

特別実験レポート  
気球実験用小型加速度計のアナログ制御

理学部 物理学科 4年

61529 澤木了

共同実験者 野海俊文

2007年9月25日

## 目次

|     |                       |    |
|-----|-----------------------|----|
| 1   | 概要                    | 3  |
| 2   | 装置の原理                 | 3  |
| 2.1 | 装置 . . . . .          | 3  |
| 2.2 | コイル . . . . .         | 5  |
| 2.3 | フォトセンサー . . . . .     | 7  |
| 2.4 | 回路 . . . . .          | 8  |
| 2.5 | フィルター回路 . . . . .     | 9  |
| 3   | 動作                    | 12 |
| 3.1 | オープンループ伝達関数 . . . . . | 12 |
| 3.2 | エラー信号 . . . . .       | 13 |
| 3.3 | カップリング . . . . .      | 14 |
| 3.4 | キャリブレーション . . . . .   | 16 |
| 4   | 地面振動の測定               | 18 |
| 4.1 | 周波数特性 . . . . .       | 18 |
| 4.2 | カップリング . . . . .      | 23 |
| 5   | まとめ・今後の展望             | 25 |
| 6   | 感想                    | 26 |
| 7   | 補遺：回路図                | 27 |

## 1 概要

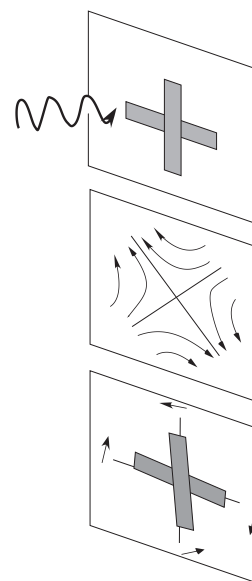
重力波は、光速で伝わる時空のさざなみであり、伝わる間に空間を引き伸ばしたり押し縮めたりする。

1918年、アインシュタイン (Albert Einstein) は、一般相対性理論の1つの帰結として、重力波の存在を予言している。中性子星やブラックホールなど極端に重い天体からなる連星が、重力波を出して徐々に連星間の距離が縮まっていく様子が天体観測から確認された。このことから重力波の存在は検証されていて、直接的な観測が試みられている。

重力波を検出するときの問題は、重力波が広がっていくにつれて弱められてしまう点にある。中性子星合体やブラックホール衝突は宇宙の中でも最も激しい変動だ。しかし、こうした現象で作られた重力波が何億光年という距離を飛んで地球に届くころには、かなり弱くなってしまふ。例えば、10億光年かなたでブラックホール同士が衝突したとすると、そこで作られた重力波は2個の自由に動く物体同士の間隔を伸び縮みさせるが、その変化率はわずか  $10^{-21}$  (太陽と木星の距離が水素原子1個分伸び縮みする程度の変化) である。

このような微小なものの測定にはノイズを小さくすることが必要である。ノイズ源の一つとして地面振動があげられる。宇宙空間で観測することは地面振動を取り除けるという点で有利である。そのうえで重力波を観測するためには、高感度の加速度計が必要となる。このために物体を非接触で磁気浮上させて、その動きを捉えることを考えられた。

今回の実験の装置ではそのことをふまえ、小型の物体を浮上させている。実際の精密測定をおこなうためには、装置も回路も必要である。設計の手法、データの処理などの実験の基礎を理解することを目指す。学生実験のスケジュールとしては、7月末までにデータを取れるようにおこなった。4月にコイルの特性を測定、5月にフォトセンサーの特性と回路作り、6月に回路の伝達関数の測定をして浮上に備えた。そして7月に装置を組み立てて浮上させ、データをとった。このレポートも実験と同じ流れで記述する。



## 2 装置の原理

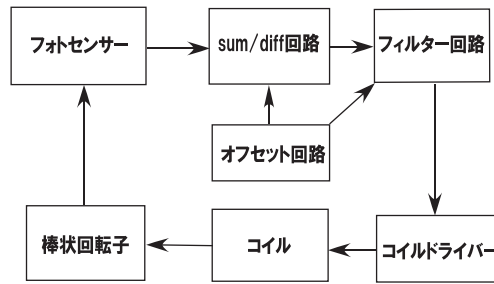
この節では、装置の物理的配置、コイル、フォトセンサー、回路について述べる。

### 2.1 装置

今回実験で用いたのは、超小型重力波検出器として開発されている、小型加速度計である。

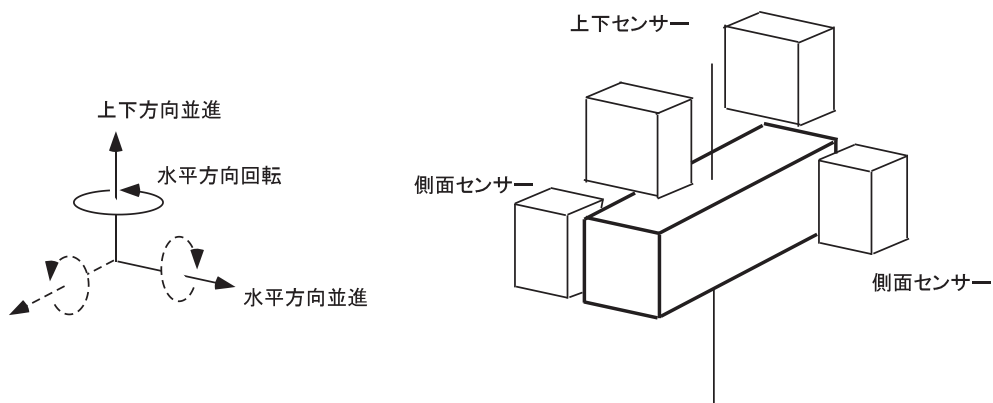
浮上体本体は長さ 50mm、質量 50g 程度で、アルミからなる。また上下面と側面にはそれぞれ2つずつ永久磁石がとりつけられている。光を反射させるために上面に2枚、側面に2枚鏡が取り付けられている。この浮上体の対称性のため、浮上体にかかる力は各自由度にわかりやすく分離される。

重力波を検出する際には浮上体2つの長い軸が互いに直交するように配置され、差動回転変動を観測することになる。浮上体に永久磁石を接着し、外部から電磁石により磁場を加えることで、非接触での磁気浮上をねらう。浮上体の動きを読み取り、フィードバックを加えることで安定して静止するようにした。



流れ

浮上体には自由度は、重心に対する並進3種類、重心に対する回転3種類のをあわせて6種類の自由度がある。

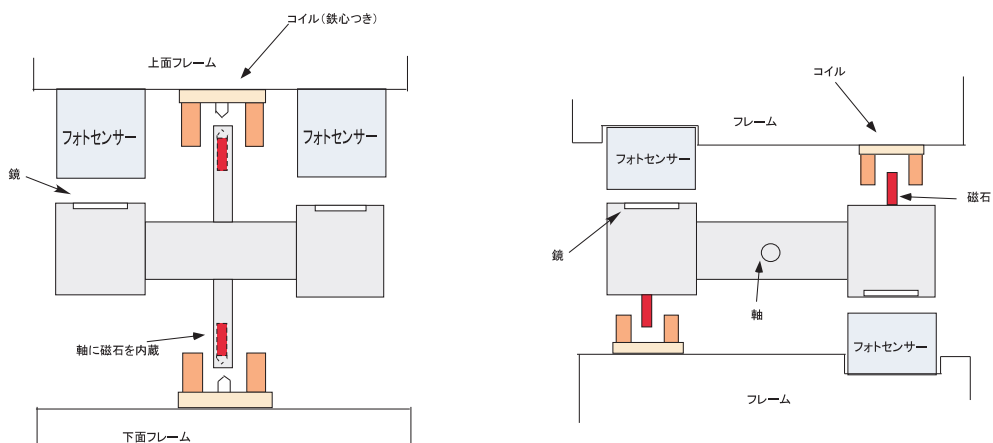


各自由度とセンサーの配置

水平方向の並進には2種類存在するが、以後この図で定義した自由度を水平方向並進と呼ぶ。

この装置では、コイルで、上下方向並進、水平方向回転、の自由度を制御した。

浮上体はアルミ製フレームの中に収まっている。上下方向並進は上面フレームについたセンサー2個と上下のコイルによって制御される。



上下方向の制御（横から見た図）と水平方向（上から見た図）

センサー2つの信号の和が上下方向の並進となっている。この信号で上下を制御している。コイルは両方浮上体を引き寄せる力が働いている。よって浮上体の軸周り（水平方向回転）と軸に沿った動き（上下方向並進）

以外には復元力が働いている。水平方向回転はコイルで制御されるがそれ以外には復元力がなく滑らかなので微小な振動を観測するのに適している。

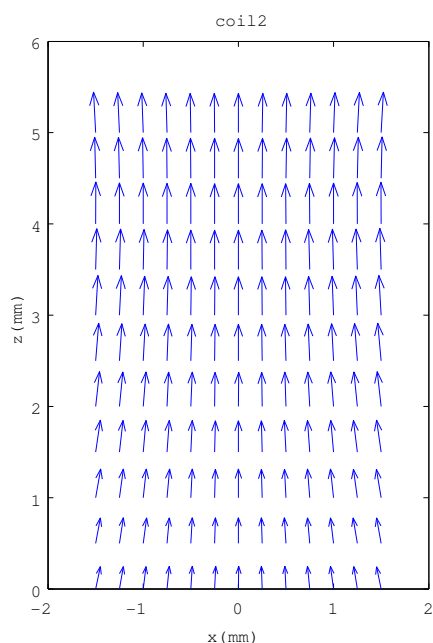
上下方向が制御されている状態で、浮上体は軸周りに自由に回転できる。水平方向の回転を制御するために、フレームの側面に軸に対称にセンサーがついている。

## 2.2 コイル

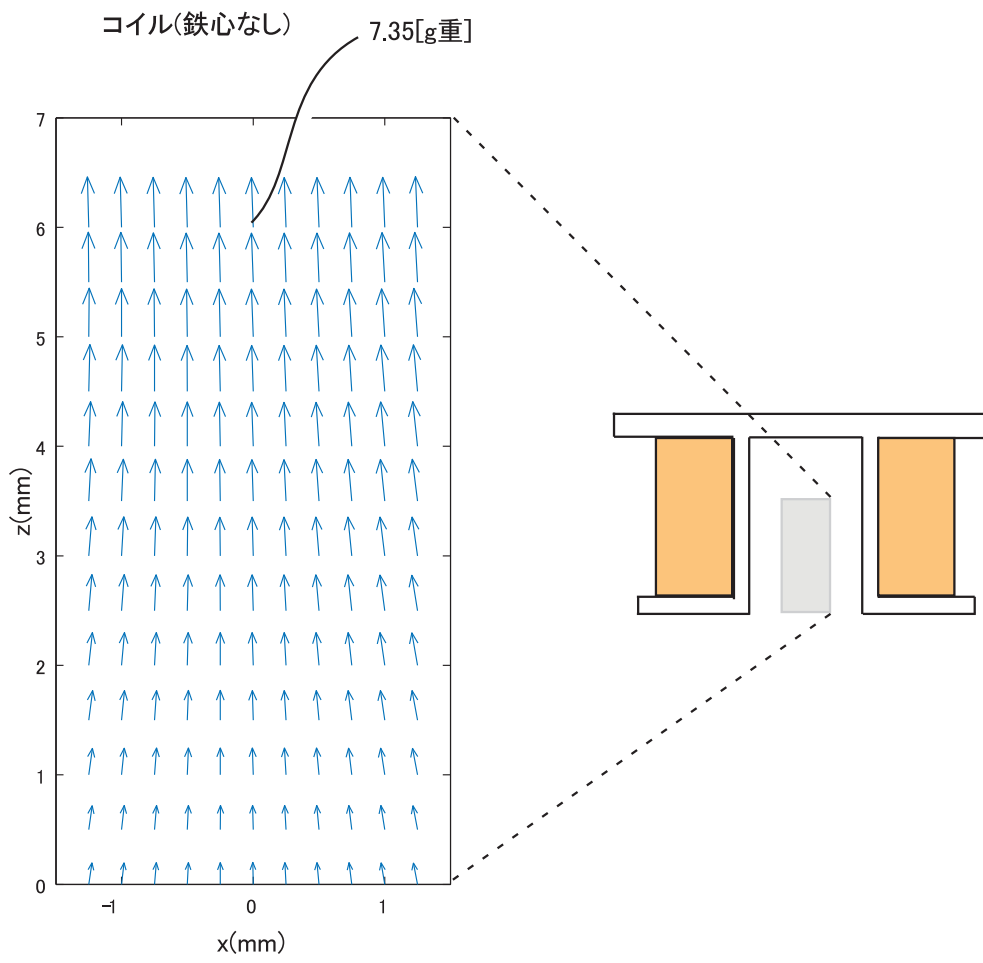
浮上体の垂直軸に埋め込まれた磁石の近くに配置されたコイルには、それぞれ磁石を吸引する力を及ぼすような電流が流されている。

上下のコイルで磁気浮上を行う。

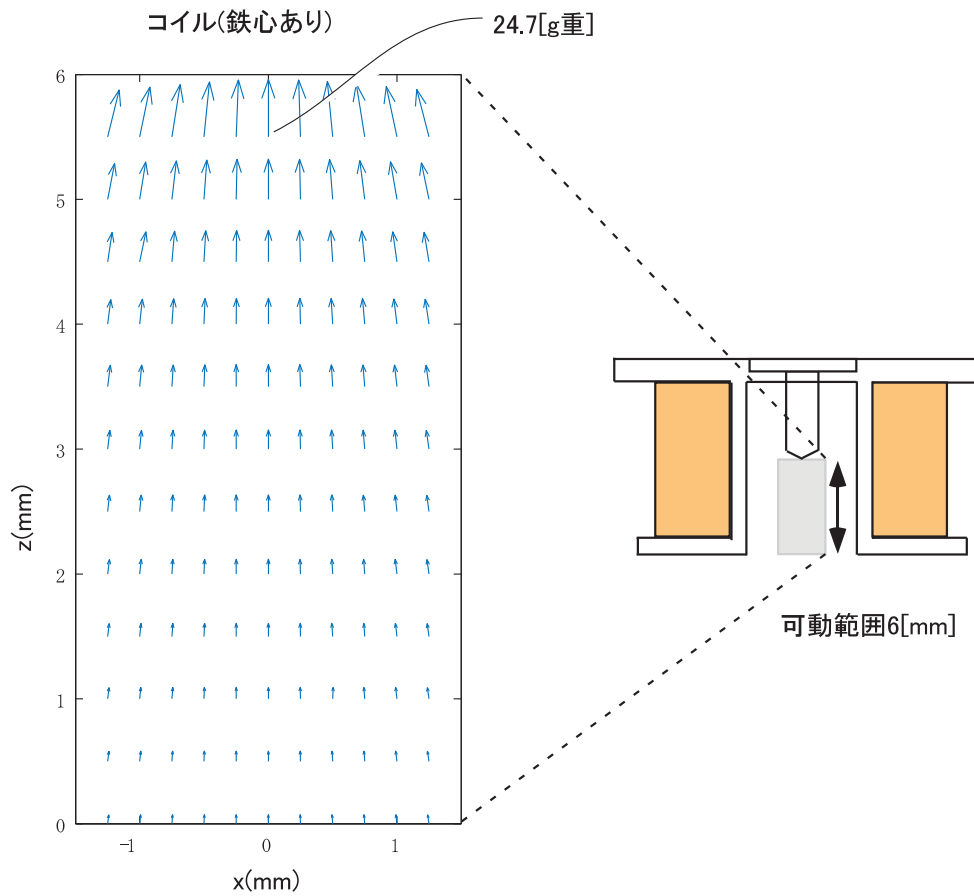
台座に取り付けた永久磁石を重量計に乗せ、コイルを垂直、水平に動かせるマイクロメーターつき微動台に固定して、コイルの磁石に及ぼす力を測定した。力のベクトルは次のようになった。



水平方向の制御に用いたコイル



上下方向の制御に用いたコイル (鉄心を加える前)

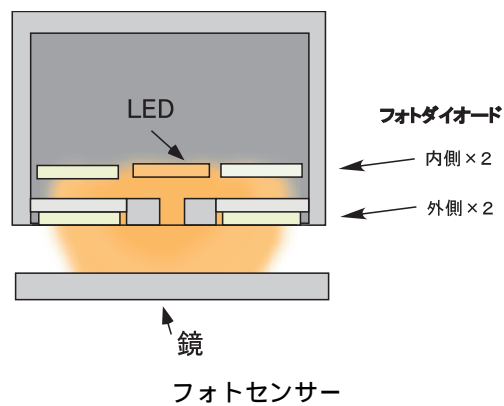


上下方向の制御に用いたコイル（鉄心を加えた後）

鉄心を加えることで力が増し、また中心方向への復元力も増していることがわかる。

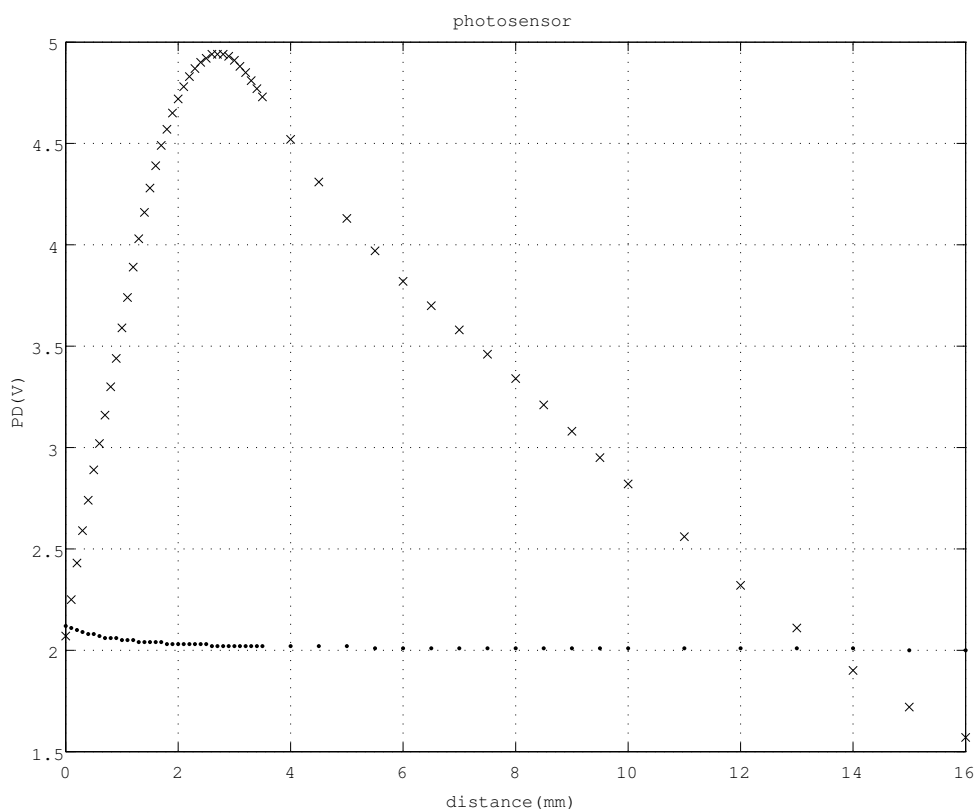
### 2.3 フォトセンサー

センサーには、赤外光によるセンサーを用いた。フォトセンサーは坪野研で設計されたものである。浮上体に鏡をとりつけ、鏡の面と平行となるようにフォトセンサーを設置した。



鏡とフォトセンサーの距離を光量で測定することで、浮上体の動きを読み取った。フォトセンサーは赤外の発光ダイオードとそれをはさむ2つの光センサーからなる。発光ダイオードからの赤外光が鏡にあたって反射し、フォトダイオードに届く。その光量が電圧となって出力される。赤外光は波長 900[nm] 付近のものである。鏡とフォトセンサーの距離が小さいときには、光が鏡に十分広がらず、フォトダイオードにあたる光量は小さい。遠くに鏡があるときは拡散し、光量は小さくなる。

鏡を固定し、センサーをマイクロメータつき微動台にマウントして鏡とセンサーの距離を微調整できるようにした。センサーからの出力をマルチメータで測定し、鏡とセンサーとの距離と出力電圧の関係を調べた。



フォトセンサーの距離と電圧。

上が距離の測定に用いた外側のフォトセンサー、  
下が内側のフォトセンサー。

上側が外側にあるフォトセンサーのもので、下側が内側にあるフォトセンサーである。制御の際は距離と出力電圧の関係が線形であることが望ましい。浮上体の制御には出力電圧が最大値となるまでの、グラフが線形な距離、0mm~2mm で用いている。後にこれらのセンサーをフレームに固定し、上下及び側面にあるフォトセンサーペアからの出力を測定しキャリブレーションを行った。

## 2.4 回路

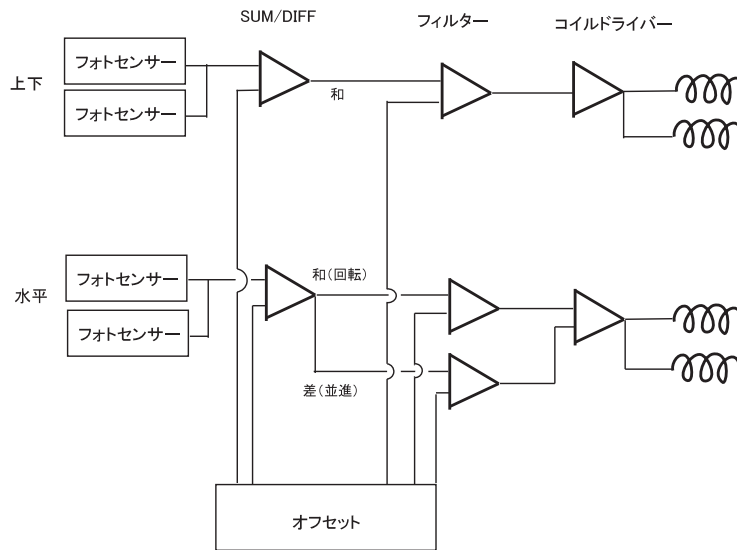
回路では各フォトセンサーからの信号を、フィードバックとしてコイルに流すべき電流に変換する必要がある。また浮上体の変動を自由度ごとに分離して測定する必要がある。このため、



- 各フォトセンサーからの信号を自由度ごとの信号に分離
- フィードバックに使う帯域を取り出して増幅
- 自由度ごとの信号をコイルごとの信号に変換、電流を供給

という回路を組んだ。

順に SUM/DIFF 回路、フィルター回路、コイルドライバー回路とする。SUM/DIFF 回路、フィルター回路には、オフセットが入られるようにした。



回路の全体構造

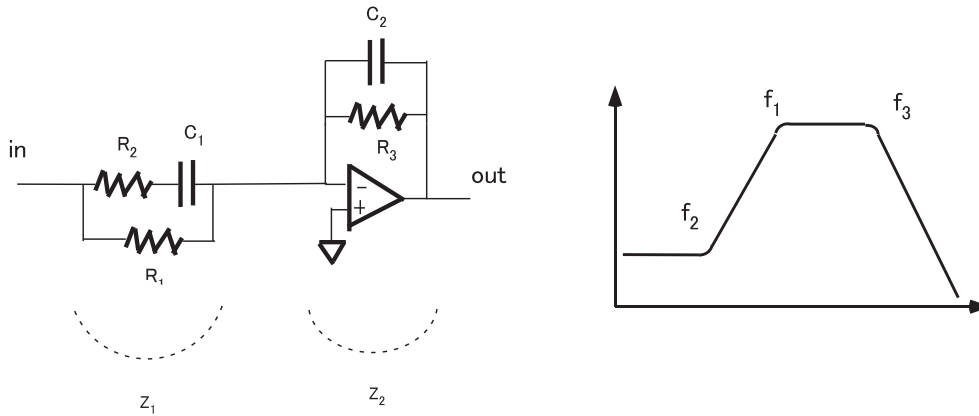
SUM/DIFF 回路ではそれぞれのフォトセンサーからの出力電圧を各自由度にわけている。上下方向並進は上下のフォトセンサーからの出力の和、水平方向回転は側面フォトセンサーからの出力の和、水平方向並進は側面フォトセンサーからの出力の差である。加算アンプと減算アンプをくみあわせて作った。

フィルター回路は、フィードバックに用いる信号のために周波数を取り出し、位相に変化を加えて増幅する。ハイパスフィルター、ローパスフィルター、反転増幅器、

コイルドライバー回路は信号を最終的にコイルに駆動するための電圧として電流を供給するのに使われる。各回路の回路図は補遺に示す。

## 2.5 フィルター回路

フィルター回路は  $300[\text{Hz}]$  以下でフィードバックがかかるように設計された。



フィルター部分と伝達関数の概形

フィルター回路の特性は次のように計算される。

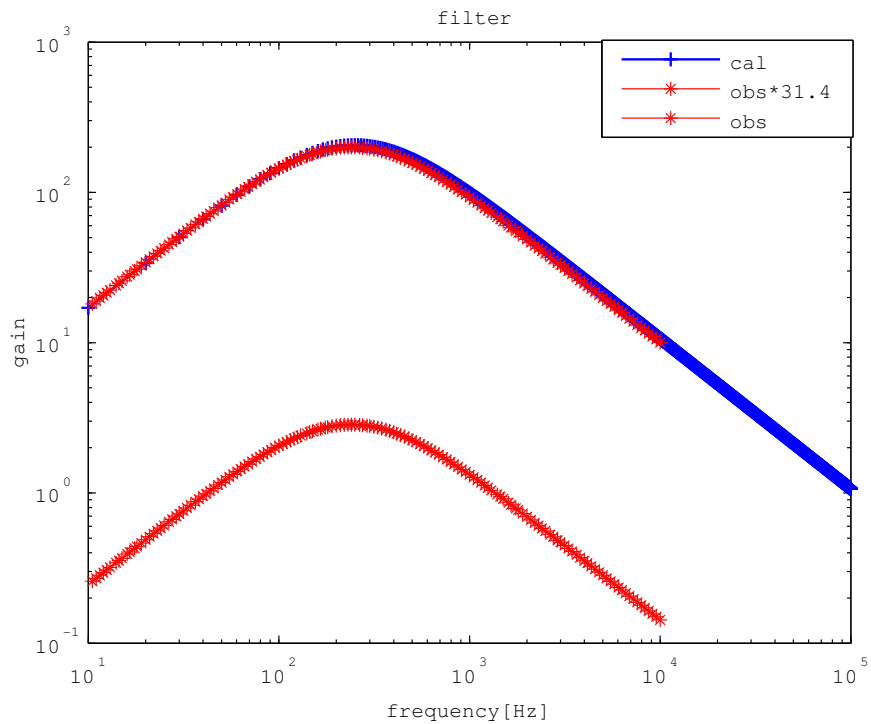
$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_2 + \frac{1}{iC_1\omega}} + \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_1} \frac{1 + i\frac{f}{1/2\pi C_1(R_1+R_2)}}{1 + i\frac{f}{1/2\pi C_1 R_2}} = \frac{1}{R_1} \frac{1 + i\frac{f}{f_1}}{1 + i\frac{f}{f_2}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_3} + iC_2\omega = \frac{1}{R_3} \left(1 + i\frac{f}{1/2\pi C_2 R_3}\right) = \frac{1}{R_3} \left(1 + i\frac{f}{f_3}\right) \quad (2)$$

これより  $f_1, f_2, f_3$  が計算できて概形がわかる。

| $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $C_1$     | $C_2$       | $f_2$ | $f_1$ | $f_3$ | 注              |
|-------|-------|-------|-----------|-------------|-------|-------|-------|----------------|
| 330k  | 1k    | 330k  | $0.82\mu$ | $0.0015\mu$ | 0.587 | 194   | 321   | 最初（理論との比較を行った） |
| 330k  | 1k    | 330k  | $0.82\mu$ | $0.015\mu$  | 0.587 | 194   | 3210  | 改良を加えたもの       |

また  $Z_1 + Z_2$  を計算し  $f$  に代入することで、 $C_2 = 0.015\mu[F]$  のとき  $10^1$  から  $10^5$  までのフィルター回路の伝達関数を計算した。



フィルター回路の理論値との比較

実際のスペクトルアナライザーでの測定による伝達関数とよく一致している。 $10^1[Hz]$  から  $10^4[Hz]$  までの周波数帯をスペクトルアナライザーで測定した。下側にあるものが実測した値、上側のものが  $31.4\Omega$  の抵抗を考えたものである。実測と理論計算が近い値になることが確認された。

後の浮上実験では、位相余裕が大きくなるよう  $C_2 = 0.015\mu[F]$  に変更されている。

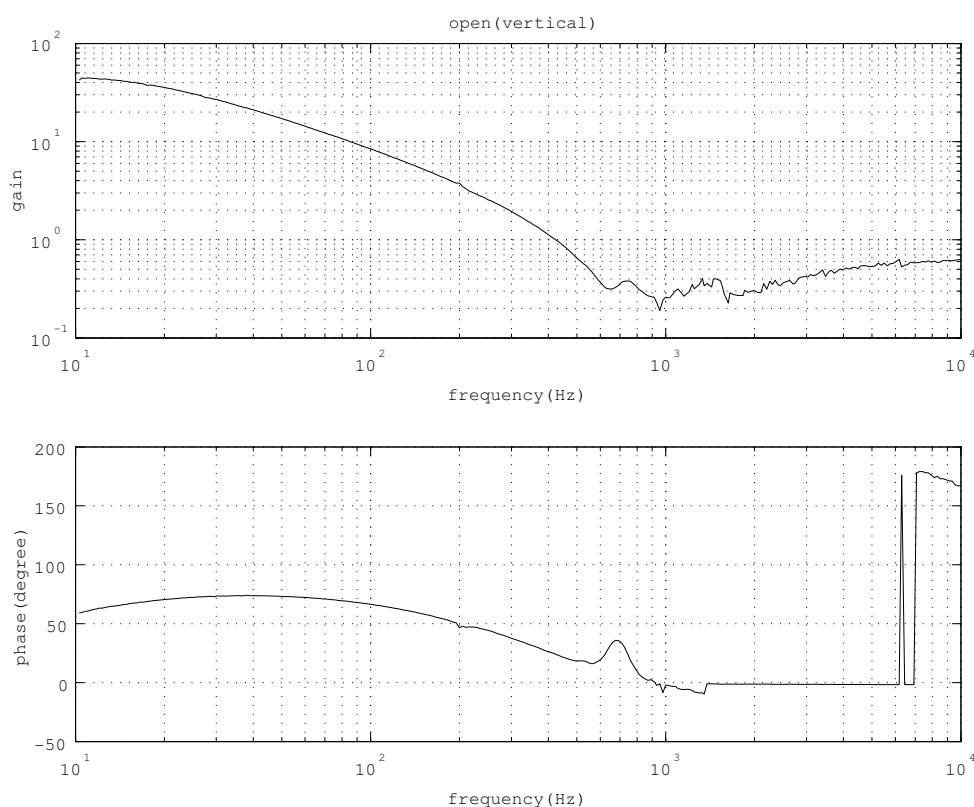
### 3 動作

これまでの回路をつなぎ浮上体を浮上させた。

#### 3.1 オープンループ伝達関数

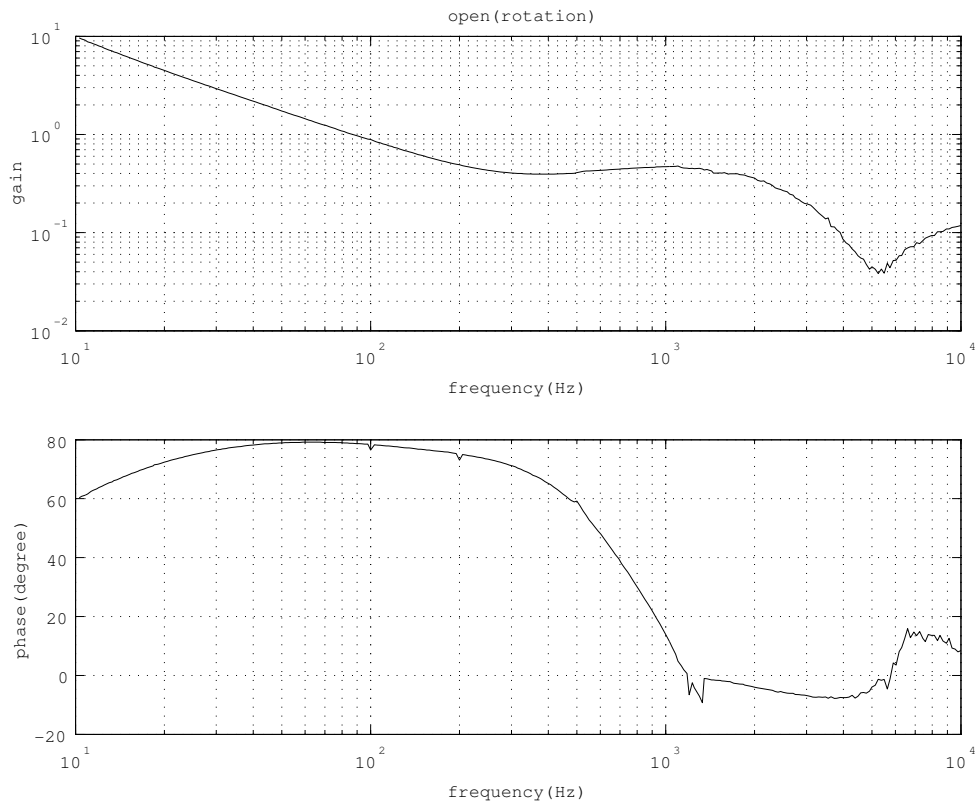
物体の位置がセンサーで読み取られて電圧となる。その生じた電気信号が回路を流れる。そしてコイルと磁石によって力に変換されて浮上体の位置が制御されてフィードバックがかかる。この一連の動きを見るためにオープンループ伝達関数を測定した。

制御系が安定するためにはユニティゲインで十分な位相余裕があることが望まれる。今回のフィルターの設計で十分に位相余裕が取れることがわかる。



上下方向のオープンループ伝達関数

ユニティゲイン 400Hz で位相余裕が 25 度と十分にあることがわかる。



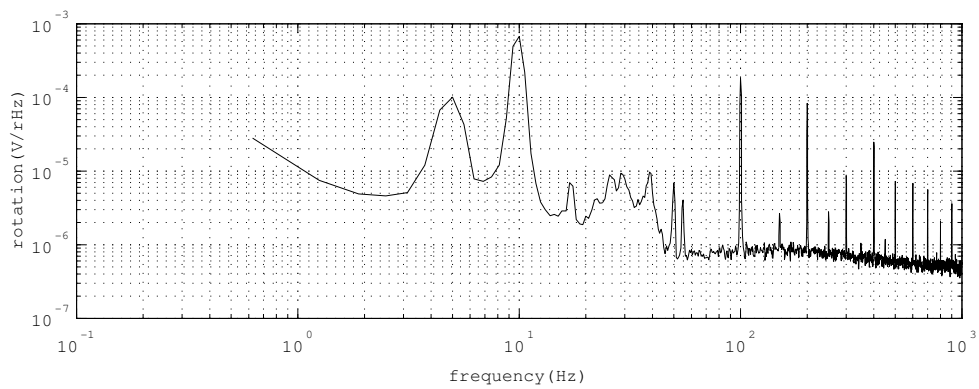
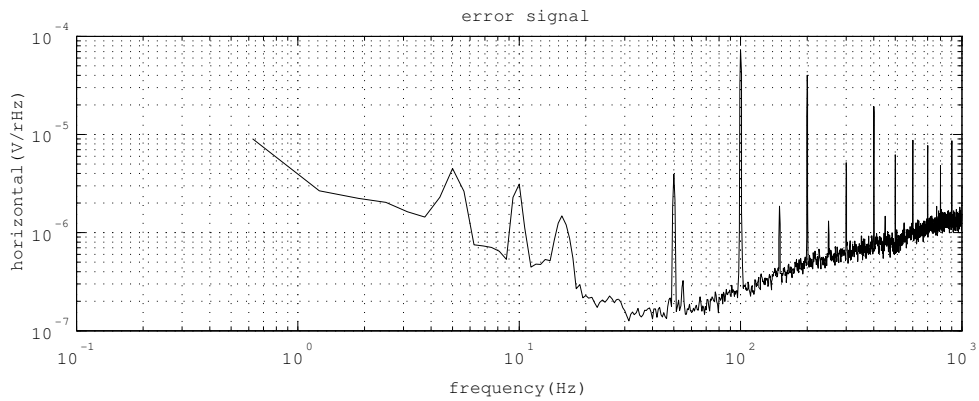
回転方向のオープンループ伝達関数

ユニティゲインを 80Hz にとっても位相余裕が 77 度あることがわかる。

### 3.2 エラー信号

浮上体は最初、下側コイルの縁に垂直軸が接触したまま浮上した。垂直軸の上下に収められた永久磁石を、上下のコイルからの磁力で引っ張ることにより、浮上体は水平回転方向以外への復元力となっている。永久磁石とコイルとの距離が遠いために復元力が弱くなっているとして、浮上体の垂直軸を延長した。結果浮上体は非接触で浮上させることができた。

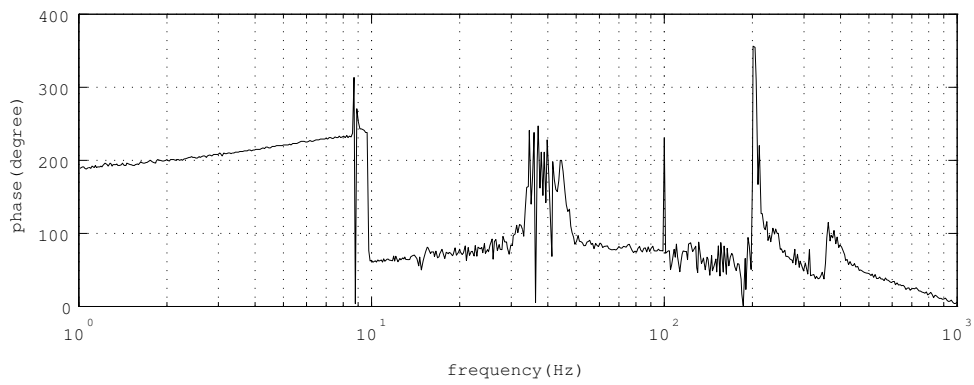
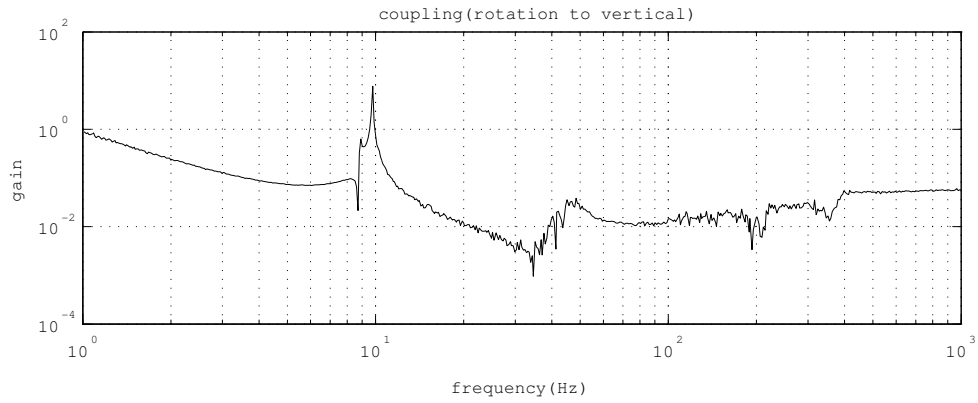
浮上体を安定な位置で静止させた。静止状態で、上下方向並進と水平方向回転のエラー信号のパワースペクトルを測定した。図に示す。この上下方向並進と水平方向回転に共通するピークについて、カップリングによるものかどうかを測定することにした。



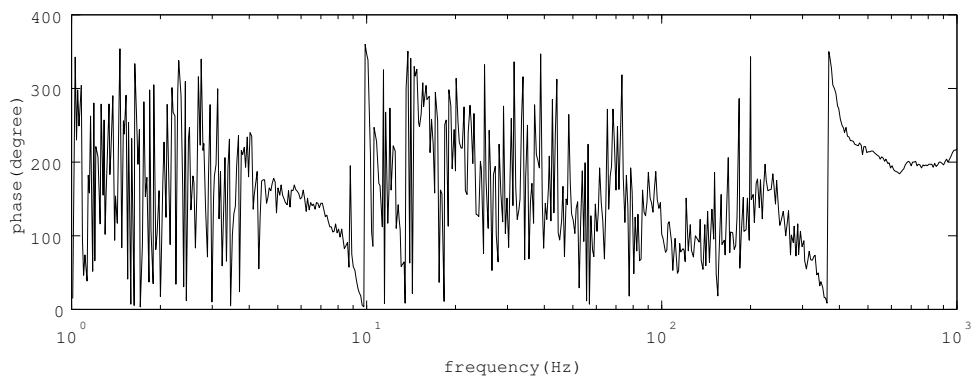
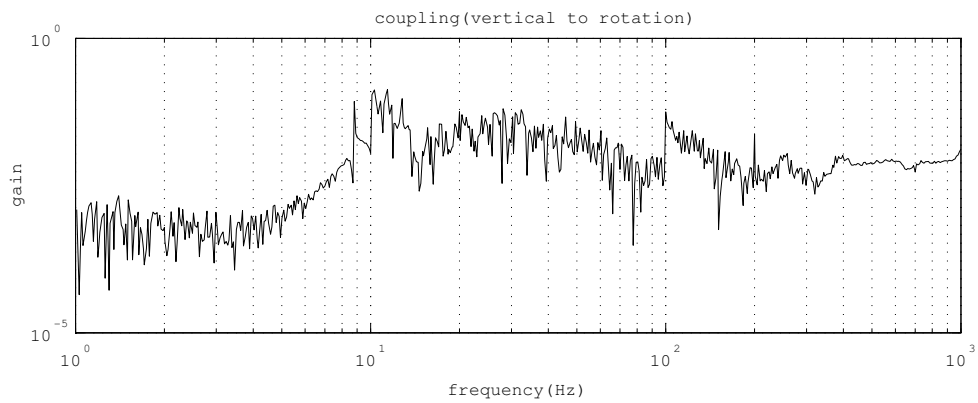
上下方向並進と水平方向回転のエラー信号  
 50Hz の倍数からなる電源由来のピークのほかに、  
 上下方向並進と水平方向回転に共通する大きなピークが 20Hz 以下に見られる。

### 3.3 カップリング

スペクトルアナライザーを用い、回転方向に変動を加えて上下方向に影響がでるか、また上下に変動を加えて回転方向に影響が出るかを調べた。



水平回転方向から上下方向への伝達関数（コヒーレンスはほぼ 1.0）



上下方向から水平回転方向への伝達関数（300[Hz] 以下でのコヒーレンスは 1.0 を維持せず）

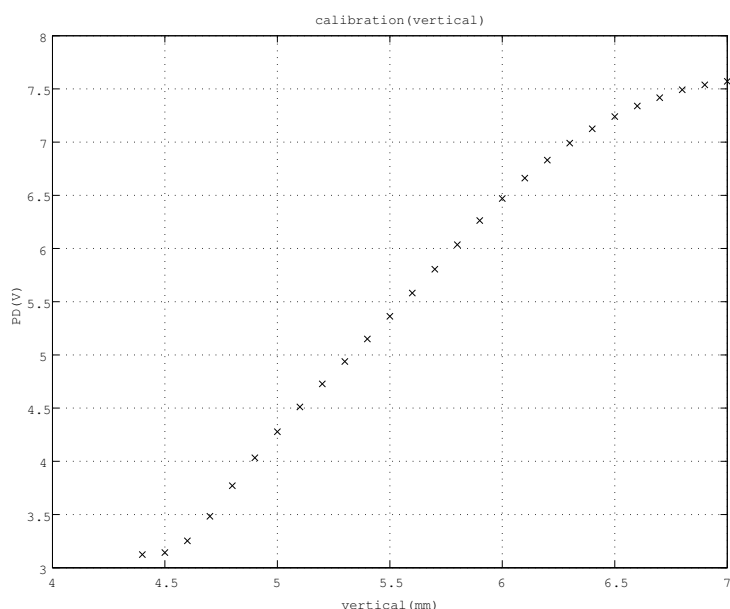
回転方向から上下方向の伝達関数では 9.3Hz から 9.8Hz にかけてゲインが大きくなっているところがある。これは 9.3Hz から 9.8Hz の周波数で回転方向の振動が上下方向にも振動としてあらわれやすいことを示している。

このことからエラー信号のパワースペクトルで見られる 9Hz から 10Hz でのピークは、この振動によるものとも考えられる。

上下方向にシグナルをいれて回転方向での影響を見てみた。300Hz 以下でのコヒーレンスは 1.0 を維持せず、影響についてはよくわからなかった。

### 3.4 キャリブレーション

浮上体が安定に非接触浮上した状態で変位と出力電圧の値のキャリブレーションを行った。



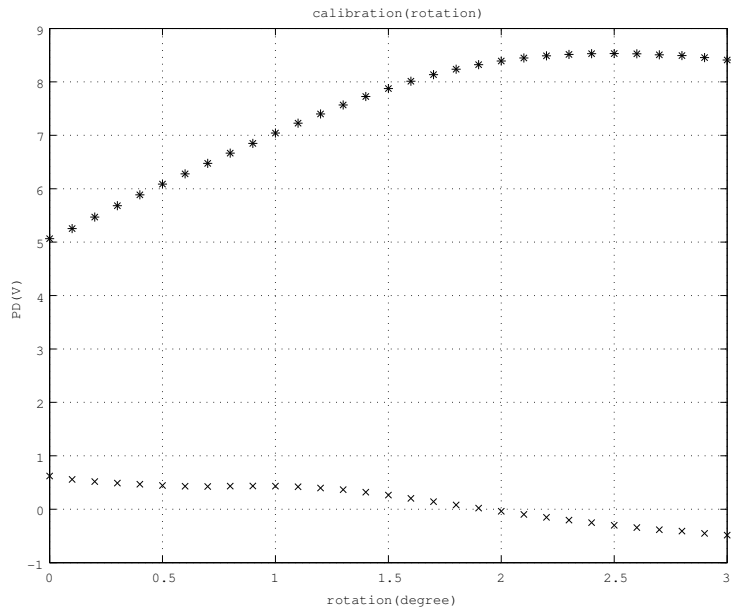
上下方向のキャリブレーション

X 軸はメーターの読みである。フォトセンサーと鏡が接触している点、ゼロ点は 4.5mm 付近であると考えられる。用いる範囲はゼロ点から 0.5mm から 1.0mm である。この範囲で測定値を直線にフィットすると、距離の変位  $\Delta d$ mm と出力電圧の変動  $\Delta V$  は

$$\Delta V = 2.15 \pm 0.05 \times \Delta d \quad (3)$$

である。



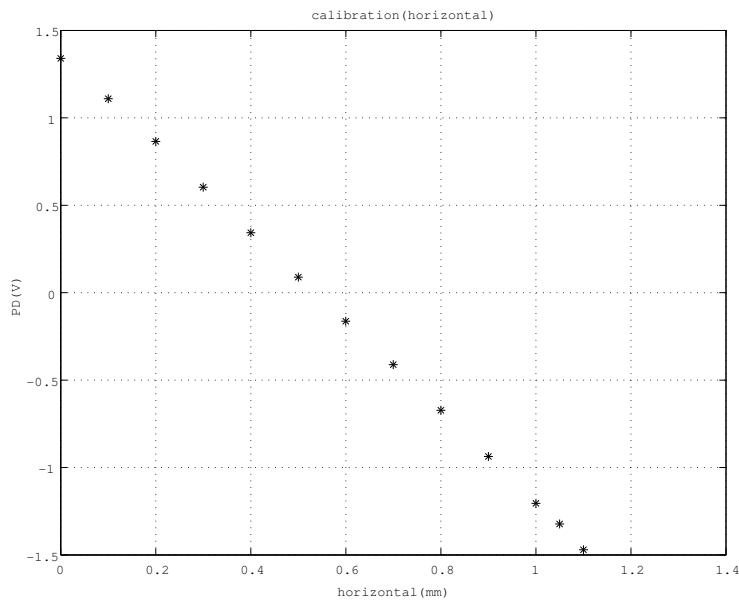


水平回転のキャリブレーション (グラフ内上)

0.7 度から 1.1 度において

$$\Delta V = 1.8 \pm 0.1 \times \Delta \theta \quad (4)$$

である。



水平並進のキャリブレーション

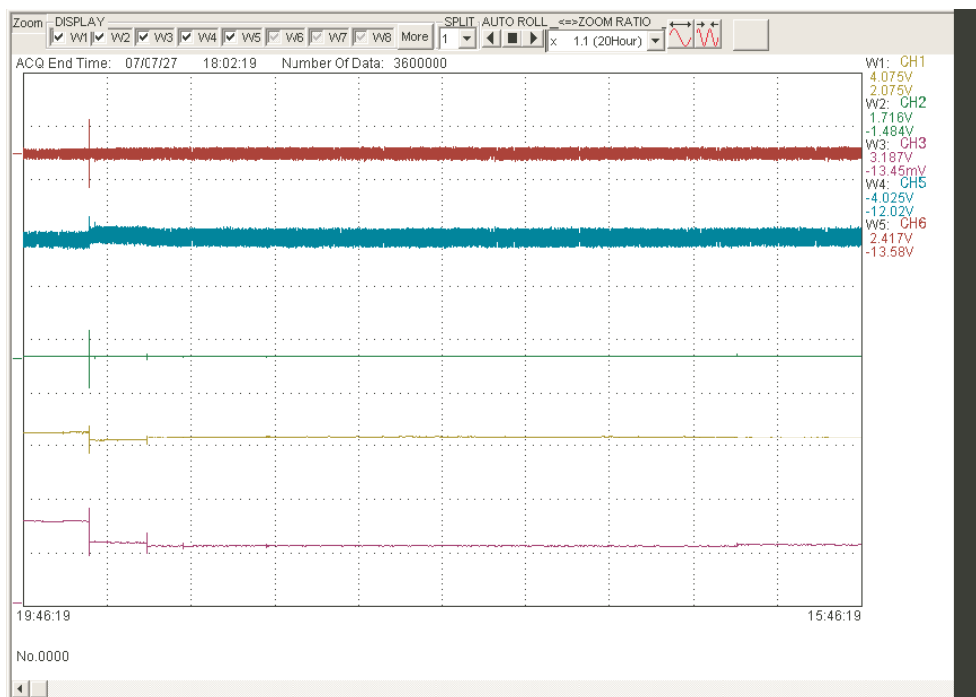
用いる範囲は 0.3mm から 0.7mm である。この範囲で測定値を直線にフィットすると、距離の変位  $\Delta d$ mm と出力電圧の変動  $\Delta V$ V は

$$\Delta V = 2.56 \pm 0.06 \times \Delta d \quad (5)$$

である。

## 4 地面振動の測定

浮上体の制御信号は機器を設置した環境の振動を検出していると考えられる。オシロスコープ時間で7月26日19時30分16秒から、7月27日14時02分19秒まで測定を行った。垂直(Z)方向並進、水平方向回転、水平方向並進、について、出力電圧(エラー信号)を測定した。また同時に上下方向並進、水平方向回転のコイルドライバーの出力(フィードバック信号)を測定した。



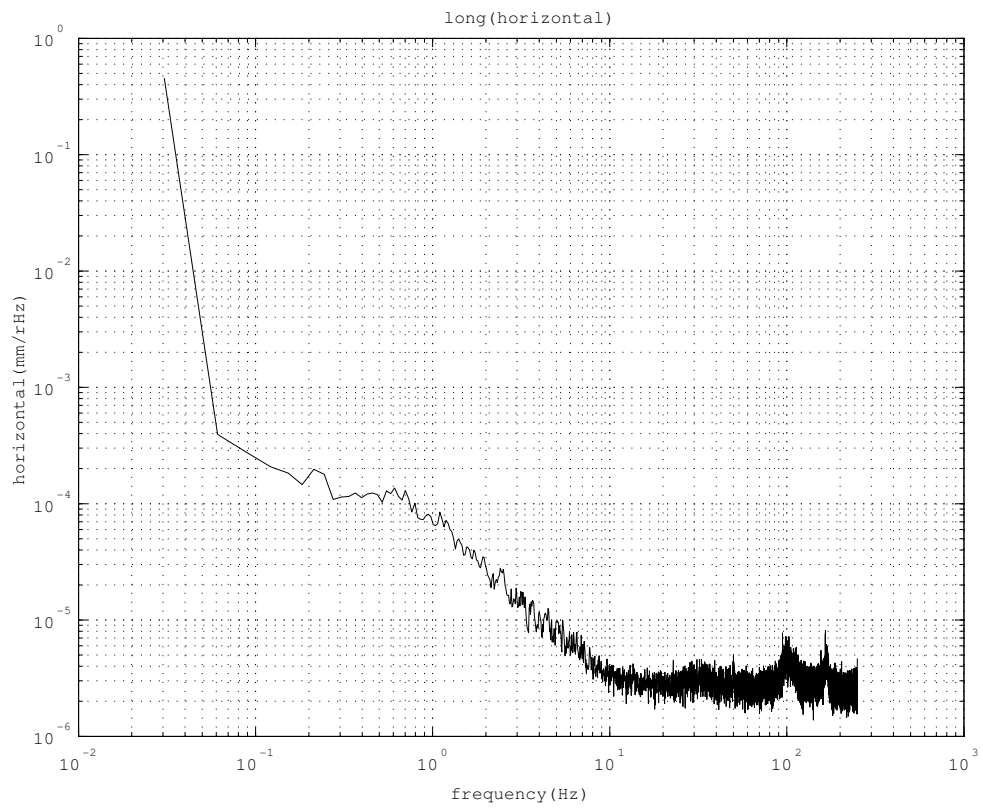
上から、  
フィードバック信号水平方向回転  
フィードバック信号上下方向並進、  
エラー信号水平方向回転、  
エラー信号上下方向並進、  
エラー信号水平方向並進。

### 4.1 周波数特性

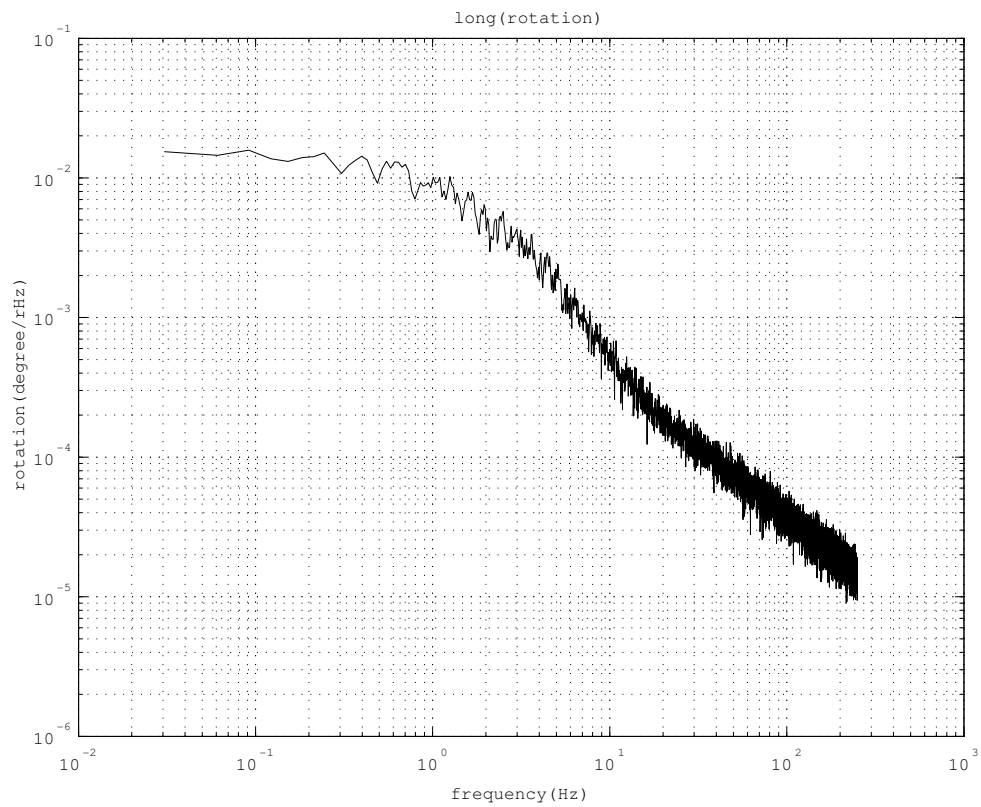
10Hz 以下の周波数特性を調べた。オシロスコープでのサンプリング周波数は 50Hz である。

得られたデータに適切なフーリエ変換を行って電圧の変動と周波数の特性を得る。この電圧の変動にキャリブレーションの値をかけて変位を計算した。

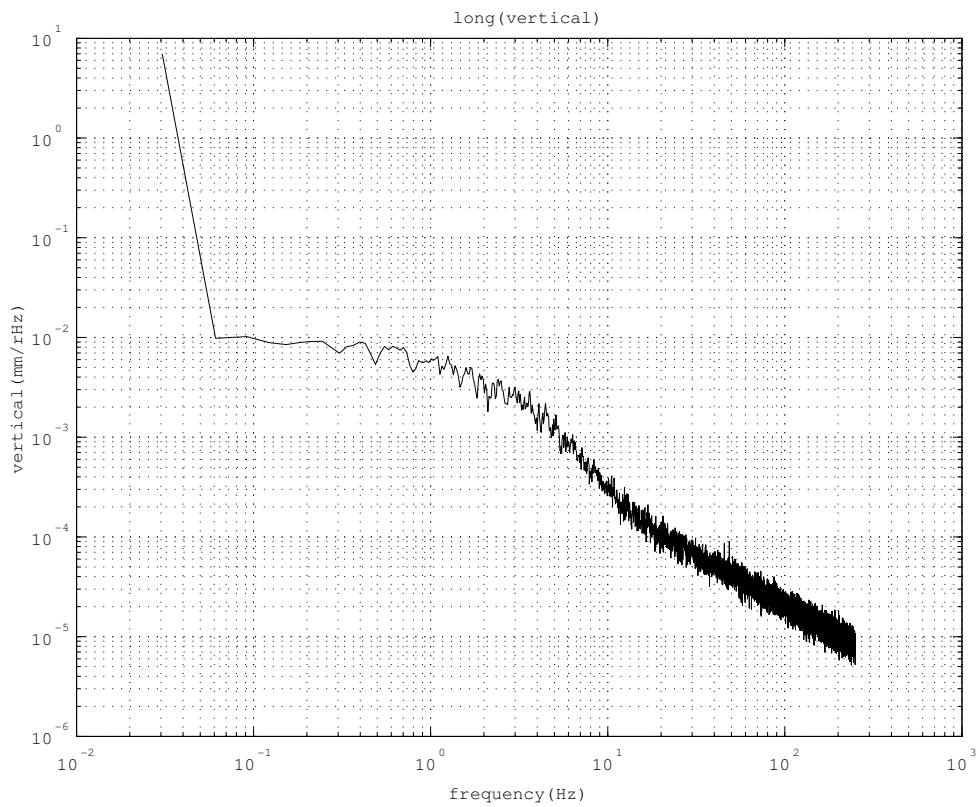
変位と周波数の関係は次のようである。



垂直方向の変位

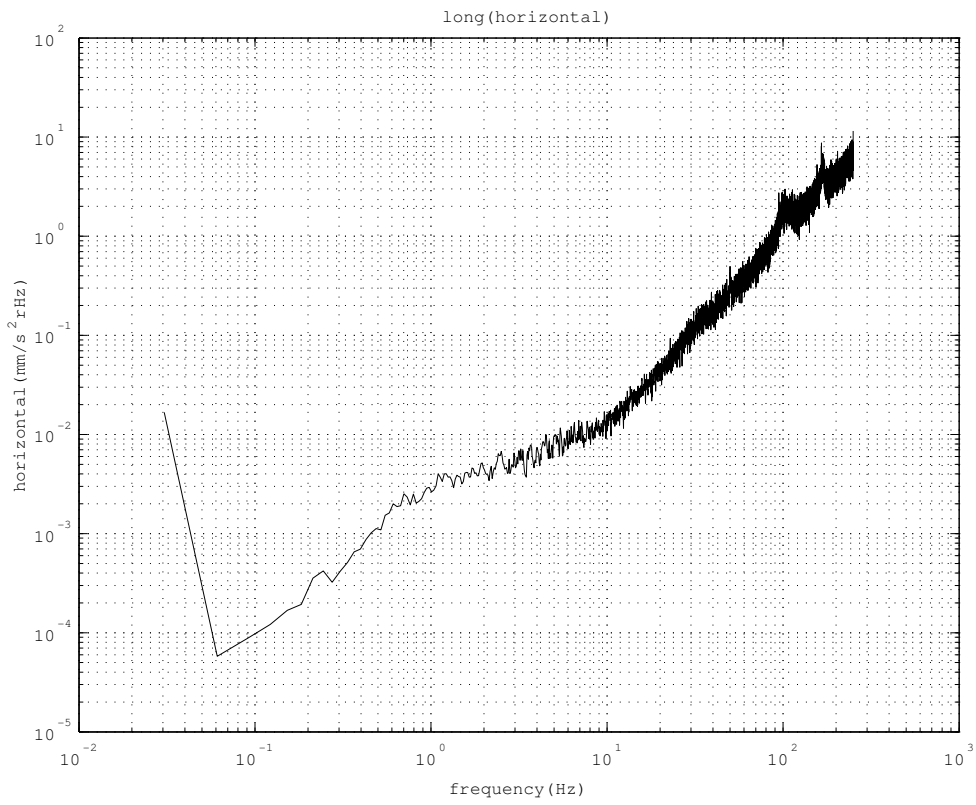


水平回転方向の変位

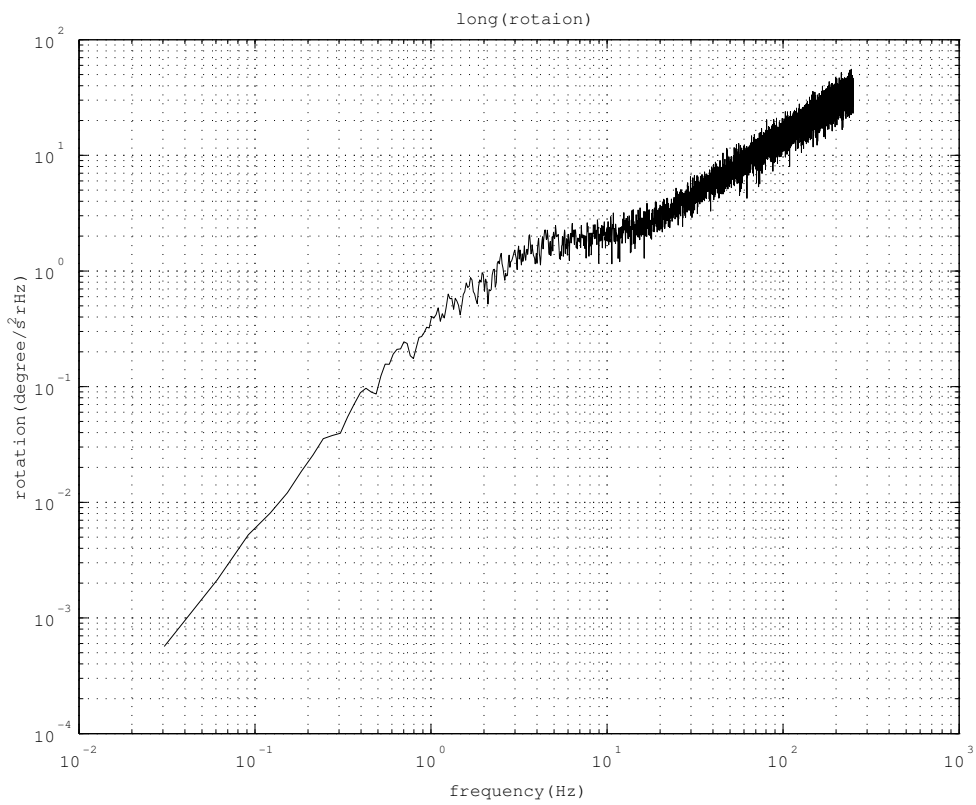


#### 水平並進方向の変位

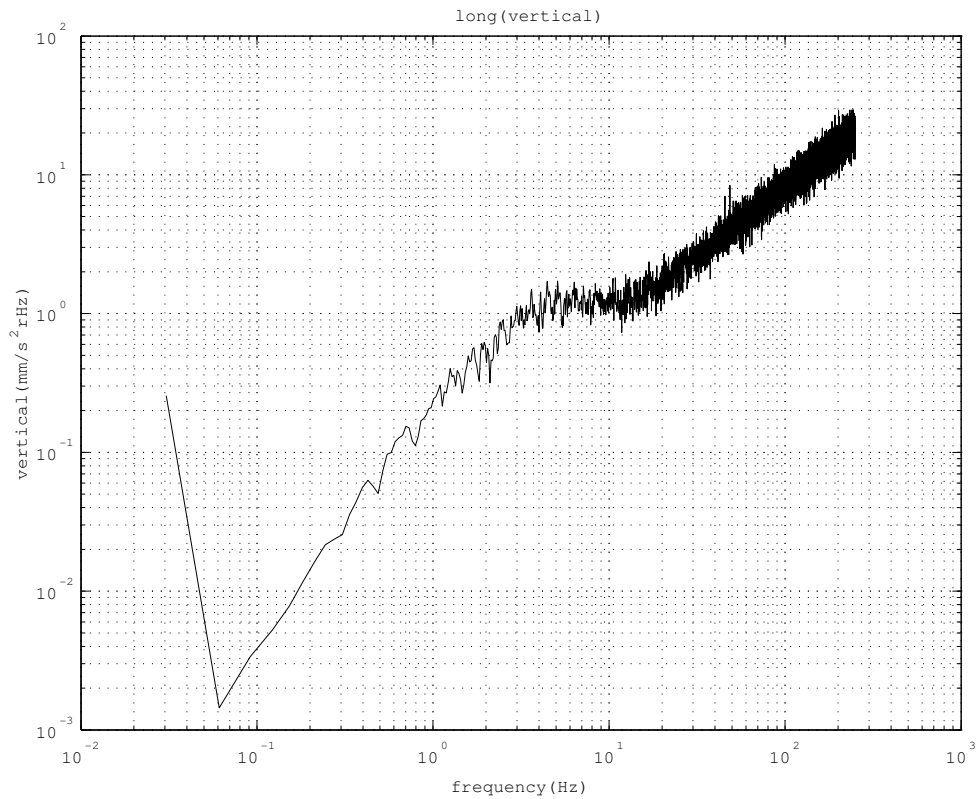
この変位はフォトセンサーの感度、1Hz で  $10^{-6}$ mm/sprt(Hz) より 2 桁ほど大きい。  
 また加速度の 10Hz 以下での周波数特性は次のようになった。



垂直方向の加速度



### 水平回転方向の加速度



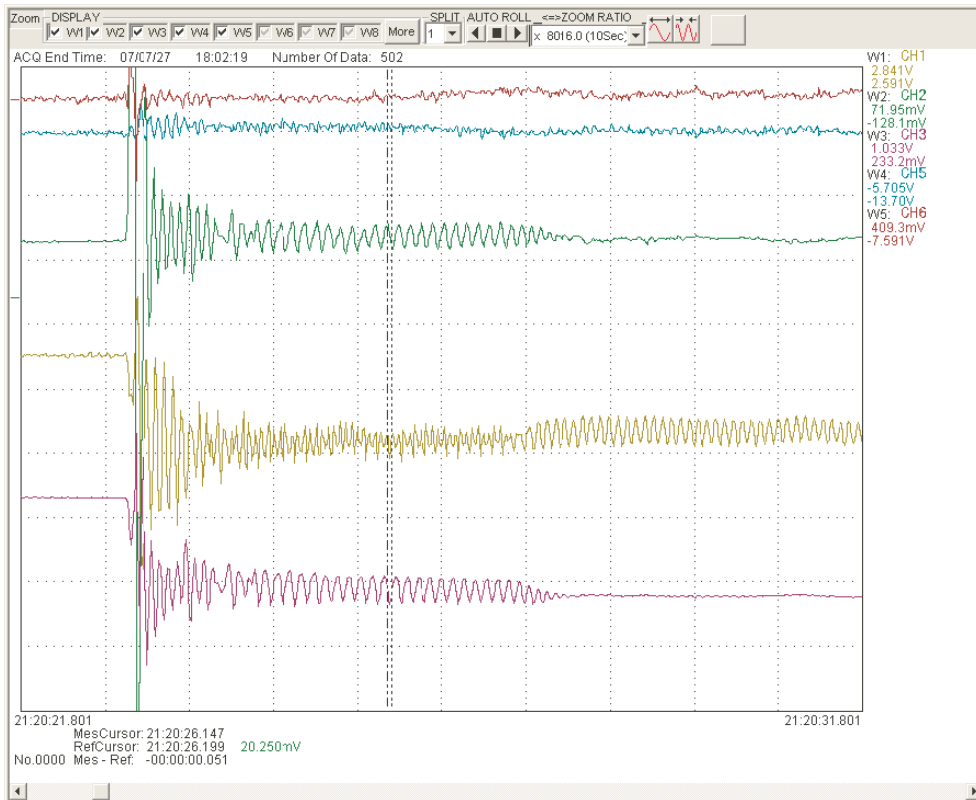
### 水平並進方向の加速度

## 4.2 カップリング

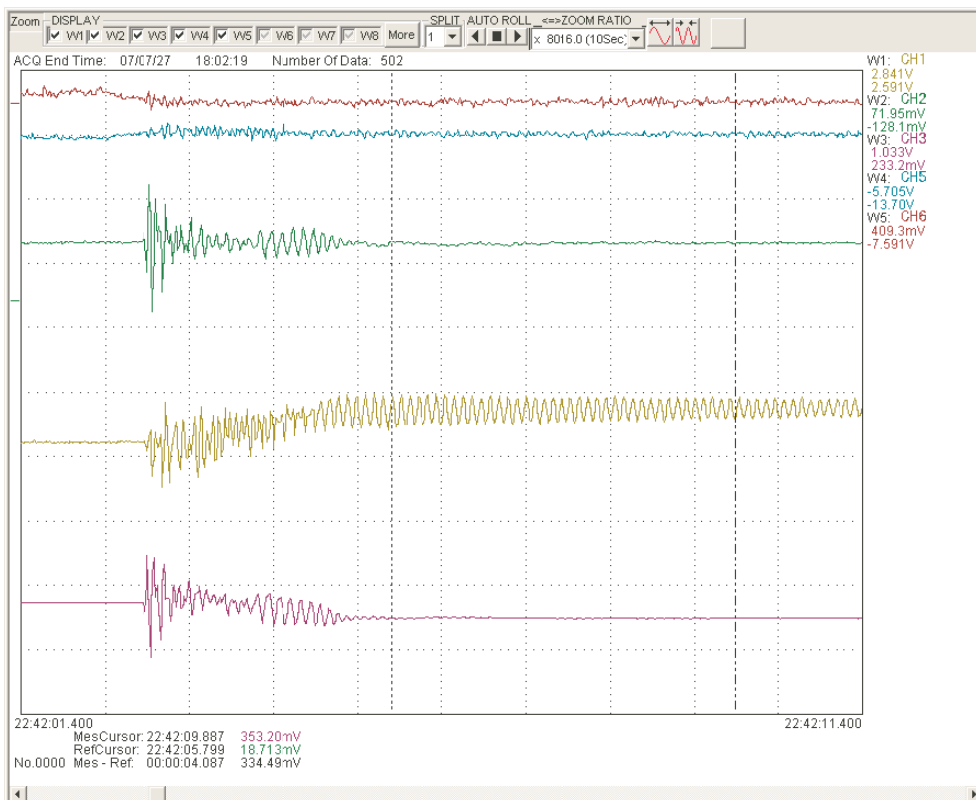
長時間データから5回程度、つりあいの位置が変わったと見られる振動イベントがあった。主な振動イベントは次のとおり。

- 26日 21時 20分
- 26日 22時 42分
- 26日 23時 35分
- 27日 12時 49分

その振動イベントが起こってから振動が収束するまでの波形を調べてみると、自由度間のカップリングが見られた。



7月26日 21時20分





7月26日 22時42分

ともに最初に大きな力が働き、水平方向回転、水平方向並進が大きく反応している。振動後、水平方向回転、水平方向並進に周波数  $8.8 \pm 0.2\text{Hz}$  の正弦波状振動が発生、さらにその振動が急速に減衰するにしたがって上下方向並進に周波数  $9.4 \pm 0.1\text{Hz}$  の正弦波状振動が発生している。この上下方向並進の振動は、周波数の変化のないままゆっくりと減衰している。

このことから、上下方向から水平方向への伝達関数の測定でも見られたように、水平方向の振動が上下方向への振動となっていることがわかる。また上下方向から水平方向への正弦波状振動のカップリングはみられない。これは上下方向から回転方向への振動が入りにくいというエラー信号での結果とたいおうしている。

上下方向の制御では、両方のコイルから引く力が働いており、不安定な固定点となることから減衰が遅いと考えられる。また水平方向回転の振動は水平方向並進の振動と同じようにあらわれていて、水平方向並進には復元力があるために比較的短い間に減衰したと考えられる。

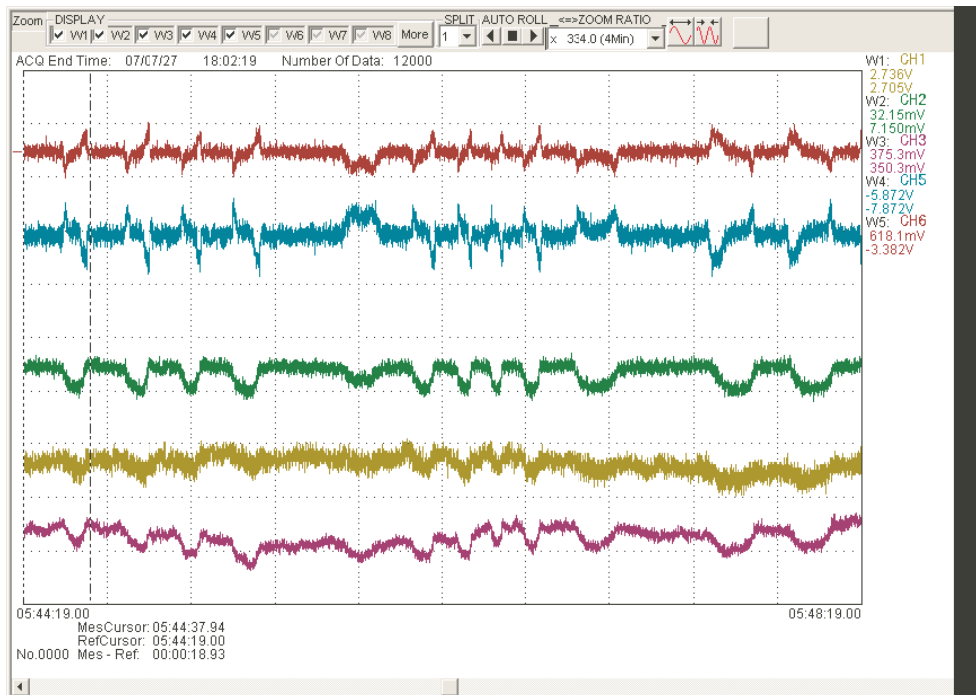
## 5 まとめ・今後の展望

今回の実験装置は気球実験に使われることになり、8月からは気球実験用の本体に組み込まれた。実験終了後、浮上に用いた上下のコイルの鉄心がコイルにうまく固定されておらず、動いていたかもしれないという指摘があった。動いていたかどうかは確認はできなかったが、動いていた場合正しい測定ができていなかったことも考えられる。

この装置を実際の重力波検出に用いるためには、ノイズの低減が必要である。そのためには浮上体の動きと電圧の関係の較正を精度よく行う必要がある。今回はアナログ制御であり、変位と電圧を直線でフィットした。有効数字は3桁程度であり今回の測定においては十分以上の精度である。もっと厳密な静止状態をつくりだせるなら、デジタル制御により関数でフィットすればより精度はあがると思われる。

今回、浮上の「静止状態」にも、何かの変動が見られた。フィードバック信号では水平方向回転、上下方向並進に同じ波形がみえる。

またエラー信号でも水平方向回転、上下方向並進、水平方向並進に同じ波形がみえる。変動のオーダーは  $10^{-3}\text{mm}$  である。



「静止状態」の拡大(幅

上から、フィードバック信号水平方向回転、フィードバック信号上下方向並進  
エラー信号水平方向回転、エラー信号上下方向並進、エラー信号水平方向並進。

浮上体に取り付けた永久磁石の磁力が実験中の数ヶ月の間に落ちるということを経験した。長期にわたるの測定の難しさを感じた。

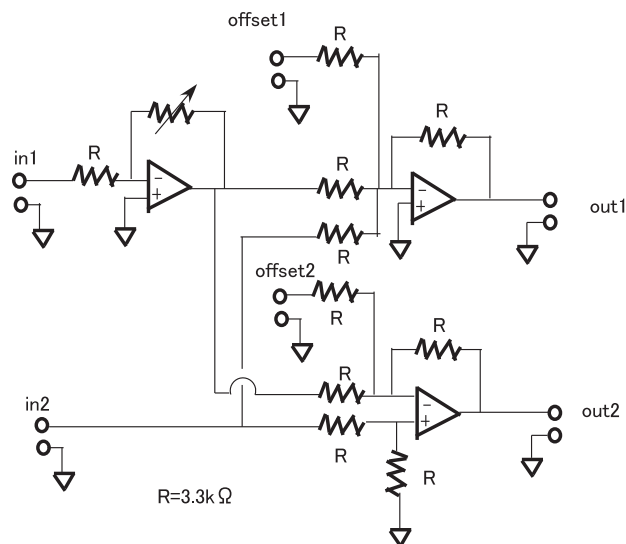
## 6 感想

研究室振り分けの後、実験室にお邪魔した。背丈をこえる真空槽が銀色に光って並ぶ林のようであった。

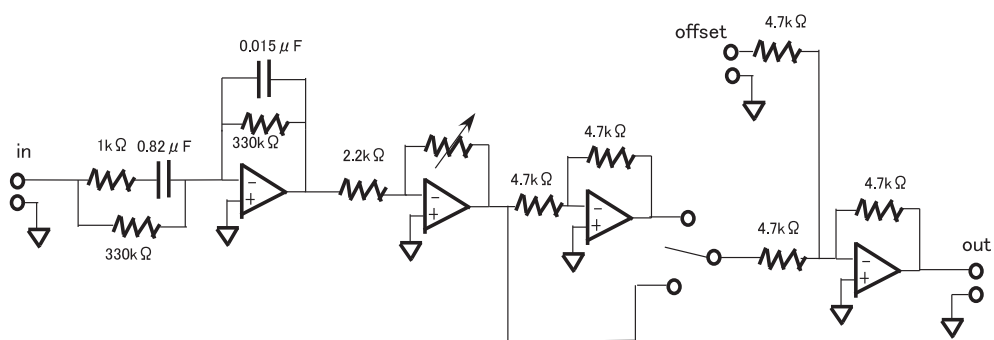
この2007年の夏にこの装置を用いた気球実験が行われるとのことで、坪野研究室は動いていた。進行形の研究に関わりたいという考えからこの実験に参加させていただいた。

回路作りでは自分の配線の間違いをICのせいにしてICを無駄遣いしてしまったり。スケジュールの律速段階となったり。いろいろ迷惑をかけたなかで、助教の安東正樹さんには大変お世話になりました。院生の方々も折を見て声をかけてくださいました。実験パートナーにも恵まれ、とてもよい環境の中で実験をできたと思います。研究室の方々の好意に感謝いたします。

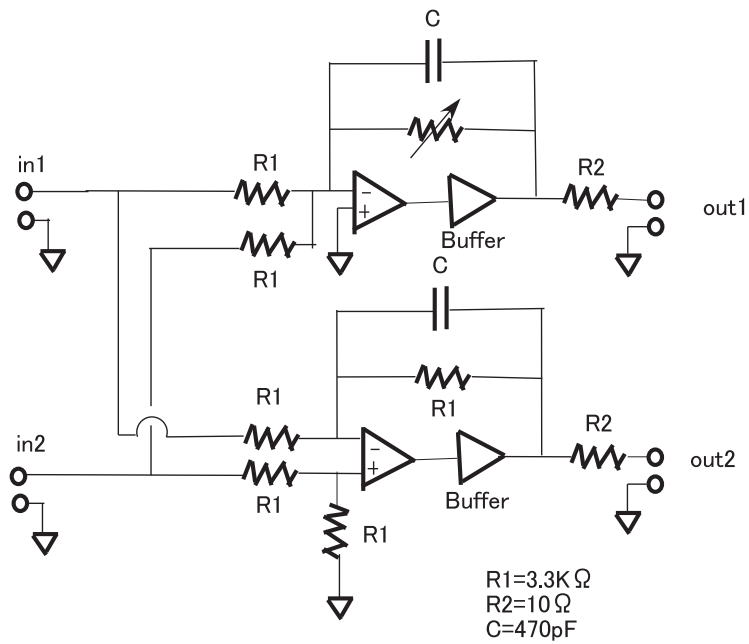
## 7 補遺：回路図



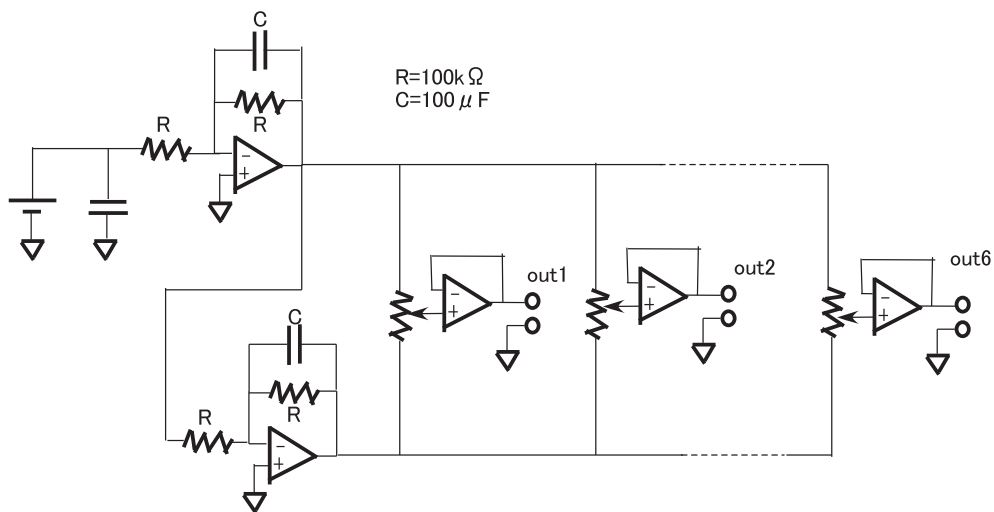
SUM/DIFF 回路



フィルター回路



コイルドライバー回路



オフセット回路

## 参考文献

- [1] 安東正樹 宇宙極小重力波検出器 ミッション概要書(案)(2006)
- [2] 小林洗、池本尚史 坪野研究室4年生特別実験レポート「磁気浮上の基礎実験」(2005)
- [3] 穀山渉、久徳浩太郎 坪野研究室4年生特別実験レポート「低周波重力波検出器開発のための磁気浮上の基礎実験」(2006)