

特別実験レポート
共振型ねじれ振動子を用いた重力の逆二乗則の検証

05091507 牛場崇文
共同実験者 柴田和憲

2010年9月15日

目次

1	はじめに	2
1.1	実験の目的	2
1.2	実験の概要	2
1.3	零点法	3
2	実験装置	3
2.1	アンテナ	3
2.2	アトラクタ	4
2.3	超音波モーター	4
2.4	モーター制御回路	5
3	結果	6
4	考察	6
5	まとめ・今後の課題	7
6	補遺	7
6.1	アンテナの設計	7
6.2	静電型トランスデューサー・エキサイタの設計	8
6.3	空気中のアンテナの共振周波数および Q 値の測定	9
6.4	真空中のアンテナの共振周波数および Q 値の測定	11
6.5	プリアンプ・バンドパスフィルタの回路図と特性	12
6.6	モーターの制御電圧と回転周波数特性	16
6.7	PLL 制御回路の回路図	17
6.8	重力の大きさの理論計算	17
6.9	熱雑音の計算	18
	文献	19

1 はじめに

1.1 実験の目的

よく知られたように、重力による力はニュートンの逆二乗則に従い、そのポテンシャルは

$$\phi(\mathbf{r}) = -G \frac{M}{r} \quad (1)$$

と与えられる。しかし超弦理論によって4次元座標以外の余剰次元の存在が示唆されており、重力相互作用はその余剰次元へ染み出すために重力の逆二乗則が短距離では破れている可能性があるといわれている。そしてそれは実験的にサブミリ領域において観測できるとの予言もされている。今回の実験ではこのサブミリ領域における重力の逆二乗則を検証することを目的とする。また、それを通じて、実験に必要なエレクトロニクス技術、設計技術、測定技術などの習得も目的のひとつである。

1.2 実験の概要

重力の逆二乗則を検証する実験はワシントン大学の C.D.Hoyle 氏らが行っているものが有名である [1]。この実験では C.D.Hoyle 氏らの実験を参考にしつつ、検出器・検出法としては赤坂展昌氏が用いた共振型ねじれ振動子（以下、アンテナと呼ぶ）を用いた零点法を用いる [2]。これは、ねじれ型振動子は Q 値が高く熱雑音の影響が小さいため重力信号を検出するのに適しているからである。今回はそのための予備実験として設計したアンテナで重力信号を見る際の困難が何であるかを見つけ、それに対する解決策を模索するというを行った。以下に実験の概要を示す。アンテナの下で12個の穴の開いた円盤（以下、アトラクタと呼ぶ）を回転させるとアトラクタの周りの重力場が周期的に変化しアンテナにトルクが発生する（最終的な零点法を行う予備実験として C.D.Hoyle 氏らを用いた missing-mass を用いる方法での重力信号の検出を行っており、この方法は零点法ではない）。これを静電型トランスデューサーで電気的信号に変換し測定を行う。トランスデューサーからの信号はプリアンプで増幅されバンドパスフィルタ（B.P.F.）で共振周波数周辺の信号以外がカットされる。これをフェイズセンシティブディテクタ（P.S.D.）で積分し計算機のアナログ・デジタルコンバータ（A.D.C.）でサンプリングする。図1に実験のブロックダイアグラムを示す。

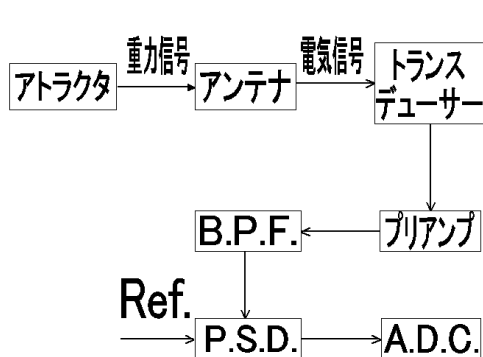


図1 実験のブロックダイアグラム

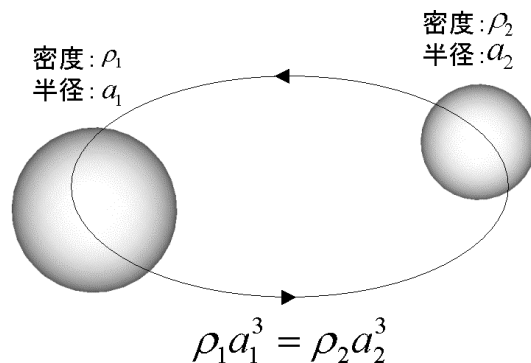


図2 零点法の系

1.3 零点法

図 2 のように質量が同じで半径の異なる二つの球からなる系を考える。重力が逆二乗則に従う場合の重力ポテンシャルは

$$\phi(\mathbf{r}) = -G \frac{M}{r} \quad (2)$$

とあらわせる。このとき図 2 の系の重力ポテンシャルは二回対称となるので、この系が作る重力場によってアンテナに発生させたトルクの基本波成分は 0 となる。一方、重力の逆二乗則が厳密に成り立たない場合に補正項として湯川ポテンシャルを考えれば

$$\phi(\mathbf{r}) = -G \frac{M}{r} + \phi_Y(\mathbf{r}), \quad \left(\phi_Y(\mathbf{r}) \equiv \frac{\alpha GM}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \right) \quad (3)$$

とあらわせる。このとき半径 a , 質量 M の球が自身の周りに作るポテンシャルの湯川項による効果は

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{\alpha GM}{r} F\left(\frac{a}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \quad (4)$$

となる [1]。ただし F は形状因子で

$$F(u) = 3 \frac{u \cosh u - \sinh u}{u^3} \quad (5)$$

である。したがって質量が等しくとも半径が異なる場合重力ポテンシャルが異なるので系の重力ポテンシャルの二回対称性が破れる。その結果この系がアンテナに発生させるトルクの基本波成分は 0 にならない。したがって、アンテナに働くトルクの基本波成分を測定することによって重力の逆二乗則が検証できる。

2 実験装置

2.1 アンテナ

今回実験で製作したアンテナは通常のねじれ型振動子とは異なり、下段が円柱から小さな円柱をくりぬいた形状をしている。これにより質量欠損部分 (missing-mass) 間に引力が働き通常のねじれ型振動子を用いるよりも大きなトルクを得ることができる。材質には Al5056 を用いることにより高い Q 値を持つアンテナとなり、重力検出により適したアンテナを製作することができる。最終的に設計したねじれ型振動子は 6.1 を参照。アンテナの大気中での共振周波数および Q 値は測定により、(補遺を参照)

$$f_0 = 18.684 \pm 0.001 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$Q = (3.9 \pm 0.4) \times 10^4 \quad (7)$$

と求まる。また同様の測定を真空中 (10Pa 程度) で行うことにより共振周波数と Q 値は

$$f_0 = 18.521 \pm 0.001 \text{ Hz} \quad (8)$$

$$Q = (9.6 \pm 0.5) \times 10^4 \quad (9)$$

と求まる。このことからアンテナの特性について以下のようなことがわかる。

- 1 一度アンテナが励起した場合、ダンピングに時間がかかる
- 2 アンテナは共振周波数での半値全幅は 10^{-4} Hz 程度である

したがって、この特性を実験に最大限に活かすためには

- 1 アンテナの励起を起こさないための防震系の製作
- 2 半値全幅に回転揺らぎが収まるような高精度のモーター回転制御

が必要となってくる。現在 1 に関してはアンテナをばねでつるすことで対応しているが、ばねが硬いものであり一段しかつるしていないので防震が十分であるとはいえない状況である。また 2 についてはモーターを PLL 制御する方法で対応しているが、現在は十分な精度の回転制御ができていない状況である（詳細は 2.4 参照）。

2.2 アトラクタ

アトラクタは厚さ 10mm、直径 230mm の Al 円盤に直径 30mm の円筒型の穴を 12 回対称に開けたものを用いた。実験で使用するモーターの回転周波数の上限が 2.5Hz であることと、アンテナの共振周波数が 20Hz 程度であることから $2.5 \times 12 = 30 > 20$ なので重力場の変調周波数を余裕を持ってアンテナの共振周波数に合わせることができる。図 3 にアトラクタの設計図を示す。

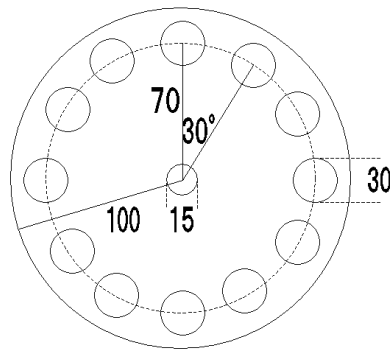


図 3 アトラクタの設計図

2.3 超音波モーター

今回の実験で用いる共振型ねじれ振動子は装置の振動に敏感に反応してしまうので、使用するモーターとしては回転のさいに自身の振動が小さいものがある必要がある。この点を考慮して今回の実験ではモーターとして超音波モーターを用いている。超音波モーターの動作原理は圧電素子に超音波を与えことによって発生する弾性体表面の波を摩擦力を介してモーターの回転に変換するというものである。図 4 にモーターの動作原理の図を示す（ただし、図中では圧電素子は省略されていて本来はステータ金属の下についている）。今回の実験で超音波モーターを用いる主な利点は以下の二つである。

1. 回転のさいの振動が少ない
2. 応答性が高く制御に優れる

一つ目は先も述べたとおりノイズを減らす上で非常に重要である。また、ホワイトノイズを減らすために長時間積分を行うためにはモーターの回転周波数をアンテナの共振周波数に追従させ同じ値にしておく必要がある。二つ目はこの制御を行う際に重要となる。一方、超音波モーターを使う際の留意点として以下の2つがあげられる。

1. 長時間使用するときの放熱
2. モーターから放出される電磁波の遮蔽

一つ目は長時間積分をするときモーターを破損させないために非常に重要である。今回はモーターから真空槽に熱を逃がすことで対応することとした。二つ目はモーターから発生した電磁波がプリアンプなどにノイズとして混入しないようにするために重要となる。今回はモーター全体をアルミホイルで覆ってモーターからの電磁波を遮蔽している。そのほかにもモーターの回転軸の磁化などが問題となるが、今回はモーターに非磁性体を用いることでその問題を解決している。

2.4 モーター制御回路

熱雑音などのホワイトノイズを小さくするために有効な手段として長時間の積分があげられる。アンテナの特性(2.1 参照)を最大限に利用するためにはモーターの周波数をのゆらぎを 10^{-5}Hz 程度まで抑える必要がある。これを行う手段として今回はモーターの PLL 制御を用いることにした。今回用いた PLL 制御回路のブロックダイアグラムを図 5 に示す。位相比較器に入力される二つの信号(入力信号とリファレンス信号)を $\sin(\omega_1 t)$ と $\sin(\omega_2 t + \phi)$ (ϕ は二つの信号の位相差)とすれば位相比較器からの出力は $\cos((\omega_1 - \omega_2)t - \phi) + \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi)$ となるので $\omega_1 \simeq \omega_2$ のときローパスフィルタを通して残る信号は第 1 項となる。この電圧をモーターの回転制御電圧にフィードバックすることにより位相が遅れている場合は回転周波数が早くなり、位相が進んでいる場合は回転周波数が遅くなり、最終的に入力信号とリファレンス信号の位相差が $\pi/2$ となったときに位相比較器の出力電圧が 0 となり位相がロックされる。今回の実験では基準信号としてファンクションジェネレータの正弦波を用いている。また、エンコーダ信号はモーターの回転周波数の 500 倍の方形波信号である。この制御によってモーターの回転周波数の揺らぎを 2Hz 付近で 10^{-3}Hz 程度に抑えられるが目標とする回転制御 10^{-5}Hz には届いていないのが現状である。この原因としては以下のようなものが考えられる。

- 1 ローパスフィルタの抵抗値などのパラメータの最適化ができていない
- 2 モーターからのエンコーダ信号が方形波である
- 3 回路全体が発振している

1 に関しては回路のオープンループ伝達関数を測定することにより理論的にパラメータの決定することが可能である。2 に関しては位相比較器に入力する前のエンコーダ信号をバンドパスフィルタを通すことによって基本は成分のみにできる。3 に関しては回路全体として入力信号の周波数域で位相が π 遅れてしまうことが原因なので、ローパスフィルタと並列に微分回路の出力を足し合わせることで出力の位相を進め回路の安定性を高めることで解消できると考えられる。

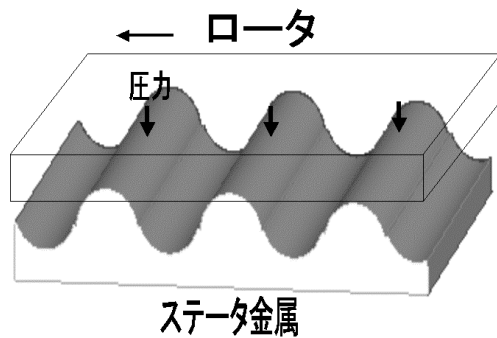


図4 モーターの動作原理

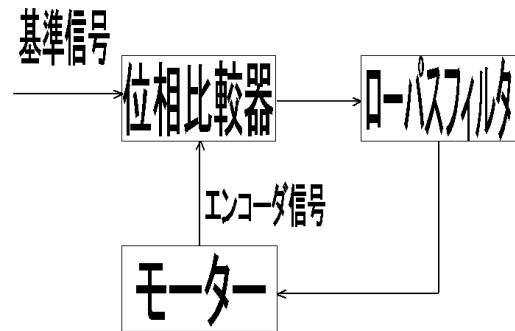


図5 PLL 制御回路のブロックダイアグラム

3 結果

真空中でアトラクタを回転させ静電型トランスデューサーの出力を見ると 10V 程度のビートが見られた。このビートの周波数は 2Hz であるので、共振周波数から 2Hz 程度ずれた信号が出力されていることがわかった。

4 考察

実験によって得られたビートが重力信号であったとすると、アンテナの励起の振幅は $\Delta x = 2 \times 10^{-10} \text{m}$ 程度なので (6.8 参照) それによって変化する電荷は

$$\Delta Q = \epsilon_0 \frac{SV}{d^2} \Delta x = 2.7 \times 10^{-14} \text{C} \quad (10)$$

と近似できる。したがってトランスデューサーから流れる電流は電荷の移動量を 1 周期で平均して

$$I = 2.0 \times 10^{-12} \text{ A} \quad (11)$$

となる。これが $2\text{G}\Omega$ の抵抗で電圧に変換されるのでプリアンプへの入力電圧は

$$V = 4.0 \times 10^{-5} \text{ V} \quad (12)$$

となる。これがプリアンプおよびバンドパスフィルタで増幅された値が出力信号となるので得られる出力信号は

$$V_{sig} = 1.8 \times 10^{-1} \text{ V} \quad (13)$$

と求まる。これを得られた結果と比較すると、実験によって得られたビートは重力信号ではないことがわかる。今回得られたビートの原因としてあげられるものを以下に示す。

- 1 アトラクタ中の磁性体の磁化により発生した電磁波によるトランスデューサーの容量の変化
- 2 モーターからの電磁波によるトランスデューサーの容量の変化

これらの検証はまだできておらず今後の課題である。

5 まとめ・今後の課題

今回の特別実験で目標としていた重力信号の検出は達成できなかった。主な原因としては考察でも述べたとおり (4 参照)

- 1 アトラクタ中の磁性体の磁化により発生した電磁波によるトランスデューサーの容量の変化
- 2 モーターからの電磁波によるトランスデューサーの容量の変化

が起ってしまったことにあると思われるので、これが本当にビートの原因となっているのかを検証することが第一の課題である。また、重力信号をより精密に得るために長時間積分を行うにはアンテナの Q 値に対してモーターの回転制御があまく、Q 値の高さを有効に使うことができていないので制御回路に改良を施し 0.01% 程度まで周波数の揺らぎを抑えることが第二の課題である。

6 補遺

6.1 アンテナの設計

共振型ねじれ振動子は図 6.7 のようになっており、この共振周波数は

$$f_0 = d^4 \sqrt{\frac{\mu}{128\pi h I}} \quad (14)$$

とあらわされる [3]。ここで I はアンテナの中心軸周りの慣性モーメントであり、

$$I = \rho a^4 t \left[\phi + \frac{1}{3} \sin \phi \cos \phi (1 + 2 \sin^2 \phi) \right] \quad (15)$$

とあらわされる。また μ は Lamé の弾性定数と呼ばれ、常温 (290K) で

$$\mu = 2.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (16)$$

となる [3]。(14) 式からもわかるように d を小さくすることによって共振周波数を下げることが可能であるが d を小さくしすぎるとアンテナの耐久性を著しく損なってしまうため今回の設計では $d=0.8\text{mm}$ とした。また a を大きくとればその分トルクも大きくなり大きな信号を得られるが、製作の都合で $a = 115\text{mm}$ とした。共振周波数が小さいほうがピークの半値振幅の幅が小さくなるのでより精度の高い測定を行うことができる。これを考慮して今回の実験では最終的に

$$a = 115 \text{ mm} , d = 0.8 \text{ mm} , h = 20 \text{ mm} , t = 100 \text{ mm} , \phi = 29.725^\circ \quad (17)$$

としてアンテナを製作した。ただし実際のアンテナでは下段を上段と同じ形ではなく円柱から小さな円柱を 1 2 回対称となるようにくりぬいたものを製作した。この際上段部分の慣性モーメントと下段部分の慣性モーメントが等しくなるように設計した。図 8, 9 に最終的なアンテナの設計図を示す。

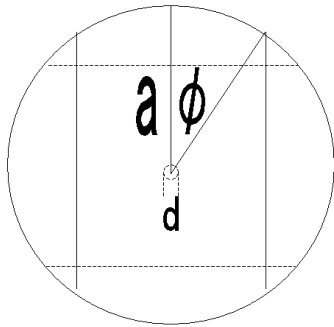


図 6 通常のアンテナの上面図

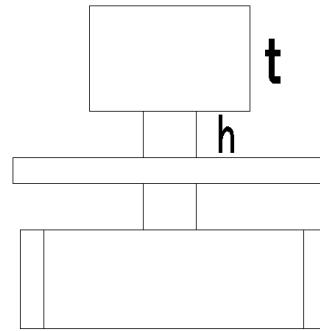


図 7 通常のアンテナの側面図

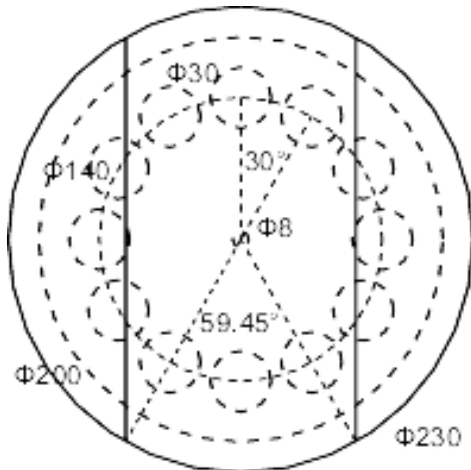


図 8 製作したアンテナの上面図

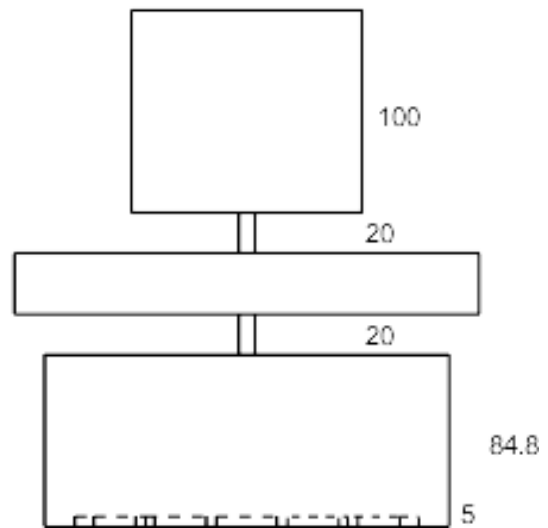


図 9 製作したアンテナの側面図

6.2 静電型トランスデューサー・エキサイタの設計

アンテナの信号処理に利用する静電型トランスデューサーおよびエキサイタの構造はアンテナの側面にアルミの平板を取り付けるというものである。取り付けた平板とアンテナがつくる平板コンデンサの容量を測定することによって静電容量は

$$C_{trans} = 740 \pm 2 \text{ pF}, C_{ex} = 420 \pm 2 \text{ pF} \quad (18)$$

と求まる。このコンデンサの静電容量が

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (19)$$

を満たすと考えると（ここで S はコンデンサの面積、 d はコンデンサの極板間距離）取り付けられた静電型トランスデューサーとエキサイタのアンテナとの間の距離は

$$d_{trans} = 83 \mu\text{m}, d_{ex} = 150 \mu\text{m} \quad (20)$$

と求めることができる。したがってバイアス電圧を 90V としたときにトランスデューサーの極板間に発生する電界の大きさは

$$E = \frac{V}{d} = 1.08 \times 10^6 \text{ V/m} \quad (21)$$

と求まる。これから極板間の距離の変化と極板間の電圧変化の関係を求めると極板間の電界の変化を無視する近似で

$$\Delta V = E\Delta x = 1.08 \times 10^6 \Delta x \quad (22)$$

となる。

6.3 空気中のアンテナの共振周波数および Q 値の測定

実験のブロックダイアグラムを図 10 に示す。共振周波数はアンテナを木槌でたたいて励起させ、フォトセンサーによって電気信号に変え、スペクトラム・アナライザーを用いた Fast Fourier Transformation (F.F.T.) を用いて解析する。それによって得られたデータを図 11 に示す。このデータから共振周波数は

$$f_0 = 18.684 \pm 0.001 \text{ Hz} \quad (23)$$

と求まる。次にアンテナの Q 値はアンテナの減衰振動の時定数と

$$\tau = \frac{2Q}{\omega_0} \quad (24)$$

の関係があるので、パワースペクトルのピークの時間変化を調べることにより求めることができる。パワースペクトルのピークの時間変化を横軸を時間、縦軸をピーク値として対数グラフにプロットしたグラフを図 12 に示す（図中の直線はデータ点をフィッティングした直線）。このグラフの傾きから Q 値を求めると

$$Q = (3.9 \pm 0.4) \times 10^4 \quad (25)$$

と求まる。

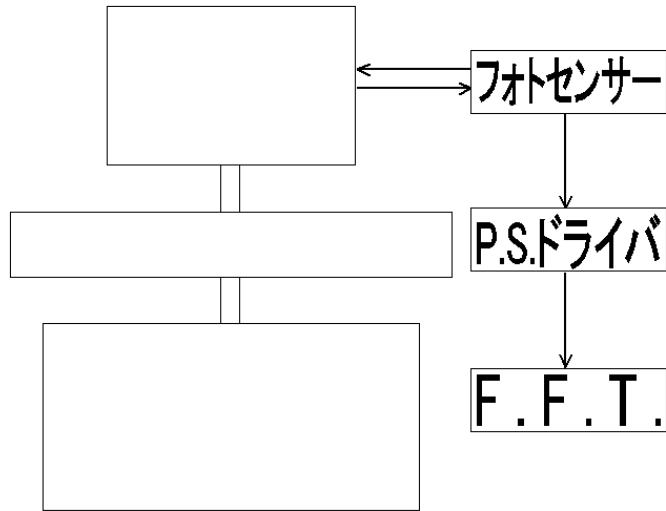


図 10 共振周波数・Q 値を求める実験のダイアグラム

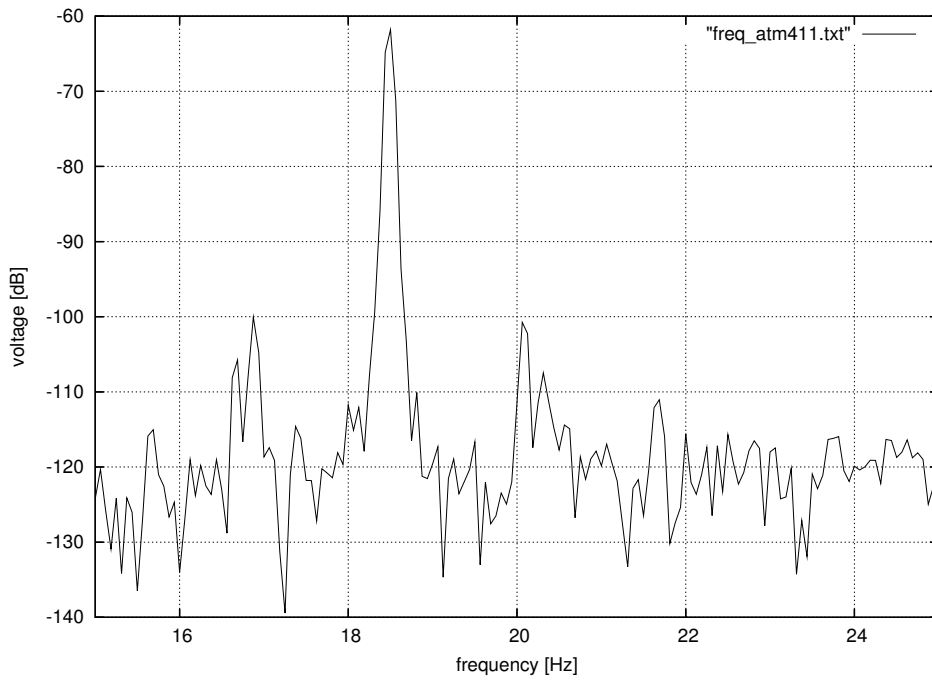


図 11 共振周波数の測定データ

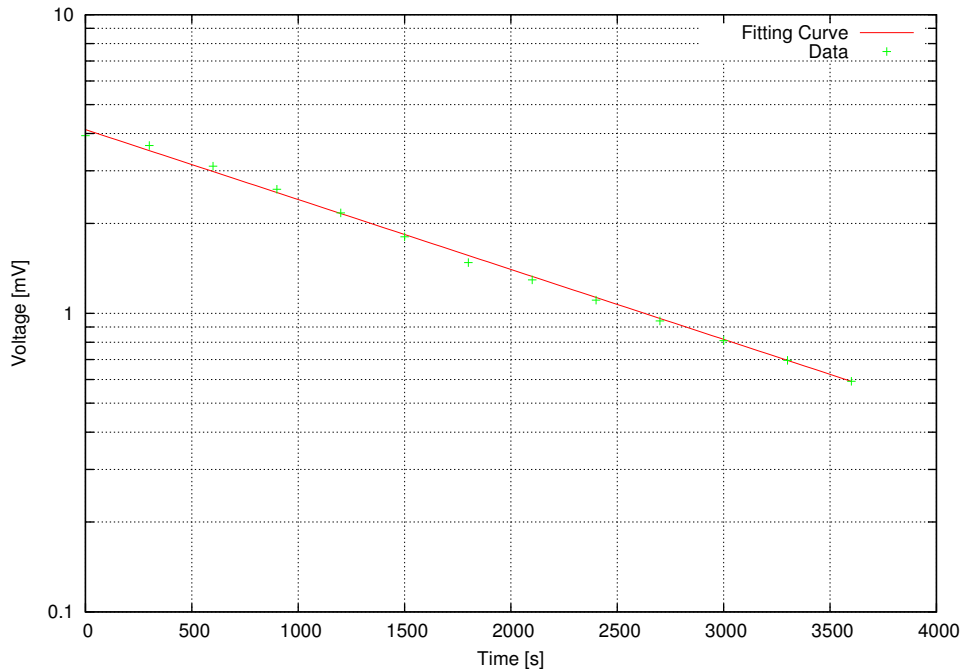


図 12 大気圧中でのパワースペクトルのピークの時間変化

6.4 真空中のアンテナの共振周波数および Q 値の測定

真空中での共振周波数の測定はエキサイタおよびトランスデューサーを用いて行う（エキサイタ・トランスデューサーの詳細は 6.2 参照）。空気中での共振周波数と一致した信号をエキサイタにファンクションジェネレーターを用いて入れると真空中での共振周波数とのずれがあるため信号に

$$n = |f_0^{atm} - f_0^{vacuum}| \text{ Hz} \quad (26)$$

のうなりが観測できる。したがってファンクションジェネレーターの周波数を変化させてうなりが消える周波数が共振周波数であることがわかる。この方法を用いて真空中での共振周波数を測ることにより

$$f_0 = 18.521 \pm 0.001 \text{ Hz} \quad (27)$$

と求まる。また、この状態でエキサイタに入力しているファンクションジェネレーターからの信号をとめることにより式 (24) であらわされる時定数で信号が減衰する。したがってその時間変化を計測することにより Q 値を得ることができる。図 13 に得られたパワースペクトルのピーク値の時間変化を示す。これを用いて Q 値を計算することにより Q 値は

$$Q = (9.6 \pm 0.5) \times 10^4 \quad (28)$$

と求まる。

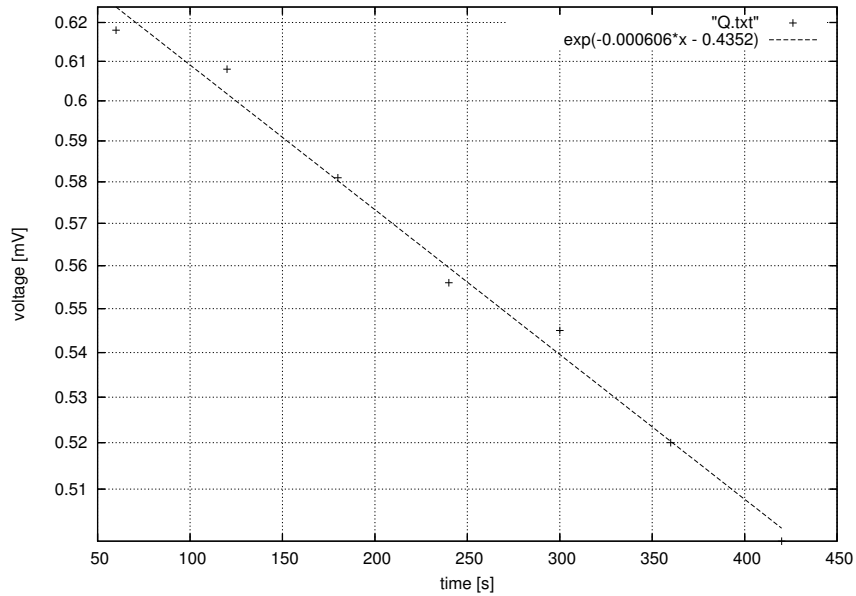


図 13 真空中でのパワースペクトルの時間変化

6.5 プリアンプ・バンドパスフィルタの回路図と特性

図 14,15 に実験で製作したプリアンプおよびバンドパスフィルタの回路図を示す。この回路で作ったプリアンプの gain の周波数特性を測定したデータを図 16 に、位相の周波数特性を測定したデータを図 17 に、ノイズを測定したデータを図 18 に示す。共振周波数付近でのノイズは入力換算で $11\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度なのでアンテナの振幅としては 10^{-14}m 程度の信号まで見ることが可能である。また製作したバンドパスフィルタの gain の周波数特性を測定したデータを図 19 に、位相の周波数特性を測定したデータを図 20 に、ノイズを測定したデータを図 21 に示す。バンドパスフィルタはノイズが多いことがデータからわかるが図 20 から回路自身が発振していることが原因である可能性がある。

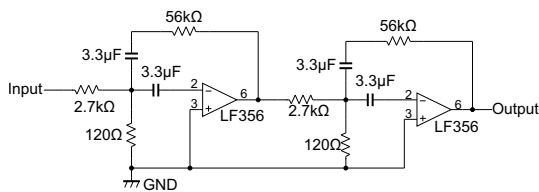


図 14 バンドパスフィルタの回路図

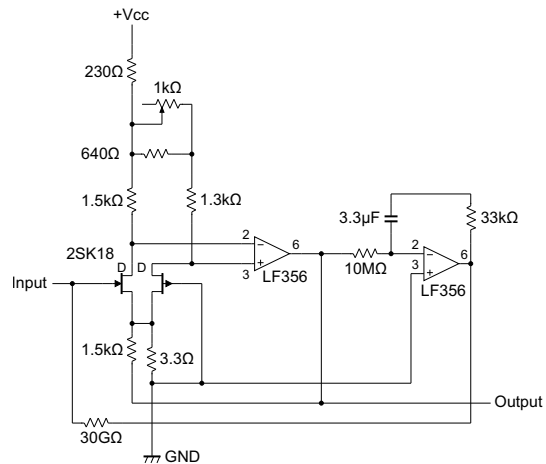


図 15 プリアンプの回路図

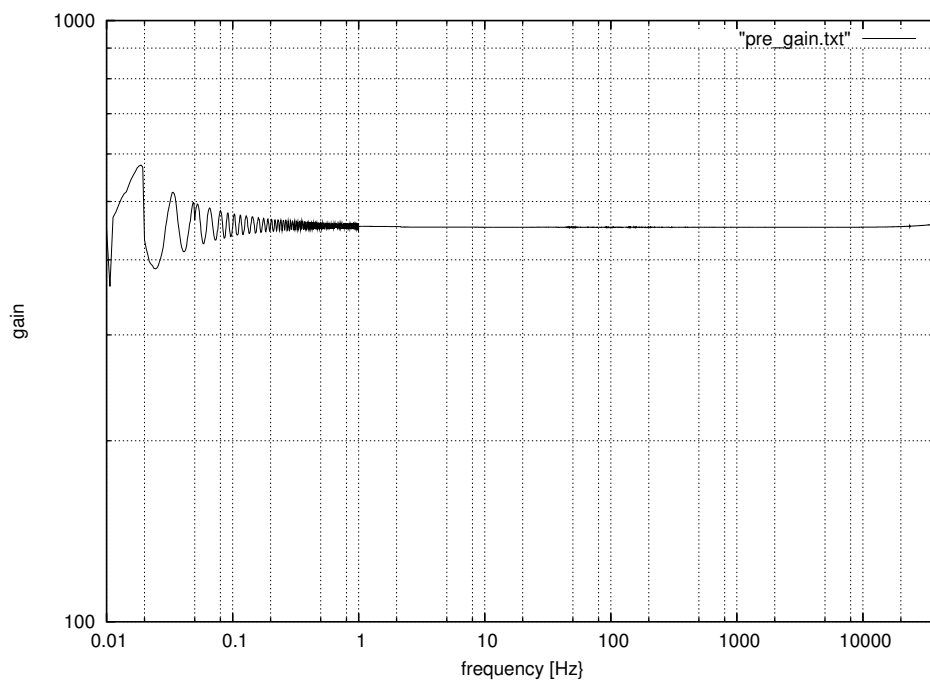


図 16 プリアンプの gain の周波数特性

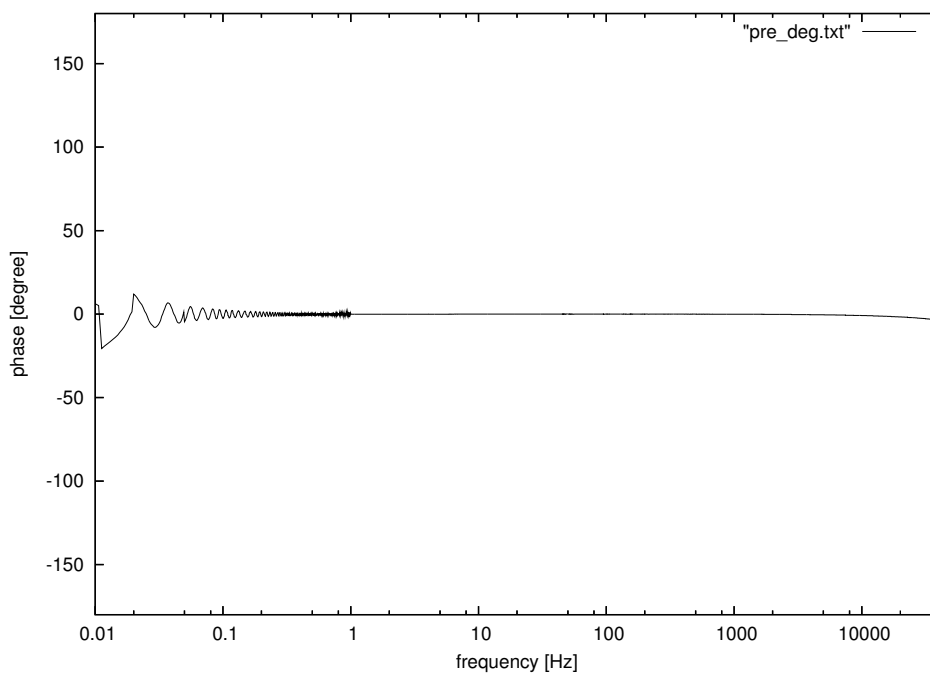


図 17 プリアンプの位相の周波数特性

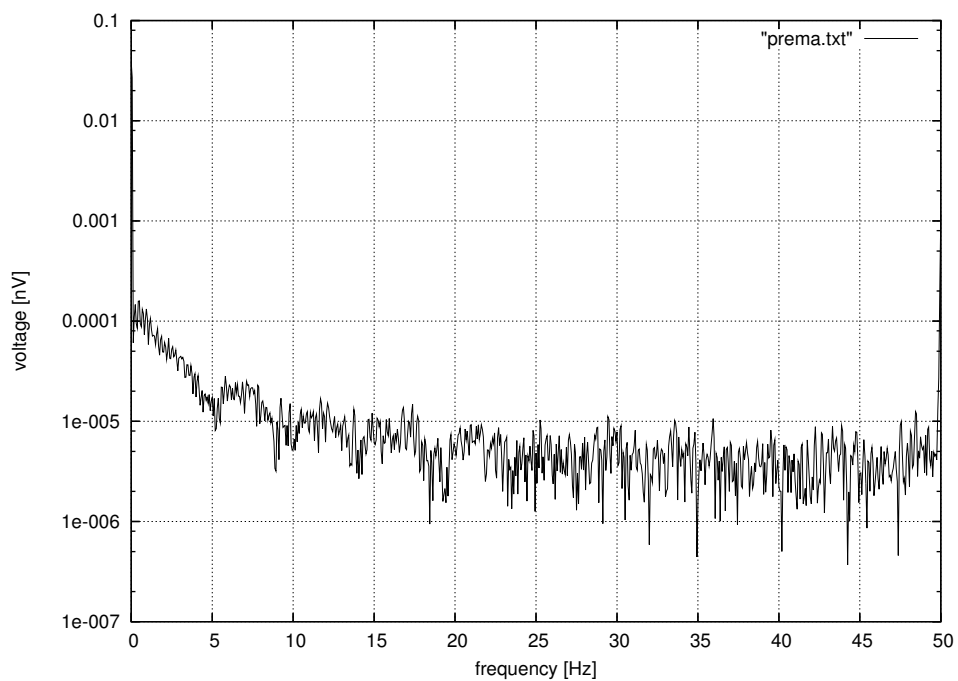


図 18 プリアンプのノイズ

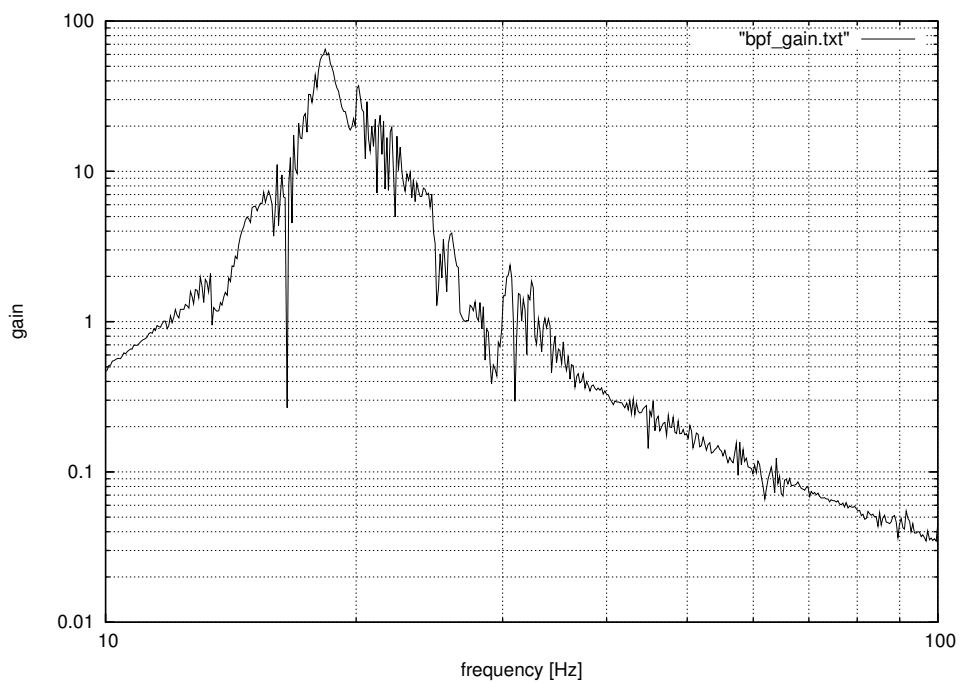


図 19 バンドパスフィルタの gain の周波数特性

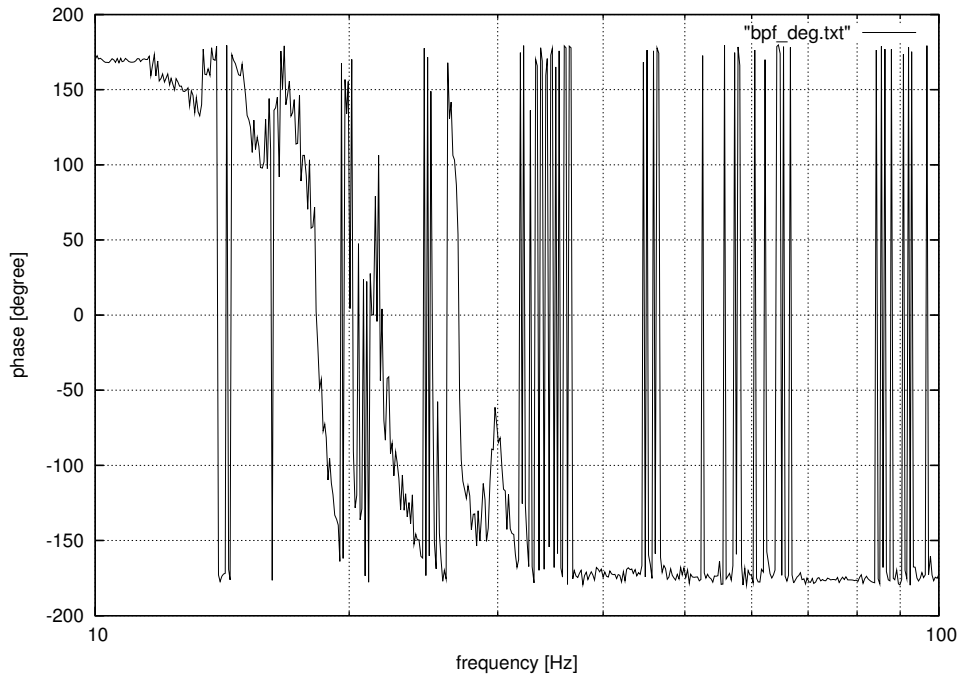


図 20 バンドパスフィルタの位相の周波数特性

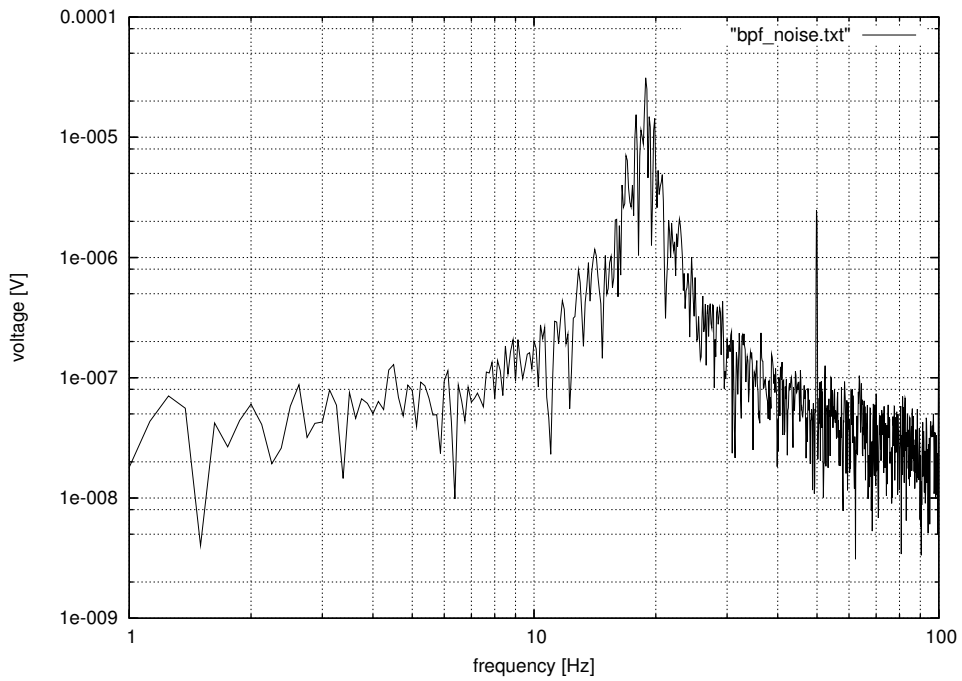


図 21 バンドパスフィルタのノイズ

6.6 モーターの制御電圧と回転周波数特性

図 22,23 に制御電圧に対するモーターの回転周波数特性の測定結果を示す。アトラクタをつけた場合とつけていない場合でどちらもほとんど違いは見られず、制御電圧に対してリニアに回転周波数が増加していくことがわかる。

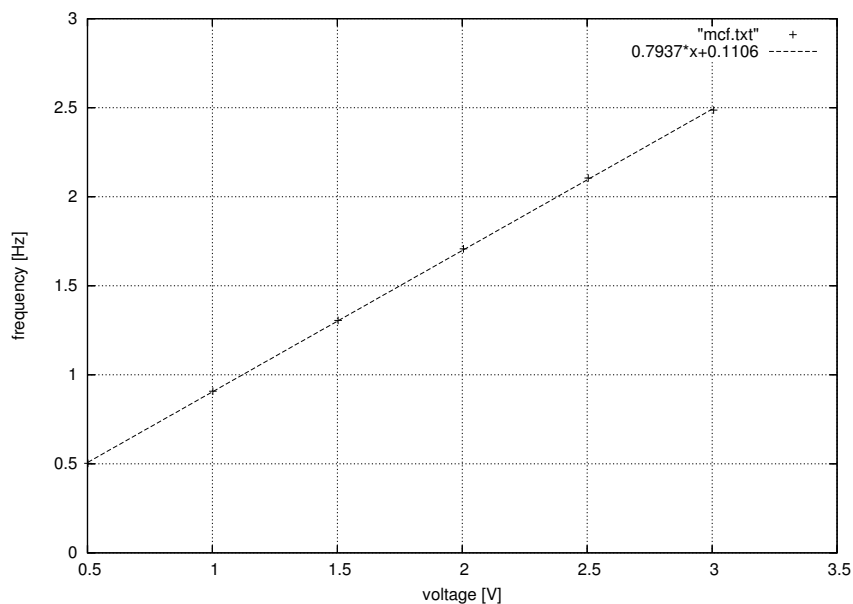


図 22 モーターの制御電圧と回転周波数の関係（アトラクタなし）

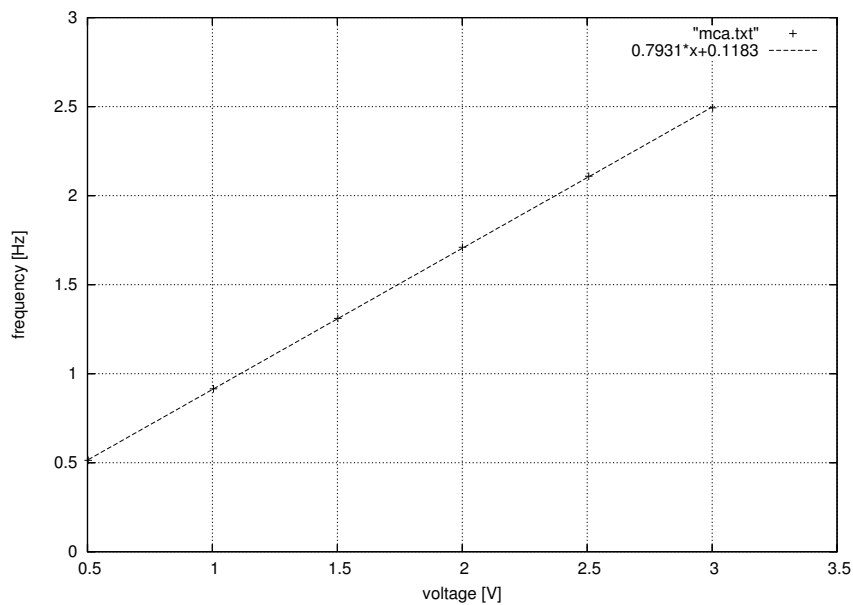


図 23 モーターの制御電圧と回転周波数の関係（アトラクタあり）

6.7 PLL 制御回路の回路図

図 24 に PLL 制御回路の回路図を示す。

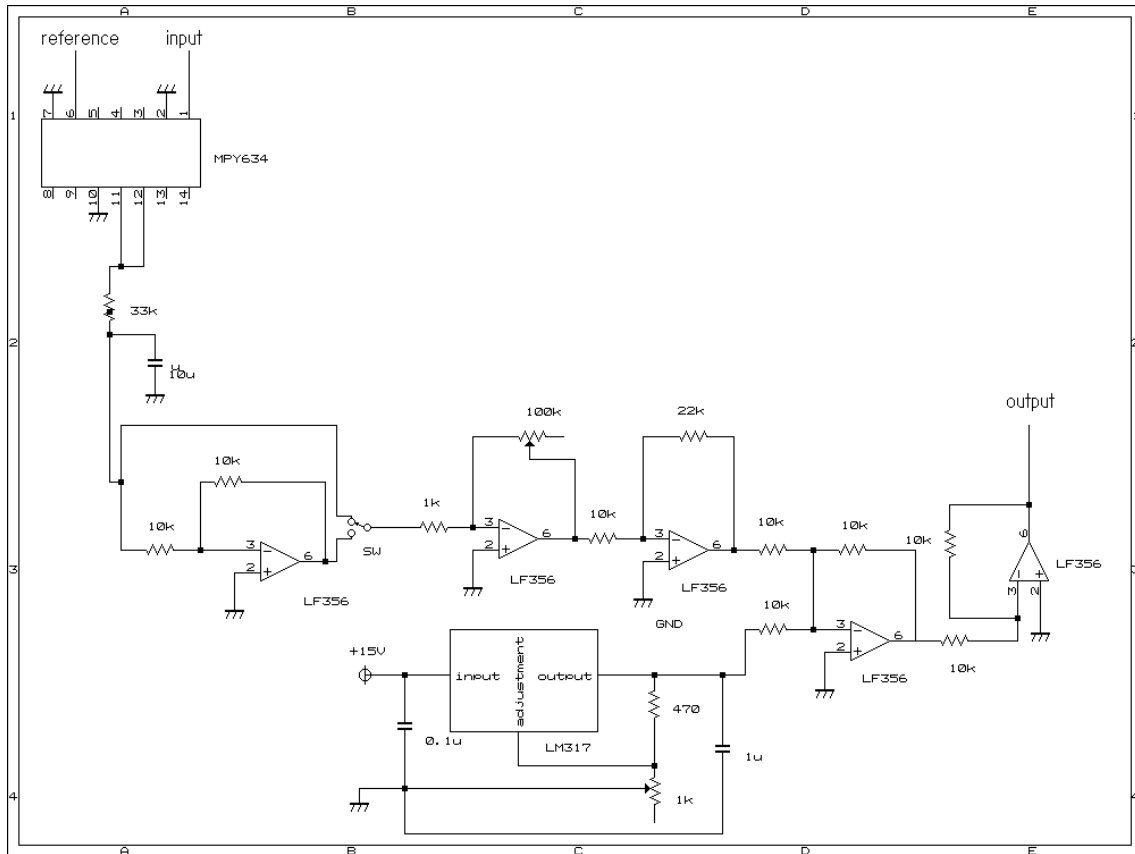


図 24 PLL 制御回路の回路図

6.8 重力の大きさの理論計算

厳密に重力が逆二乗則に従うとして今回の実験で製作したアンテナがどの程度の振幅で励起されるのかを計算する。逆二乗則に従う重力場のポテンシャルは

$$\phi(\vec{x}) = \int \frac{\rho(\vec{x}')}{|\vec{x} - \vec{x}'|} d\vec{x}' \quad (29)$$

とあらわせる。このときアンテナに働くトルクは

$$T = \int \rho(\vec{x}) \vec{w}(\vec{x}) \cdot \nabla \phi(\vec{x}) d\vec{x} \quad (30)$$

とあらわせる [1]。ただし、 $\vec{w}(\vec{x}) = (-y, x, 0)$ である。また、トルクとアンテナの振幅の間には

$$\Delta x = \frac{QTa}{I\omega_0^2} \quad (31)$$

の関係がある (a はアンテナの半径) ので、これを計算機の数値積分によって評価することによりアンテナの振幅は

$$\Delta x \sim 2.0 \times 10^{-10} \text{ m} \quad (32)$$

と求めることができる。

6.9 熱雑音の計算

データに混入する熱雑音の二乗平均は

$$\sqrt{\Delta N^2} = \sqrt{\frac{4I\omega_0 k_B T}{Qt}} \quad (33)$$

とあらわせるので、 $I = 0.034 \text{ kgm}$, $\omega_0 = 2\pi \times 18.521 \text{ rad/s}$, $T = 300 \text{ K}$, $t = 3600 \text{ s}$, $Q = 9.5 \times 10^4$ とし
て計算すれば、

$$\sqrt{\Delta N^2} \simeq 1.38 \times 10^{-14} \text{ kgm} \quad (34)$$

と求まる。ポテンシャルの逆二乗則からのずれを湯川項であらわせば

$$\phi = -\frac{GM}{r} + \frac{\alpha GM}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \quad (35)$$

ここで r/λ が小さいとすれば、テイラー展開の一次までを取って

$$\phi(\vec{x}) \sim (1 - \alpha) \frac{GM}{r} + \frac{\alpha GM}{\lambda} \quad (36)$$

となる。したがって、逆二乗則に従うポテンシャルによって発生するトルクと逆二乗則からのずれを湯川項に
仮定したポテンシャルによって発生するトルクの差は

$$T = \int \rho(\vec{x}) \vec{w} \nabla \alpha \frac{GM}{r} d^3x \sim 10^{-11} \alpha \quad (37)$$

となる。これが熱雑音と等しくなる α がアッパーリミットとしてもとまるとすれば

$$\alpha \sim 10^{-3} \quad (38)$$

の精度で α のアッパーリミットを決めることができる。

参考文献

- [1] D. J. Kapner, T. S. Cook, E. G. Adelberger, J. H. Gundlach, B. R. Heckel, C. D. Hoyle and H. E. Swanson :Phys.Rev.D70(2004)
- [2] 赤坂展昌 『零点法による重力の逆二乗法則の検証』 (東京大学理学部物理学科修士論文, 1987)
- [3] S. Kimura, T. Suzuki and H.Hirakawa :Phys. Lett. 81A (1981) 5
- [4] 坪野公夫, 麻生洋一, 岡田健志 『ブラウン運動』 (物理学実験 テキスト, 2009)
- [5] 角田秀夫 『PLL の基本と応用』 (東京電機大学出版局, 1978.3)
- [6] 柳沢健 『PLL(位相同期ループ) の応用回路』 (総合電子出版社, 1977.9)
- [7] 正田亜八香 『DECIGO pathfinder における試験マスモジュールの制御実験』 (坪野研究室 4 年生特別実験, 2009 夏)
- [8] 道村唯太 『DPF における試験マスモジュールの 3 自由度デジタル制御』 (坪野研究室 4 年生特別実験, 2009 夏)
- [9] 岡村迪夫 『定本 OP アンプ回路の設計 再現性を重視した設計の基本から応用まで』 (CQ 出版, 1990)