

特別実験 1

補助共振器を用いた Fabry-Perot 型共振器の安定化

実験期間 1999/4/12 ~ 9/14

理学部 物理学科 81514H 榎並 太平

共同実験者

81503 麻生 洋一

目次

1	目的	2
2	基礎実験	2
2.1	15V 直流電源の製作	2
2.2	Beam Profile の測定	3
2.2.1	Measuring the Beam Profile	3
2.3	Mode Matching	5
2.3.1	Eigen modes of the Fabry-Perot cavity	5
2.3.2	Mode Matching of the laser beam to Eigen modes of the Fabry-Perot cavity	6
2.3.3	アラインメント合わせ	7
2.3.4	アラインメント制御	8
2.3.5	Openloop 伝達関数	9
2.3.6	入射鏡のレンズ効果	10
3	2 段振り子	10
3.1	実験回路のセットアップ	10
3.2	測定	11
4	今後の課題	13

1 目的

重力波の信号は非常に弱いため、干渉計の検出感度をあげるために様々な雑音を除去しなければならない。雑音の原因としては次のようなものがある。

- 光源： 散乱雑音、ビームジッターなど
- 地面振動
- 熱雑音、その他

この実験では次ページに示すような Fabry-Perot 型干渉計を 2 組用いて、上段の干渉計で変位を検出して、その変位とは逆方向に力を加えることで上段の鏡の振動を押さえる。これによって下段の鏡への低周波の振動が伝播するのを防ぐことを目的としている。具体的には次のようなことを目的とした。

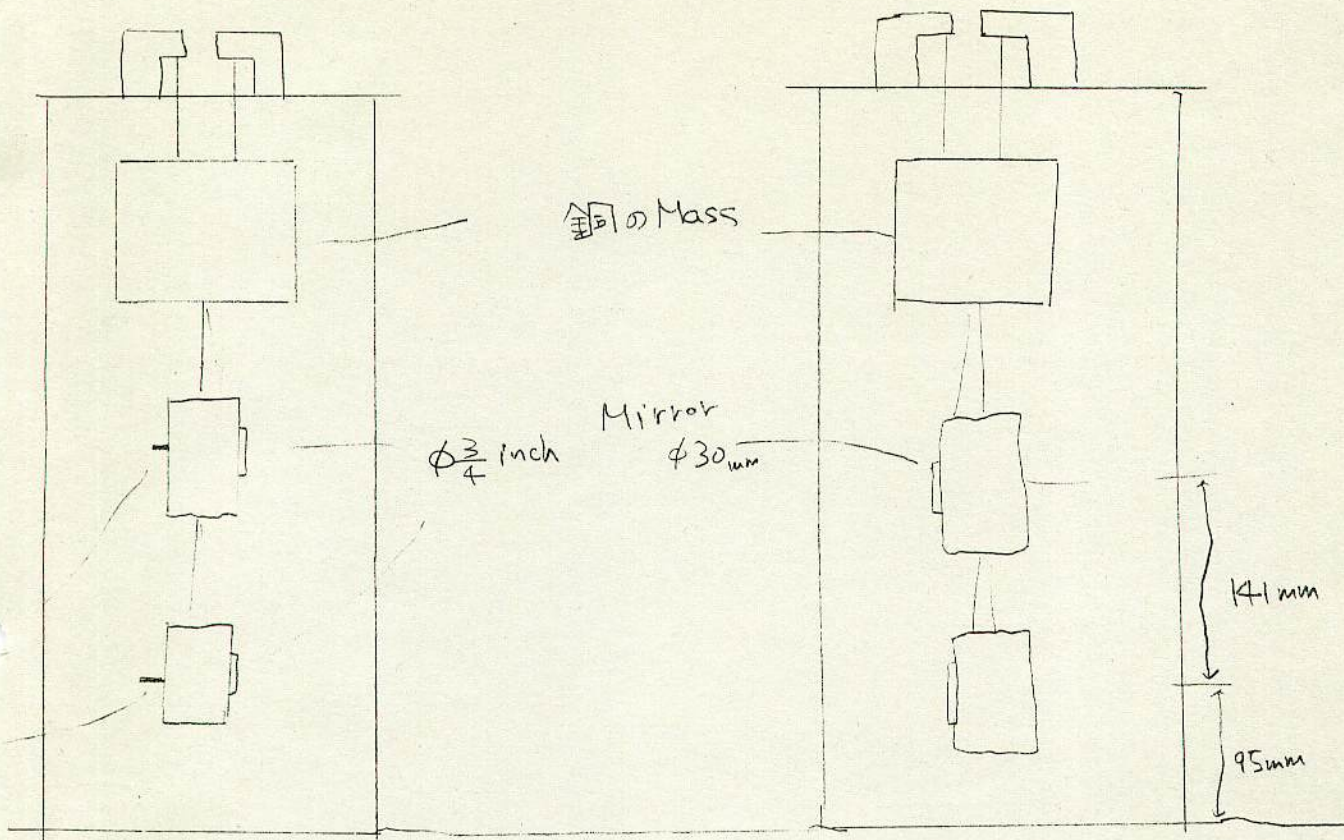
- FP cavity のアラインメント制御をおこなう。
- 2 段振り子の上段をアクティブに制御することで下段を定常的にロックさせる。
- 下段はどの程度動いているかをみる。

実際には 2 段振り子の上段をロックさせるだけで終了した。Unity Gain Frequency は 750Hz 付近で位相余裕は 16.5° であり、キャビティ長制御のループは正しく働いていることを確認した。今後の課題としては下段が定常的にロックすることを見た後に、下段がどれぐらい揺れているかを測定するということがある。

2 基礎実験

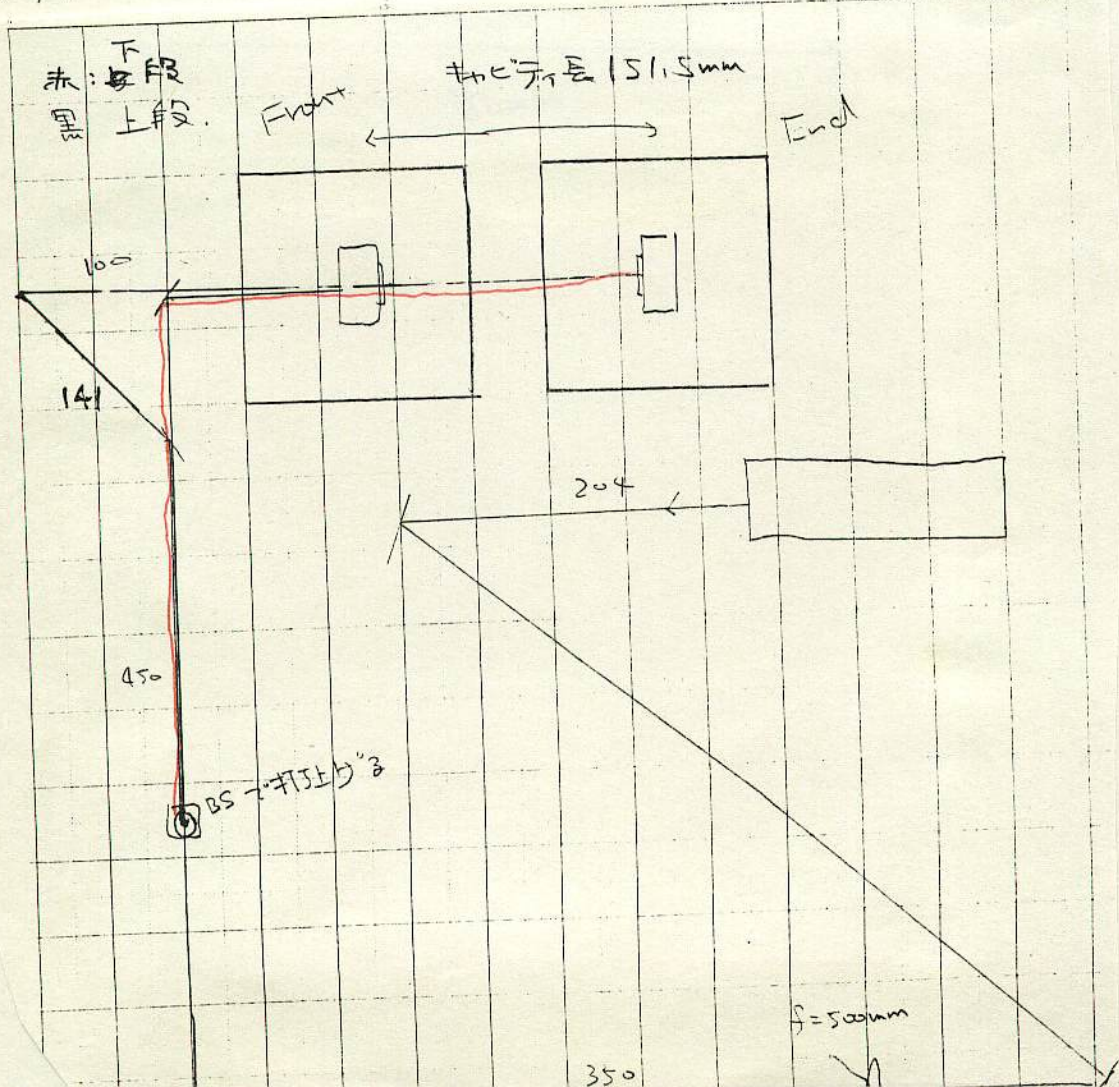
2.1 15V 直流電源の製作

トランスなどを用いて、100V の交流から 15V の直流へ変換する回路を製作した。この電源は以下の実験で、各種回路のための電源として用いている。



End Mirror

Front Mirror



2.2 Beam Profile の測定

2.2.1 Measuring the Beam Profile

モードマッチングを行うために光源の Beam Profile を次のような方法で測定した。光源として LIGHTWAVE 社の Nd:YAG レーザー Model 126 を用いた。レーザーの光軸上に Photo Detector を置き、その間にナイフエッジを通過させる。レーザー断面上の強度分布は Gaussian で表されていると考えられる。

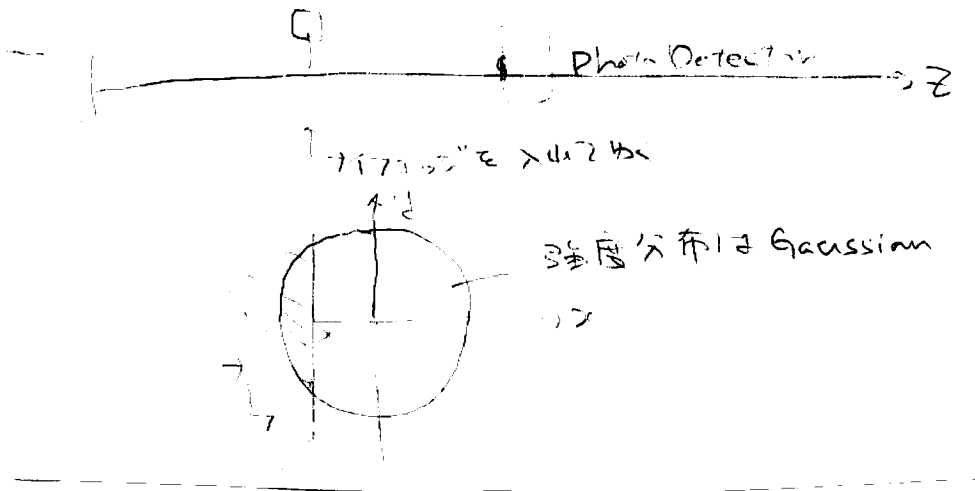


図 ナイフエッジ

つまり、Photo Detector で観測される光の強度 I は次の式に比例する。

$$I = \int_x^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha x^2} dy dx \quad (1)$$

ナイフエッジの位置 x を変えて何点か測定し、これを Mathematica でフィットすれば、強度が軸上の $\frac{1}{e^2}$ となるビーム径を知ることができる。さらに、ナイフエッジのレーザーからの距離を変えて何点かとりフィットすれば、ビーム径 $\omega(z)$ のビームプロファイル (含むエスト) がわかる。ナイフエッジによる測定例を次に示す。また得られたビームプロファイルをを表 1 に示す。

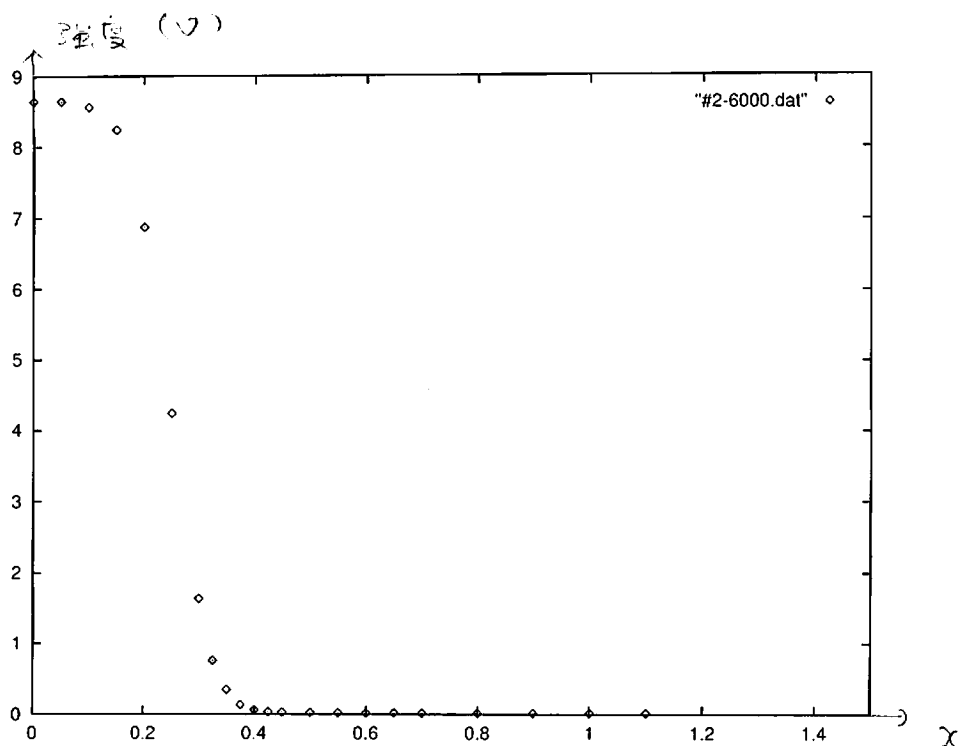


図 ナイフエッジによる光の強度変化

表 1: Beam Profile [mm]

	waist position	waist
x 方向	61.9	0.131
y 方向	73.1	0.150

ここで x 、 y 軸はレーザー発振器についている「Model 126」というラベルが y 軸上向きになるようにとった。

ナイフエッジによる測定値を理論曲線にフィットさせると、 y が大きくなる場所、つまり光の強度が低い場所では実測値は理論曲線ほど落ちてこない。これは、実験室内の光を Photo Detector が拾っているためであろう。実際、レーザー光を入射しないときの光の強度は 15mV ほどあり、レーザー光強度が低い場所ではこちらが主になっていると思われる。ナイフエッジによる測定値のうち、室内光の影響が大きくなっていくと思われる $y \geq 0.2$ を落として、フィットしてみたところ、表 2 のようなビームプロファイルを得た。これらの結果より、このレーザーは光学台に対して水平方向と垂直方向で異なったウェスト位置を持つ楕円ビームであることがわかる。

表 2: Beam Profile [mm]

	waist position	waist
x 方向	63.8	0.127
y 方向	72.3	0.149

2.3 Mode Matching

次節で述べる FP cavity の基本モードのウエストの式から、 $w_1^2 = 4.217 \times 10^{-8} [m]$ である。これよりこの実験で用いる cavity の固有モードのウエストは、 $2w_1 = 205 [\mu m]$ とわかる。レーザーの固有モードをこの cavity の固有モードに合うように、レンズを入れるなどして光学系を設計した。レーザーは x、y 方向ともに同じ位置に同じ太さのウエストを持つとして、Laser のウエスト位置 $z_3 = 67.5 mm$ 、太さ $w_0 = 0.14 nm$ と x、y 方向を単純平均した。

2.3.1 Eigen modes of the Fabry-Perot cavity

入射光と FP cavity のモードを合わせる際にアラインメント合わせとモードマッチングを行わなければならない。モードマッチングを行う際に、図 1 のような Fabry-Perot cavity を考える。 R_1, R_2 はそれぞれのレンズの曲率半径である。キャビティのビームウエストの太さを w_1 、キャビティの入り口からの距離を z_1 とすると、

$$w_1^2 = \frac{\lambda d}{\pi} \sqrt{\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2}} \quad (2)$$

という関係がある。

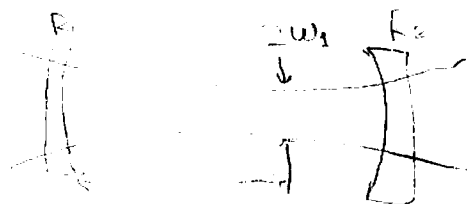


図 1 FP Cavity の固有モード

$R_1 = 250 mm, R_2 = 1000 mm, d = 150 mm$ とすれば、

$$g_1 = 1 - \frac{d}{R_1} = 0.4 \quad (3)$$

$$g_2 = 1 - \frac{d}{R_2} = 0.85 \quad (4)$$

これより、

$$w_1^2 = \frac{\lambda d}{\pi} \sqrt{\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2}} \quad (5)$$

$$= 4.217 \times 10^{-8} \text{ [m}^2\text{]} \quad (6)$$

よって $w_1 = 205 \text{ } \mu\text{m}$ となる。

$$z_1 = \frac{g_2(1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} d = 134 \text{ [mm]} \quad (7)$$

2.3.2 Mode Matching of the laser beam to Eigen modes of the Fabry-Perot cavity

次に光源とキャビティの間にレンズを挟むことで入射光の固有モードを FP Cavity の固有モードに合わせる。この際、変数としては挟むレンズの焦点距離 f 、その位置、光源から cavity までの距離がある。

今、レーザーの持つウエスト位置を d_0 、太さを ω_0 とし、レンズを通したあとにできるウエスト位置を d_2 、太さを ω_2 とする。このとき、

$$\frac{d_0 - f}{d_2 - f} = \frac{\omega_0^2}{\omega_2^2} \quad (8)$$

$$(d_0 - f)(d_2 - f) = f^2 - f_0^2 \quad (9)$$

ただし、 $f_0 = \frac{\pi \omega_0 \omega_2}{\lambda}$ とした。これより光源からレンズまでの距離 d_0 とレンズから cavity までの距離 d_2 がわかる。

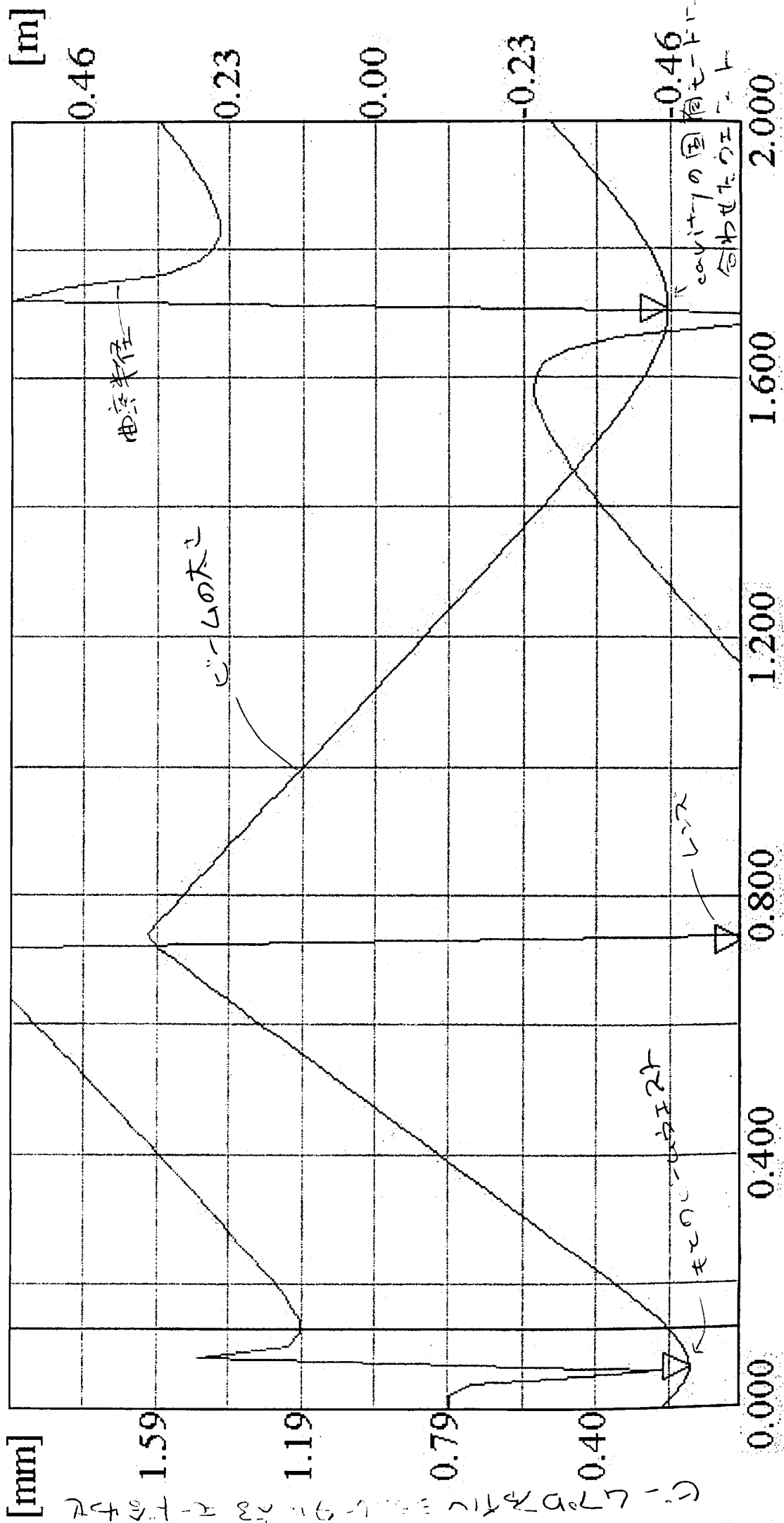
実際には安東正樹氏の製作した Beam Profile Simulator を用いて、レンズを入れる位置を計算した。Beam Profile Simulator の使用例を次ページに示す。 $f = 0.5\text{m}$ のレンズをレーザー口から 1.188m のところに置けば、それによってできるウエストが位置 2.032m、太さ 0.205mm となるとわかった。使用した光学台は直線で 2メートルはとれなかったので、鏡を用いて折り返すことでキャビティまでの光路長を実現した。下に実際の光学系の配置を示す。途中で鏡を 3 枚入れて折り返している。またこの鏡はアラインメントを合わせる際に調整する自由度になっている。

図 2 モードマッチングを考慮した光学系

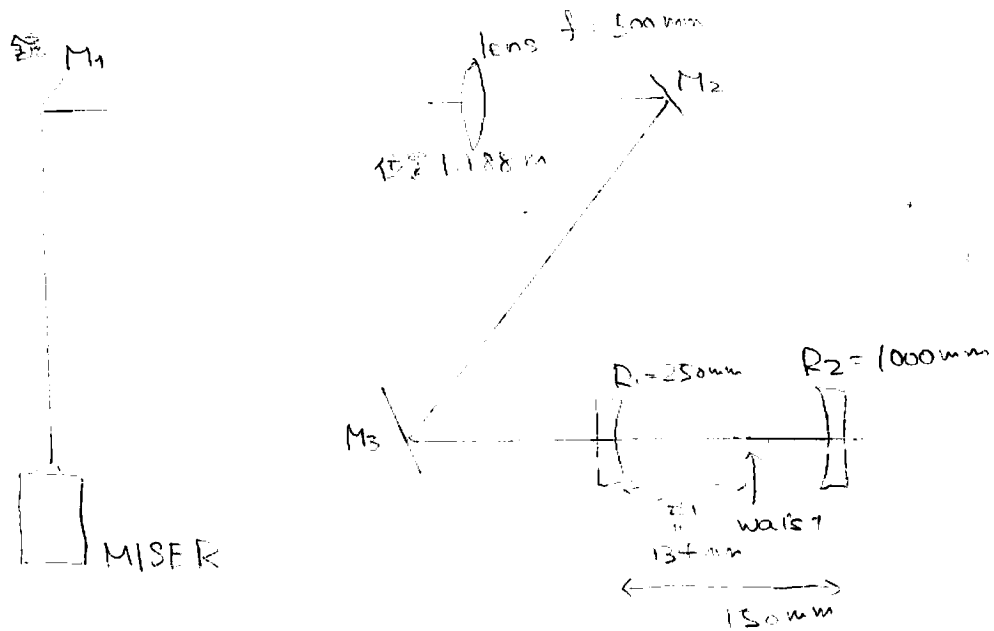


beam size [mm]

wavefront radius [m]



C:\7007\B\11-91-23-F-F\47F



2.3.3 アラインメント合わせ

次にアラインメントを合わせた。ここではレーザー光から cavity までにある 3 枚の鏡と cavity を構成する 2 枚のレンズのアラインメントを変えていった。最初に R_2 まで光が届いていることを確認し、 R_1 の反射光が M_3 に正しく返るように R_1 と M_3 のアラインメントを合わせた。次に M_2 に正しく返るようにアラインメントを合わせるといったように最終的にレーザー光源まで反射光が戻るようにした。すると optical feedback が発生し出力が不安定になる。そのため、レンズとキャビティの間にアイソレーターを入れた。アイソレーターとして、PBS と $\frac{\lambda}{4}$ 板を組み合わせ、 M_2 と M_3 の間に入れた。

R_2 を透過してくる光を PhotoDetector で観測しながら、透過光強度が最大になるようにアラインメントを合わせた。

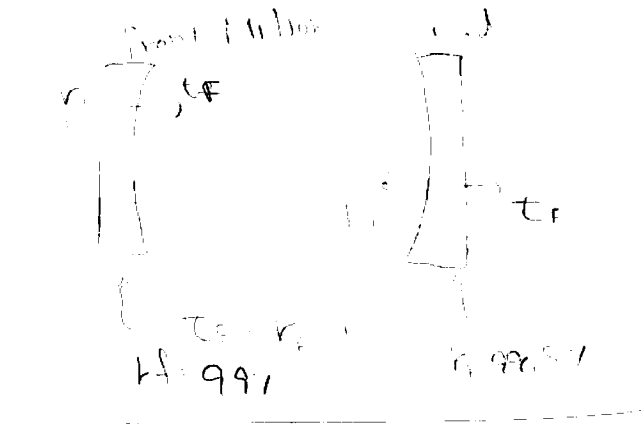


図 cavity 透過率

アラインメントを合わせた結果、キャビティ直前でのビーム強度は 10.5V で、透過光は 1.8V になった。透過率は 17% であまり良いとはいえない。これは後に述べる入射鏡のレンズ効果を考慮していなかったため、ビームのモードがキャビティのモードにあっていなかったためであろう。

この cavity のフィネス F と Q 値は次のようになった。

$$F = \frac{\pi \sqrt{r_F r_E}}{1 - r_F r_E} = 208 \quad (10)$$

$$Q = \frac{2lF}{\lambda} = 5.9 \times 10^6 \quad (11)$$

2.3.4 アラインメント制御

次に反射光を Photo Detector でみてその入力をフロントミラーのピエゾ素子にフィードバックするような回路を作成した。Photo Detector での AC 信号を変調周波数 20MHz で復調して error signal を得る。これをフロントミラーのピエゾ素子に返してアラインメントを制御する。また、レーザーのピエゾ素子にも周波数変調を書けてレーザーの周波数を制御する。実際には下のような回路を製作した。フロントミラーのピエゾ素子の共振周波数である 266.7kHz 付近のノッチフィルタを途中にいった。

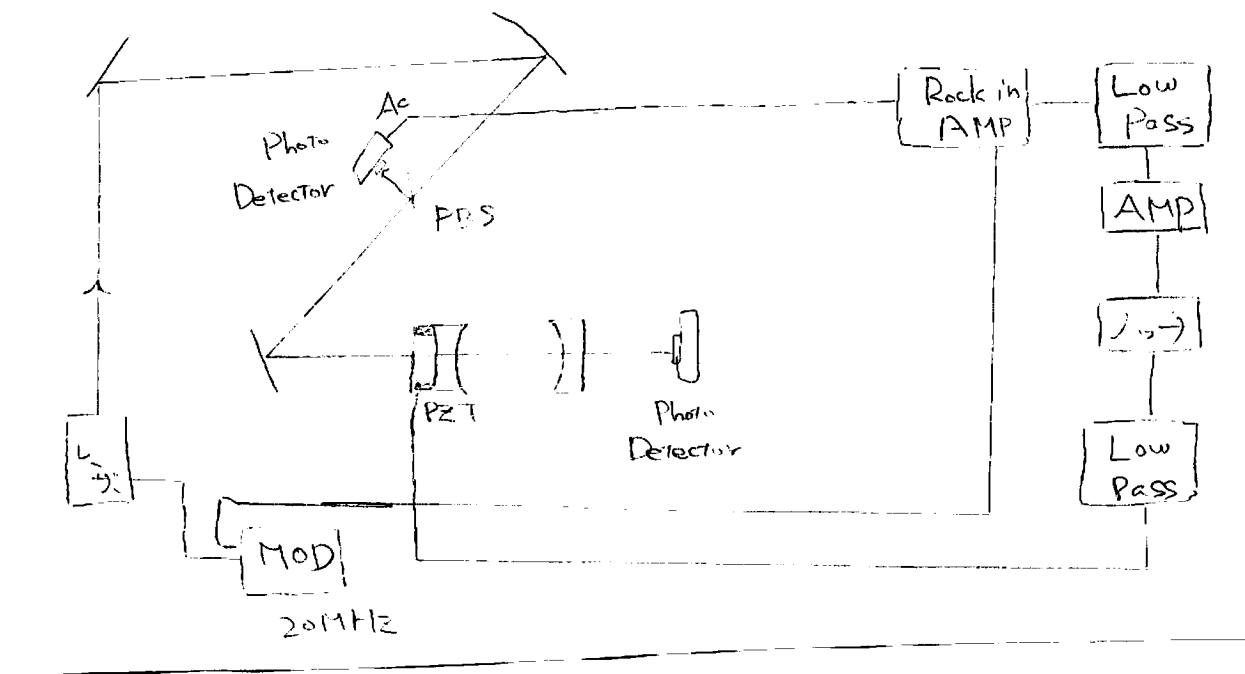


図 制御系回路

2.3.5 Openloop 伝達関数

次にこの制御系の openloop ゲインを評価するために、アラインメント制御を切って、伝達関数を測定した。

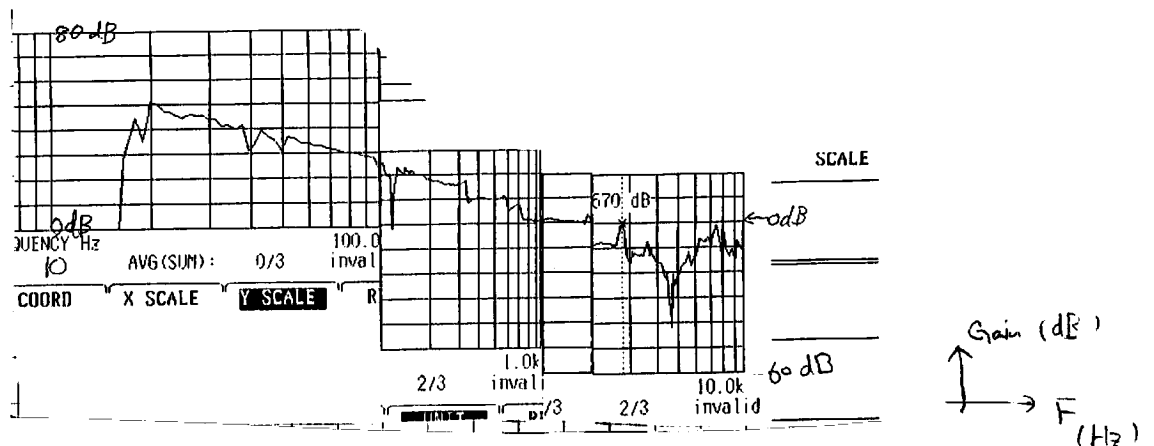


図 openloop 伝達関数

2.3.6 入射鏡のレンズ効果

今までのモードマッチングの計算では入射鏡が凹面鏡であることを考慮していなかった。入射鏡もレンズであると思って計算をやり直した。まず、入射鏡は $R = 250\text{mm}$, $n = 1.507$ なので、

$$f = \frac{R}{1-n} = -438.6[\text{mm}] \quad (12)$$

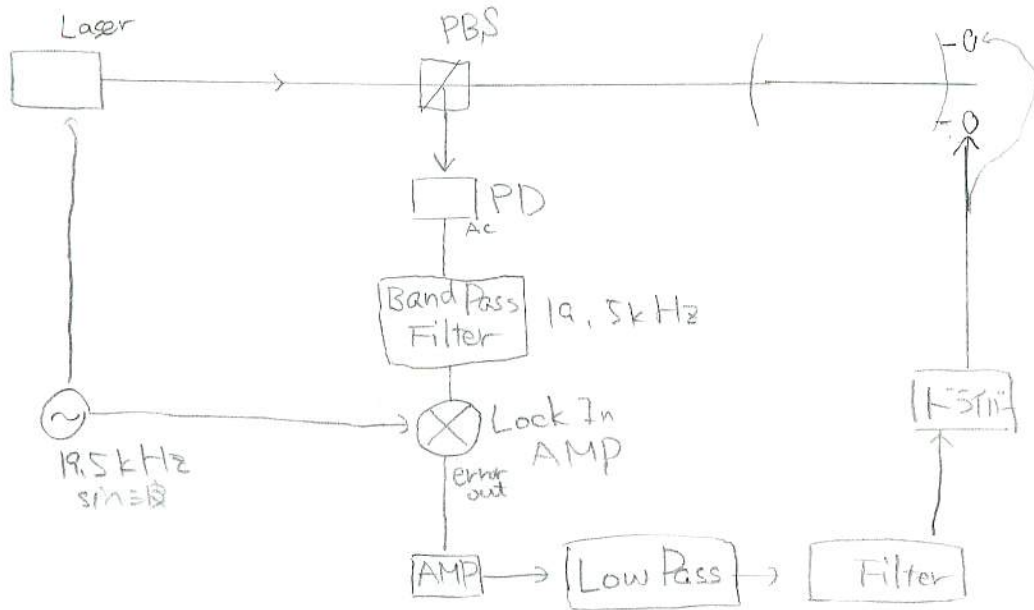
これを考慮にいれてレンズ位置を再計算した結果、1つ目のレンズまでが 1.427m、キャビティまでが 2.074m となった。

3 2段振り子

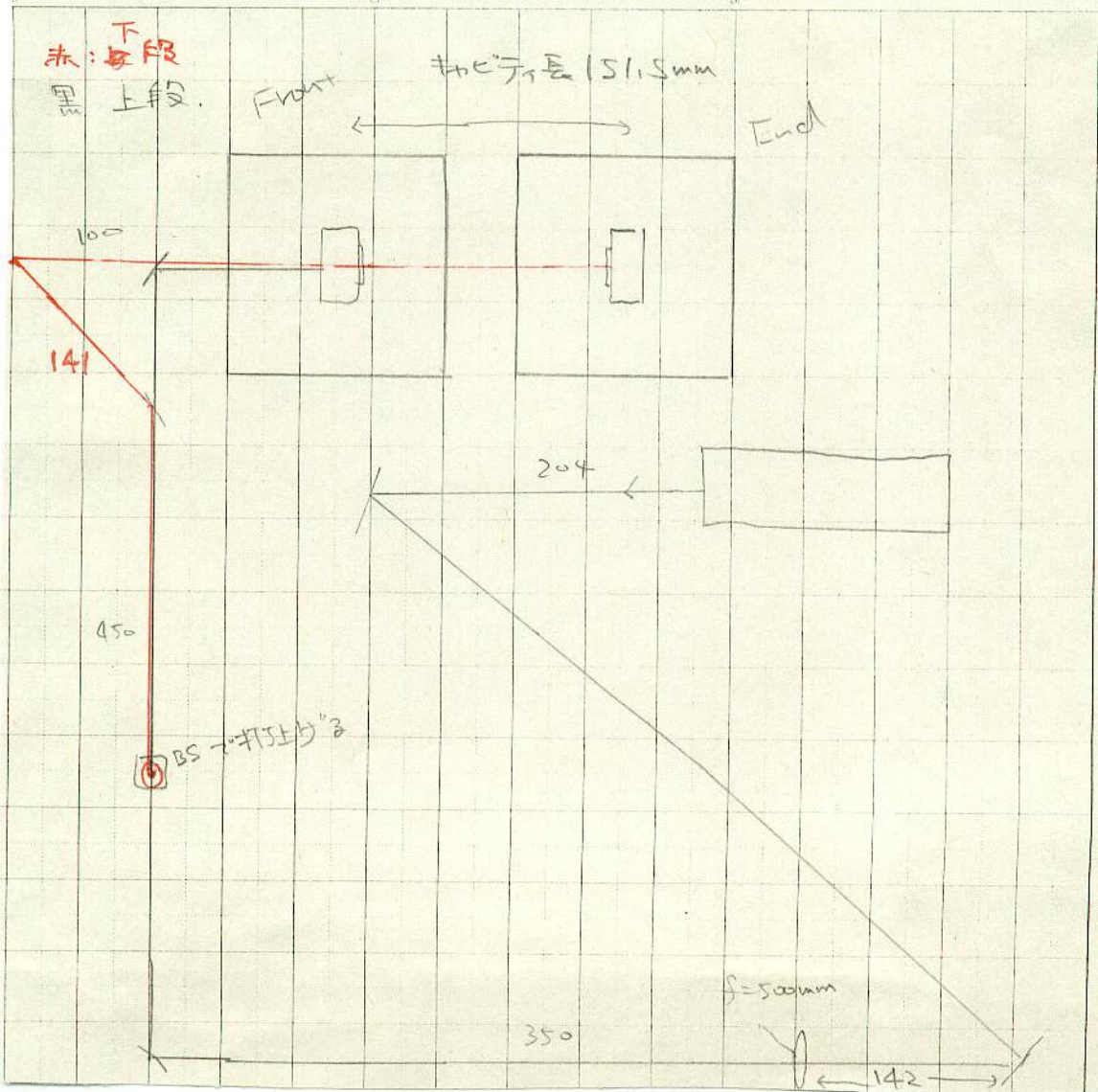
3.1 実験回路のセットアップ

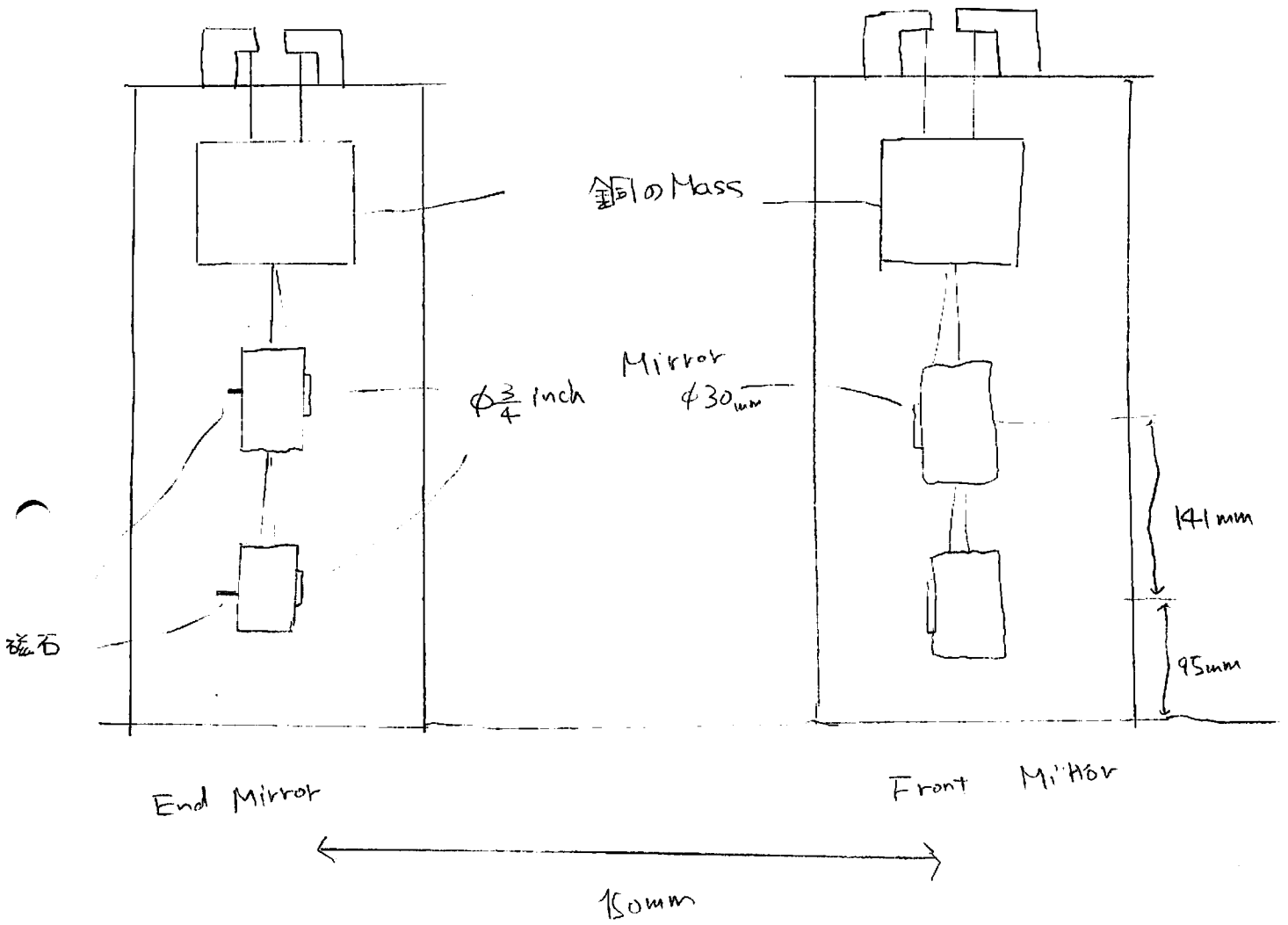
前章の基礎実験で得られた知識を元に、2段振り子を用いて、中段のミラーを制御する実験を行った。次ページに使用した振り子の図および光学系、制御系を示す。

制御系



光学系





まず、振り子を製作した。振り子の最上段のマスは銅製で、その周りに強力な磁石を8つづつ置くことで magnet damping を行っている。中段と下段には鏡を張り付けている。フロントミラー側には直径 30mm のもの、エンドミラー側には直径 $\frac{3}{4}$ インチのものを取りつけた。またエンドミラー側の2つには制御用の永久磁石をそれぞれ2つ張り付けた。この周りにコイルを用意し、コイルに流す電流を制御することでミラーの水平面方向のアラインメントを制御する。また、垂直方向のアラインメントは懸架部上部にとりつけた XZ ステージにあるマイクロメーターを用いて調整する。こちらは制御していない。制御系については反射光を PBS で分けてからフォトディテクタで見て、これを LockIn AMP に通し、error signal をドライバーへ戻してやる。ドライバーはミラーについている磁石の周りにあるコイルに電流を流し、地場を発生させることで変異とは逆方向の力を加え、ミラーを動かす。また、openloop 伝達関数を測定する際には低周波の Gain をあげるために Low Pass Filter を入れ、Unity Gain Frequency 付近で位相余裕がなかったので積分回路を入れた。光学系は先に求めたモードマッチングの数値を用いてレンズなどを配置した。キャビティにはいる前にビームスプリッターで光を上段の方に分けている。このままでは上段と下段で光路の高さの分 (141mm) 光路長が異なってしまうので、下段の方は途中で遠回りして 141mm 距離を稼いでいる。

3.2 測定

以上のようなセットアップを行った後に上段のアラインメントあわせを行った。その結果透過光強度が数%になった。キャビティ直前でのビーム強度は 1.7V で、透過光は 100mV 程度になった。

ここで openloop 伝達関数の測定を行った。次ページのグラフより Unity Gain Frequency は 750Hz 付近であるとわかった。また、この際の位相余裕は 16.5° であった。これより、このキャビティ長制御ループは安定に動作しているとわかった。つまり、上段についてはキャビティが共振点に安定に制御されているといえる。

open loop

open loop 伝達関数

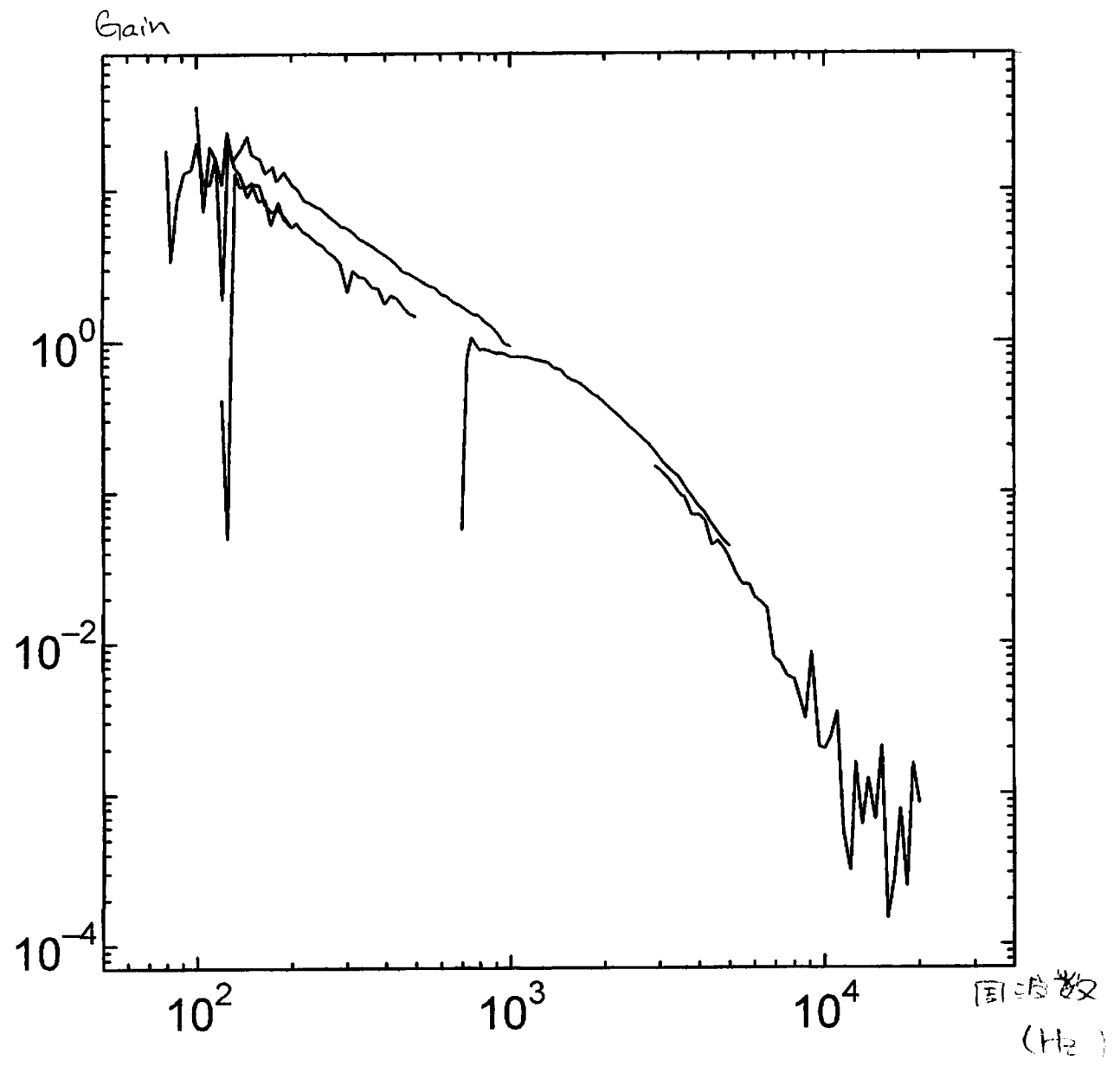
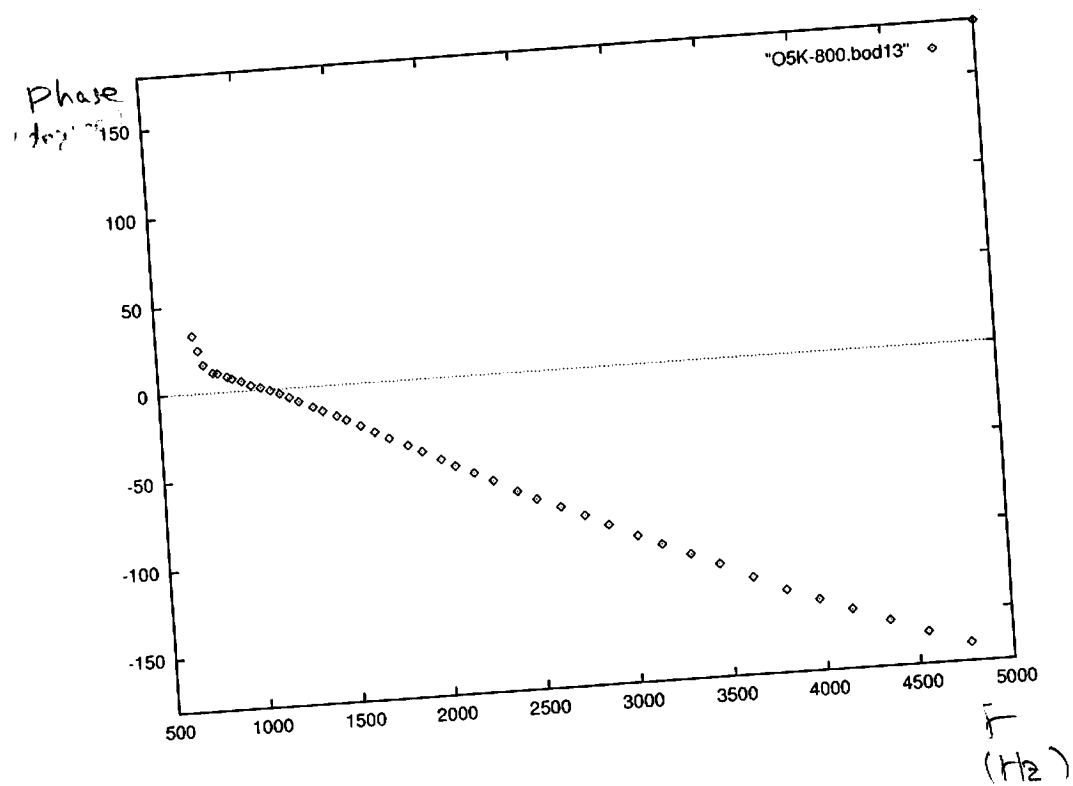


図 openloop 伝達関数の Phase



4 今後の課題

今回の実験の目的は2段振り子の上段をアクティブに制御することで下段を定常的にロックさせることだったが、実際には上段の制御までしか実験できなかった。今後の課題としては、次のようなことがある。

- 下段のアラインメント調整を行って、安定的にロックするような状態にする。
- このとき、下段のキャビティ長変化を測定する。
- 普通の1段の振り子を用いた制御よりも特に低周波部で防振できていることを確認する。

参考文献

- 三尾典克、大橋正健著 重力波アンテナ技術検討書 (1992)
栃久保 邦治 修士論文 Fabry-Perot 共振器のアラインメント制御
安東 正樹 修士論文