

4年生冬学期 特別実験

実験レポート

磁気浮上の基礎実験

(坪野研究室)

※ホームページ掲載用編集

物理学科 4年

61521F

佐伯 輝俊

2008/02/12

1. 実験の概要

1. 1 実験の目的

重力波検出のためには、装置に対するノイズや振動を限りなくゼロに抑える必要がある。装置を人工衛星に搭載して検出を試みる場合、外部振動の影響を取り除くために磁気によって検出器を空間に浮上させ、安定に制御することが重要な基礎となる。

本実験は、物体を磁気浮上させ、安定に保つ制御システムを組み、その安定性について評価する基礎実験である。この実験を通し、フィードバック制御機構の回路と応答システムについて学ぶとともに、ノイズの評価方法などについて学ぶことを目的とする。

1. 2 本実験の主な課題

フィードバック制御のシステム面においては、過去に4年生が本研究室で行ってきた磁気浮上実験のものとそれほど相違はない。

今回の実験で重点をおいた要素は、形状面における浮上装置自体の改良と製作である。改良のポイントは

- ① 装置全体の小型化
- ② 浮上体の腕を長くする
- ③ 浮上体の軽量化

これらはすべて将来的な重力波検出器の基礎概念に根差すものとして導入した。

まず①については、装置を小型化することにより検出器の扱いやすさにつながる。衛星に搭載する場合のことを考えれば装置の小型化は重要である。

②は、検出の精度を上げるためである。過去の実験では、浮上体は縦長のリング状磁石であったが、本実験では左右に腕の伸びた棒状の浮上体の製作を試みた。浮上体の腕を長くすることにより、特に回転方向の変動に対しての検出精度が上がるため、より安定に浮上体を制御できると考えられる。

①に基づいて小型化された装置の磁力でこの浮上体を浮かして、なおかつ制御するためには、浮上体は軽量でなくてはならない。③の浮上体の軽量化はこのためである。

このような形状の改良を目指して実験装置の製作を行い、その安定性を解析することが本実験の主な課題である。過去の4年生実験から、浮上システムの安定性はある程度解析されている。装置本体の形状を大きく改良することは、これまでの安定性を保証しないという不安もある。しかし重力波検出へのプロジェクトが進みつつある昨今、本格的な検出器へのアプローチを試みるためにも、基礎実験が担う役割はあらゆるケースに挑戦しデータを集めることである。このような観点から一からの浮上装置製作および安定性の解析を行った。

2. 実験原理と装置

2.1 原理

磁気による浮上の場合、固定磁石のみでは空間中に磁場ポテンシャルの極小値をつくることはできないため、単純に物体を静止させることは不可能である。安定に物体を浮上させるには、浮上体に生じる振動やノイズを感知し、巧くその変動を抑えようとする機構が必要である。

本実験では、空間自由度3つ（垂直方向（以下Z方向）、回転方向、並進）のうち、並進方向自由度を除く、Z方向の制御と回転方向の制御によって物体を浮上させることにした。

変動の検出は従来通り、浮上体にとりつけた鏡と、装置に固定されたフォトセンサーとの距離で検出する。フォトセンサー基盤上にあるLEDからでた光が浮上体の鏡で反射し、フォトセンサーがその光量を感知する。光量は、浮上体鏡とセンサーとの距離に応じて変化するため、浮上体の物理的変動はセンサーからの電圧信号に変換される。距離と電圧信号との関係はあらかじめ各センサーについてキャリブレーションを行っておく。一般的なキャリブレーション図は以下の図1のようになる。

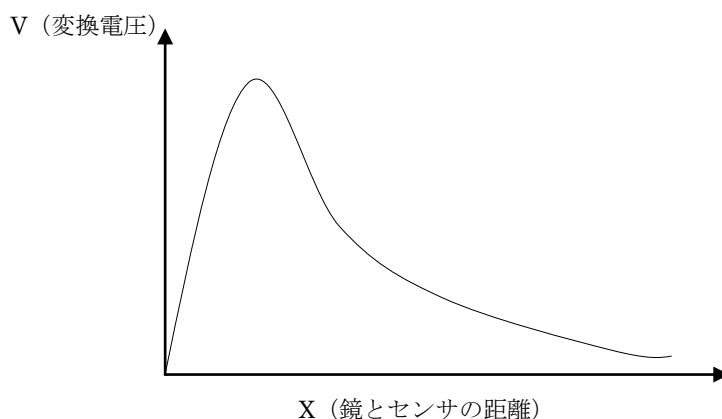


図1 一般的なキャリブレーションの曲線 図2におけるS (System) の伝達関数はこのキャリブレーションと考えてよい。

物体の浮上および変動の制御はZ方向および回転方向のコイル磁石によって実現させる。センサーからの電圧信号を加算アンプ回路で足し合わせ、オフセット電圧からのズレをフィルター回路を通してコイルドライバに伝えることで変動と逆向きの力をコイルに生じさせる。

本実験で用いたフィードバック制御の概略図を図 2 に示した。

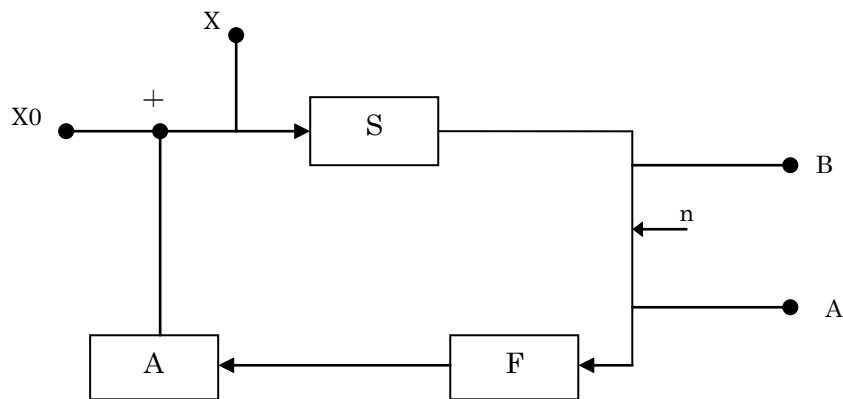


図 2 フィードバック制御系。

x_0 フィードバック前の外乱 x フィードバックされた変動

S は System A は Amplifier F は Filter の略。

この実験の場合、S がフォトセンサー出力をもつ装置一式で、F がフィルター回路、A がフィードバックを力として伝えるコイルドライバおよびコイルの制御回路である。

オープンループ伝達関数を $G = SFA$ とする。図 2 から

$$X = X_0 - Gx$$

$$\therefore x = \frac{X_0}{1 + G}$$

$|G| = 1$ のときをユニティーゲインとよぶ。このとき、G の位相が -180° からどれだけ離れているかを位相余裕という。位相余裕は大きい方が一般的に安定であるが、この実験の場合 40° 以上あれば適当であるといえる。

この制御系の Open loop 伝達関数 G を測定するにはスペクトルアナライザを用いればよい。

例えばフィルター入力の方にスペクトルアナライザを挿入し、適当な信号 n を加えて戻ってきた信号を読めばよい。このとき、

$x = x_0 - FA(Sx + n)$ であるから、図の点 A、B における信号は

$$B = Sx \quad \text{および} \quad A = Sx + n$$

この比 $\frac{B}{A} = \frac{Sx_0 - Gn}{Sx_0 + n}$ において、 $Sx_0 \ll n$ であるような信号 n であれば

$$\frac{B}{A} = -G$$

となり、G が測定できる。

2.2 実験装置の製作

ここからが本実験のスタートである。主な課題は前節で述べたとおり形状の改良である。

改良点として挙げる点は

- ① 装置の小型化
- ② 浮上体の腕を長くする
- ③ 浮上体の軽量化

このような観点のもと、装置を設計した。

完成図を次頁の図3、および図4に示した。

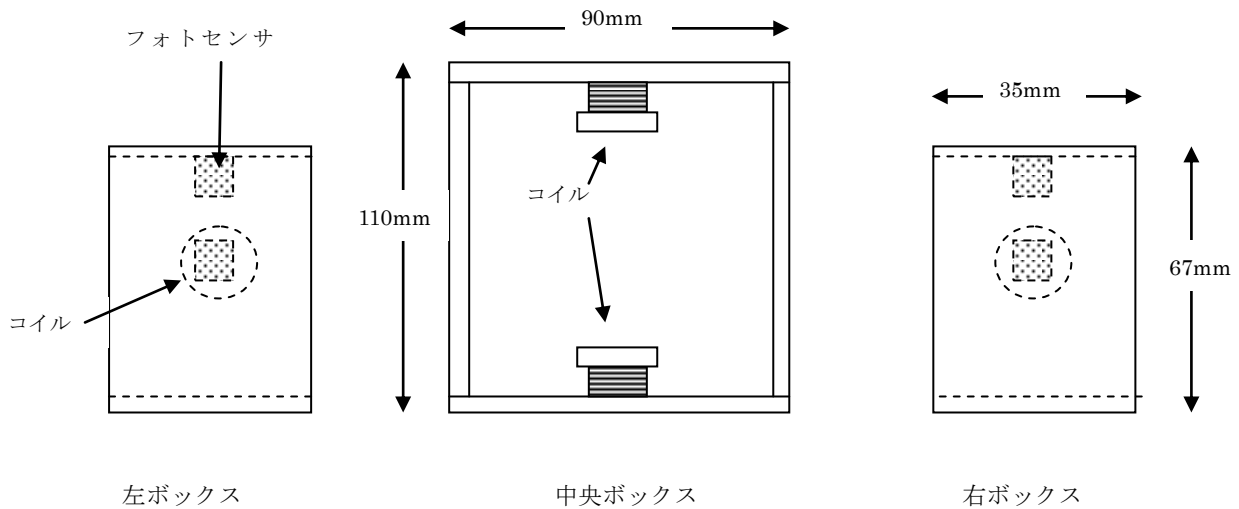


図3 装置の完成図

左ボックスは手前側面にフォトセンサー，奥側面にコイルがついている。右ボックスはその逆。サイズは同じである。

中央ボックスは底面と上面を頂点に4本の柱を立てて組み立ててある。

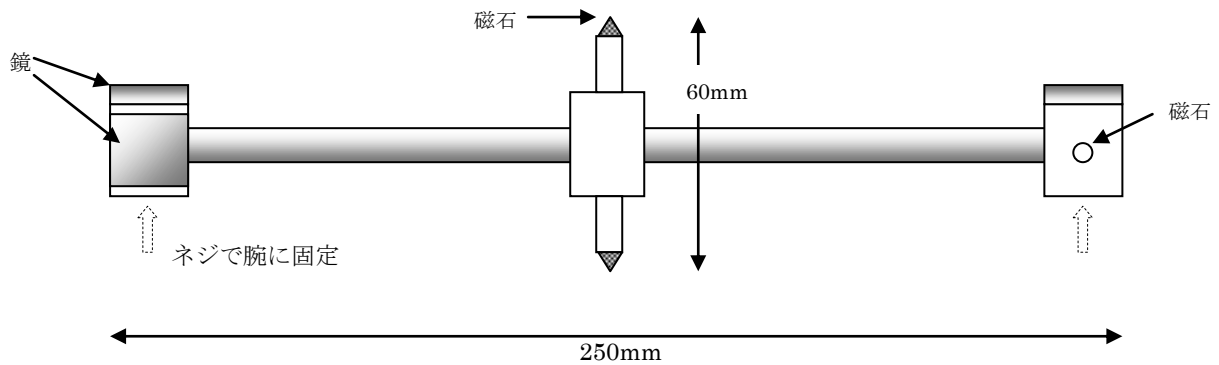


図4 浮上体

左の端は、手前側面に鏡、奥側面にピンの磁石を水平に取り付けてある。右の端は逆。また、両端とも上面に鏡を取り付けてある。鏡は1cm四方である。中央には上下に円柱型の強力な永久磁石を張り付けた。

設計のポイントは、

- ① 装置のフレームを中央、左右の3つのボックスに分けたこと
- ② 装置のフレーム（ボックス）のできる限りの最小化
- ③ 浮上体の腕を空洞のアルミ柱で製作し、できる限り腕を伸ばしたこと。さらにその長さの調節を可能にしたこと

浮上体およびボックスは磁化しないようアルミで製作した。

形状の設計アイデア自体は、本研究室で行われていた実験や過去のレポートなどを参考にしたので、ある程度すぐにイメージにできたが、設計段階で一番苦労したのが小型化によるサイズ制限、および重量制限であった。

当初、浮上体の腕は両端の距離50cm程度を計画していた。しかし用いるコイルの磁力を考慮すると、許される浮上体の質量は50g程度が限度である。両端に付属する鏡の取り付け部分や中央の磁石の質量も考えると、最も薄い厚さ0.5mmのアルミの空洞柱を用いても、実際には25cmが限界となった。腕をより長くするならば、装置全体のスケールを上げればよいが、それでは本来の小型化の趣旨に反するのでこの長さで妥協した。ボックスを含めた装置の大きさに比べると、相対的にある程度腕の長い浮上体といえると考えたためである。

また、浮上体の軽量化は、その耐久性にも問題を起こした。腕に取り付ける中央、両サイドの部品は体積をなるべく削ろうとしたために、形状が変形しやすく、設計の変更を何度も迫られた。また、両サイドは位置を調節可能にするためにネジで腕に押さえつける形で固定するので、薄いアルミ円柱の腕にネジ跡が変形して残った。

中央、両サイドのボックスの設計も困難を極めた。小型化により、浮上体が実際に可動できる範囲は上下、回転ともに 1mm~2mm 程度の設計である。浮上体が非接触で浮上した場合の状態での可動範囲の余裕をもたせるよう、フォトセンサーおよびコイルをボックスに固定しなければならない。正確な寸法が必要とされるが、設計段階では用いる予定のフォトセンサー基盤一式やコイルの精密な寸法が分かっていなかった。このため設計段階と製作段階では食い違いが生じた。回転方向のフォトセンサーの取り付け方向を変えたり、Z 方向のフォトセンサーの位置を高くするためにサイドのボックスの屋根（天板）と側面板との間にスペーサーとしてワッシャー（6 枚！）を挿入したりと、何度も微調整を迫られた一番の困難な点であった。

浮上体の変動感知とその制御について説明をする。

まず Z 方向の制御であるが、これは浮上体の浮上を実質的に担うので重要な部分である。浮上体には腕の中央の上下に棒状の永久磁石を取り付けてある。一方、装置中央ボックスの上下にコイルが固定されており、コイルの筒の内側に、さらにピン状の磁石が鉛直方向に取り付けられている。コイルが作動していないときは浮上体は磁力で上側か下側に張り付く。フィードバック制御によってコイルの磁力をうまく自動操作し、浮上体を空間に留めておくようにする。

上下変動の感知は、装置中央ボックスではなく、装置左右ボックスにあるフォトセンサーで行う。浮上体の左右の上面には鏡、フォトセンサーはボックスの上面に、鉛直下向きに取り付けてある。左右のフォトセンサーは変動の上下で同じ符号の電圧信号であるから、これらを足し合わせて加算アンプから出力する。

次に回転方向の制御である。これは浮上体の左右両端それぞれから水平に取り付けた細い棒磁石と、装置の左右ボックスの側面に取り付けたコイルによって行う。

回転方向の変動感知は、浮上体両端の側面にある鏡と、左右ボックスの側面（回転制御コイルの向かい側の面）に取り付けたフォトセンサーとの距離によって行う。

回転制御のコイルおよびセンサーは、装置の上側からみて、腕の中心軸対称に位置しているため、浮上体がどちらかに回転しようとした場合、左右のフォトセンサーからは同じ符号の信号がでる。

装置と浮上体の位置関係を簡単に図 5 に示す。

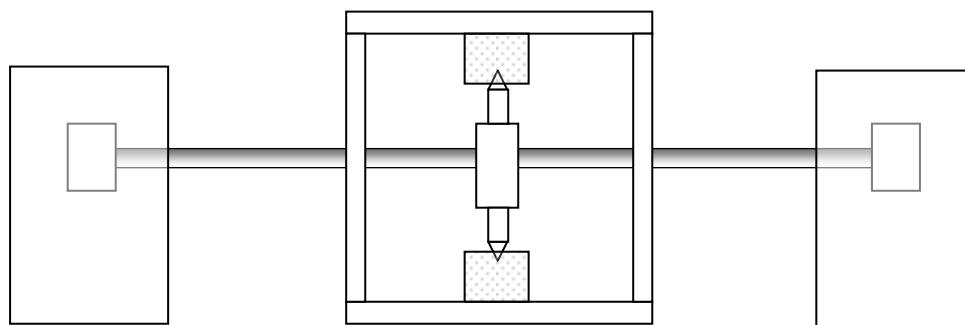


図 5 浮上体を挿入した状態での装置一式（正面からみた図）

次に、フィードバック制御を行う各電気回路の概略図を図 6 に示す。

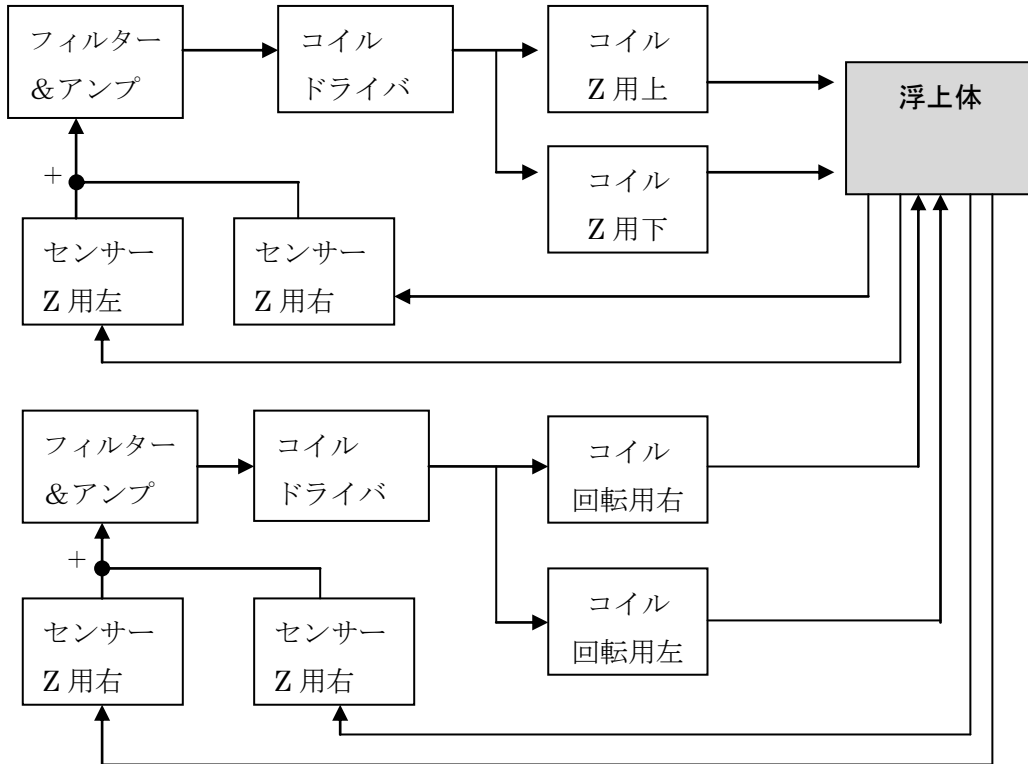


図 6 本実験におけるフィードバック制御機構の概略

3. 実験

3.1 浮上体の調整

装置が完成し、浮上させるまでの調整について述べる。

初めはZ方向の制御，すなわち浮上自体に専念した。

浮上体が非接触の状態でおフセットのゲインを調整し，動作点を定めた。次にフィルター回路，およびコイルドライバーのゲインをそれぞれ調節していった。

当初，フィルター回路の反転スイッチを正しい方向と逆にいていたため，なかなか浮上しなかった。その後，正しい方向に入れなおして，コイルドライバーのゲインを調節していくと，浮上体の磁場ポテンシャルの安定点が存在するようになり，Z方向の制御は成功した。

しかし，最初に浮上したときは，浮上体がコイルの内穴に接触して留まる状況になった(図7)。すなわち，Z方向では制御が効いているが，浮上体が並進方向に移動してしまい，完全な非接触が実現できなかった。これは浮上体の質量バランスが正確でないために起こったものと考えられる。浮上体の鉛直方向の棒磁石は，中央ボックスの上下に取り付けられたコイルの内穴に入っている設計なので，並進方向の移動を制御しない本実験では浮上体の非接触浮上を実現するのが困難な点である。

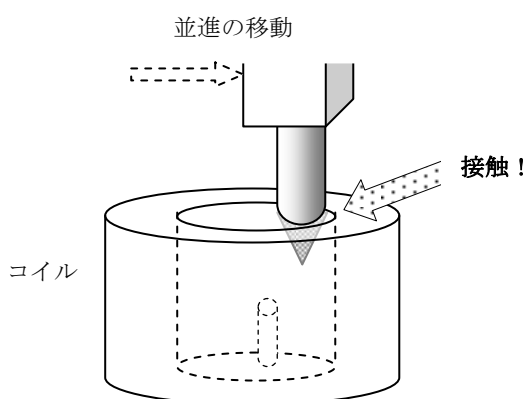


図7 浮上体の接触 コイルの穴の淵に浮上体の中心軸が接触している。

浮上が実現した後，回転方向の制御も取り入れて浮上体を制御させた。

しかし，初めはフィルターのゲインが強すぎたために，装置が発振してしまい，浮上はしているが大きく振動してしまい，安定な制御を実現できなかった。ゲインを調整しながら何度も安定な位置を探したが，なかなかうまく静止しなかった。

原因としては，Z方向の制御信号と回転方向の制御信号のカップリングが考えられる。浮上体の腕が長い分，左右上下のバランスは崩れやすく，本来独立な自由度であるべき上下の変動は回転の変動と関連してしまう。

ここで、不安定な浮上体を安定させようと、上下コイルの内穴にワッシャーを取り付けてみた。すなわち、コイルの穴を小さくすることで浮上体の並進方向の移動範囲を狭くし、浮上体の制御をしやすくする。常に完全な非接触は実現できないが、浮上していれば少なくとも Z 方向と回転方向のフィードバック制御機構の解析においては問題がない、と当初考えたためである (図 8)。しかし、後で示すように、軽い接触でも、伝達関数のノイズに影響を与えてしまい、きれいなスペクトルが得られないという影響がでてしまった。

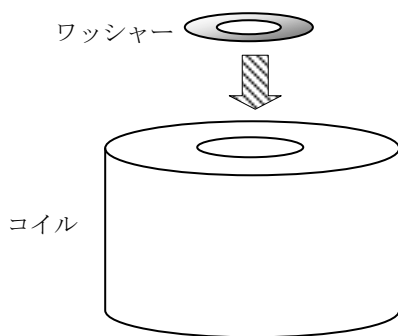


図 8 並進を制限したワッシャー取り付け。コイルの穴よりもワッシャーの穴の方が小さいため並進の振動を制限できると考えた。

実際、これは実験の解析終了後に判明するが、ワッシャーを取り除き、並進移動の制限を取り払っても、浮上体はほぼ非接触で浮上することが確認された。完全な静止浮上ではないが、少なくとも接触はせず Z 方向、回転方向のフィードバック制御のみで浮上制御が完成していた。おそらく、ゲインや浮上体のパラメータを調整する中で、よい安定点にたどりついたのだと考えられる。

ただし、これは実験最終日での実現であり、以降に示す制御システムの解析は、すべて完全な非接触とは言えない状況で行ったものである。

3. 2 浮上システムの解析

浮上体が浮上し、フィードバックシステムが完成したので、この制御システムの諸解析を行った。

この解析によって、システムがどのような作動特性をもちどれほど安定な制御を実現しているのかを確認する。

以下、(1)キャリブレーション (2)変動測定 (時系列) (3)周波数測定 (スペクトル) (4)制御特性 (Open loop 伝達関数の測定) の順で記し、各結果について考察してある。

(1) キャリブレーション測定

フォトセンサーの電圧信号と浮上体の物理的変動を結びつけるためにキャリブレーションを行った。浮上体の平均的な変動距離は 1mm~2mm 程度の小さい範囲であるから、フォトセンサー特性としては電圧が極大値を迎える手前の右上がりの曲線である。すなわち、この浮上体の外乱の電氣的信号への変換は、距離が大きくなれば電圧がほぼ比例して増加する部分に対応する。

以下の図 9 に各フォトセンサーのキャリブレーションの結果を示す。

プロットの近似から、距離 $x(\text{mm})$ と電圧 $y(\text{V})$ との関係式も含めて各フォトセンサーについて示してある。

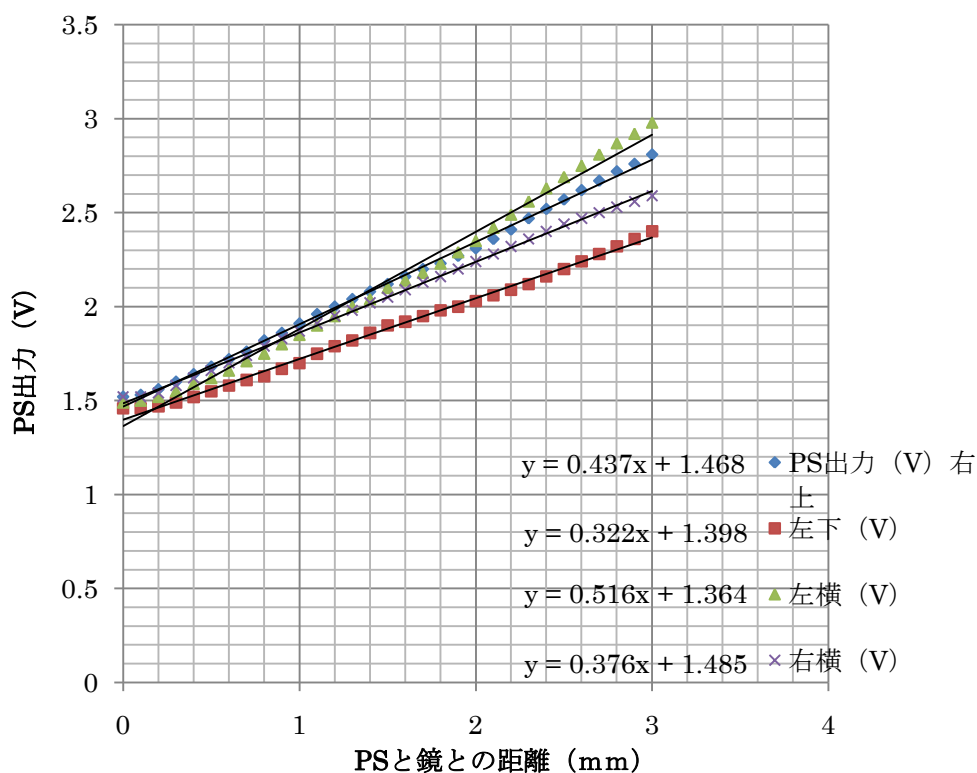


図9 キャリブレーション結果

鏡とセンサーとの距離が 0mm でも電圧値が 1.5V 程度あるのは、鏡がセンサーを覆い切れていないため外部の光がセンサーに入り込んでいる理由による。

どのフォトセンサーも比較的きれいな直線を描いている。

このキャリブレーションを System の伝達関数として考えるとゲインは直線の傾きに対応しているので、およそどのフォトセンサーも 0.4 程度である。

(2) 変動測定 (時系列)

制御システムの安定性を調べるために、時系列での浮上体の変動測定を行う。測定は各フォトセンサー4つの出力信号をデータローガで測定した。測定時間は200秒である。

Z方向の変動測定を図10、回転方向の変動測定を図11に示した。

略記として、Z方向のフォトセンサーで右側をP1(右)、左側をP1(左)、回転方向のセンサーで右側をP2(右)、左側をP2(左)と呼ぶことにする。

まず図からわかるように4つのフォトセンサー出力のうちP1(右)の出力が他のものに比べて明らかに変動が小さい。

P1(左)における大きな変動がもし浮上体の上下変動であればP1(右)の出力にも同じ変動が現れるはずであるから、P1(左)の変動出力は他の要因であると考えられる。明確な原因は定かではないが、以下のことが考えられる。

ひとつはP1(左)自体の振動である。左側ボックスがもし制御コイルの振動によって振動していたとすると、フォトセンサー自体も微小に振動している可能性がある。

もう一つは、回転方向の変動を縦方向の変動のものと感知してしまうことによる。もし、浮上体の左の上面にある鏡が下図12のように傾いていたとすると、回転方向に浮上体が移動すればP1(左)と鏡との距離も変動してしまう。可能性としては以下で述べるようにこちらの方が高い。

回転方向の変動であるが、こちらはP2(右)とP2(左)の出力が同じタイミングで変動しているため、出力の寄与はほぼ浮上体の振動であると思われる。ここでP1(左)の変動と照らし合わせると、ほぼ同じタイミングで出力の大きな変化が観察される。すなわち、回転の変動が、左のZ方向P1(左)の出力に影響を及ぼしている可能性が高い。

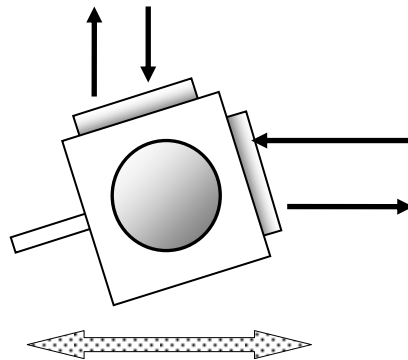


図12 浮上体の左端を左から見た図。もし上のように傾いていると回転方向の移動は上下の変動にも影響を与えてしまう。

浮上体の設計上、左右両端の鏡取り付け部分は可動にしてある。ネジで腕に押しえつける形で固定してあるため、実験中何度も外れかかった。特に左側の鏡は外れやすく、修復の際に傾いてしまい、上面の鏡が水平にならず傾いていた可能性がある。

キャリブレーション値から浮上体の変動幅を算定すると、大きく変動したときで0.01mm~0.02mm程度である。その意味で、ある程度安定した浮上が実現できていたといえる。

出力電圧 (V)

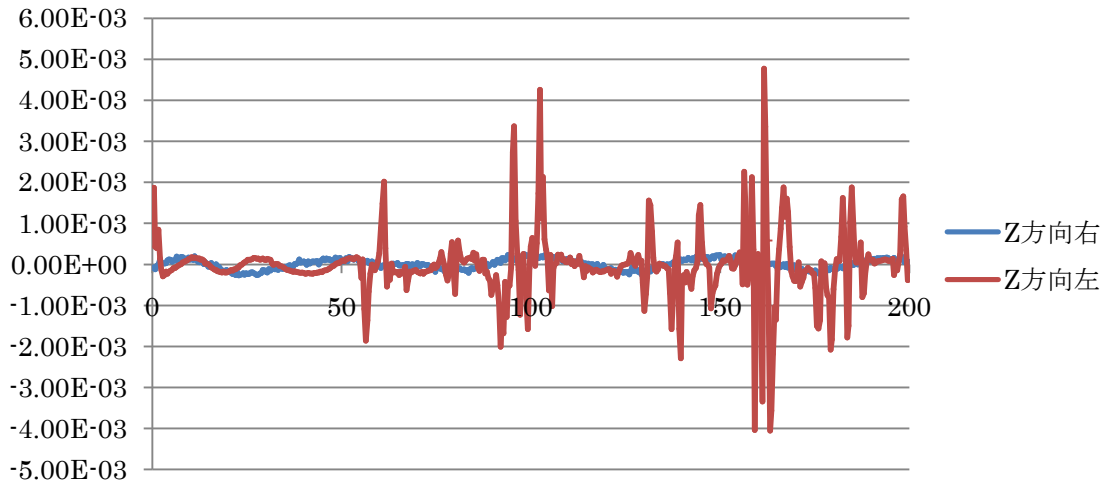


図 10 Z方向の変動測定 (時系列)

右側 PS の出力はほぼ安定しているのに対して左側 PS は変動が大きい。

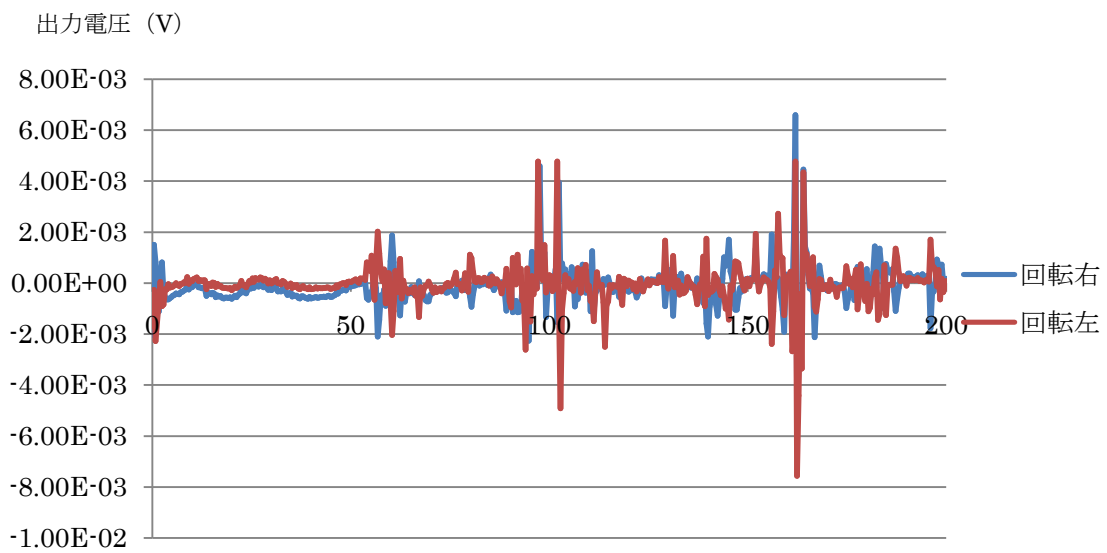


図 11 回転方向の変動測定 (時系列)

右と左の PS 出力がともに同じタイミングで変動している。

(3) 周波数測定 (スペクトル)

浮上体の振動に対する各周波数成分の寄与を調べた。測定点は、各フォトセンサーの出力（加算アンプに投入する前）である。Z方向の測定結果を図13、回転方向の結果を図14に示す。

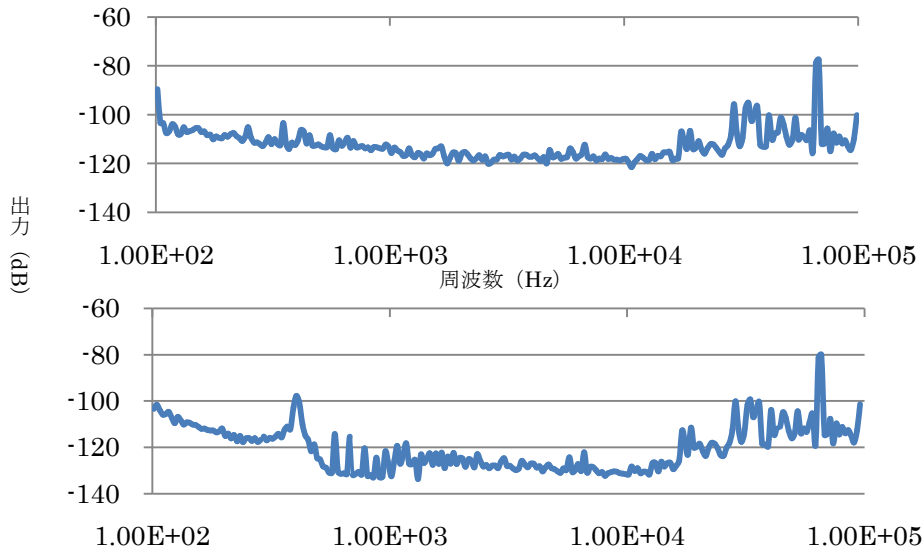


図13 Z方向のセンサー出力のスペクトル。上がP1（右）下がP1（左）である。

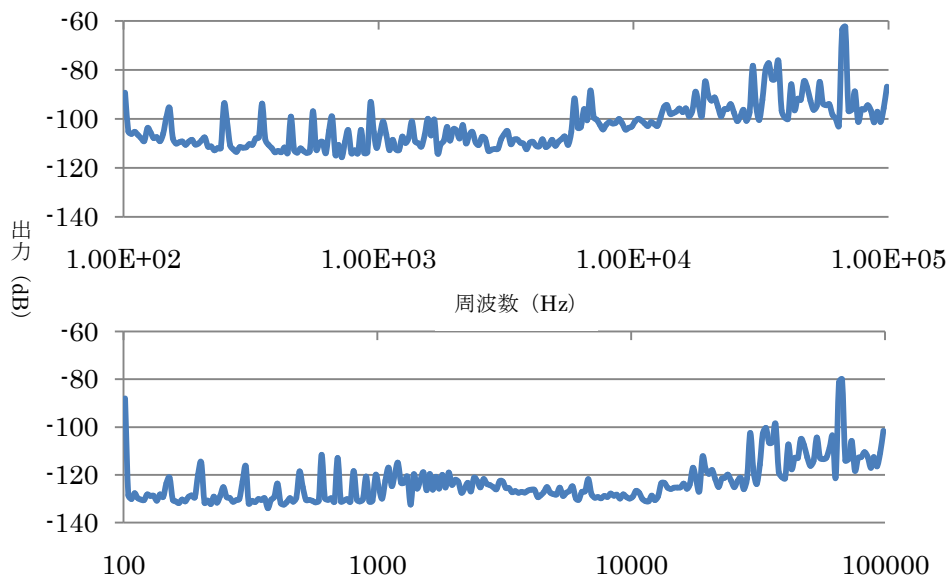


図14 回転方向のセンサー出力のスペクトル。上がP2（右）下がP2（左）である。

後に示す(4)の結果から分かるが、ユニティーゲインがZ方向では25Hz、回転方向では3Hzである。フォトセンサー出力は浮上体の変動の大きさと比例しているため、理論的にはユニティーゲイン以下の周波数成分はカットされているはずである。しかし、結果としてはそれぞれのユニティーゲイン周波数付近でも平坦なスペクトルを描いている。これも浮上体の微妙な接触による影響だと思われる。

(4) 制御特性（伝達関数の測定）

制御回路の伝達関数をスペクトルアナライザーで測定した。フィードバック制御において、Open loop 伝達関数を測定することは、その制御系の特性を知る上で重要であり、その実用性にも関係してくる。

具体的な目的は、周波数応答 G において、ユニティーゲイン ($|G| = 1$ となる時) と位相余裕 (ユニティーゲイン周波数における -180° からの余裕位相) を見積もることである。ユニティーゲインおよび位相余裕が大きいと、安定に制御できる変動の周波数帯域が広くなり、より安定な制御システムが実現できるといえる。

スペクトルアナライザーをフィルターとコイルドライバーの間に直列に接続する。伝達関数 G は、スペクトルアナライザーから加算される様々な周波数出力に対して戻ってくる出力の比 (のマイナス) で表わされることを用いた測定である。

Z 方向、および回転方向それぞれの伝達関数 G のゲイン特性、位相特性の測定結果を図 15、図 16 に示した。

スペクトルアナライザーから挿入される信号の電圧 n は 500mV, 600mV, 700mV に変えてそれぞれ測定したが、一番安定したデータが得られた 500mV のときを載せてある。

$Sx_0 \ll n$ であるような信号 n である必要があるが、キャリブレーションによって得た S のゲイン (0.5 程度) と、もともとの変動 x_0 を大きくて 10mm 程度であると考慮すれば十分満たされる挿入値である。

はじめに Z 方向の制御に関して考察する (図 15 : 省略)。

ユニティーゲインは 26Hz 付近であり、位相余裕は 40° 付近であった。

どちらも適当な値であると思われる。スペクトルがきれいな曲線を描かない理由としては、浮上体の接触が考えられる。測定時は不安定に振動していたり、発振が起こっていた様子はなかったが、微妙な接触によりフィードバック制御が浮上体の運動に反映されず、その結果ギザギザのデータが出力されていると考えられる。

次に回転方向の制御に関して考察する (図 16 : 省略)。

こちらはユニティーゲインが 3Hz 付近であり、Z 方向に比べると小さい。位相余裕は 30° 付近であり、これは Z 方向のものとそれほど変わりはない。

位相余裕は適当な値であると考えられるが、 G の周波数応答は必ずしもきれいなスペクトルとはいえない。浮上体の接触が伝達関数の正確な測定に影響を及ぼした可能性が高いと思われる。

Z 方向について、伝達関数 G の軌跡（ナイキスト図）をプロットした。図 17 に示す。

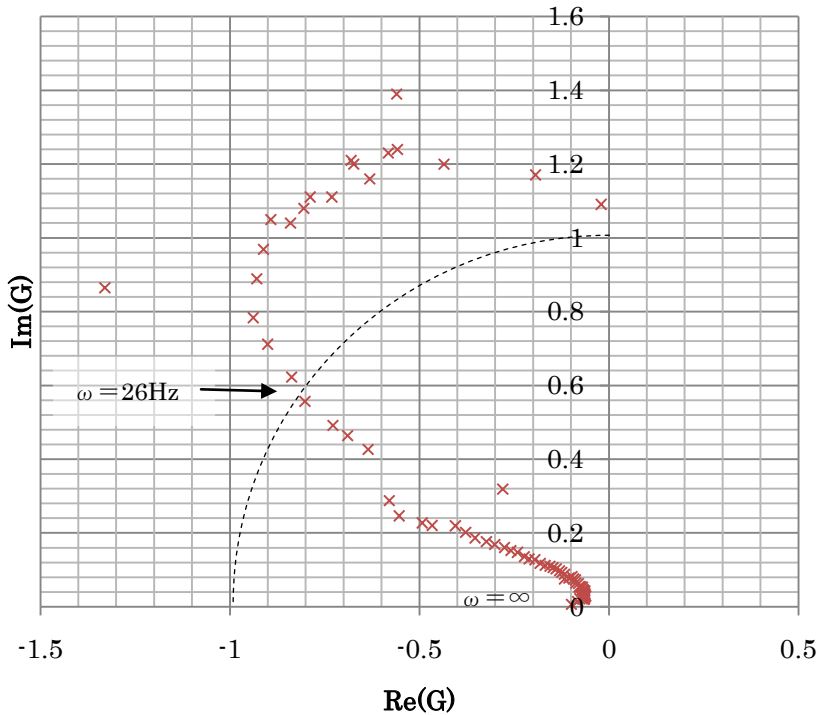


図 17 Z 方向制御の G のナイキスト図をプロットしたもの

低い周波数から高い周波数にかけて反時計回りに移動し、周波数 $\rightarrow\infty$ で原点に近付いていることが分かる。図 17 において原点中心半径 1 の円 ($|G| = 1$) と G の奇跡が交わる点がユニティゲインを指す。この点と実軸の負の方向とが成す角が位相余裕と考えられる。また、周波数が大きくなるにつれて原点に近付いているのが分かる。

ここで、 $1+G$ の曲線は上の曲線を実軸方向に 1 平行移動したものである。

$$|x| = \frac{|x_0|}{|1+G|}$$

$1+G$ の大きさが大きいほど外乱をよく制御しているといえる。ユニティゲインにおける点を実軸に 1 平行移動したとき、その点の原点からの距離が大きいほどよいことになる。ユニティゲインにおける位相余裕が大きいほどそれが実現される。それゆえユニティゲインにおける位相余裕が制御系の安定性指標となると考えられる。

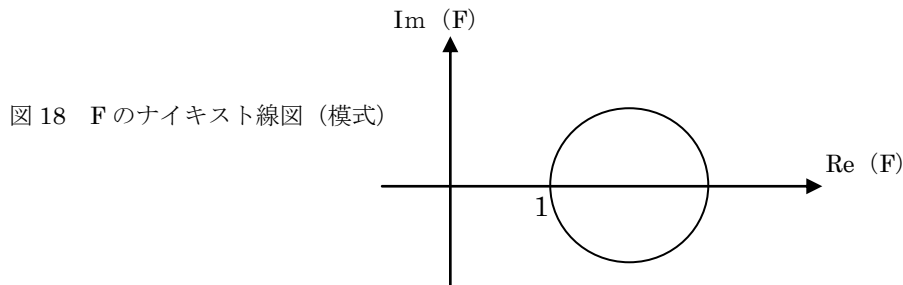
$\text{Re}(G) > 0$ におけるプロットはどうなるのだろうか。

伝達関数は $G=SFA$ で表わされる。A の伝達関数は入力 -2 次で減少し、位相は π (rad) 遅れるので、フィルター回路についても伝達関数を測定しておけば、A が分かる。今回の実験ではフィルターの伝達関

数を測定していないので、この制御系の理論的な伝達関数 G のナイキスト線図は描けない。

しかしある程度の概形は予想できると思ったのでそれを最後に記しておく。

$G=SFA$ であり、 S は線形の伝達関数であるから実質的に FA が G の周波数応答特性に寄与すると考えられる。 F は特定周波数を通す伝達関数なので、おおよそ F の伝達関数は下のようになる (図 18)。



簡単のため、例えば F を、 $F = \frac{2s+1}{s+1}$ という伝達関数とする。実際これは上の図の曲線を表す。

さらに、 A は -2 次で減少するゲインを与える 2 次系関数と思い、簡単に $A = \frac{1}{s^2+s+1}$ と置く。

そうすると伝達関数は $G(s) = \frac{2s+1}{s+1} \frac{1}{s^2+s+1}$ とモデル化できる。従って、

$$G(i\omega) = \frac{1 + 2\omega^2 - 2\omega^4}{\omega^6 + 1} + \frac{3\omega^3}{\omega^6 + 1} i = x(\omega) + iy(\omega)$$

となるから、この伝達関数のモデルでは、理論的な曲線は以下のようなになる (図 19)。

周波数 $=0$ のとき点 1 、そこから反時計回りに回転していく。高周波数 $\sim \infty$ にかけて原点 0 に近付く。

実験で得られた G のナイキストプロットはこの図の $\text{Re}(G) < 0$ の部分を見ていると考えてよい。

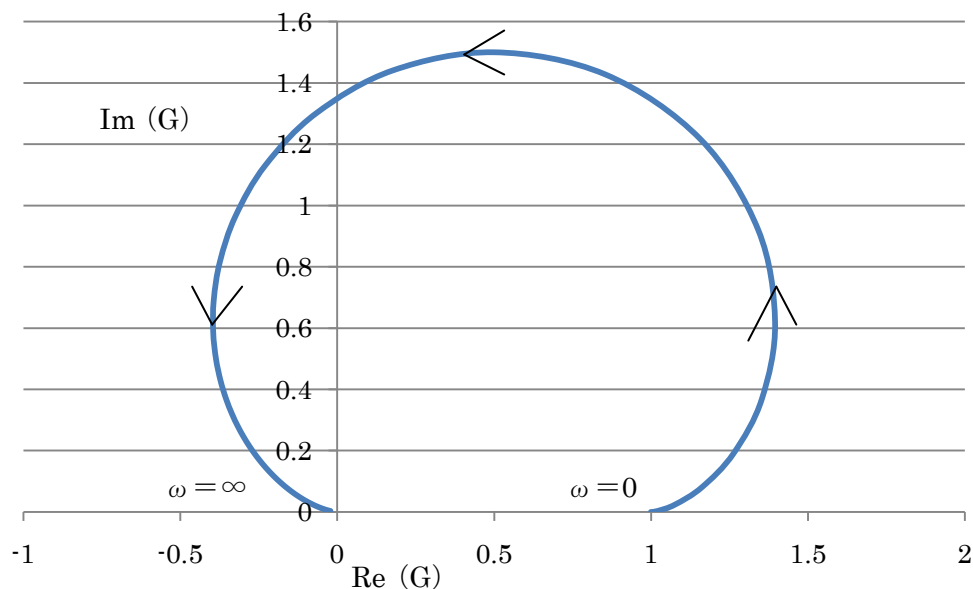


図 19 モデル化した伝達関数 G の理論線。図 17 のプロットはこの図の $\text{Re} < 0$ の部分と思われる。

4. まとめと今後の課題

今回の主な課題は形状の改良であった。思い切って浮上体の腕を長くして、装置全体を小型化する、この試みで実験を進められことには満足している。しかし、安定な浮上を阻害した一番の原因も、やはりこの浮上体の形状にあると思われる。すなわち、浮上体が横に長いことで、バランスを保つことが難しくなる。結果、①Z 方向と回転方向の変動が混ざってしまい正しいフィードバックができない、②並進の変動を大きくしてしまい浮上体がコイルに接触してしまう、そのために非接触での安定な浮上が実現しなかったと思われる。

今回の実験で反省すべきは、浮上体の正確な製作とバランスの調整を精密に行わなかった点である。特に、両端の鏡の取り付けや磁石の取り付けは正確とは言えない。両端の取り付け部分は左右で平行にするのは難しく、工夫しながら目測で調整したのが事実である。

したがって今後の課題としては、浮上体のバランスをうまくとるような装置の改造である。小型化と軽量化を踏襲しつつ、いかにしてバランスのとれた浮上体をつくり、Z 方向と回転方向の変動を独立させるかが重要である。また、並進方向の制御を取り入れられればより安定に浮上すると思われる。

5. 感想

実験の解析終了後、接触点となっていたワッシャーをコイルから取り除いて浮上の様子を確認したところ、はじめて非接触状態で浮上体を安定させることに成功した。多少の変動はあるものの、上下と回転のフィードバックがうまくかかり、安定な動作点を見つけて浮上していた様子が目に焼き付いている。その状態で解析を行えなかったのは悔やまれるが、自分たちで製作した装置で実験を終えられたことには満足している。一から物を製作し物を浮かすという体験は非常に貴重であると感じたし、何より楽しかった。

研究室の先輩方、坪野先生、何より安藤さんには大変よく面倒をみていただいて感謝します。