

特別実験レポート  
ねじれ振り子による重力の逆二乗則の検証

05141570 和田祥太郎  
共同実験者 川名好史朗

2015年9月8日

# 1. 目的

ニュートンの古典力学において、重力のポテンシャルは

$$\phi(r) = -\frac{GM}{r} \quad (1.1)$$

と書ける。

しかし超弦理論によれば、これに湯川ポテンシャルが足されて

$$\phi(r) = -\frac{GM}{r} \left( 1 + \alpha \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \right) \quad (1.2)$$

と書ける。

この湯川ポテンシャル項のずれを測定しようというのが今回の実験の目的である。

## 2. 方法

### 2.1 実験概要

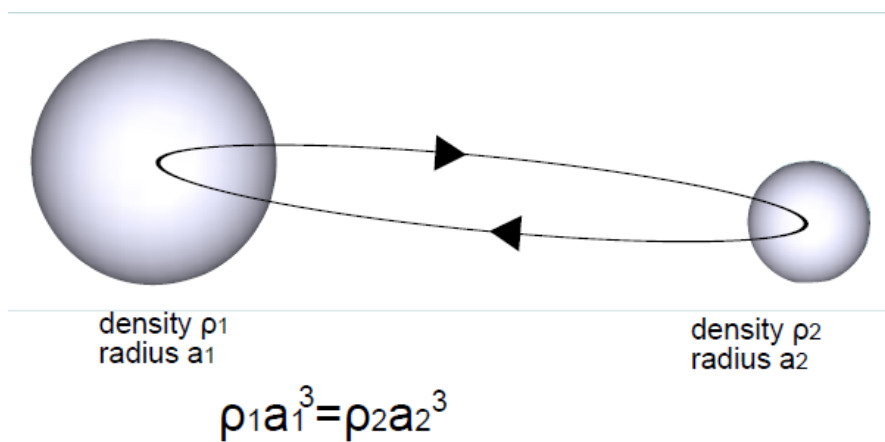


図 1 (柴田さんの修士論文より)

図 1 のように密度が違うが質量が同じ二つの球を考える。  
半径  $a$ 、質量  $M$  の球の重力ポテンシャルを考える。

(1.1)式のニュートンの逆二乗則が成り立っているとすると、

$$\phi(r) = -G \int d^3 r' \frac{\rho}{|r - r'|} = -\frac{GM}{r} \quad (2.1)$$

となり、質量が同じであれば密度が違っていても重力は変わらない。

一方(1.2)式の第二項の湯川ポテンシャル

$$\phi(r) = -G \int d^3 r' \frac{\rho}{|r - r'|} \exp\left(-\frac{|r - r'|}{\lambda}\right) = -\frac{GM}{r} F\left(\frac{a}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \quad (2.2)$$

$$F(x) = \frac{3(x \cosh x - \sinh x)}{x^3}$$

となり、質量が同じであっても密度が違えば重力は変わることがわかる。

よって図 1 の系で考えたときに、もし逆二乗則が成り立っているとすれば重力場は二回対称になるが、湯川ポテンシャルが入ってきたときは一回対称である。

このことを利用して以下のように実験を行った。ステンレスの円盤の中に等間隔で 2 種類の球状の穴をそれぞれ 6 個ずつ(計 12 個)交互にあけ、球状の穴の一方に何も入れず、他方にサファイヤを入れた(円盤の設計図は図 2 参照)。ステンレスの密度を基準としてみたときに、何も入れない球の密度は  $-\rho_{\text{ステンレス}}$ 、サファイヤ球を入れたほうの球は  $-(\rho_{\text{ステンレス}} - \rho_{\text{サファイヤ}})$  と負の密度を持っているみなすことができる。半径をうまく調節することで、それぞれの穴の負の質量が等しくなるように設定した。こうして図 1 の系を少し応用した、質量は同じだが密度が違う球が並んだ系ができた。この円盤(以下アトラクタと呼ぶ)を回転させたときに、もし逆二乗則が成り立っていれば重力場は 12 回対称であるが、成り立っていなければ 6 回対称である。したがってアトラクタの回転周波数の 6 倍波成分は逆二乗則が成り立っていればゼロになるが、そうでなければゼロにならない。6 倍波を検出すれば、逆二乗則の破れを検出したことになる。

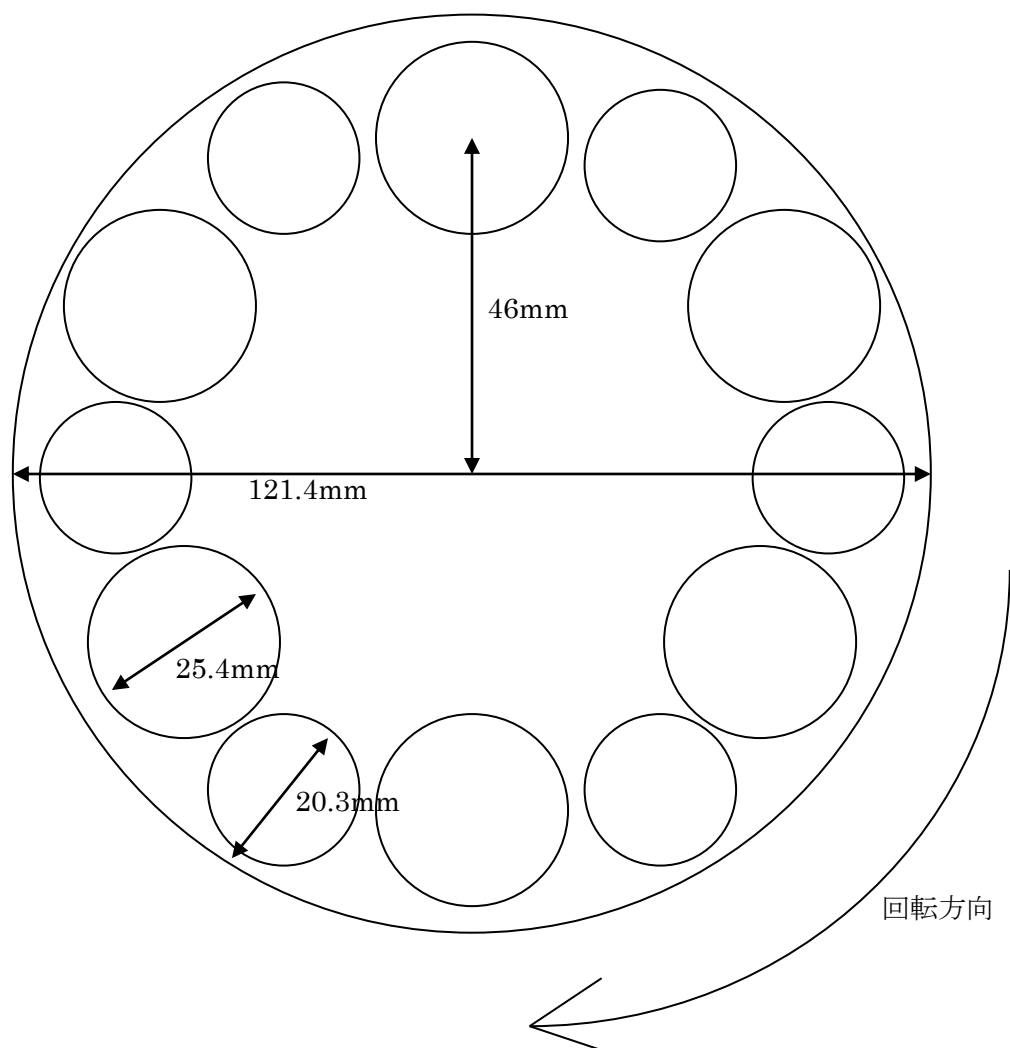


図2 アトラクタを上から見た図

この円盤を2枚用意し、重ねて球が中におさまる構造にした

次に重力の変化をどのように検出するかについて述べていきたい。アルミでできた細長い直方体をタングステンの糸でアトラクタの上につるした(図3参照)。重力の影響により直方体(以下アンテナと呼ぶ)にはトルクが発生する。このことを利用して、アトラクタをまわしたときのアンテナにかかるトルクを測定すればよい。

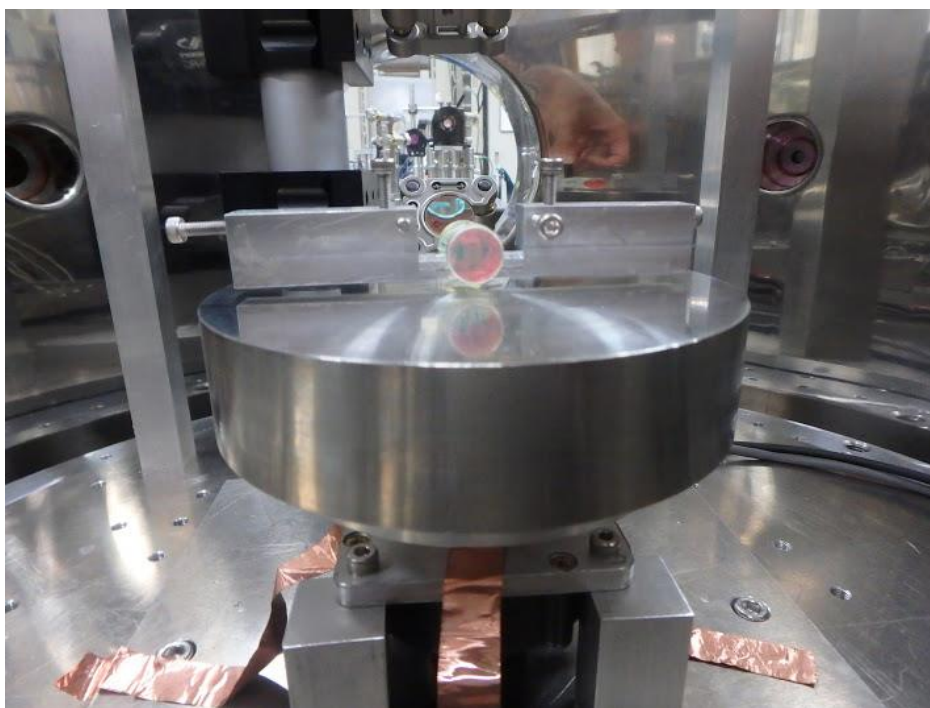


図3 アンテナ（上の直方体）とアトラクタ（下の円盤）を正面から見た図  
アンテナの正面と後ろに付いているのは鏡

アンテナの前後に鏡をつけ、レーザーでアンテナに光を当てる。トルクが発生するとアンテナが少し回転するので反射光の位置がずれるので、そのずれの大きさによってトルクの大きさがわかる。光学系は図4のように配置し、反射光のずれは QPD（光の位置測定器。詳しくは 2.2 の（5）参照）によって測定した。

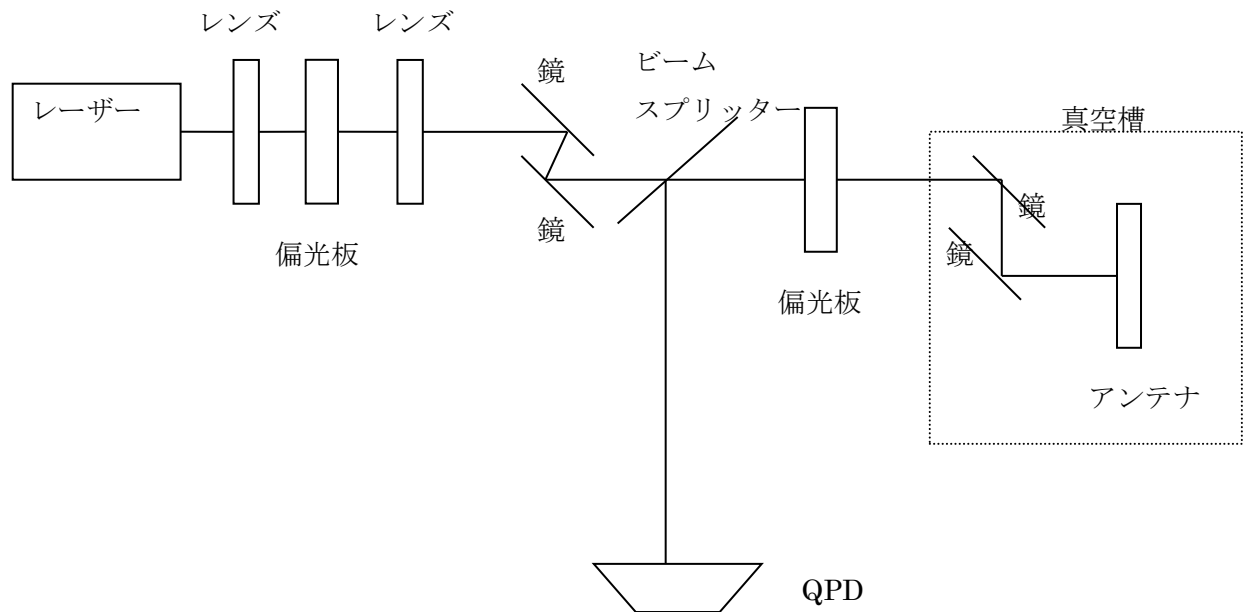


図4 実験で用いた光学系

## 2.2 実験装置の詳細

### (1) アンテナ

アンテナは縦 106mm、横 10mm、高さ 16mm の直方体で、中央部だけ糸を接合する関係上少しくりぬいてある。前と後ろに直径 12.7mm の鏡をくっつけた。材質は Al5056 を用いている。(図3参照)

### (2) アトラクタ

アトラクタは厚さ 13.7mm、直径 121.4mm の円盤で、その円盤に何も入れない直径 20.3mm の球とサファイヤを入れる用の直径 25.4mm の球がそれぞれ 6 個ずつ互い違いに計 12 個あけられている。材質はステンレスの一種である SUS316 を使用した。(図2、図3参照)  
また、アトラクタ中の球による重力場をよりはっきりと検出するために、ダミーとして球を一切あけない同じサイズの円盤も用意した。この円盤の信号と比べることでミシングマスによる信号を取り出そうと考えた。

### (3)二重振り子

ノイズの一つである地面振動を軽減するために糸の中間点に別の振り子をつるし、二重振り子とした。

さらに図 5 のようにまわりには円形の磁石とそのまわりに支える台を設置し、よりダンピングすることを目指した。



図 5 二重振り子

### (4) 振り子の位置調節器

振り子のスタンドの天板には振り子の位置を細かく調節できるように調節器を組み込んだ。並進方向の調節器三つと回転方向の調節器一つを組み合わせて、振り子の  $x,y,z$  方向と角度方向の調節を可能にした。(図 6 参照)

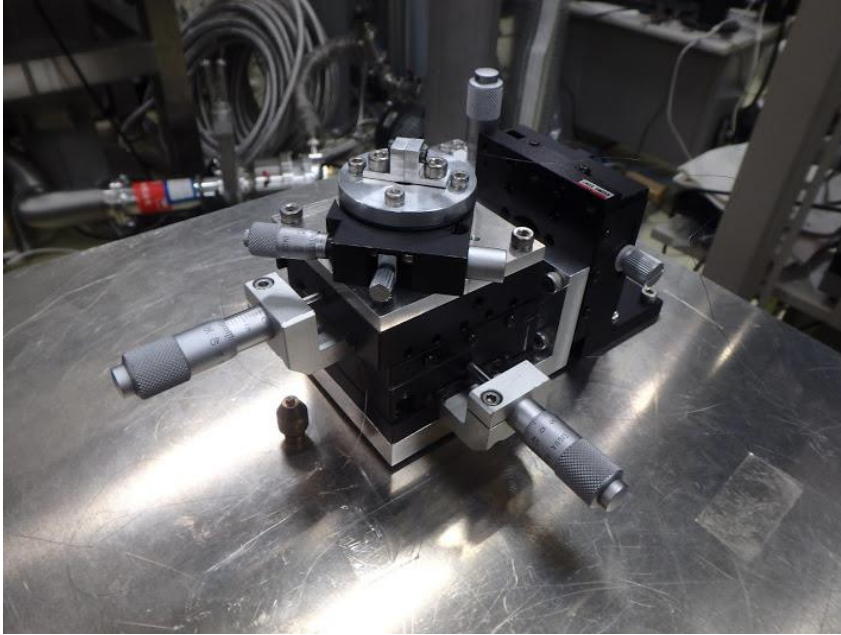


図 6 振り子の位置調節器

ここまでの (1) ~ (4) までをまとめて撮った全体像が図 7 である。図の上から振り子の位置調節器、二重振り子、アンテナ、アトラクタ、モーターのようになっている。



図 7 (1)~(4)を正面から見た全体図



## (5) QPD(Quadrant Photodiode)

QPD は図 8 の InGaAs PIN フォトダイオード G6849 を使用した。

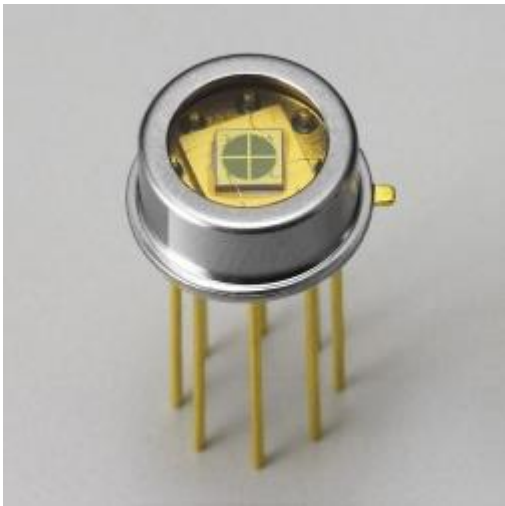


図 8 フォトダイオード

(<http://www.hamamatsu.com/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheadername1=content-disposition&blobheadervalue1=inline%3Bfilename%3D1336994190224.jpg&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1328686385806&ssbinary=true>) より

これは、フォトダイオードという光の強さを測定できる機器が 4 つ組み合わさったもので、4 つの信号の強さから光の位置を測定する機器である。これを使って反射光のずれを測定することができ、アンテナにかかるトルクを測定できる。一つのフォトダイオードの回路図は図 9 のようになる。QPD にはアノードが 4 つあるので、上の回路を 4 つ作り、接続した。

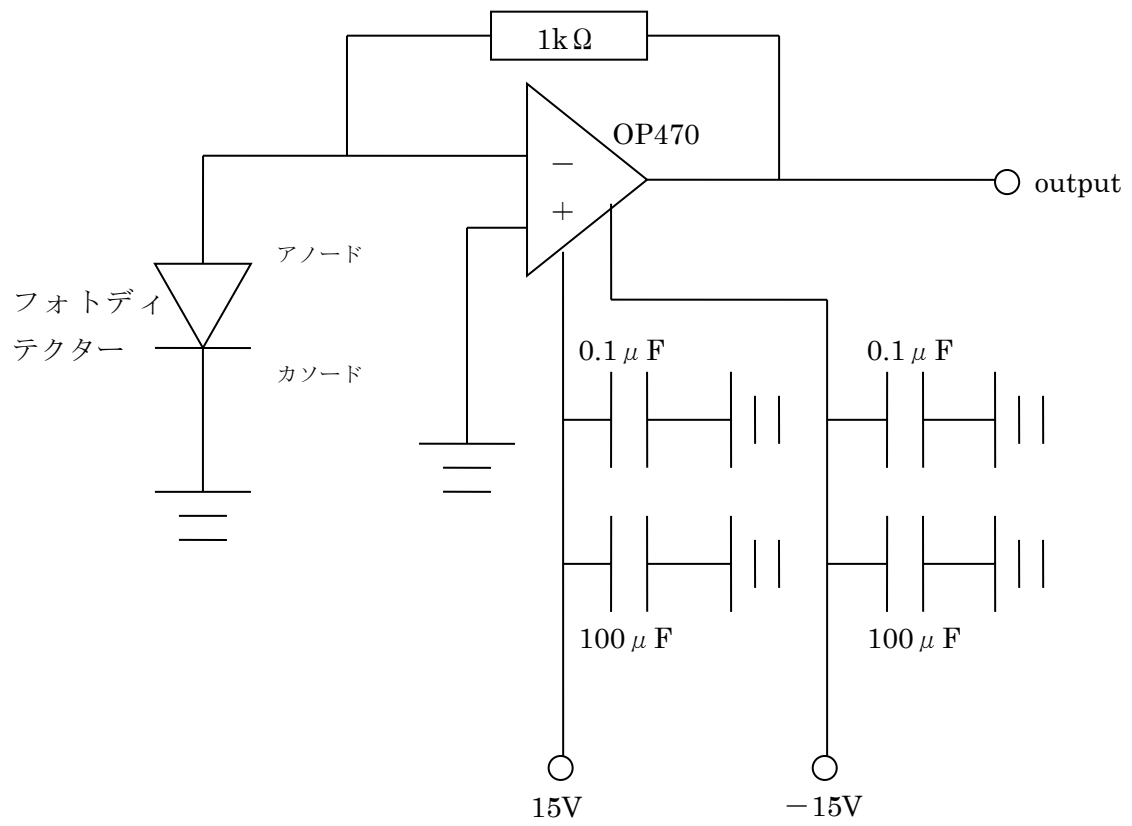


図9 フォトダイオードの回路図

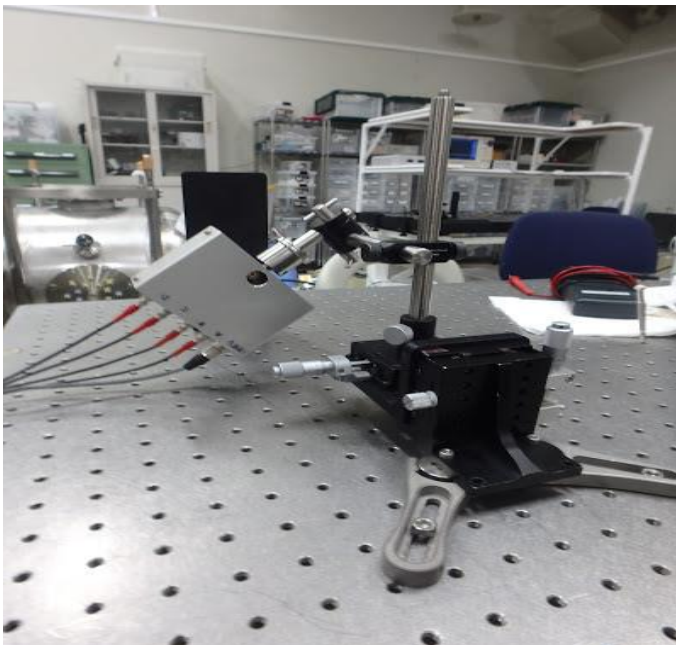


図10 QPD 完成図

## (6) モーターと制御回路

### (6-1) モーター

モーターは超音波モーター（USR 60-E3N）を使用した。振動が少ない点が優れている。ただ長時間の使用で熱が発生するので、銅のテープを使うなど熱を逃がす工夫をした(図 11 参照)。

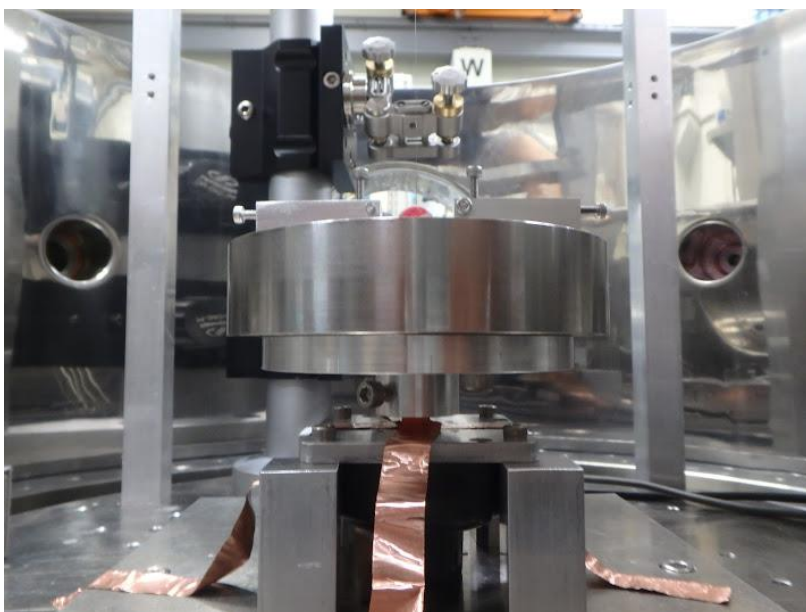


図 11 超音波モーター（アトラクタの下）

## (6-2)制御回路

モーターの回転周波数の揺らぎを小さくするため、モーターに対して制御回路をつないだ。制御回路の流れとしては、掛け算回路→ローパスフィルター→反転回路の流れである。(図12 参照)

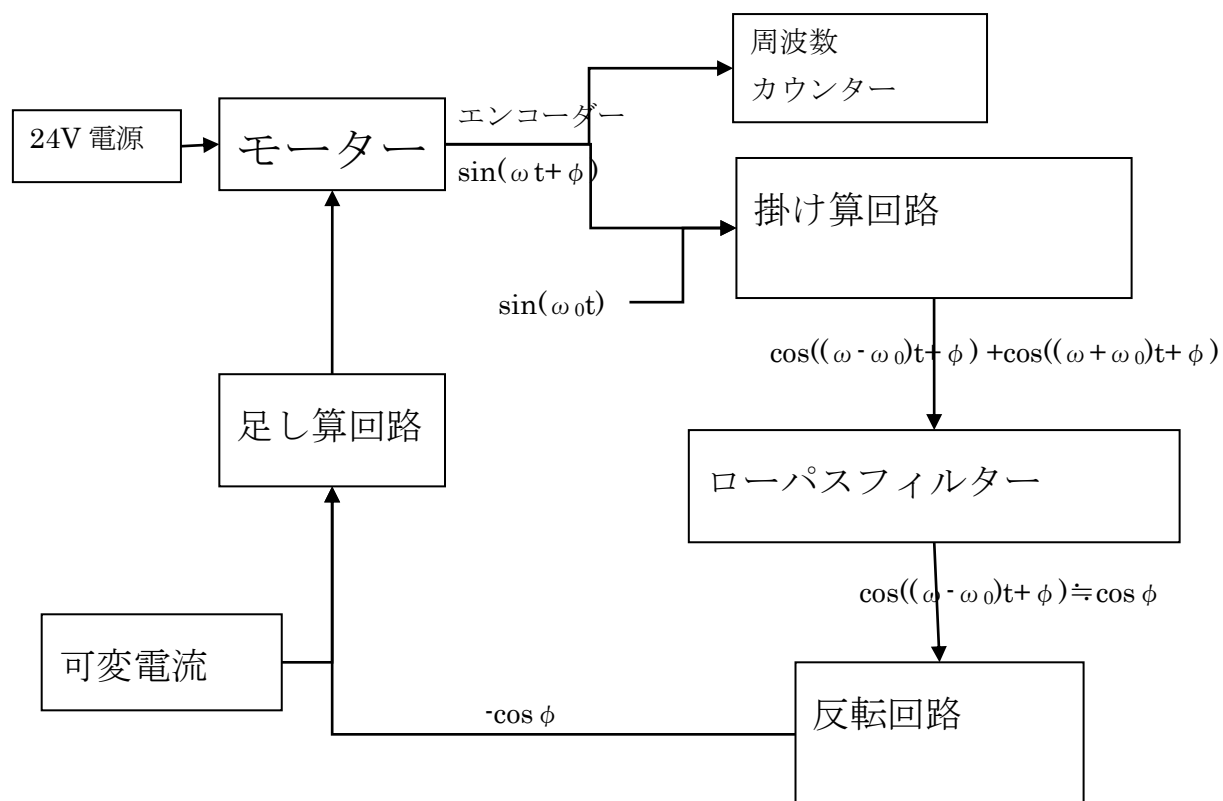


図 12 制御回路図の概略

まず、モーターの信号が  $\sin(\omega t + \phi)$ であったとき、その信号の角周波数の近い信号  $\sin(\omega_0 t)$ とともに掛け算回路の入力につなぐ。すると出力信号は  $\cos((\omega - \omega_0)t + \phi) + \cos((\omega + \omega_0)t + \phi)$ となる。次にその信号をローパスフィルターの入力につなぐ。すると低周波の信号だけが残るので、出力信号は  $\cos((\omega - \omega_0)t + \phi) \approx \cos \phi$ と近似できる。最後に反転回路を通すと、出力は  $-\cos \phi$ となり、可変電流とともに足し算回路に通すことで、モーターの信号を安定させるという仕組みである。

一つ一つを細かく見てみる。

### (6-2-1) 掛け算回路

乗法回路の MPY634 を使った。MPY の概略回路図は図 13 である。

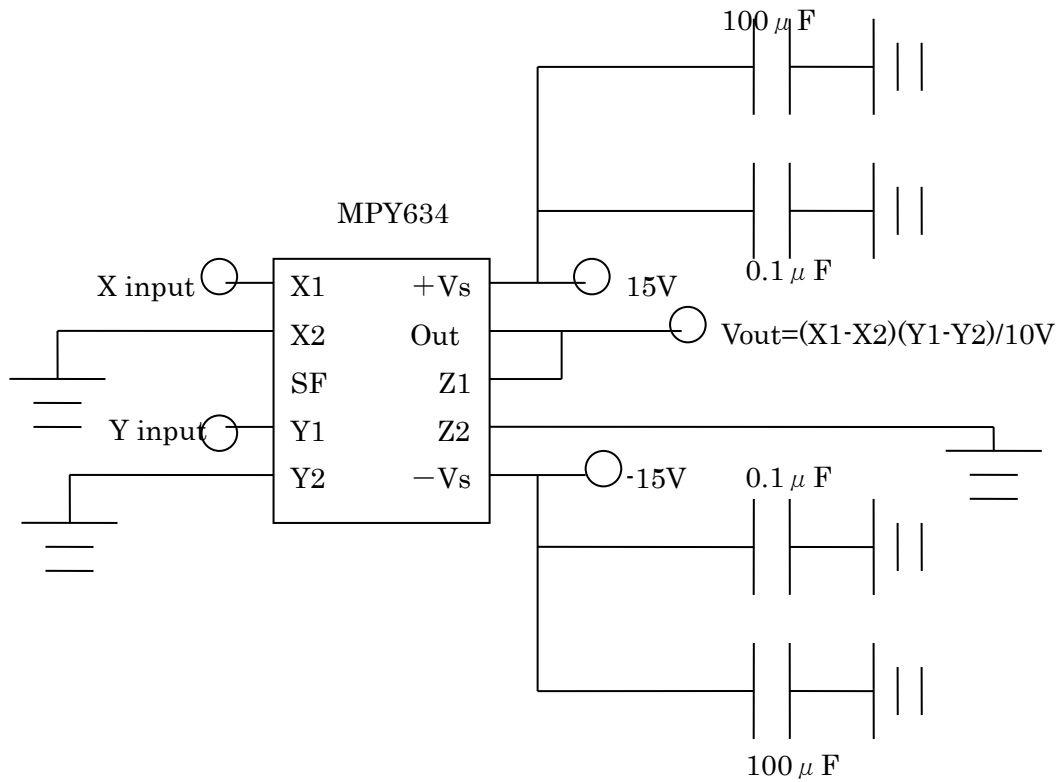


図 13 掛け算回路図

### (6-2-2) ローパスフィルター

これは周波数の低い信号のみを通し、周波数の高い信号をカットする回路である。今回は実験室内にすでにあったものを使った。

### (6-2-3) 反転回路

これは入力信号を  $-1$  倍させて出力する（符号を反転させる）回路である。これは反転増幅回路の増幅率を  $1$  倍にして作った。（図 14 参照）

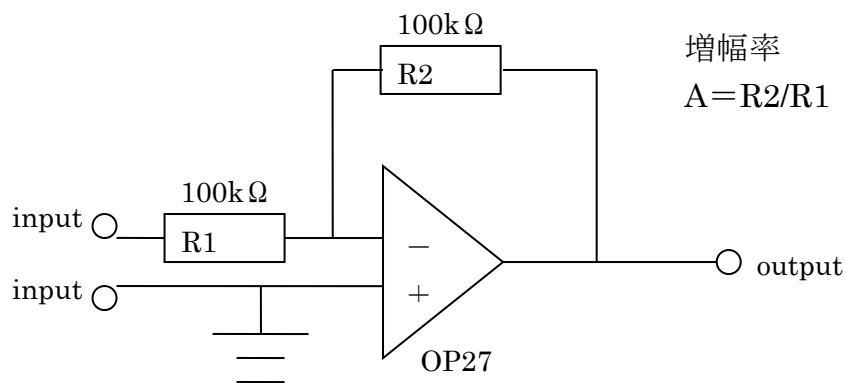


図 14 反転（増幅）回路

### 3. 結果

今回の実験は真空槽の外側からねじれ振りを操作できる仕組みになっていなかったの  
で、真空はひかずに単にふたをした状態で実験を行った。

まずダミーのアトラクタで真空槽のふたを開けたままで実験しようとする  
と、アンテナの回転方向の大きな振動が止まらなかった。そこでふたを閉めて丸一日待つと振動が止ま  
るのが確認できた。

しかしアトラクタを回してしまうと丸一日置いてもアンテナの振動が止まらなかった。  
レーザー光は QPD に収まらずに観測データは得られなかった。

## 4. 考察

アトラクタをとめた状態で真空槽のふたを閉めると一日置いておけばアンテナの信号は QPD に収まる事は確認できたことから、振動の原因はアトラクタが回っていたことによるものだと考えられる。

一番に考えられるのが、アトラクタの回転によって気流が生じることである。これを改善するには真空槽の中を真空にすることが第一にあげられる。そのためにまず、回路の配線が今のところ真空対応になってないので、真空対応に変える必要がある。また、今の実験装置だと振り子の位置調節器は毎回真空槽のふたを開けて調節しなければならないので、真空をひいての実験を実現するには真空槽の外から真空槽の内部を調節する仕組みが必要である。考えられる仕組みとしてはピコモーターを使うことが挙げられる。ピコモーターとは電圧をかけるとその分だけ移動させる装置であり、真空槽の外から電圧をかければその分だけ振り子の位置を調節できる。

あと考えられる原因としては、モーターの振動があげられる。今回の実験装置は、アンテナの懸架台にモーターが置いてある構造である（図 7 参照）。よってモーターが振動すると懸架台が揺れて、その結果アンテナも揺れることになる。モーターが懸架台をより揺らさない構造、例えば懸架台の底の板をモーター部分だけくりぬいてモーターは真空槽の底面に直接置いたり、モーターがおいてある部分だけ振動吸収剤を敷いたりすることなどがあげられる。