

特別実験レポート
重力波検出のための磁気浮上の基礎実験

宮本幸一

学籍番号 6 1 5 5 8

共同実験者 佐伯輝俊

2 0 0 8 年 2 月 1 2 日

目次

1	実験の目的と概要	3
2	実験装置の製作	3
2.1	浮上体	3
2.2	中央部分	4
2.3	検出部分	4
2.4	全体の配置と動作原理	4
2.5	回路	7
3	実験装置の動作	8
3.1	センサーのキャリブレーション	8
3.2	浮上の様子	9
3.3	浮上体の変位の時系列の測定	10
3.3.1	Z軸方向の変位	10
3.3.2	Z軸周りの回転	11
3.4	振動のスペクトル	12
3.4.1	Z軸方向の変位	12
3.4.2	Z軸周りの回転	13
3.5	オープンループ伝達関数	14
3.5.1	Z軸方向の変位	14
3.5.2	Z軸周りの回転	16
4	今後改善すべき点	17
4.1	浮上体の傾きの影響の低減	17
4.2	検出部分の固定方法の改良	18
4.3	その他の改善すべき点	18
5	まとめと感想	18
6	補遺	20
6.1	回路図	20
7	参考文献	22

1 実験の目的と概要

一般相対性理論によって存在が予言される重力波は、2008年1月現在、いまだ直接には観測されておらず、検出に向けて世界各地で様々な実験がおこなわれている。重力波の振幅は非常に微小であるため、それを検出するには、検出器に防振のための仕組みを導入する必要がある。防振の方法の一つとして、物体を磁力によって浮上させることで、その物体に地面から伝わる振動を除去するということが挙げられる。

そこで、本実験では、物体を磁力によって浮上させることのできる装置を作り、さらにその物体の変位を電気信号として観測し、どの程度安定に空中に静止させられるか評価することを目的とした。ただし、ただ磁石を配置しただけでは安定な浮上を実現することは不可能なので、物体の変位に応じてコイルに電流を流して磁力を調節するというフィードバック制御を行った。今回は、垂直方向（Z方向）の変位と、Z軸周りの回転に対して制御した。

しかし、物体を浮上させることはできたものの、目に見える振動が残る状態にまでしか到達することはできず、振動の検出器となり得るほどの安定な浮上は実現できなかった。

2 実験装置の製作

2.1 浮上体

浮上体の概形は図1に示す。浮上体を上下から引っ張るための永久磁石が取り付けられた中央部分（以下、浮上体中心と呼ぶ）と、変位の検出のためのミラーおよび回転方向の制御のための永久磁石が取り付けられた左右の端の部分（以下、ミラー部と呼ぶ）及び、それらを連結する腕の部分からなる。今回、浮上体は過去の学生実験とは違って、腕の長い設計となった。改良点としては、次の3点を挙げることができる。

1. 軽量化

素材としてアルミニウムを用いたこと、腕の部分をパイプ状にしたこと、不必要な部分をできるだけ削り落したことにより、浮上体の質量を25.3gにまで軽量化した。

2. 腕を長くしたこと

そして、腕の部分にアルミパイプを用いたことにより、腕の長さを260mmにすることが可能になった。浮上体中心の長さが62mmであるため、全体の大きさに対して腕が長い形になっている。腕が長いと、Z軸周りの回転に伴うミラー部の変位は大きくなるため、回転による電気信号の変化は大きくなる。つまり、微小な回転を検知することが容易になる。

しかし、このことは、逆に、安定な浮上を実現されなかった一因と考えられる。これについては後に詳しく述べる。

3. ミラー部の可動化

ミラー部は、ちょうど腕にはまる程度の穴が開いており、差し込んで、ねじを締めて固定することで浮上体に取り付けられる。つまり、ミラー部の位置は自由に変わることができる。そのため、実験に応じて実質的な腕の長さを変えることが可能になっている。さらに、ミラー部をより改良された物に取り換えたい場合なども、容易に交換ができる。

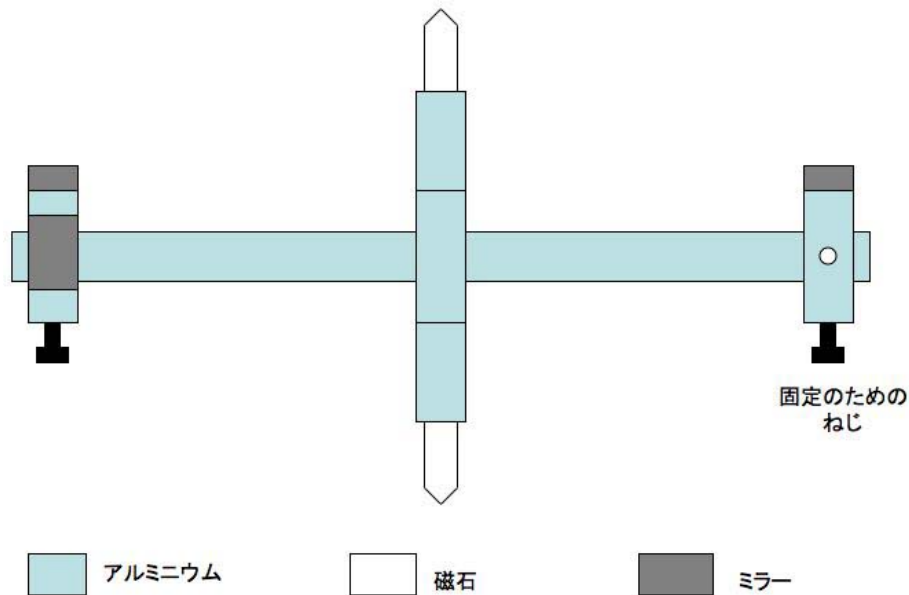


図 1: 浮上体の概略図

2.2 中央部分

装置の中央部分の概形は図 2 に示す。上下の板に、浮上体を上下から引っ張るための磁石と、Z 軸方向の制御のためのコイルが取り付けられている。浮上体は、平衡点では上下の永久磁石の先をこのコイルの穴の中に少し入れるような格好になる。

コイルの上部には、M4 (内径 5mm) のワッシャーを貼り付けた。これは次のような理由による。装置が出来上がり、実際に電源を投入して浮上を試みたところ、コイルの内側面にぶつかるほどに激しく振動し、ついには上下どちらかの磁石にくっついてしまうという有様だった。フィルター回路のゲイン等を調節してこれを抑えようとしたが、それにあたって、浮上体の動ける範囲をいくらか制限した上で調整を行ったほうがやりやすいだろうと考え、ワッシャーを貼り付けてその中に浮上体を通すことにしたのである。しかし、この策は装置の動作に多大な影響を及ぼすことになった。それに関しては後述する。

2.3 検出部分

装置の左右の端には、Z 軸方向の変位と回転を検知するためのフォトダイオード、LED が一体となった装置 (以下、単にセンサーと呼ぶ) が二つと、回転方向の制御のためのコイルが取り付けられた部分が位置する。その概形を図 3 に示す。

この検出部分は、設計ミスのため、横の二枚の板と上の板との間に M2 のワッシャーを 6 枚 (厚さにして 2mm) 挟むことになってしまった。そのようにして上の板の位置を調節しないと、上と横の二つのセンサーがぶつかってしまうからである。

2.4 全体の配置と動作原理

装置の全体的な配置は図 4 のようになった。浮上体は、4 つの磁石が、それぞれ対応するコイルの穴に数 mm 入った状態で、どこにも接触せずに静止することになる。装置は、当初は光学定盤上に固定する予定であったが、最終的にはそうしなかった。プラスチックのシートに中央部分と検出部分を貼り付け、そのシートをさらに方眼

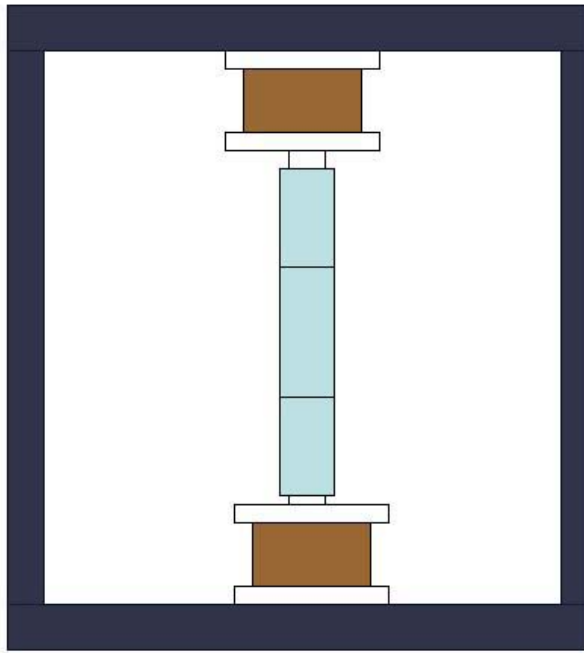


図 2: 中央部分の概略図。浮上体が入った状態。腕の部分は省略。

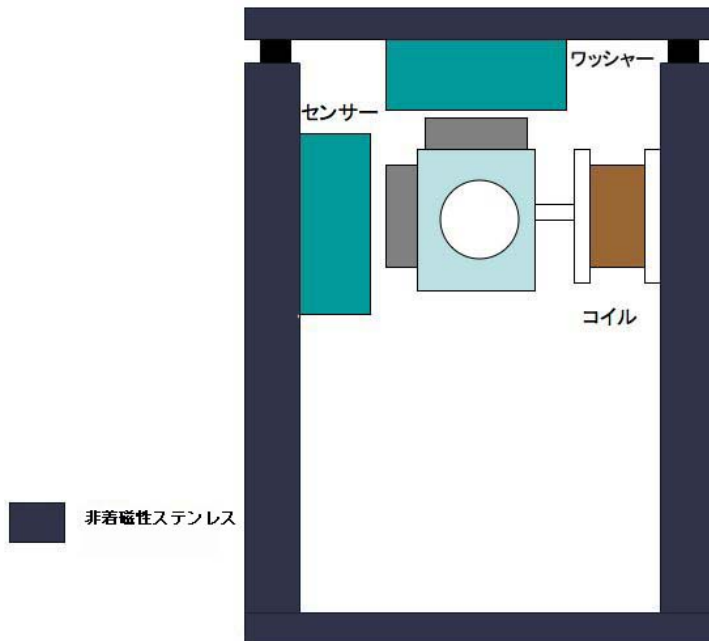


図 3: 検出部分の概略図。浮上体が入った状態。ミラー部のみ示す。

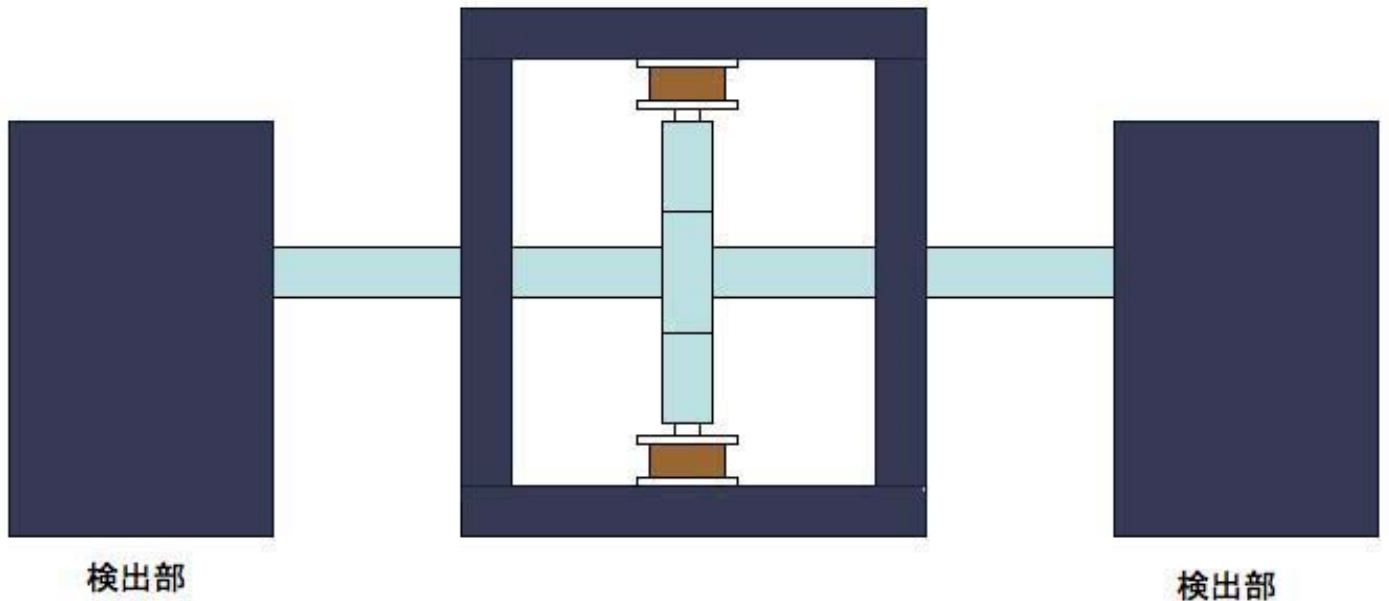


図 4: 全体の配置の概略

紙を貼り付けた発泡スチロールの板状にテープで固定した。なぜそのようにしたかという、ミラー部の位置を変えられるというこの装置の特徴を生かしたかったためである。ミラー部の位置を変えれば、それに伴って検出部の位置も変える必要がある。しかし、光学定盤上に装置を固定するのであれば、そのねじ穴の間隔に検出部の位置を合わせなくてはならず、それによってミラー部の位置も自動的に決まってしまう。これは本末転倒であると考えたのである。

しかし、やはりこのような固定の仕方は稚拙であり、観測に悪影響を及ぼした可能性は高い。それについてと、改良案については後述する。

安定な浮上を実現する原理は、大まかには以下の通りである。

浮上体の二つの磁石と、中央部分の上下の磁石によって、浮上体は上下に引っ張られる。この力によって、理想的には、浮上体中心は、中央部分の二つの磁石を結ぶ直線状に位置が固定される。したがって、残る自由度は、浮上体全体が Z 軸方向に動く自由度と、浮上体中心を軸に浮上体が回転する自由度の二つになる。しかし、これらの自由度は不安定である。即ち、平衡点から下に変位すると、その方向にどんどん変位が大きくなっていく様に力が働く。また、回転方向にはなんの力も働かないので、一度外乱によって角速度を持つと、そのまま回転し続けることになる。そのため、フィードバック制御をおこなう必要がある。それは次のように行う。検出部分のセンサーからは、常に LED の光が放たれ、その一部は、センサーが相対するミラーによって反射され、その一部がフォトダイオードに入射し、電気信号として取り出される。しかし、平衡点では、それはオフセット電圧によって相殺され、0 になる。今、浮上体が平衡点から Z 軸方向に変位したとする。すると、ミラーの位置が変わるので、フォトダイオードに入射する光量に変化し、フォトダイオードからの電気信号も変化する。そして、いくつかの回路を経て、中央部分の上下のコイルに適切な電流が流される。すなわち、もし上に変位したのであれば、下に引っ張り戻すような磁力を発生させるように電流が流れる。こうして、浮上体に変位しても、すぐに平衡点に戻され、安定に浮上するのである。

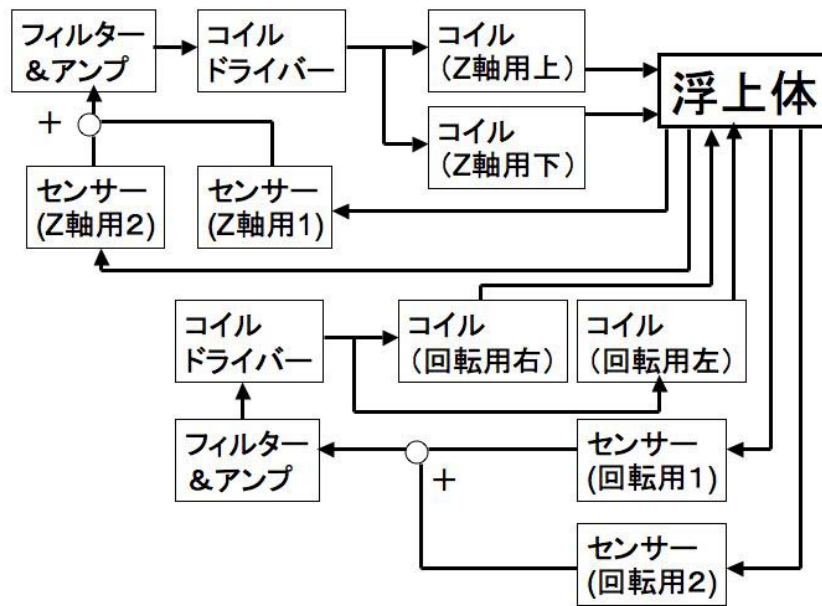


図 5: フィードバック制御系の全体図

2.5 回路

フィードバック制御のための電気回路の概略を図 5 に示す。

フォトダイオードからの出力は、センサー上の増幅回路で増幅された後、上のセンサーからの信号は Z 軸用の、横のセンサーからの信号は回転用のサムアンプにそれぞれ入り、足し合わせられる。ただし、ここにはオフセット電圧も入っていて、平衡点では電圧が相殺して 0 になるように調整されている。ここで、二つのセンサーからの出力に重みを付けて足し合わせることができるので、仮に浮上体の重心がずれて、浮上体が若干傾いてしまっている場合などは、これによって多少調整することができる。次に、フィルター回路によって低周波、高周波の雑音が除去される。また、ここで全体の信号を増幅することができる。そして、コイルドライバーを経て、コイルに電流が送られる。コイルドライバーでは、中央部分の上下のコイルに送られる電流の大きさに差をつけることができ、それによって引っ張る力の調整が可能である。検出部分の二つのコイルについても同様である。

各回路の回路図は補遺に示す。

3 実験装置の動作

3.1 センサーのキャリブレーション

まずは、センサーのキャリブレーションを行った。すなわち、センサーとミラーとの距離 x と、センサーの出力 v の間に一次関数的な関係が成り立つと仮定し、その係数を求めるのである。それを用いて、 v を測定することで、制御のもと浮上体がどれだけ動いているかを知ることができる。平衡位置でのミラーとセンサーの間隔は4つの対のいずれも1~2 mmなので、ミラーとセンサーを正対させ、両者が密着した状態から間隔を3 mmまで広げていって、センサーからの出力がどうなるかを測定した。キャリブレーションは4つのセンサーそれぞれに対して行った。ミラーは同一のものを用いた。その結果を図6に示す。

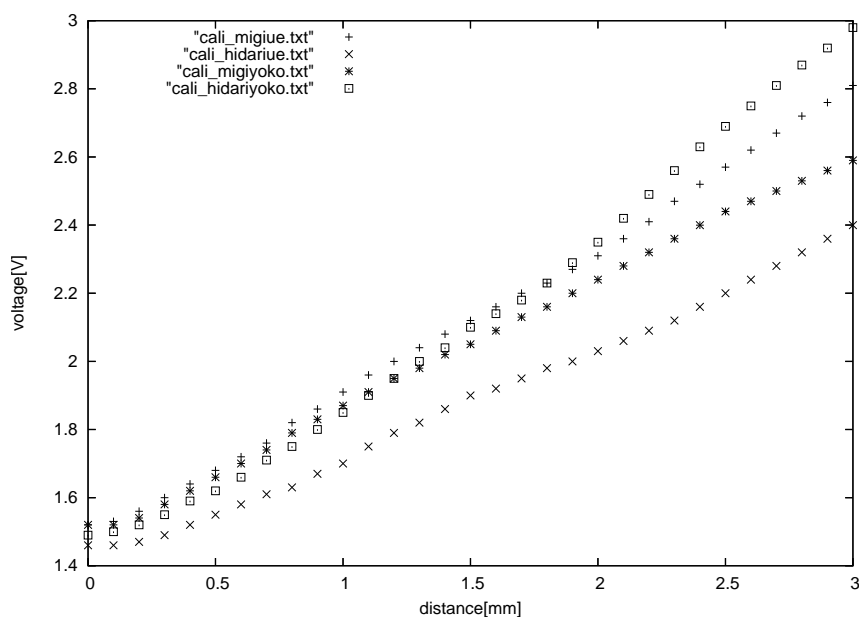


図 6: v と x の関係

「右(左)上」は、右(左)の検出部分に付けられた Z 軸方向のセンサーを、
「右(左)横」は、右(左)の検出部分に付けられた回転のセンサーを意味する。

その結果、4つのセンサーとも、 x が0~3mmの範囲では、 v と x の関係は一次関数的とみなしてよいことが分かった。ただし、その1次の係数には、センサーごとによりばらつきがあった。それぞれのセンサーの v と x の関係は、右上、左上、右横、左横の順に、以下のようになった。

$$v = 0.437x + 1.468 \quad (1)$$

$$v = 0.322x + 1.398 \quad (2)$$

$$v = 0.376x + 1.485 \quad (3)$$

$$v = 0.516x + 1.364 \quad (4)$$

v の単位は V_x の単位は mm である。このような値のばらつきの原因は、センサーへの LED とフォトダイオードの取り付け方にあると思われる。プラスチックのケースに LED とフォトダイオードと基盤を取り付けることでセンサーを製作したのであるが、その際、LED とフォトダイオードがずれてしまった場合は、そろえて取り付けられた場合よりフォトダイオードに入射する光が少ないと考えられる。(図7)

このような差があるものの、1 次の係数は最大と最小のものでも 2 倍も変わらないので、サムアンプに信号が入る際に調整することで両者の寄与を等しくすることが可能と考え、問題視しなかった。

ちなみに、オフセット電圧により、平衡位置での実質的な出力を強制的に 0 にするので、傾きのみが重要なのであって、 v 切片はあまり重要でない。

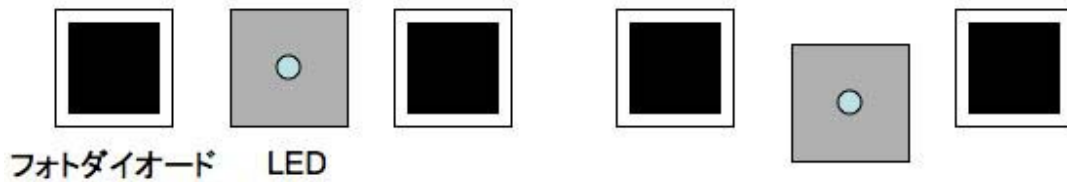


図 7: センサーへのフォトダイオードと LED の取り付け方。左は良い例、右は悪い例。

3.2 浮上の様子

装置及び制御回路が完成し、電源を投入して浮上を試みた時は、浮上は非常に不安定であり、そのためにコイルにワッシャーを取り付けたのは前述の通りである。そして、結論を先に書くと、このワッシャーの取り付けは失敗に終わった。

ワッシャーを取り付け、いくつかの回路の可変抵抗値を調整すると、浮上体は安定に静止するようになった。そのため、私たちは制御に成功したと考え、後述のスペクトルやオープンループ伝達関数の測定に入った。しかし、実際には、制御に成功したわけではなかった。浮上体の可動領域が狭くなったため、永久磁石がワッシャーの内側に触れてしまい、それによって振動が抑えられているに過ぎなかったのである。それに気づいたのは、スペクトルの測定中、浮上体が振動をはじめ、それと同時に音が鳴り始めた時である。これは、浮上体とワッシャーとが擦れる音だったと思われる。

浮上体とワッシャーが接触していることによって発生する問題点として、次のようなことが考えられる。

- 浮上体とワッシャー間の摩擦が装置の動作に影響を及ぼす。たとえば、浮上体が回転しても本来なら何の力も働かないはずだが、減衰力が働いてしまうことになる。
- 接触によって安定に見えているにすぎないので、各パラメータの値が制御系として最適なものになっている保証はない。
- 浮上体は中央部分を通じて床と一続きになっていることとなり、浮上させることで地面から切り離して地面振動を除去するという当初の目的が達成されていない。

本来なら、このことに気付いた時点で抵抗値を再調整するなどして、真の安定な状態を実現させるべきであったが、時間の都合上、そのまま測定を終えてしまい、その後ワッシャーをはずして調整を試みることにした。しかし、結局、長時間浮上したままでいられるところまでは行ったものの、目に見えるレベルの振動がなくなるほどに安定化させることはできなかった。

安定な浮上を困難にした要因としては、腕が長いことによる、浮上体の傾きとZ軸方向への変位のカップリングの影響の悪化が考えられる。中央部分の磁石の力によって、浮上体中心はその磁石を結ぶ直線上に束縛されるというものの、実際にはその力は有限であるから、図8のように浮上体が傾くという運動は起こる。もし、Z軸用のミラーが浮上体中心のすぐ近くに取り付けられているのであれば、それによってそのミラーはあまり変位しないが、この装置のように中心から離れていると、ミラーの変位は顕著になる。これがZ軸方向の変位と認識されてしまい、コイルに余計な電流が流れて、浮上体を振動させてしまったと考えられる。この問題への対策の案は後述する。

いずれにせよ、これから述べる各測定には、このことが多分に悪影響を及ぼしている。

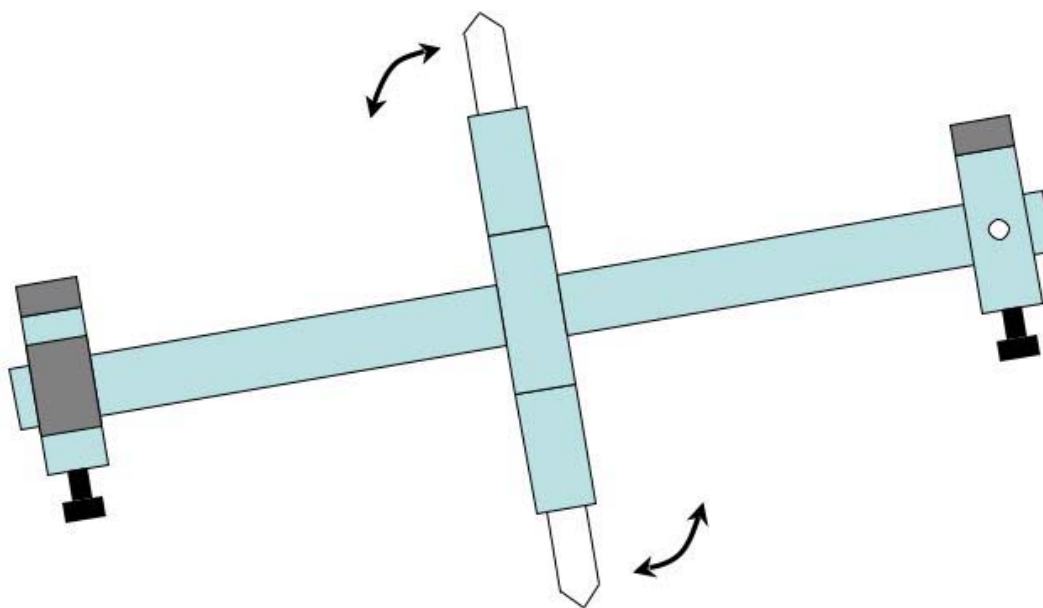


図 8: 浮上体の傾きの振動の様子

3.3 浮上体の変位の時系列の測定

3.3.1 Z軸方向の変位

4つのセンサーからの出力信号を、データロガーによって200秒間記録した。まずは、Z軸方向用の2つのセンサーからの出力について述べる。このデータを式(1)、(2)を用いて平衡位置からの変位に換算すると、図9のような結果となった。値の増加、減少は、それぞれ+Z、-Z方向への運動を意味する。

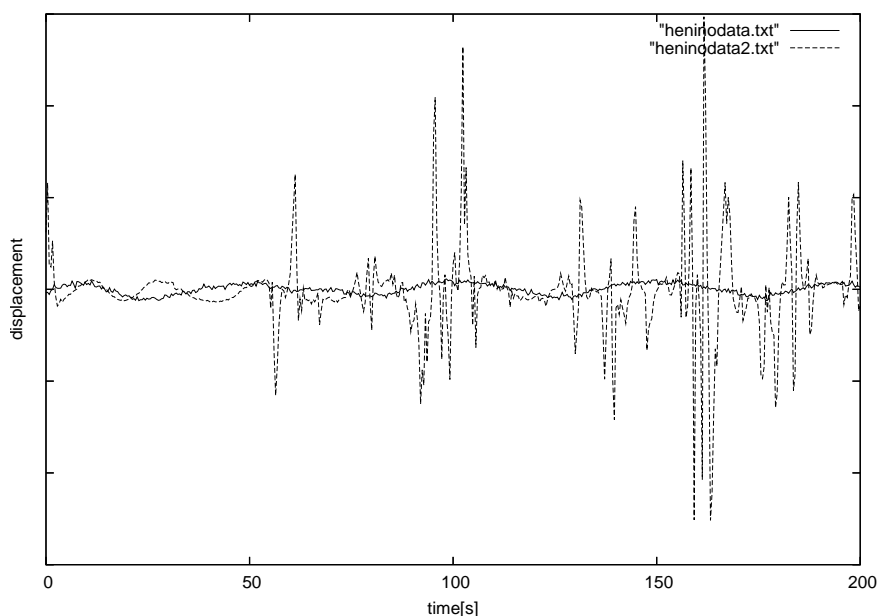


図 9: 二つのセンサーの出力から求めた Z 軸方向の変位。縦の 1 目盛りは $5\mu\text{m}$ 。
 実線は右上のセンサー、点線は左上のセンサーの出力。

残念ながら、この結果は、この装置がきちんと作動していないことを示すものとなってしまった。

理想的には、二つの信号から得られる変位のデータは、100%一致しているはずである。そうでなくても、変動の幅はずれているが、一方が増加（減少）しているとき他方も増加（減少）しているのであれば、装置は正しく動作しており、センサーのキャリブレーションに何らかのミスがあったと解釈することもできる。ところが、悪いことに、0～50秒の範囲で、二つのデータは符号が反対になってしまっている。これは、前述したような、浮上体の傾きの運動によるものと思われる。傾きの運動がおこると、一方のミラー・センサー間の距離は広がるが、もう一方のそれは狭まるからである。

また、50秒を過ぎると、左上のセンサーのみ出力が大きく変動していることが分かる。浮上体の変位によるものであれば、どちらのセンサーともに大きな変動が起こるはずなので、これは検出部分の振動によるものではないかと思われる。つまり、左側の検出部分のみ、固定が不十分で、地面振動が何かで揺れていたようである。やはり、きちんと光学定盤上に固定しなかったことが効いているのではないかと考えられる。

3.3.2 Z 軸周りの回転

次に、回転用の二つのセンサーからの出力について述べる。このデータを式(3)、(4)を用いて変位に換算したのち、浮上体の中心から各ミラーの中心までの距離（右のミラーまでは 120.5mm 、左のミラーまでは 123.2mm ）で割ることによって、回転角を求めた。（回転角が微小であるため、このように近似的に計算できる）その結果を図10に示す。値の増加、減少は、それぞれ装置を上から見た時の反時計回り、時計回りの回転を意味する。

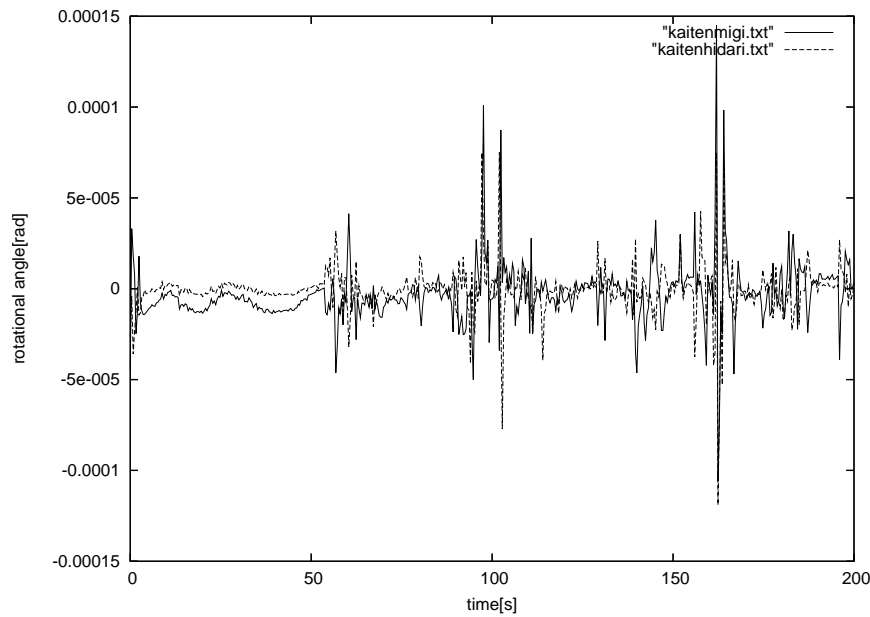


図 10: 二つのセンサーの出力から求めた回転角。縦の 1 目盛りは $5 \times 10^{-5} rad$
 実線は右横のセンサー、点線は左横のセンサーの出力。

今度は、50秒までは、どちらのセンサーともほぼ同じ出力をしている。しかし、その後は、ともに激しく変動している。これは、浮上体の振動によるものと考えられる。右上のセンサーには大きな変動が見られなかったことから、浮上体は、ワッシャーとの接触により、外乱により幾分回転はし得たが、Z軸方向には摩擦により外乱による変動は少なかったと言える。また、回転に関しては2つのセンサーでZ軸方向ほどの大きな違いが見られなかったことから、検出部分が感じていた揺れは主に鉛直方向のもので、水平面上の揺れは少なかったようである。

3.4 振動のスペクトル

3.4.1 Z軸方向の変位

浮上体の振動に対して、各周波数成分の寄与がどの程度ずつあるのかを調べた。具体的には、スペクトルアナライザーによって4つのセンサーからの出力信号のスペクトルをとり、それを式(1)~(4)で変位のスペクトルに直した。周波数の範囲は100Hz~100kHzとした。

まずは、Z軸方向の変位のスペクトルである。結果を図11に示す。

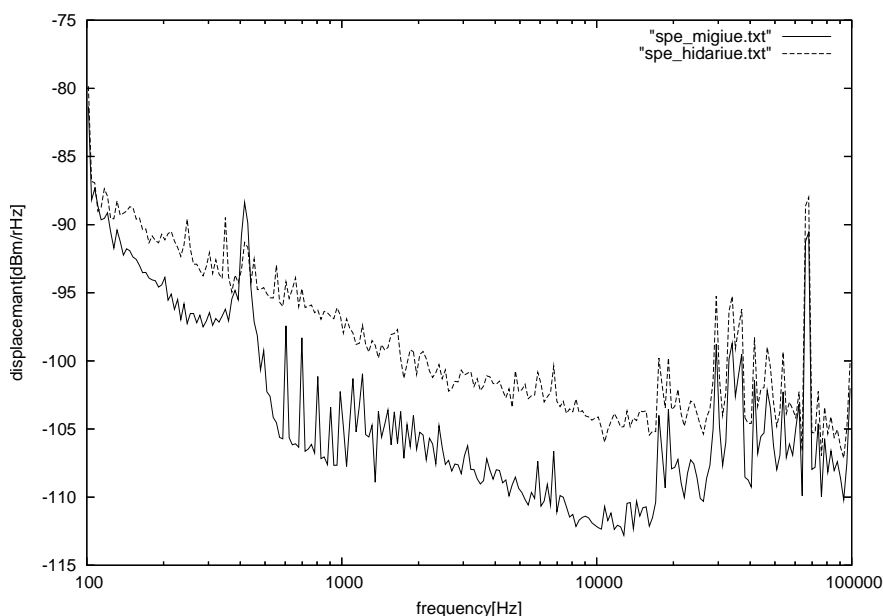


図 11: 二つのセンサーの出力から求めたスペクトル。実線は右横のセンサー、点線は左横のセンサーの出力。

どちらのセンサーとも、同じような形のスペクトルで、低周波になるにつれ強さが増している。しかし、なぜか左上のセンサーの方が右上のセンサーよりも1桁程度大きい値を出していることが分かる（理想的には、両者はまったく同じスペクトルとなるべきである）。これについてはよくわからないが、一つの可能性として考えられるのは、右のZ軸用のミラーが、センサーと正対していなかった、ということである。もしそうだとしたら、右のフォトダイオードに入る光の量は、左のそれよりも小さくなるため、右のセンサーの出力は左のそれよりも少し小さくなり、結果として同じ振動成分でも振幅は少し小さくなる。もしくは、ミラーの性能や、汚れ具合の差などから、同様の理屈でこのような結果を生じさせたのかもしれない。しかし、高周波の範囲はパワーが小さいので、より低周波の範囲では二つのスペクトルがあまり変わらず、この差は結局全体の動作にはあまり影響を及ぼさないという可能性も考えられる。

また、400Hzあたりに、右上のセンサーだけピークがみられる。これは右側の検出部分がこの周波数で共振しているのではないかと考えられ、ここでも安易な装置の固定法の悪影響がみられる。しかし、時系列の変位の測定では、右上のセンサーは左上に比べて出力の振動が小さかったことを考えると、この振動は結局動作に影響を及ぼさなかったようである。より低周波の範囲で、同様のピークが左上のセンサーに対して立っていて、それが図9で見られたような左側のセンサーの振動を生んだ可能性がある。

いずれにせよ、もっと低周波の範囲まで、少なくとも、ピークがみられる程度までは、スペクトルを取るべきであった。

3.4.2 Z軸周りの回転

次に、回転のスペクトルである。結果を図12に示す。先ほどと同様に、腕の長さで割ることで、変位を回転角に換算してある。

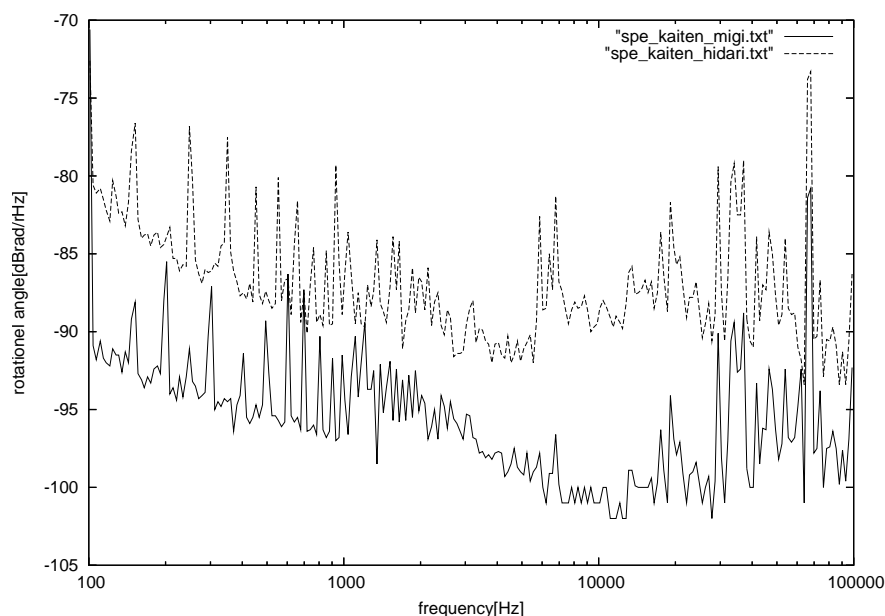


図 12: 二つのセンサーの出力から求めたスペクトル。実線は右横のセンサー、点線は左横のセンサーの出力。

こちら、Z 軸のセンサーと同様の結果が得られた。すなわち、2 つのスペクトルは形状は似ているが、左横のセンサーの値は右横のそれより 1 桁程度大きい。この先ほどの結果との共通点を考えると、やはり右側のミラーがセンサーと正対していなかった可能性が高い。ミラー部が傾いているのであれば、上下のミラーのセンサーとの正対位置からのずれは、同程度になるからである。一方、ミラーの個体差によってこの差異が生まれたのであれば、Z 軸と回転で共通した特徴がみられる理由はない。

また、回転のスペクトルには、Z 軸の場合に見られた、一方のスペクトルにのみ現れるピークは、少なくとも測定した範囲にはないということがわかった。これは、図 10 で、回転のセンサーの出力は一方だけ激しく変動することはなかったという結果に沿うものである。

3.5 オープンループ伝達関数

3.5.1 Z 軸方向の変位

スペクトルアナライザーを用いて、Z 軸、回転の 2 系統の制御系に対して、オープンループ伝達関数を測定し、ユニティゲイン周波数と位相余裕を求めることで、制御系がどの程度最適化されているかを調べた。

まずは、Z 軸方向の変位の制御に関して述べる。オープンループ伝達関数のゲイン特性と位相特性は、それぞれ図 13、図 14 のようになった。

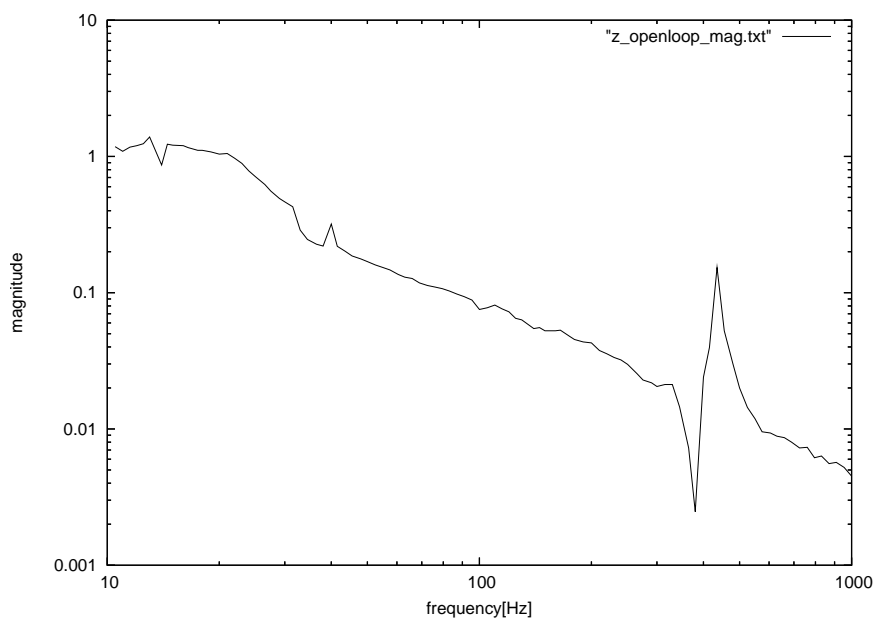


図 13: Z 軸方向の制御のオープンループ伝達関数のゲイン特性

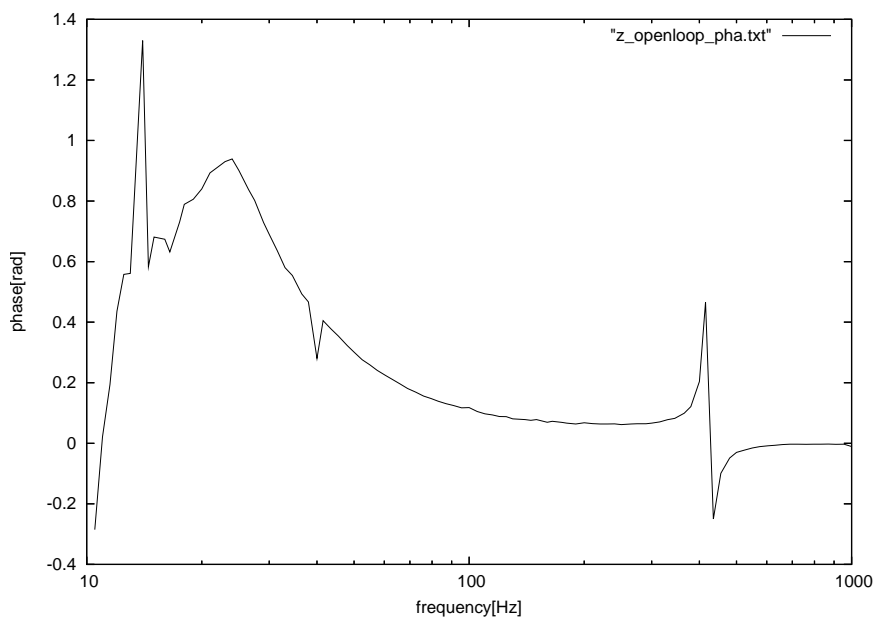


図 14: Z 軸方向の制御のオープンループ伝達関数の位相特性

図 13 より、Z 軸方向の変位の制御に関して、ユニティゲイン周波数はおよそ 20 Hz であると推定される。また、その周波数での位相をみると、位相余裕はおよそ $0.8rad \sim 45^\circ$ と求まった。この値は位相余裕としては十分である。ところが、ユニティゲイン周波数以下の範囲で、位相が減少してしまっている。しかも、ユニティゲイン周波数以下で、ゲインはあまり増加していない。そのため、位相的に本当に安定とは言えないと思われる。

また、両特性とも滑らかさに欠ける曲線となってしまっている。誤差を生んだ要因としては、前述のように浮上体とワッシャーが触れていることや、検出部分の振動の影響などに加え、次のようなことが考えられる。この

測定は、フィルター回路とコイルドライバーの間にスペクトルアナライザーをはさみ、そこから適当な信号電圧を発生し、その結果どのような電圧値がスペクトルアナライザーに返ってくるかを見ることで行われる。この信号電圧はある程度大きいものでなければならないので、それによって浮上体が振動してしまうということが起こった。特に、ユニティゲイン周波数程度からそれ以下の周波数帯では、その振動は大きかった。そのまま浮上はし続けたので測定を続けたが、例えば 14Hz あたりに見られるゲイン特性の不自然なくぼみなどはこれによるものかもしれない。

3.5.2 Z 軸周りの回転

次に、回転の制御に関して述べる。オープンループ伝達関数のゲイン特性と位相特性は、それぞれ図 15、図 16 のようになった。

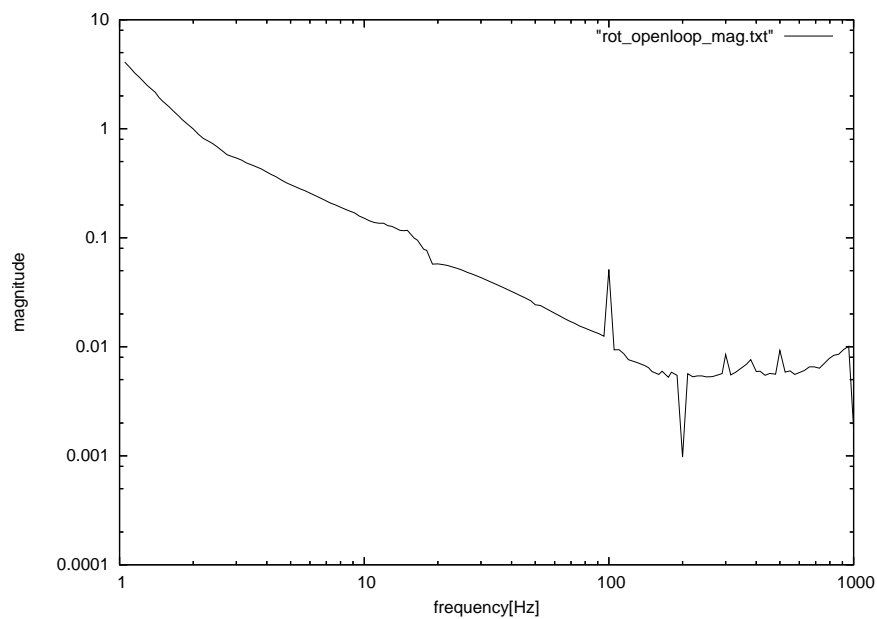


図 15: 回転の制御のオープンループ伝達関数のゲイン特性

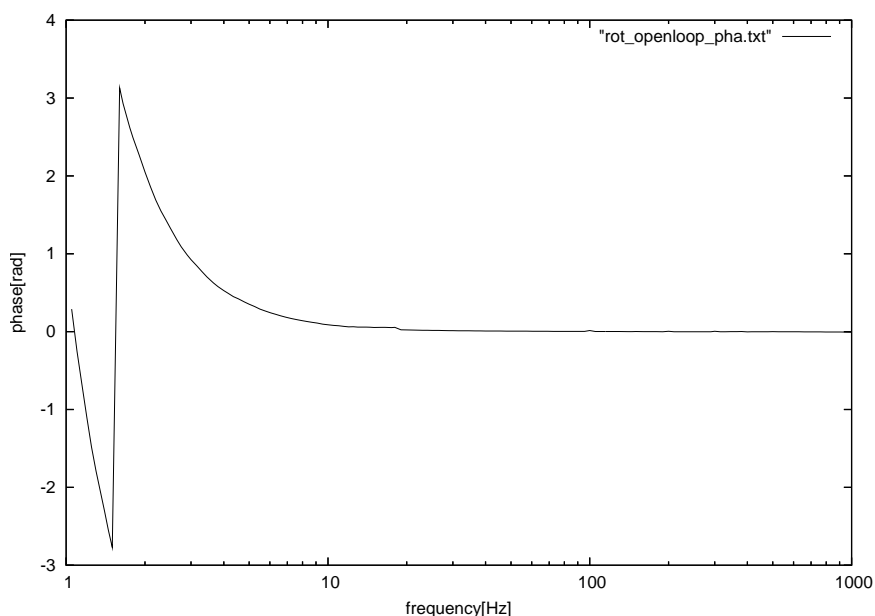


図 16: 回転の制御のオープンループ伝達関数の位相特性

回転の制御については、ユニティゲイン周波数は 2Hz 程度であることが分かった。また、位相余裕はおよそ $2rad \sim 115^\circ$ と、非常に大きいものであった。しかし、周波数が 1Hz から 2Hz の間で、位相が大きく変化し、 180 度から -180 度まですべての値をとるような格好になってしまっている。(1.6Hz のあたりでの位相が急激に減少しているように見えるのは、位相が 180 度を超えたために瞬間的に -180 度になったものである) したがって、こちらも、本当に位相の面で制御が安定とは言えないだろう。回路の位相特性を調整する必要があると思われる。

また、今回も Z 軸の場合と同様に、低周波の範囲で浮上体の振動が見られたが、偶然にかその範囲でのゲイン特性は比較的滑らかな曲線が得られている。

4 今後改善すべき点

4.1 浮上体の傾きの影響の低減

前述したように、おそらく、浮上体の傾きの振動が起こっており、それを装置が Z 軸方向の変位と認識してしまうことが、浮上の不安定化の大きな要因と考えられる。本来ならこの傾き自体を除去したいところであるが、磁石によって引っ張る力が有限である以上それは不可能であろう。そのため、傾きの影響をなるべく小さくするように装置を改良する必要がある。

1つの案として、次のようなものが考えられるだろう。この装置は、ミラー部を固定していないため、ミラー部状のパーツなら何個でも腕に取り付けられるという利点がある。(もちろん、大きさや質量からくる制限はあるが) そのため、腕の一番外側のミラー部には回転用のミラーのみ取り付け、その内側のなるべく浮上体中心に近い所に Z 軸用のミラー部を取り付ければいいのではないかと。(図 17) それに伴い、Z 軸用のセンサーは中央部分の天板に取り付けることになる。ミラー部をなるべく外側に付けたかったのは、回転に対する感度を増すためであって、Z 軸方向の変位には関係がなかった。逆に、Z 軸用のミラーが外にあればある程、傾きによるそのミラーの動きは大きくなってしまい、傾きの影響が増してしまう。実際、過去の学生実験を見ても、Z 軸用のミラーはなるべく浮上体の重心に近い所に設置しているようである。

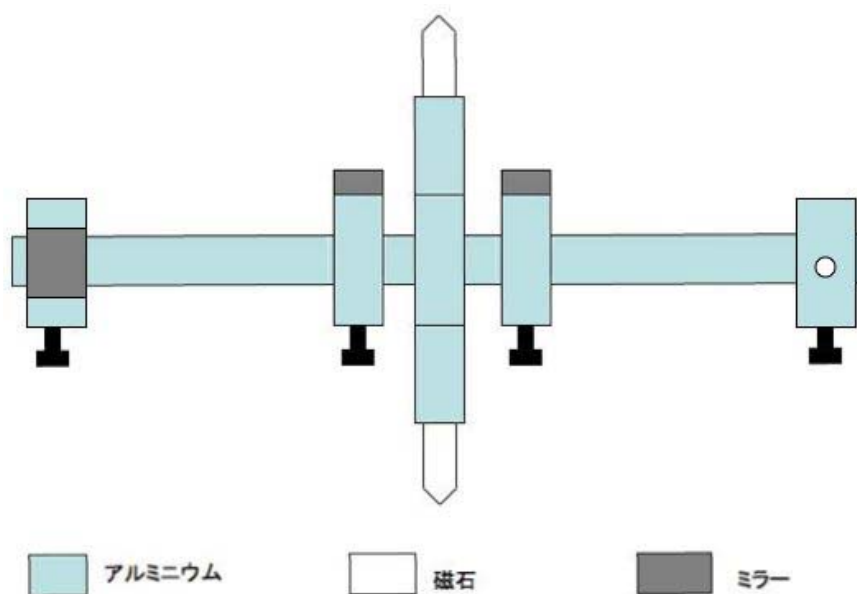


図 17: 浮上体の改良案

4.2 検出部分の固定方法の改良

今回、実質的な腕の長さが調整可能であるという利点を生かすため、装置をテープで固定するという方法をとったが、それによる悪影響が出たと思われるのは前述した通りである。やはり、装置を光学定盤に設置する必要性があったと思われる。

中央部分は光学定盤に固定してしまって構わない。検出部分と中央部分の間の距離を可動にしてやればよいのである。そのため、2つの検出部分をX軸ステージの上に固定し、そのステージを光学定盤に固定するという方法を取るべきであっただろう。

4.3 その他の改善すべき点

その他にも、改善すべき点は数多くあるだろう。思いつくものを以下に列挙する。

- センサーへのLED、フォトダイオードの取り付け方を見直し、4つのセンサーとも同じキャリブレーション結果が得られるようにする。
- 各回路のゲイン等をより詳細に調整し、安定な浮上ができるようにする。
- 制御回路の位相特性が適当なものになるように各抵抗値等を変える。
- 検出部分の側面を作り直して、ワッシャーを除く。

5 まとめと感想

これまで述べてきたように、結局安定な浮上を実現することはできず、その原因としては浮上体の傾きが考えられる。その状態で各種測定を行ったが、装置としての不十分さが随所に影響を及ぼす格好になってしまった。

今回の実験の一番の反省点は、回路の製作に時間をかけすぎてしまったことである。そのせいで、測定を行う時間が一月の最後の一週間程度しか残されなかった。測定にかけられる時間がより沢山あれば、結果を受けて装置を改良することもできたろうし、各パラメータの値の調整もより精密に行えたであろう。私たちに回路の製作の手際の良さが足らなかったのに加え、3年の実験で学んだ電気回路に関する知識をかなり忘れてしまっていたことが原因だと思う。

しかし、曲がりなりにも浮上には成功し、道半ばとはいえある程度までは装置を作れたということはよかったと思う。

最後になりましたが、安東さんには最初から最後まで非常にお世話になりました。また、坪野研の院生の方々にもさまざまなことを教えていただきました。皆様本当にありがとうございました。

6 補遺

6.1 回路図

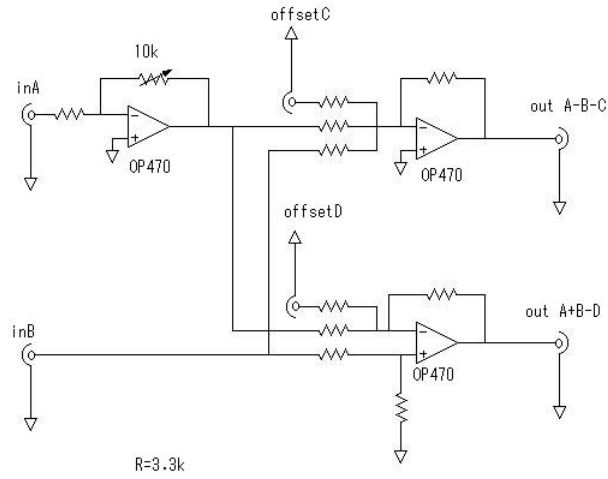


図 18: サムアンプ

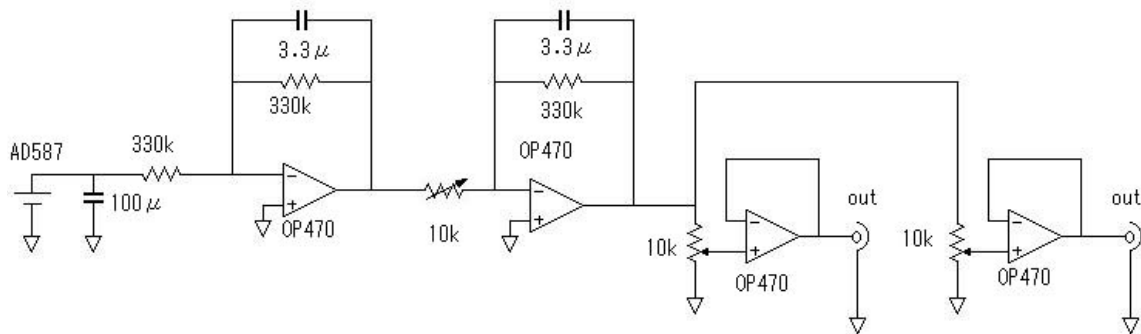


図 19: オフセット

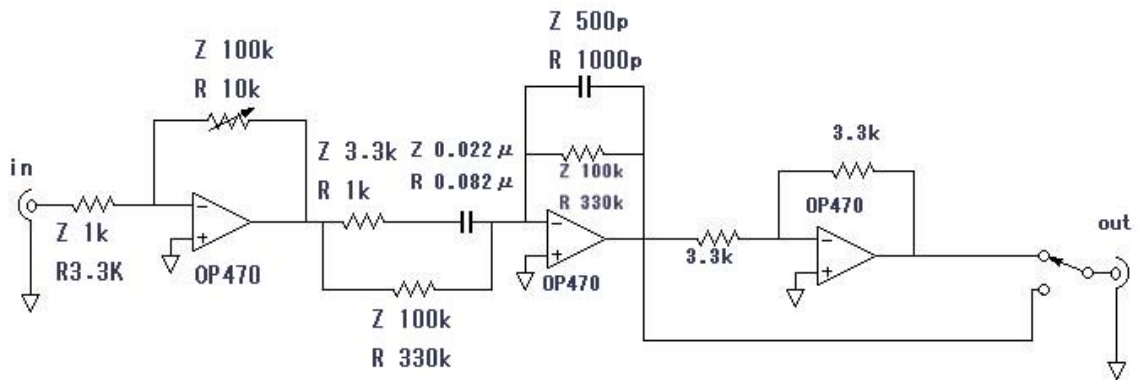


図 20: フィルター。Z、R は、それぞれ Z 軸用、回転用の回路における値を示す。

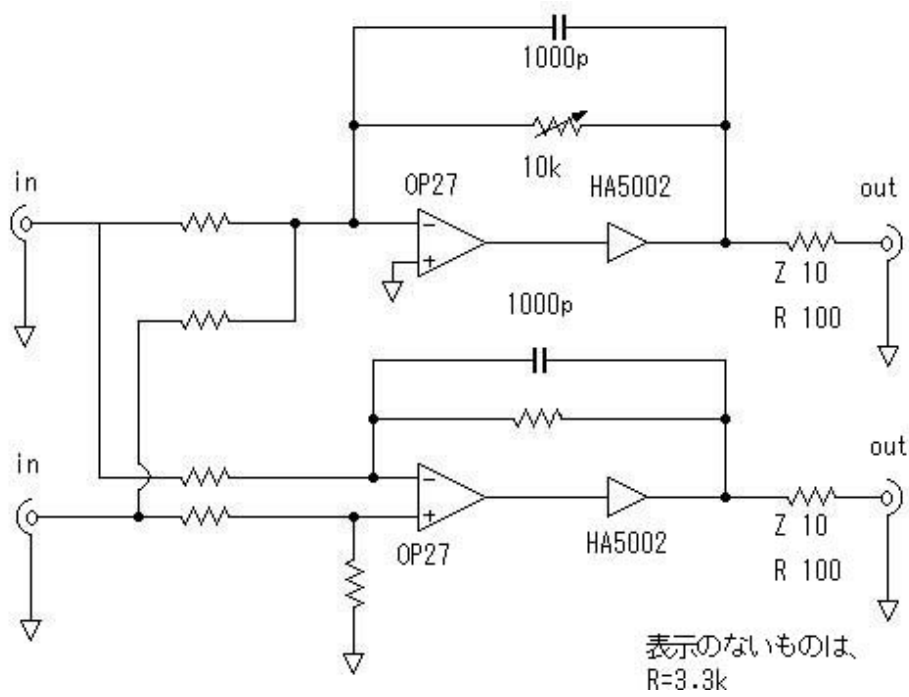


図 21: コイルドライバー。Z、R は、それぞれ Z 軸用、回転用の回路における値を示す。

7 参考文献

- 「新版フィードバック制御の基礎」 片山徹 (朝倉書店)
- 「スペクトル解析」 日野幹雄 (朝倉書店)
- 「特別実験 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」 穀山渉、久徳浩太郎
- 「特別実験 II レポート 磁気浮上の基礎実験」 小林洸、池本尚史