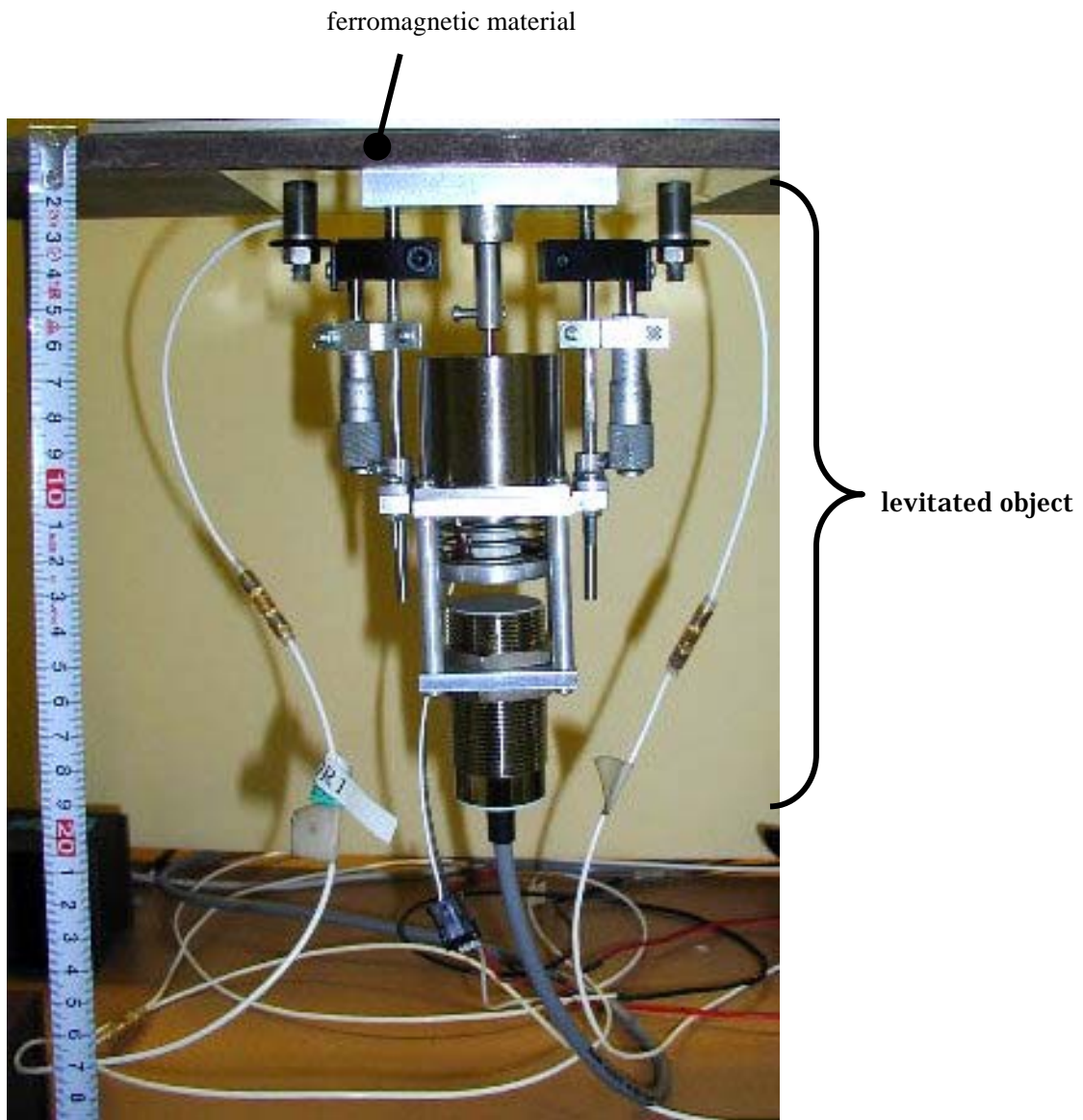


Fig.9. 2nd levitation system uses of the VCM

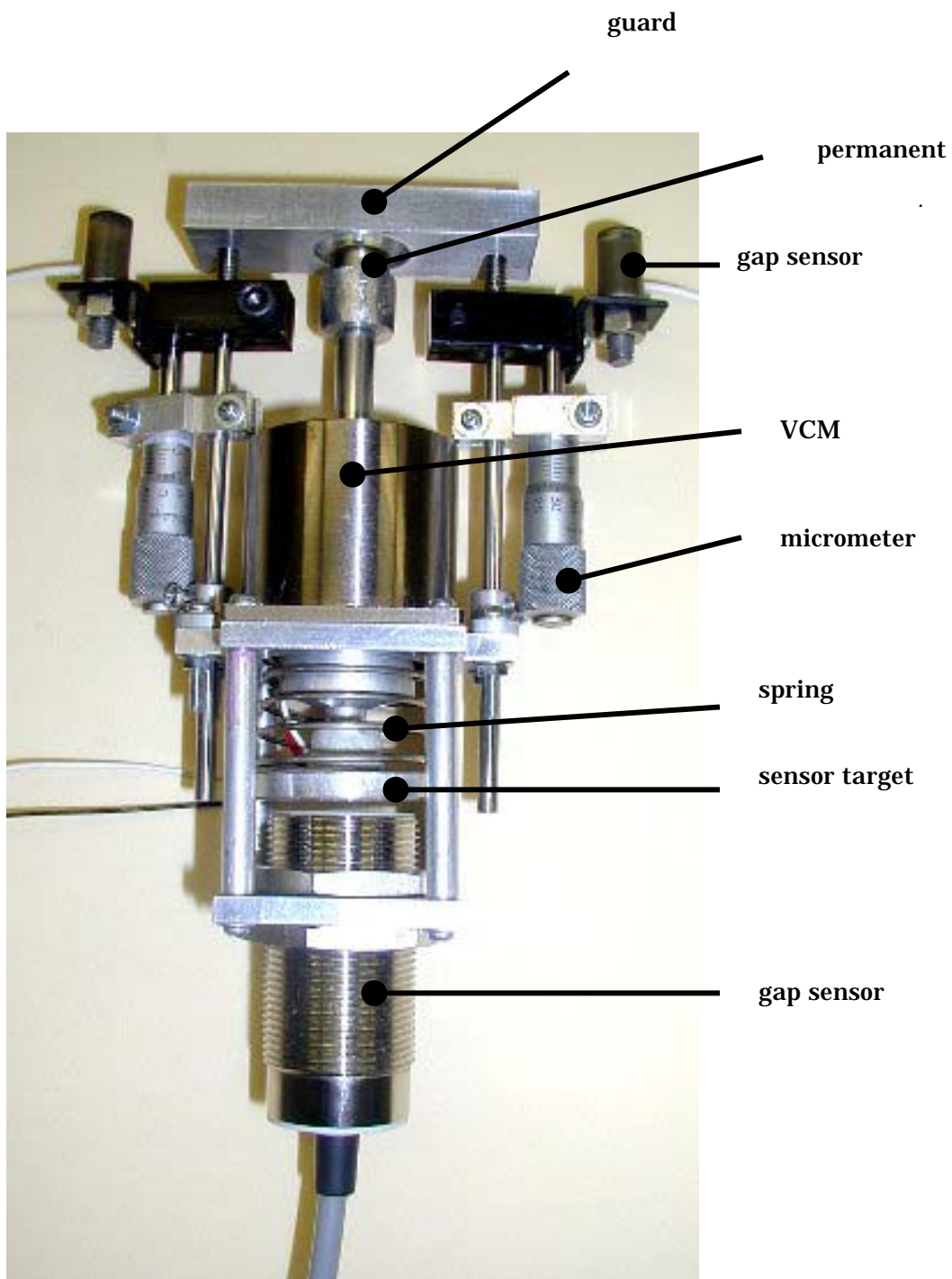


Fig.10. Photograph of levitated object uses of the VCM



Fig.11. Photograph of part of magnet

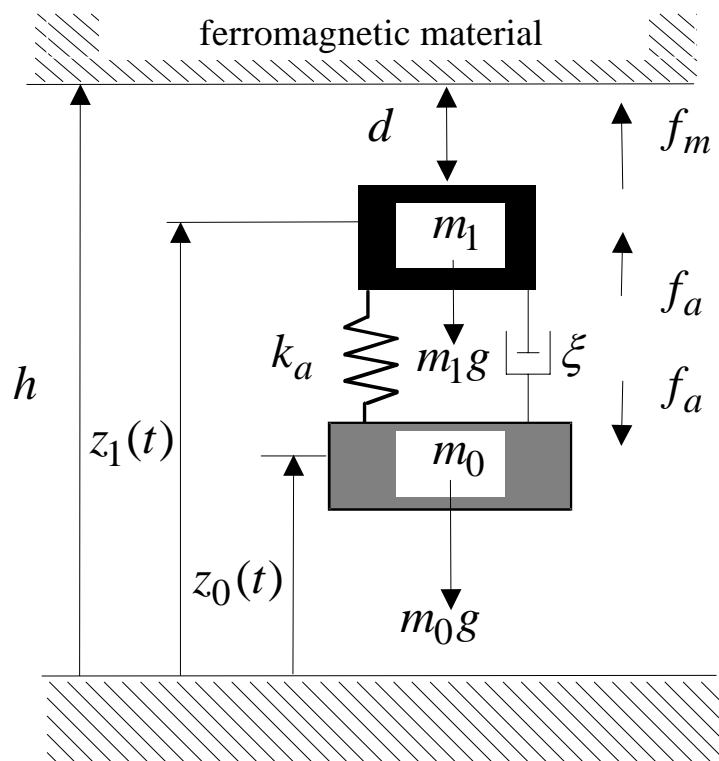


Fig.12. Model of levitation system

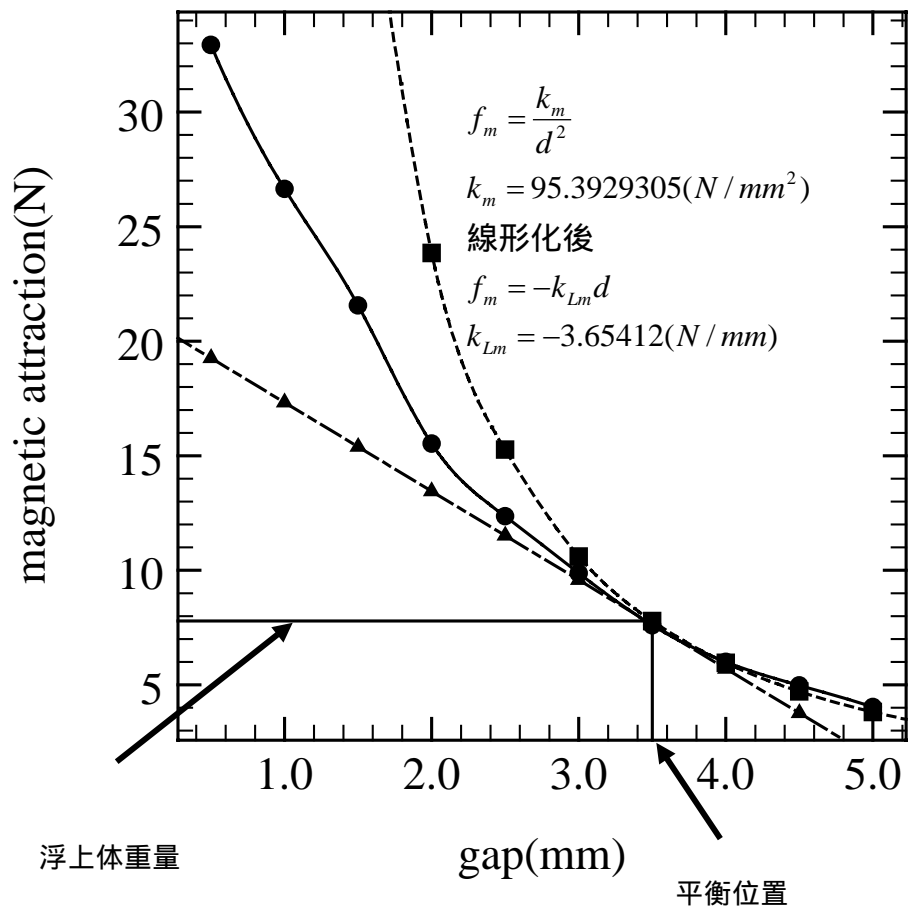
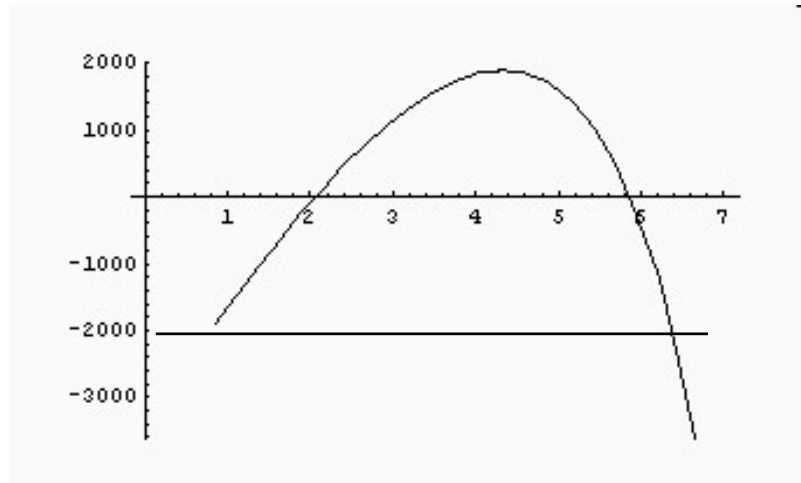


Fig.13. Graph of magnetic attraction

k_p



k_d

Fig.14. Range of PD gains for stable levitation

Initial Condition Results

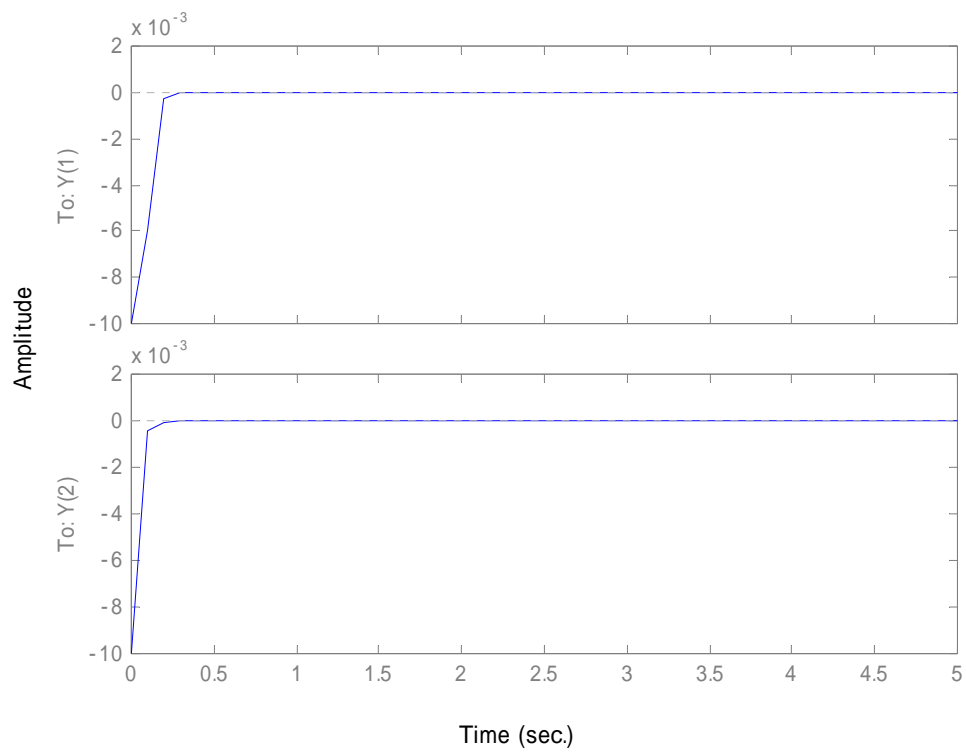


Fig.15. Stability of levitation system

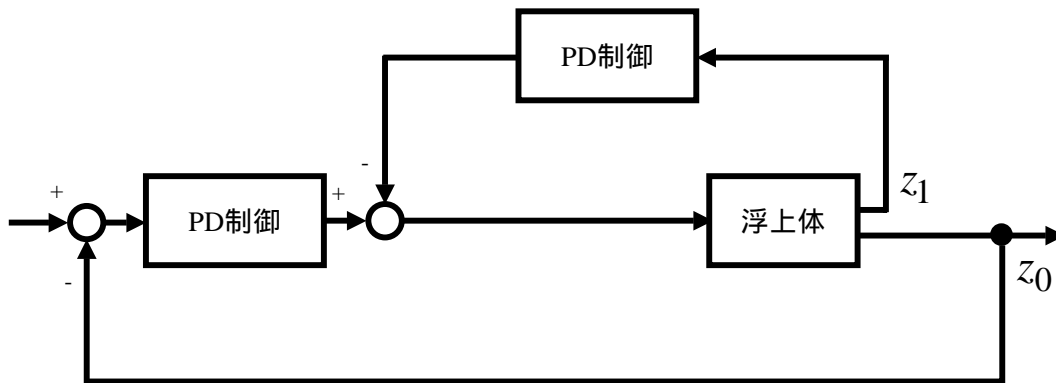


Fig.16. Block diagram of control system

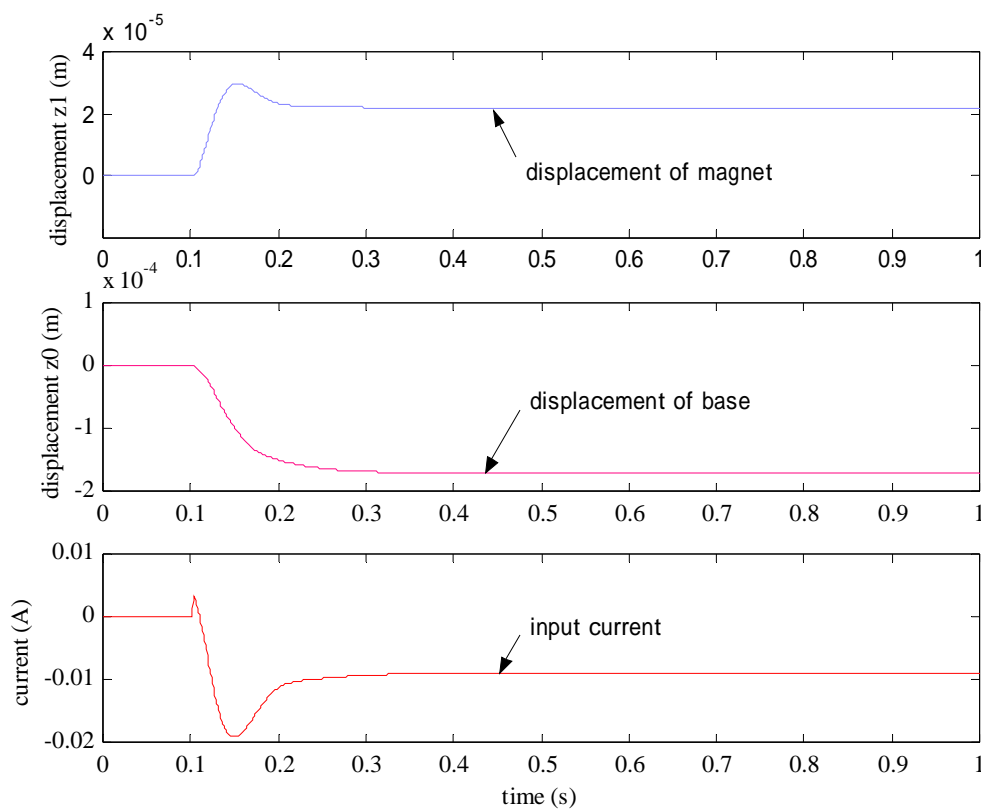


Fig.17. Displacement of levitation system

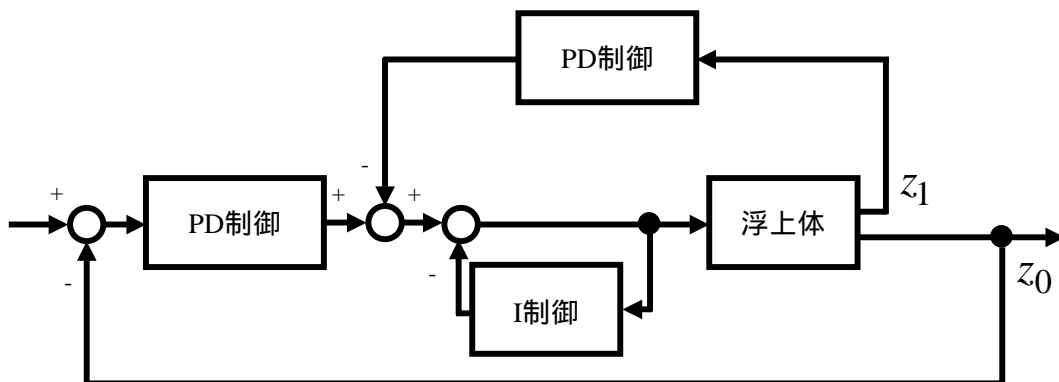


Fig.18. Block diagram of control system

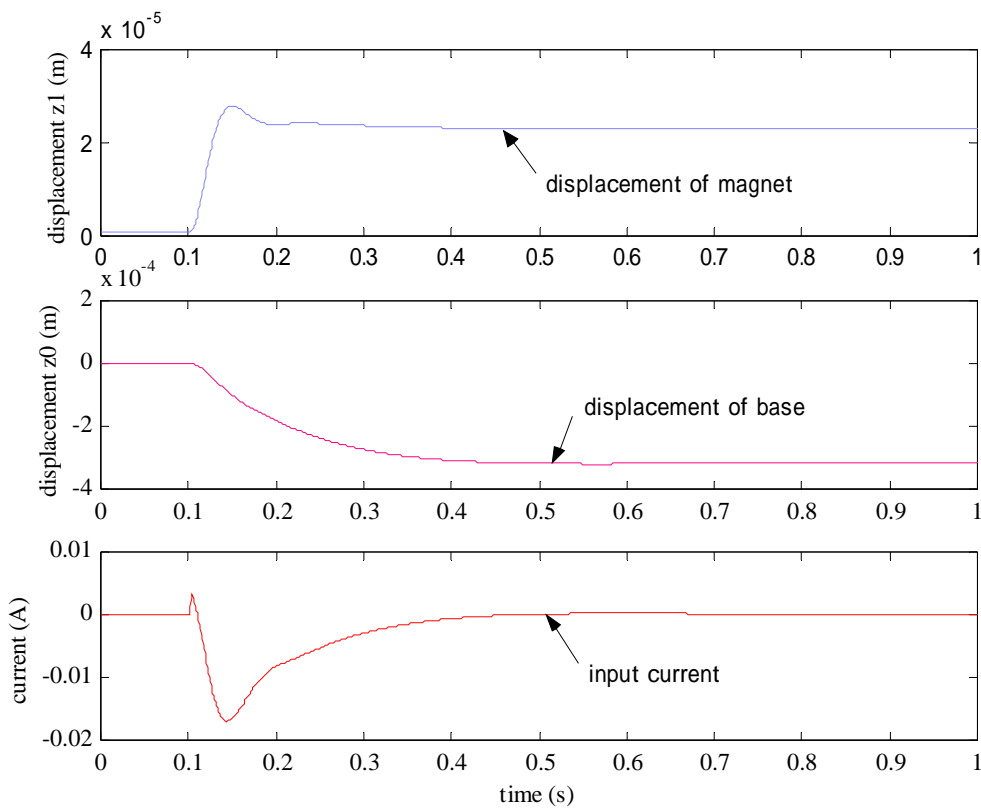


Fig.19. Control of current

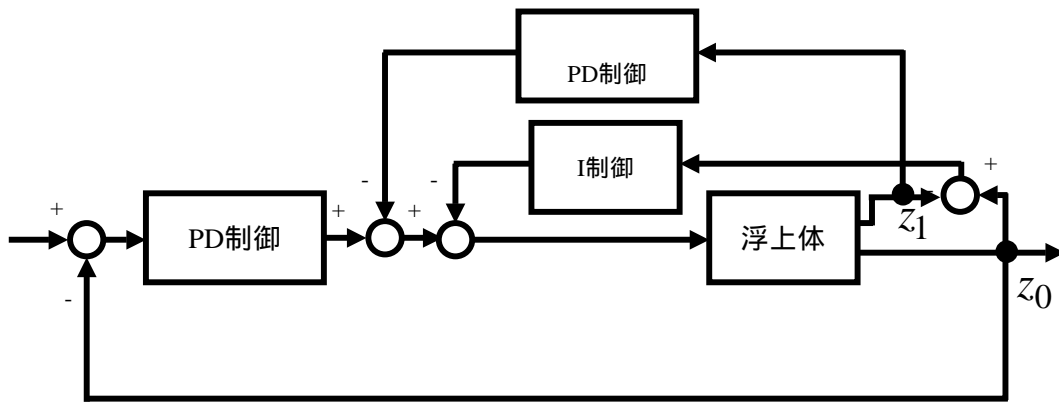


Fig.20. Block diagram of control system

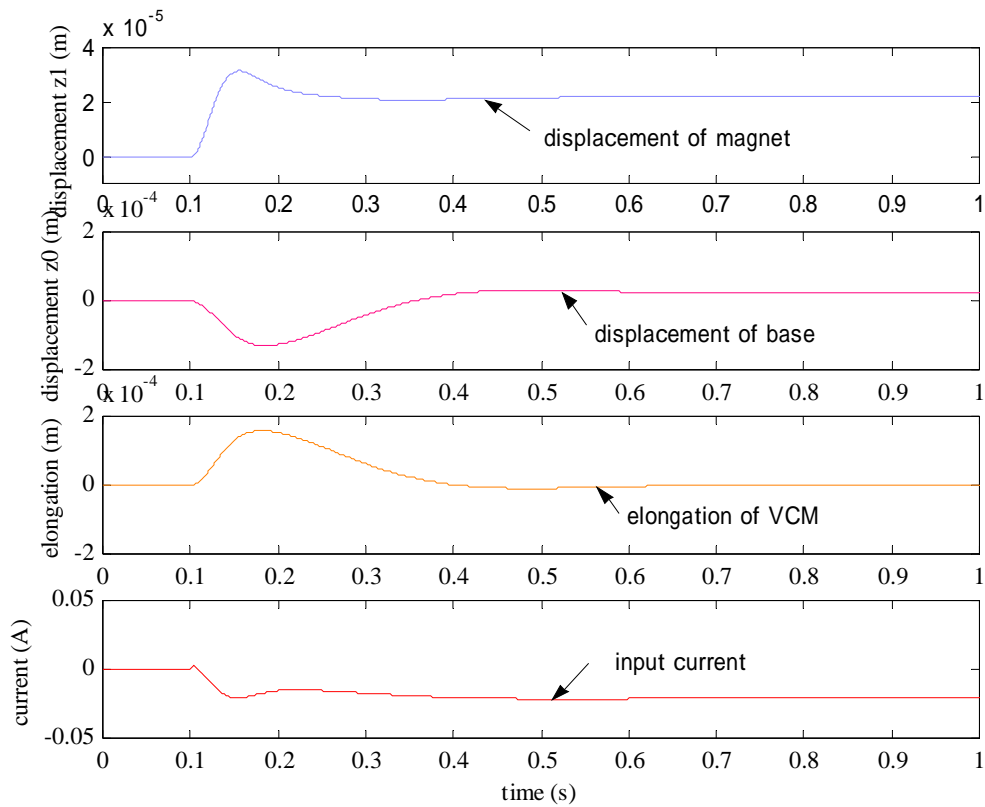


Fig.21. Control at offset position

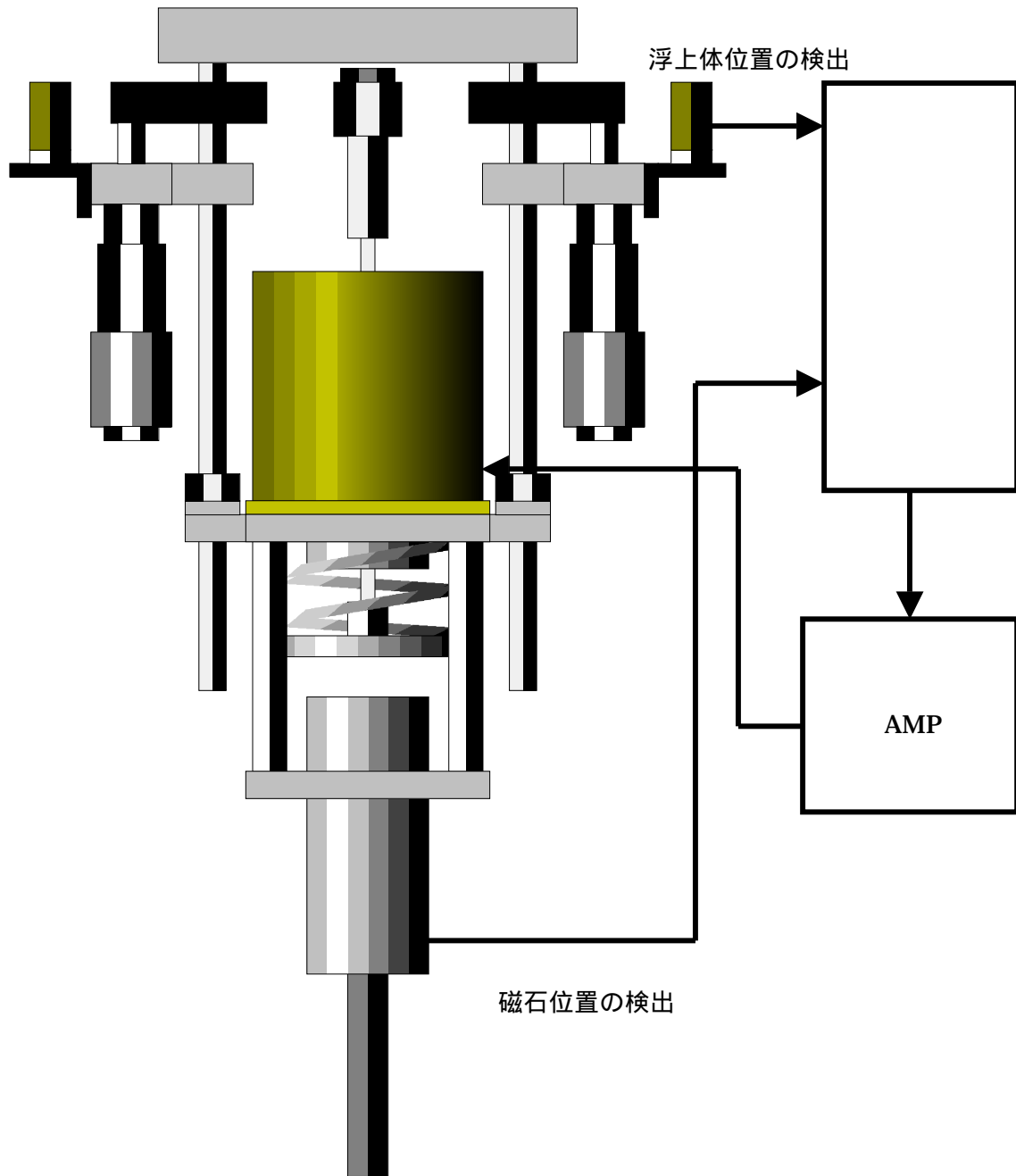


Fig.22. Flowchart of control system



Fig.23. State of levitation

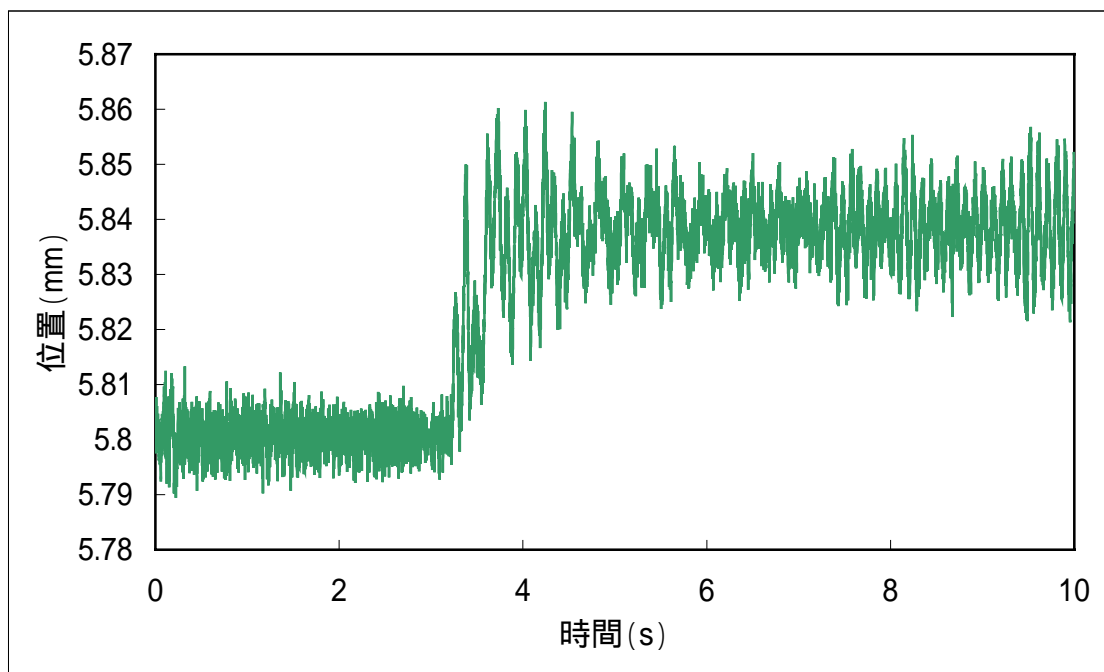


Fig.24. Response of step disturbance (Motion of magnet)

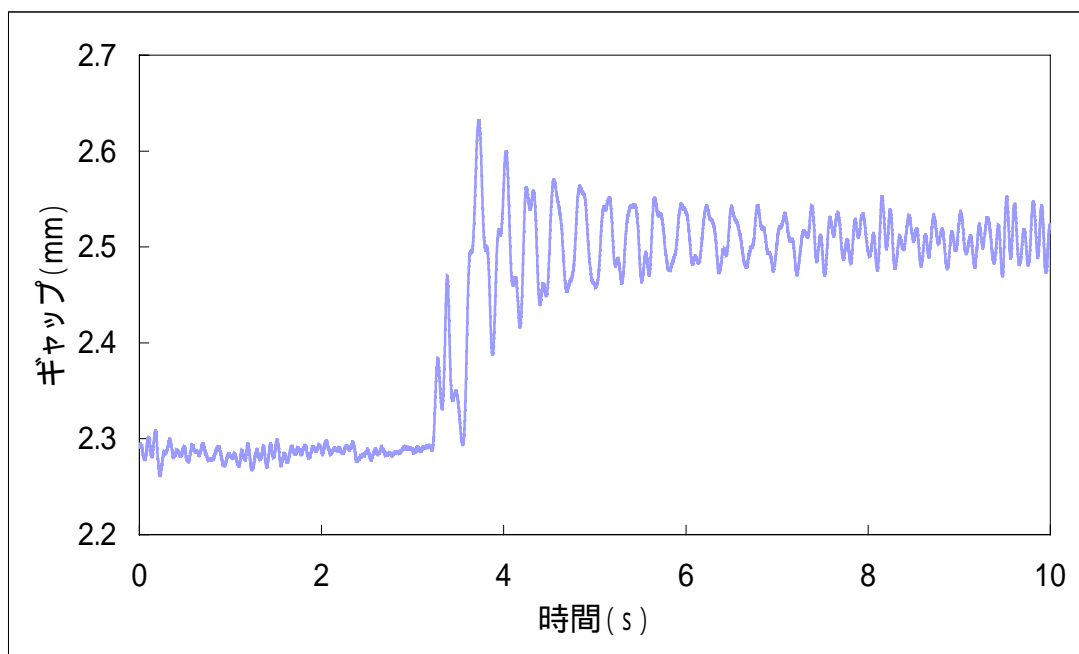


Fig.25. Response of step disturbance (Average displacement)

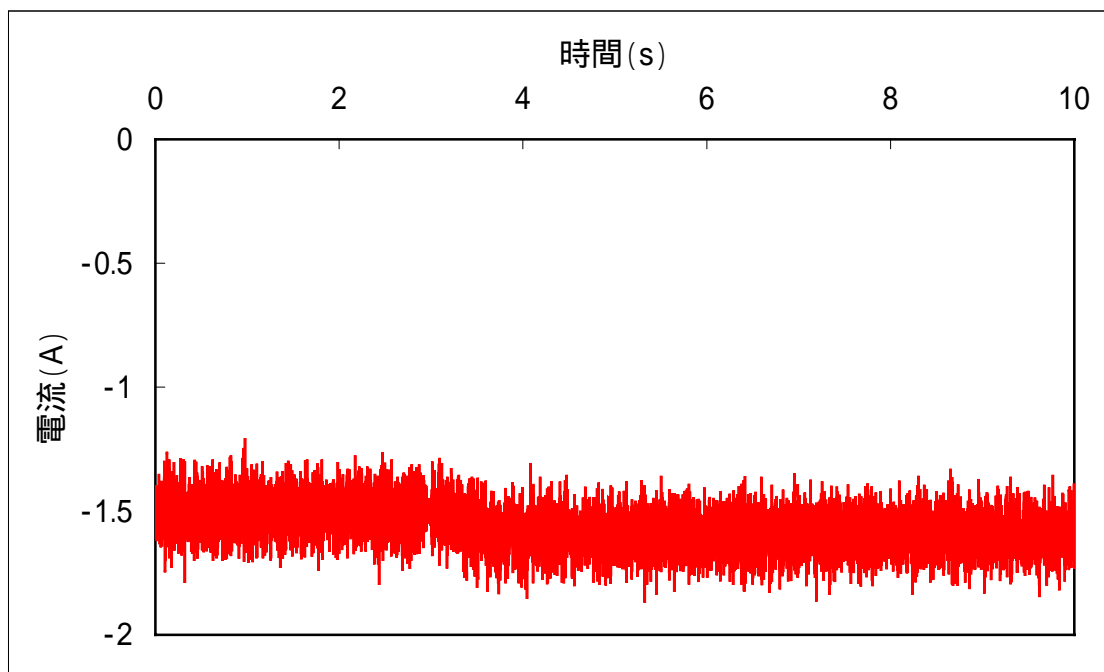


Fig.26. Response of step disturbance (Input current)