

10  
東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 修士論文

論文題目：半導体レーザー励起高出力Nd:YAGレーザー  
の強度安定化に関する研究

指導教員：三尾典克 助教授



学籍番号：46116

氏名：尾関孝文

平成18年1月

# 目次

第1章	序論	3
第2章	レーザー強度安定化とフィードバック制御	5
2.1	フィードバック制御の理論	5
2.1.1	フィードバック制御の安定性	6
2.1.2	雑音を考慮した場合	8
2.2	光強度安定化制御の実際の構成要素	10
2.2.1	ディテクタ	10
2.2.2	アクチュエータ	11
2.2.3	増幅器	12
第3章	電流引き込み回路	14
3.1	概要	14
3.2	検出用抵抗を用いた電流引き込み回路	15
3.3	オプトカプラを用いた電流引き込み回路	17
3.3.1	回路部分の評価	19
第4章	電流引き込み回路を用いたレーザー強度安定化	21
4.1	実験に用いたレーザー光学系	21
4.2	電流引き込み回路の評価実験	24
4.2.1	定電圧入力による光強度出力の変化	24
4.2.2	正弦波入力による光強度出力の変化	26
4.2.3	伝達関数の測定	26
4.3	レーザー強度安定化実験	28
4.3.1	電気系詳細とオープンループ伝達関数	28
4.3.2	強度安定化実験の結果	31
4.3.3	雑音についての考察	32
4.4	強度雑音改善のための実験	34
4.4.1	アクチュエータによる強度雑音の違い	34
4.4.2	マスターレーザーだけの強度安定化	36
4.4.3	レーザーの位置揺らぎの測定	37
4.4.4	その他の調査	37
第5章	モードクリーナーを導入した強度安定化	39
5.1	モードクリーナー	39

5.1.1	共振と周波数制御 . . . . .	40
5.1.2	横モードとモードクリーナー . . . . .	43
5.2	強度安定化実験 . . . . .	45
5.2.1	実験方法 . . . . .	45
5.2.2	強度安定化の実験結果 . . . . .	48
5.2.3	雑音についての考察 . . . . .	50
5.3	その他の実験 . . . . .	51
5.3.1	レーザーの位置揺らぎの測定 . . . . .	51
5.3.2	$M^2$ の測定 . . . . .	53
<b>第 6 章</b>	<b>別のレーザーモジュールを用いた光学系への強度安定化</b>	<b>58</b>
6.1	実験のシステム . . . . .	58
6.1.1	レーザーモジュール . . . . .	58
6.2	電流引き込み回路の評価実験 . . . . .	60
6.2.1	定電圧入力による光強度の変化 . . . . .	60
6.2.2	正弦波入力による光強度出力の変化 . . . . .	60
6.2.3	伝達関数の測定 . . . . .	61
6.3	レーザー強度安定化実験 . . . . .	61
6.3.1	増幅器の励起電流依存性 . . . . .	62
6.3.2	非制御時の強度雑音 . . . . .	64
6.3.3	電源直接制御について . . . . .	64
6.4	マスターレーザーへのフィードバック制御 . . . . .	66
<b>第 7 章</b>	<b>考察</b>	<b>68</b>
7.1	雑音の原因と改善方法 . . . . .	68
7.2	安定化システムについての考察 . . . . .	69
<b>第 8 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>70</b>
<b>付 録 A</b>	<b>光源の強度安定度への要求</b>	<b>71</b>
A.1	強度雑音と電場 . . . . .	72
A.2	輻射圧雑音 . . . . .	72
A.3	共振器を含んだ干渉計 . . . . .	72
<b>付 録 B</b>	<b>フィードバックフィルタの設計方法</b>	<b>78</b>
B.1	一次のローパスフィルタ . . . . .	78
B.2	フィードバックフィルタの設計手順 . . . . .	80
B.3	設計の実例 . . . . .	81
<b>付 録 C</b>	<b>実験に用いた電気回路</b>	<b>85</b>

# 第1章 序論

自然界には、強い力、弱い力、電磁気力、重力という4つの力が存在する。この中の1つである重力は、ほかの3つの力と比べて微視的なスケールでは非常に弱い。そのため重力の性質について、実験による検証は困難であり、実証的解明は進んでいない。たとえば、重力の動的な効果により、重力の波動である重力波の発生が理論的に予言されている [1] が、重力波を直接検出した例は世界にまだない。

現在、天文学的イベントによって放出される重力波を検出する計画が、日本をはじめ世界で進められている [2]。重力波が精度よく観測できるようになった場合は、重力波で宇宙を観測する重力波天文学が始まることも期待されている [3]。

重力波検出にはレーザー干渉計を用いる方法が有効であり、現在、

- TAMA300 [4] (日本)
- LIGO [5] (アメリカ)
- VIRGO [6] (イタリア, フランス)
- GEO600 [7] (ドイツ, イギリス)

といったレーザー干渉計型重力波検出器が存在し、研究が進められている。これらは数100 Hzの帯域で  $10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  オーダーの感度が期待される。この感度は重力波を実際に検出するには十分なものではないとされていて、現在さらに高感度のレーザー干渉計型重力波検出器を作る計画が進められている [8]。計画の例としては、

- LCGT [9, 10] (日本)
- Advanced LIGO [11] (アメリカ)

が挙げられる。これらの干渉計では重力波が検出されることが期待できる [12, 13]。

これらの新しいレーザー干渉計では、現在の干渉計で用いられているレーザーよりも、さらに出力が大きく、かつ、さらに出力強度が安定なレーザーが必要である。現在のレーザー干渉計においてもレーザーの強度安定化はおこなわれている [14, 15] が、さらに強度安定なレーザーを得るため、強度安定化の実験がおこなわれている [16, 17, 18]。これらの実験におけるレーザーはそれぞれ、現LIGOに使われているレーザー [17] または同じ構成のもの [16] と、マスターレーザーのみのもの [18] である。また、これらの実験では主に Advanced LIGO が考えられている。

本研究の最終的な目的も、新しい干渉計用のレーザーに十分な強度安定性を与えることである。本研究では、日本の計画である LCGT を想定している。また、マスターレーザーと増幅器からなるレーザーシステムを使用している、LCGT で用いられるような高出力レーザーを（使用しているわけではないが）想定し、適用できるような技術を用いて安定化をおこなうよう心掛けた。本研究におけるレーザー強度雑音の最終目標値を図 1.1 に示す。この雑音レベルは LCGT が設計感度を達成するために必要な安定度である（付録 A）。

また、高出力、低強度雑音のレーザーや安定化技術は、他の精密計測や量子光学の実験でも役に立つ [19]。

本実験で用いるレーザー媒質は、マスターレーザー、増幅器とも Nd:YAG である。Nd:YAG レーザーは LCGT をはじめ多くの干渉計で採用が予定されるか実際に使用されている。また、加工用などとして高出力 Nd:YAG レーザーは既に開発され、広く用いられている。

本論文ではまず、安定化のために必要なフィードバック制御の技術について簡単に紹介する。次に、高出力レーザーのフィードバック制御のために必要な、電流引き込み [20] 回路の作製について記述する。そして、電流引き込み回路を用いたフィードバック制御について評価し、強度安定化の結果を報告する。また、モードクリーナーという光共振器を用いることによってフィードバック時の強度雑音がさらに安定化したので、その時の安定化実験の結果や、モードクリーナーによる影響の調査実験も報告する。また、違うレーザーシステムに対しての強度安定化についても実験をおこなって調査、検討したので紹介する。

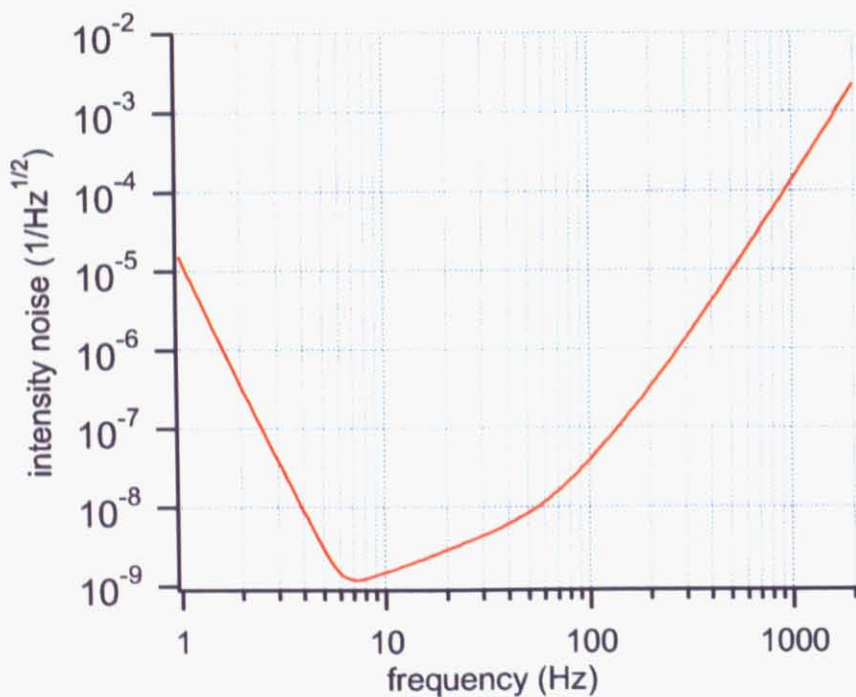


図 1.1: LCGT における強度雑音への要求。これの算出方法については付録 A で紹介する。

## 第2章 レーザー強度安定化とフィードバック制御

レーザー強度安定化のためにはフィードバック制御 [21] が必要である。この章ではフィードバック制御について記述する。ここでは触れないが、フィードバック制御を用いた量子雑音低減の研究もなされていて、理論的にも [22]、実験的にも [19] 研究が進められている。この章では、最初にフィードバック制御理論を簡単に説明し、それから実際のレーザー強度安定化を議論していく。ここでは議論は線形を仮定する。この仮定は、安定化が実現している状態では良く成り立つ。

### 2.1 フィードバック制御の理論

フィードバックとは出力の一部を入力の一部に返す操作のことである。ここで図 2.1 のような入出力システムを考える。線形性を仮定しているので周波数  $f$  に対する応答を考えると、入力  $X_{in}$ 、出力  $X_{out}$ 、増幅の伝達関数  $A$ 、フィードバックの伝達関数  $h$  に対し、

$$X_{out}(f) = \frac{A(f)}{1 + A(f)h(f)} X_{in}(f) \quad (2.1)$$

である。

今回の実験では、入出力はそれぞれ雑音  $n_{in}, n_{out}$  であり、 $A(f) = 1$  なので、

$$n_{out}(f) = \frac{1}{1 + h(f)} n_{in}(f) \quad (2.2)$$

となる。つまり雑音の絶対値は  $1/|1 + h(f)|$  倍になる。したがって雑音を小さくするには  $h(f)$  を大きくすればよい。

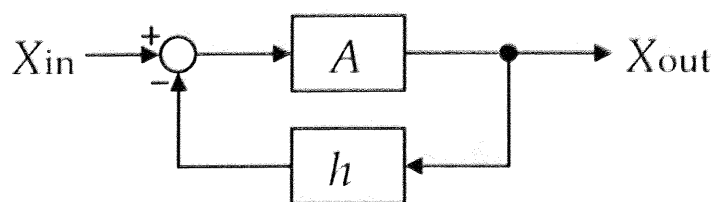


図 2.1: フィードバック。

### 2.1.1 フィードバック制御の安定性

フィードバック制御をおこなう場合、制御が正しく設計されていないと出力が発振してしまう。これを防ぐため、制御の安定性を考える必要がある。

フィードバック制御の安定性はボード線図を用いた方法 [21] で調べる。

ボード線図とは伝達関数をグラフで示すときの書き方の1つである。伝達関数は周波数に依存し、複素数であるので、横軸に周波数を取り、各周波数での伝達関数の絶対値と伝達関数の偏角（位相）をプロットすれば伝達関数を表せる。

安定性の判別方法について、理論の詳細は省くが、オープンループ伝達関数  $H_{op}(f)$  (式 (2.1) では  $A(f)h(f)$ , 式 (2.2) では  $h(f)$ ) について、 $|H_{op}(f_0)| = 1$  となる周波数（単位利得周波数） $f_0$  で、 $\angle H_{op}(f_0) > -\pi$  であればよい。このとき  $\pi + \angle H_{op}(f_0)$  を位相余裕という。

図 2.2 に安定判別の例を示す。この図はオープンループ伝達関数をボード線図で表したものである。この図は3種類の伝達関数を表していて、位相  $\angle H_{op}$  は全て同じで利得  $|H_{op}|$  だけを定数倍変えている。ここでは利得が最も大きい伝達関数のみが不安定である。一般的に利得を大きくしすぎると制御は不安定になる。だが式 (2.2) によれば利得は大きいほうがよいので、バランスを考える必要がある。

別の例を図 2.3 に示す。この図も図 2.2 と同様に、利得だけを変えた3つの伝達関数を考えている。この場合、利得は大きくしすぎても小さくしすぎても不安定になる。

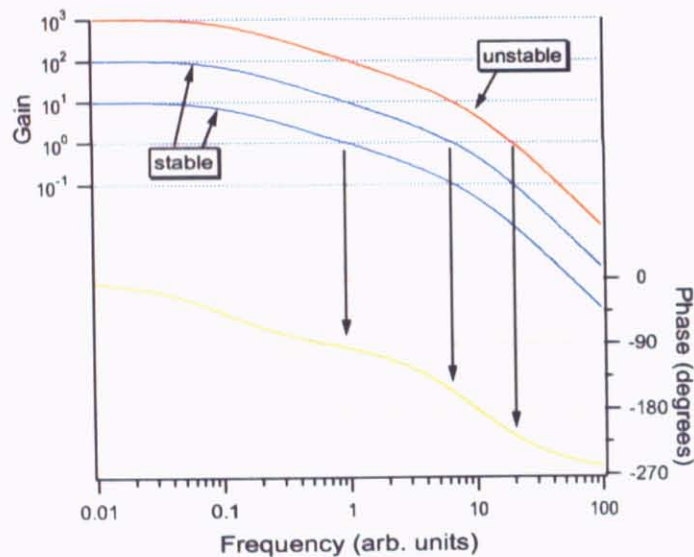


図 2.2: 安定判別の例 1. Gain が 1 のときの位相を調べて安定性を判別する。

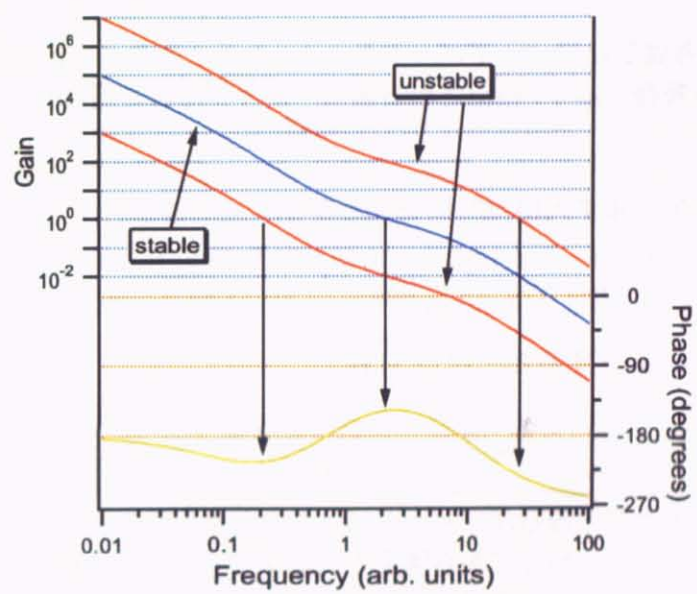


図 2.3: 安定判別の例 2.



### 2.1.2 雑音を考慮した場合

雑音について式(2.2)から考えると、 $|h|$ を大きくすれば全て解決することになる。だが実際はフィードバックに伴う他の雑音の効果を考えなければならない。そこで図2.4のようなシステムを考える。

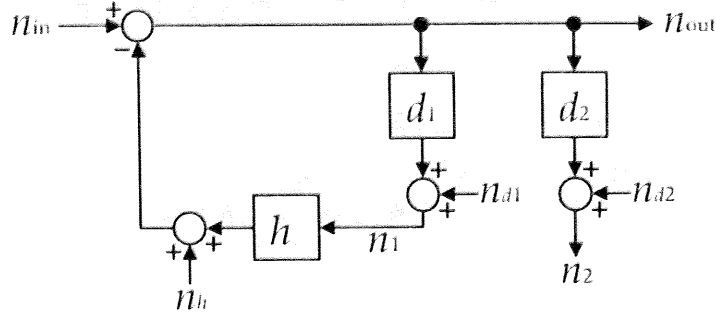


図 2.4: 種々の雑音を考慮したフィードバック系.  $d_{1,2}$ : ディテクタの伝達関数,  $n_{d1,d2}$ : ディテクタで発生する雑音,  $n_{1,2}$ : 検出される雑音,  $n_h$ :  $h$ による雑音.

このシステムについて、まず入出力関係を考えると、

$$n_{out} = \frac{1}{1 + hd_1}(n_{in} - hn_{d1} - n_h) \quad (2.3)$$

となる。ここで  $|hd_1| \rightarrow \infty$  とすると、式(2.3)は、

$$n_{out}|_{|h| \rightarrow \infty} = -\frac{1}{d_1}n_{d1} \quad (2.4)$$

となる。すなわちディテクタの雑音がフィードバックの効果を制限する。ここでのディテクタの雑音とは、出力信号が分岐してから測定されてプリアンプで増幅されるまでに発生する広義のディテクタ雑音のことである。

実験で実際に得られる信号は、ディテクタの出力  $n_{1,2}$  である。そこでまず  $n_1$  を求めると、

$$n_1 = \frac{1}{1 + hd_1}(d_1n_{in} + n_{d1} - d_1n_h) \quad (2.5)$$

となる。この  $n_1$  は、 $n_{out}$  と異なり、

$$n_1|_{|h| \rightarrow \infty} = 0 \quad (2.6)$$

となる。実際には  $n_1$  を測定するディテクタの雑音などに制限されることになるが、 $n_{d1}$  の影響は受けない。

一方、 $n_2$  は、

$$n_2 = \frac{d_2}{1 + hd_1}(n_{in} - hn_{d1} - n_h) + n_{d2} \quad (2.7)$$

となる。この場合、

$$n_2|_{|h| \rightarrow \infty} = -\frac{d_2}{d_1}n_{d1} + n_{d2} \quad (2.8)$$

となる。  $n_{d1}$  と  $n_{d2}$  は一般的に無相関なので、雑音のパワースペクトル [23] を考えると、

$$S_{n_2} |_{|h| \rightarrow \infty} = \frac{|d_2|^2}{|d_1|^2} S_{n_{d1}} + S_{n_{d2}} \quad (2.9)$$

となる。ここでディテクタの伝達関数を割り算して  $n_{out}$  のパワースペクトルを算出すると、

$$S'_{n_{out}} = S_{n_{d1}}/|d_1|^2 + S_{n_{d2}}/|d_2|^2 \quad (2.10)$$

となる。これと  $n_{out}$  の真のパワースペクトル  $S_{n_{out}} = S_{n_{d1}}/|d_1|^2$  との比は、

$$\frac{S'_{n_{out}}}{S_{n_{out}}} = 1 + \frac{|d_1|^2}{|d_2|^2} \frac{S_{n_{d2}}}{S_{n_{d1}}} \quad (2.11)$$

となる。ここで  $d_1 = d_2$  かつ  $S_{n_{d1}} = S_{n_{d2}}$  を仮定する（これは同じディテクタを用いることを意味する）と、比は 2 となる。

以上をまとめ、 $n_1, n_2$  と  $n_{out}$  との関係の場合に応じて考えると、表 2.1 のようになる。この表から、条件に関わらず  $n_2$  から  $n_{out}$  を見積もれることがわかる。この場合、 $S_{n_{in}} \ll |h|^2 S_{n_{d1}}$  では、式 (2.11) だけ大きく見積もってしまうが、最悪の値としてそのまま用いる。こうすれば 2 つのディテクタの性能差があっても見積もりを正しく行なえる。

また、 $n_1$  と  $n_2$  を比べれば何が改善すればよいのか分かる。 $n_1/d_1 \approx n_2/d_2$  のときオープンループ伝達関数を改善すればよい。 $n_1/d_1 \ll n_2/d_2$  のときはディテクタ系の雑音を改善する必要がある。

表 2.1: 条件別の雑音と関係, 改善法

	$S_{n_{in}} \gg  h ^2 S_{n_{d1}}$	$S_{n_{in}} \ll  h ^2 S_{n_{d1}}$
$n_1$	$\frac{d_1}{1+hd_1} n_{in}$	$\frac{d_1}{1+hd_1} n_{in}$
$n_2$	$\frac{d_2}{1+hd_1} n_{in}$	$-\frac{d_2}{d_1} n_{d1} + n_{d2}$
$n_{out}$	$\frac{1}{1+hd_1} n_{in}$	$-\frac{1}{d_1} n_{d1}$
関係	$n_{out} \approx n_1/d_1 \approx n_2/d_2$	$n_{out} \approx n_2/d_2 \gg n_1/d_1$
改善法	$hd_1 \uparrow$	$n_{d1}/d_1 \downarrow$

## 2.2 光強度安定化制御の実際構成要素

前節では雑音信号の流れを調べた。ここでは信号の媒体については考えなかった。実際にフィードバック制御をおこなう場合、媒体を考える必要がある。

これを考慮すると図 2.5 のようになる。  $n_{in}$  および  $n_{out}$  は、光強度雑音なので媒体は光である。フィードバックには扱いの容易な電気信号を用いる。このときに、光信号を電気信号に変えるディテクタと電気信号を光信号に戻すアクチュエータが必要になる。また、電気信号は増幅器で増幅、整形し、オープンループ伝達関数を改善する。

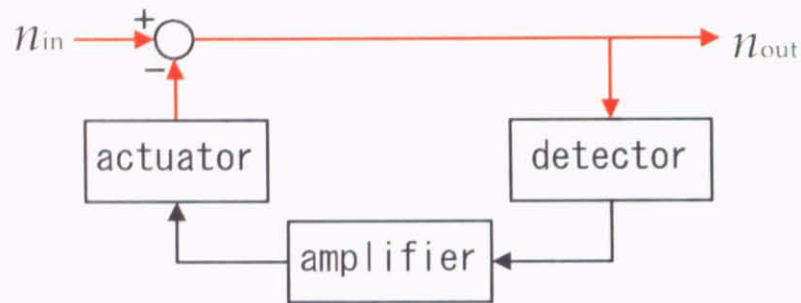


図 2.5: 信号の媒体を考えたフィードバック。赤：光信号，黒：電気信号。

### 2.2.1 ディテクタ

光信号を電気信号に変換するフォトディテクタには、pin フォトダイオードを用いた。図 2.6 のような回路によってフォトダイオードで発生する光電流が電圧信号となる。これがフォトディテクタである。この回路では OP アンプを用いて電流 - 電圧変換を行なっていて、光強度を電圧で出力している。pin フォトダイオードは逆バイアス電圧をかけて使用している。

pin フォトダイオードは高速性に優れ、たとえば実験に用いたダイオードの 1 つである G8370-02 では最大応答周波数が 4 MHz である。この値は重力波観測のために強度安定化が必要な帯域 (<10 kHz) に比べて十分である。したがってディテクタの伝達関数は周波数依存はなく、定数であると考えられる。

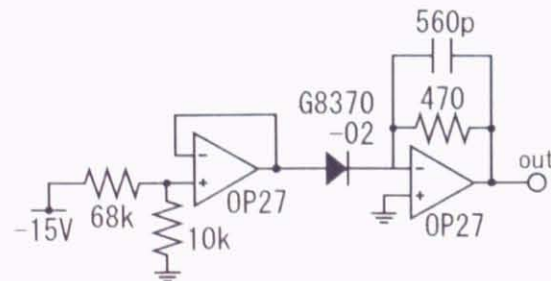


図 2.6: フォトディテクタ回路の例。

## 広義のディテクタ系

光信号を電気信号に変換するという狭義のディテクタは上記のようになるが、2.1.2節で考えた広義のディテクタ（ここで発生した雑音はフィードバックの利得では消えない）は、図 2.7 のように、フォトディテクタを含む複数の要素からなる。これら全ての要素は、安定化のために注意深く構成する必要がある。

光の強度  $I(t)$  は直流の光強度  $I_0$  に雑音  $I_n(t)$  を足して

$$I(t) = I_0 + I_n(t) \quad (2.12)$$

と記述される。したがって図 2.7 のように直流強度分を参照電圧で差し引く必要がある。

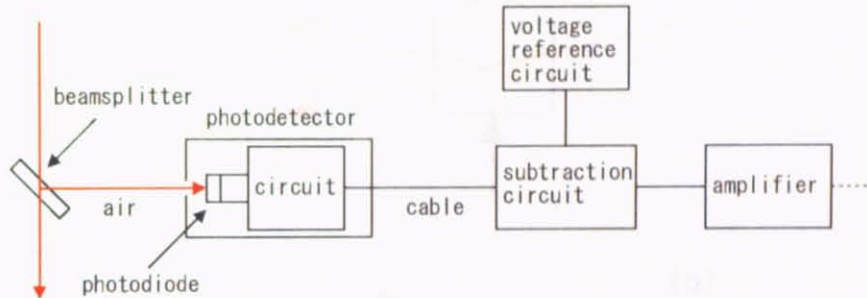


図 2.7: 広義ディテクタ系の要素.

### 2.2.2 アクチュエータ

電気信号を光信号に変換する方法はいくつかある。すなわち、

- レーザー励起電流制御
- 音響光学変調器 (AOM) 制御
- 電気光学変調器 (EOM) 制御 & 偏光ビームスプリッタ (PBS)

などである。それぞれの概略を図 2.8 に示す。

レーザーの出力が低い場合、市販の AOM や EOM を用いれば光強度の制御が可能である。また、低出力レーザーの電源装置には強度変調用の入力サイトが付属しているものがある。そこに電圧信号を送ればレーザーの励起電流が制御され、レーザー出力も制御される。

一方、重力波観測のために必要である、高出力レーザーを想定すると、上記の方法をそのまま使うことはできない。AOM 制御、EOM 制御についてはそれぞれ AO 素子、EO 素子を光学系に挿入する必要がある。高出力レーザーに対する素子の光強度耐性や制御可能幅を考慮しなければならない。また、市販の高出力レーザーにおいては微小な調節は想定されておらず、レーザー励起電流を、電源装置につないですぐ制御できるということもない。

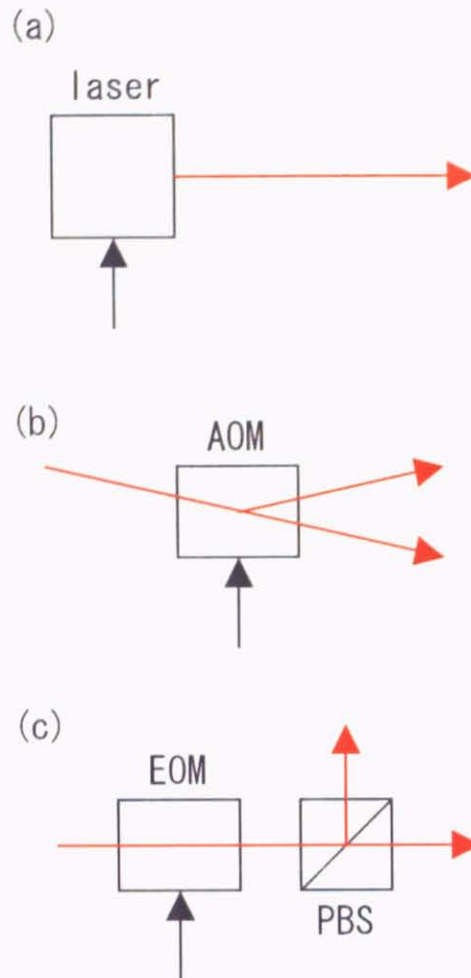


図 2.8: レーザーに対するアクチュエータ. (a) レーザー励起電流制御, (b)AOM 制御, (c)EOM 制御 & PBS.

そこで本研究ではレーザー励起電流を制御するアクチュエータを作製したのだが、詳細は次章で述べる。

この節の最後にアクチュエータでの雑音について述べる。アクチュエータでの雑音は、図 2.4 における  $n_h$  として系に侵入する。この雑音は、式 (2.3) から考えると、オープンループ伝達関数の利得が大きいときは出力の雑音には影響しないことがわかる。したがってアクチュエータでの雑音についてはあまり神経質になる必要はない。

### 2.2.3 増幅器

式 (2.2) または式 (2.3) によれば、オープンループ伝達関数の利得は大きいほどよい。また、2.1.1 節で議論した制御の安定性も考える必要がある。そこで、増幅器で適当な伝達関数の信号処理をおこない、利得と安定性を考えてオープンループ伝達関数を調節する。ここでいう増幅器は一般に、全体の利得を調節する直流増幅器と、利得（位相）の周波数

依存性を決めるフィルタからなる。

増幅器の設計手順としては、まずディテクタとアクチュエータによる伝達関数を測定する。その伝達関数がわかると、増幅器の伝達関数を仮定すればオープンループ伝達関数も決まるので、オープンループ伝達関数が望ましい形になるように増幅器の伝達関数を設計する。増幅器は入力も出力も電気信号でよいので、数学的、回路学的に正当な範囲内で任意の伝達関数を実現できる。

## 第3章 電流引き込み回路

2.2節で述べたように、フィードバック制御のためにはディテクタとアクチュエータが必要である。ディテクタはフォトダイオードを用いればよいが、高出力レーザーに対するアクチュエータは自作する必要がある。そこで、アクチュエータとして電流引き込み回路 [20] を作った。

### 3.1 概要

本実験で作製、使用した電流引き込み回路は、電源からレーザーモジュールへ流れる電流（レーザー励起電流）を一部引き込む回路である（図 3.1）。この回路を用いて引き込む電流  $I_{csc}$  を制御する。また、電源は定電流回路となっていて、電源からの電流  $I_{ps}$  はほぼ一定である。そのため、電流引き込み回路を用いると、レーザーモジュールを流れる電流  $I_{lm}$  は、

$$I_{lm} = I_{ps} - I_{csc} \quad (3.1)$$

となり、 $I_{csc}$  の調節により  $I_{lm}$  の調節が可能である。 $I_{lm}$  が増減すればレーザー強度も増減するので、 $I_{lm}$  の調節によりレーザー強度の調節が可能である。

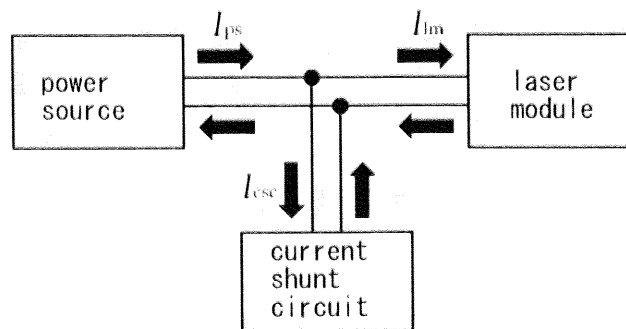


図 3.1: 電流引き込み回路の概略.

また、本実験において、制御をおこなっているレーザーモジュールは光増幅器として使用している。これは、重力波検出器でのレーザーを想定しているためである。日本で計画中の重力波検出器 LCGT におけるレーザー光源の設計を図 3.2 に示す。レーザー光源はマスターレーザーの光を注入同期 (injection locking) という方法でまず増幅し、さらに増幅器で増幅する設計になっている [12]。このとき注入同期の出力光の強度雑音は、図 3.2 のスレーブレーザーで決まることが報告されている [24]。そのため LCGT では、その後の増幅器に強度制御をかけ、強度安定化をおこなう設計になっているのである。

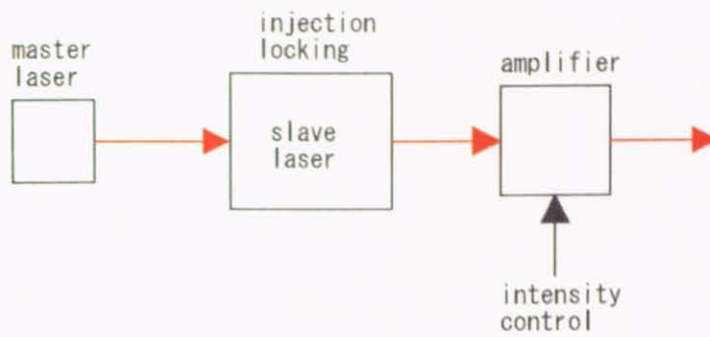


図 3.2: 重力波検出器 (LCGT) におけるレーザー光源の設計.

### 3.2 検出用抵抗を用いた電流引き込み回路

引き込む電流  $I_{csc}$  の調節のためには、やはりフィードバック制御を用いる。  $I_{csc}$  を測定し、その値が望んだ値になるよう制御するのである。

電流の測定は検出用抵抗を用いて電圧に変換するのが簡単である。図 3.3 に検出用抵抗を用いた電流制御の概略を示す。

検出用抵抗を用いた電流引き込み回路を作製した。回路を図 3.4 に示す。OP アンプ (AD811) とトランジスタ (2SC2335) による電流のフィードバック制御をおこなった。さらに OP アンプ (OP27) を用いて  $1.2 \Omega$  検出用抵抗間の電位差と参照電圧 (入力信号電圧の  $-1/2$  倍) が等しくなるように設計した。

図 3.4 を用いて励起電流制御実験を行なった。その結果、励起電流の制御に失敗した。原因を調べると、電源・レーザーモジュール回路と電流引き込み回路ではグラウンド電位が異なることがわかった。さらに、グラウンド電位の差は一定ではなく、電流引き込み回路を動作させると差が大きくなってしまい、制御がかからなくなっていることがわかった。

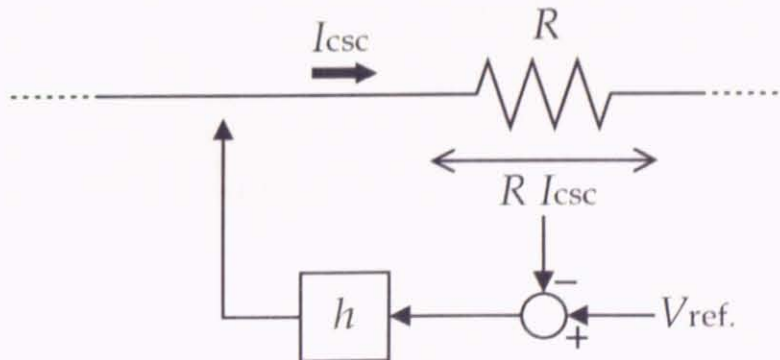


図 3.3: 検出用抵抗を用いたフィードバック電流制御の概略.



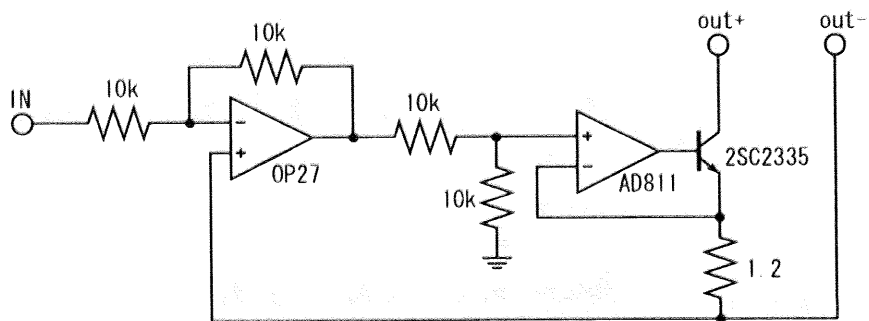


図 3.4: 検出用抵抗を用いた電流引き込み回路.

### 3.3 オプトカプラを用いた電流引き込み回路

グラウンド電位の差を克服するために、電源・レーザーモジュール回路と電流引き込み回路との間でアイソレーション [25] (絶縁) を行なうことにした。そのためにオプトカプラを用いることにした。

図 3.5 にオプトカプラを用いたフィードバック電流制御の概略を示す。オプトカプラは発光ダイオード (LED) 1つとフォトダイオード 2つからなるユニットである。LED によって発生する光電流は、2つのフォトダイオードで同じになるようにできている。したがって、一方の光電流を測定し、LED をアクチュエータとして用いてフィードバック制御することによって、他方の光電流は測定せずに制御することができる。

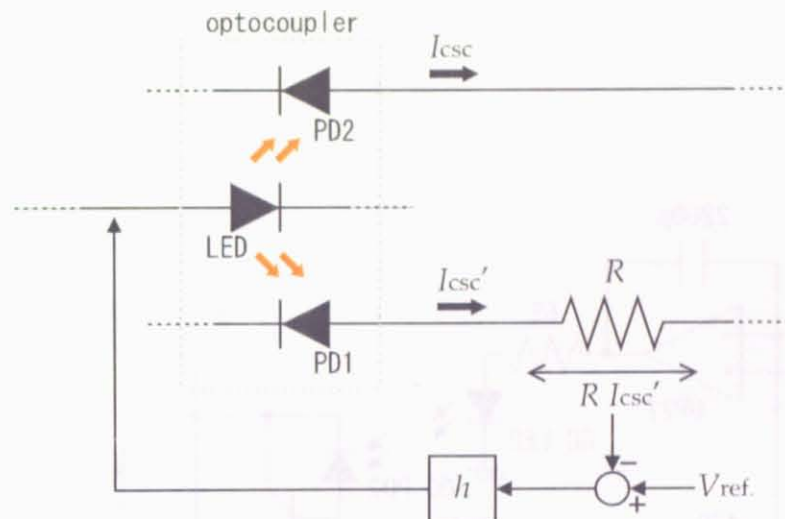


図 3.5: オプトカプラを用いたフィードバック電流制御の概略。PD1,2: フォトダイオード, LED: 発光ダイオード。

オプトカプラを用いた電流引き込み回路を図 3.6 に示す。フォトダイオードの光電流は小さいため、トランジスタで増幅している。電流のフィードバック制御には OP アンプを用いた。この回路により、励起電流制御による光強度制御に成功した。次章以降に、この電流引き込み回路を用いた光強度の実験結果を示す。

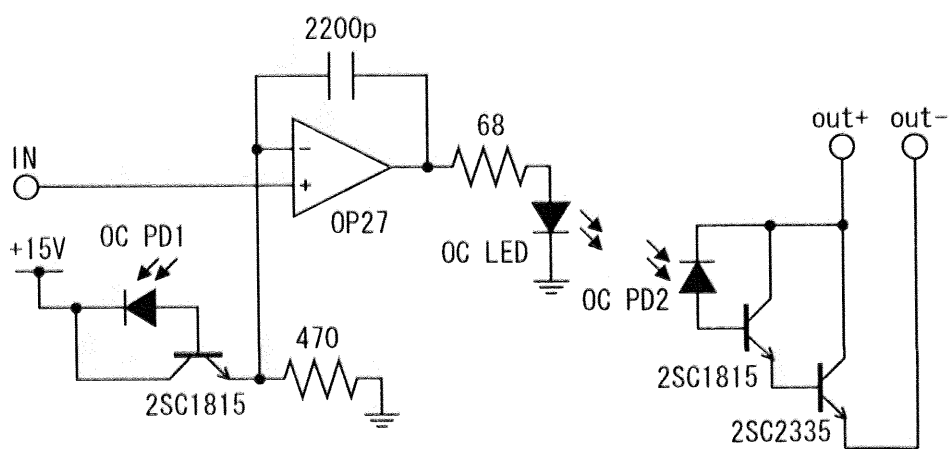


図 3.6: オプトカプラを用いた電流引き込み回路. OC:オプトカプラ, 型番 HCNR201.

### 3.3.1 回路部分の評価

引き込み回路の回路部分の評価するため、図 3.7 の回路を作製した。この回路は、図 3.6 の回路について、出力側の一段目のトランジスタ (2SC1815) までを再現し、測定のために電圧に変換して出力するものである。二段目のトランジスタを入れてしまうと、回路に 1 A の電流が流れてしまうため、それは省いた。二段目のトランジスタである 2SC2335 は、データシートによれば 1 MHz 程度の帯域はあるはずである。出力側にあるバイアス電圧は、使用時における電位差 18 V を再現するためである。

この回路の伝達関数を図 3.8 に示す。測定にはアドバンテスト社製 R9211C FFT SERVO ANALYZER を用いた。40 kHz に位相進みのピークがあるが、最大で  $10^\circ$  以下であり、制御系に対する影響は小さい。

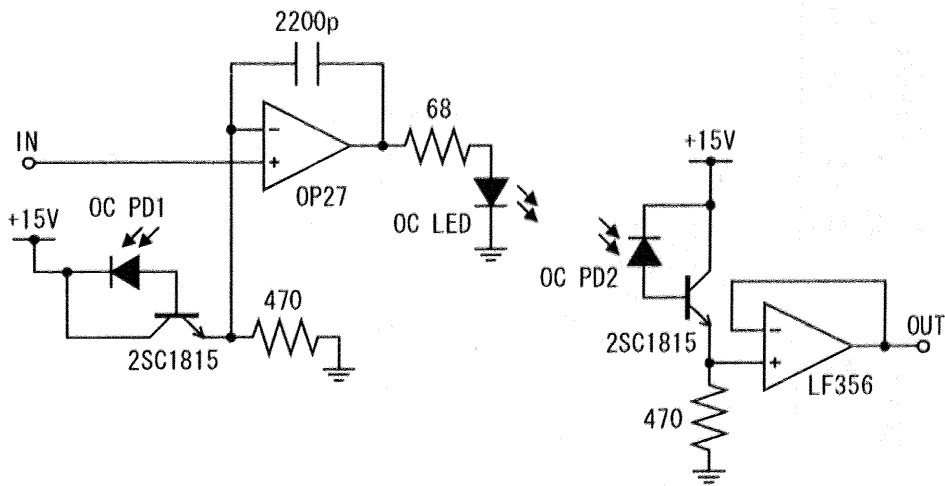


図 3.7: 電流引き込み回路の評価用回路

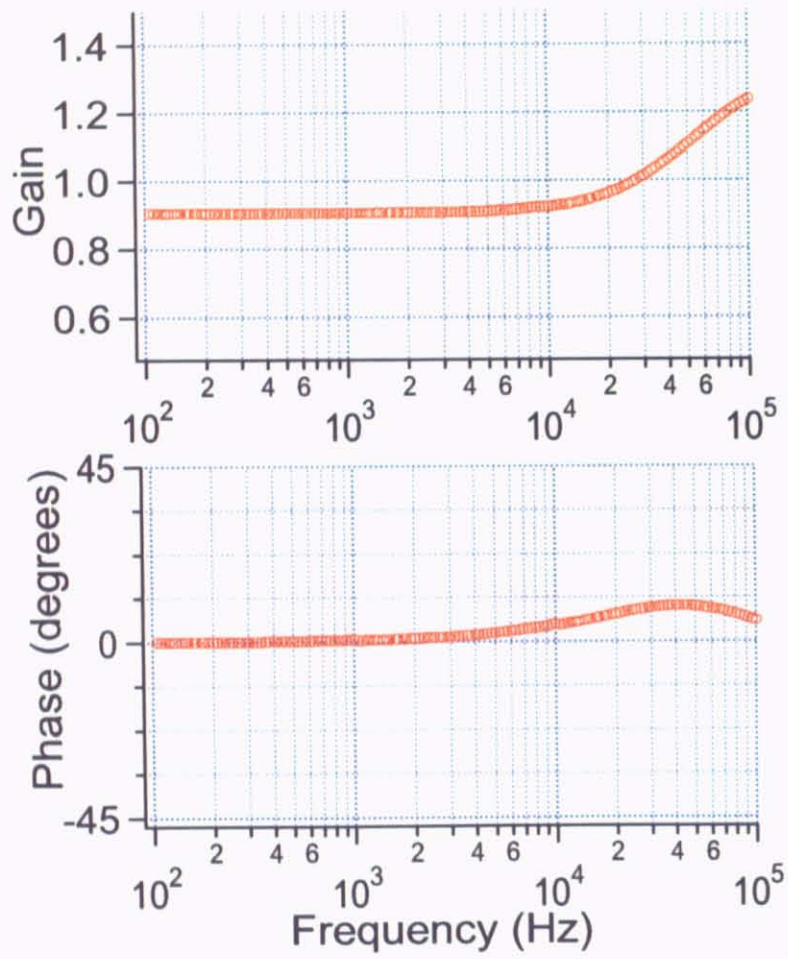


図 3.8: 評価用回路の伝達関数

## 第4章 電流引き込み回路を用いたレーザー強度安定化

3.3節で紹介した電流引き込み回路を用いて、フィードバック制御によるレーザー強度安定化をおこなった。実験方法と実験結果を示す。電流引き込み回路の評価や雑音の評価に関する実験もあわせて示す。

### 4.1 実験に用いたレーザー光学系

はじめに、この章における実験に用いたレーザー光学系について述べる。光学系の概略を図4.1に示す。光学系はマスターレーザーと光増幅器で構成した。また、電流制御は増幅器に対しておこなった。

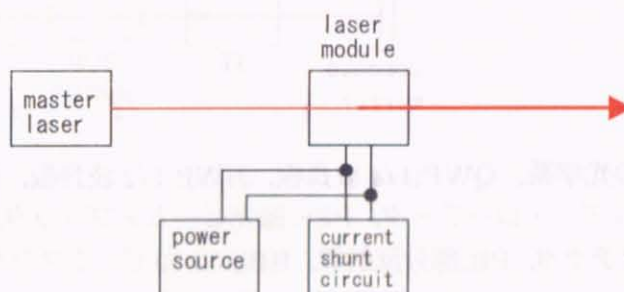


図 4.1: レーザー光学系の概略。

強度安定化実験における光学系の詳細を図4.2に示す。偏光ビームスプリッターとファラデー・ローテータを用いることにより、光を、レーザーモジュールに2回通過させ、取り出している。また、ファラデー・アイソレータを用いてマスターレーザーへの戻り光を防いだ。波長板はファラデー・アイソレータと偏光ビームスプリッターを有効に働かせるために用いた。フォトディテクタに入射する光量を調節するため、適宜ウェッジ窓や部分反射鏡を用いている。フォトディテクタに対する光のアラインメントは、鏡の調節ねじを用いておこない、強度雑音が小さくなるように調節した。

レーザー光の強度について、直流の成分は Scientech 社製のハイパワーメーター AC2500H を用いて測定した。雑音を測定するためのフォトディテクタには、主に浜松ホトニクス社製の InGaAs pin フォトダイオード (G8370-02, G5832-02) を PD1, PD2 に用いた。同社製の Si pin フォトダイオード (S1223-01) も用いた。

マスターレーザーには Innolight 社製 Mephisto を用いた。このレーザーは、レーザー媒質は Nd:YAG で、半導体レーザー励起、空冷である。発振周波数は  $1.064 \mu\text{m}$ 、最大出力

1 W, 単一モード発振である。

レーザーモジュールには Cutting Edge Optonics 社製 RB20-1C2 を用いた。このモジュールはレーザー媒質として Nd:YAG の円筒型結晶を使用している。半導体レーザー励起、水冷である。

円筒型結晶のレーザー媒質を用いた増幅やレーザー発振では熱複屈折の問題が起きることが指摘されている [26] が, Hua ら [27] による方法によりその効果を補償した。

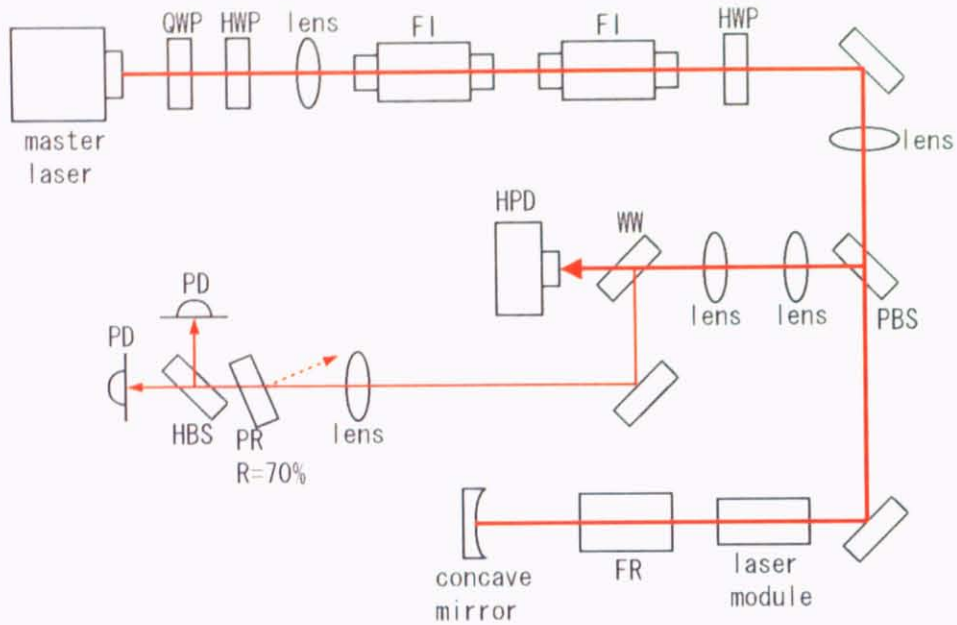


図 4.2: 強度安定化実験の光学系. QWP:1/4 波長板, HWP:1/2 波長板, FI:ファラデー・アイソレータ, FR:ファラデー・ローテータ, PBS:偏光ビームスプリッター, WW:ウェッジ窓, HPD:ハイパワーディテクタ, PR:部分反射鏡, HBS:50-50 ビームスプリッター, PD:フォトディテクタ.

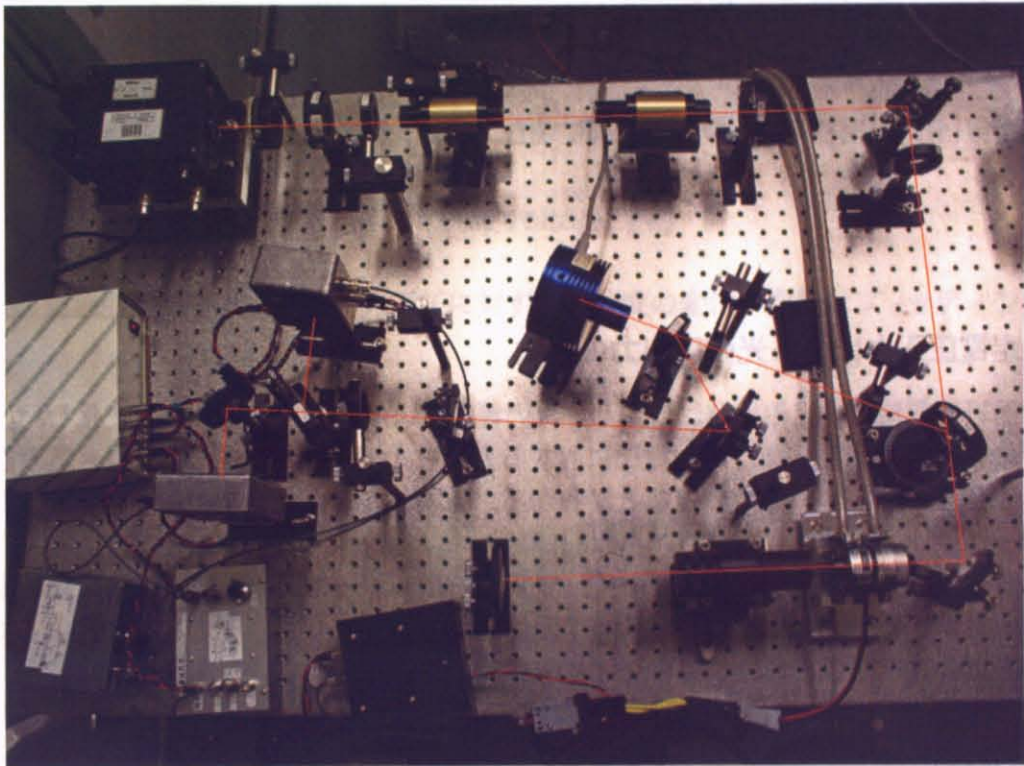


図 4.3: 実験系の写真. 赤線はレーザー光を示す. 実際は赤外光であり, 不可視.



## 4.2 電流引き込み回路の評価実験

電流引き込み回路に電気信号を入力し、光強度を測定して、電流引き込み回路の評価をおこなった。実験の概略を図 4.4 に示す。この節での実験はマスターレーザーは 2 A 駆動、増幅器の電源は出力電流約 25 A でおこない、測定の間は設定を変えずにおこなった。

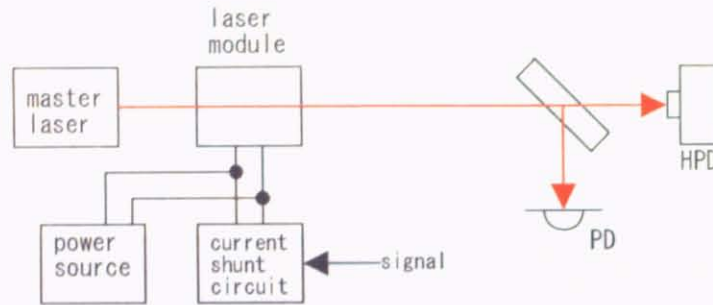


図 4.4: 電流引き込み回路の評価実験の概略。PD：フォトディテクタ，HPD：ハイパワーディテクタ。

### 4.2.1 定電圧入力による光強度出力の変化

定電圧信号を電流引き込み回路に入力し、入力電圧による光強度出力の値の変化をハイパワーディテクタで測定した。入力電圧に対する光強度を図 4.5 に示す。電流引き込み回路による光強度の制御ができていることがわかる。直線性が見られたのでフィッティングをおこなった。比例係数は  $-0.024 \text{ W/V}$  だった。

比較のため、電流引き込み回路は使わず、マスターレーザーの出力を同じにして増幅器の電源の出力電流を 25 A 付近で変化させて光強度出力を測定した。その結果を図 4.6 に示す。同様に直線性が見られた。フィッティングの比例係数は  $0.15 \text{ W/A}$  だった。

図 4.5 の比例係数と図 4.6 の比例係数から、この条件での電流引き込み回路の直流での電圧・電流変換係数がわかる。すなわち、 $0.16 \text{ A/V}$  である。

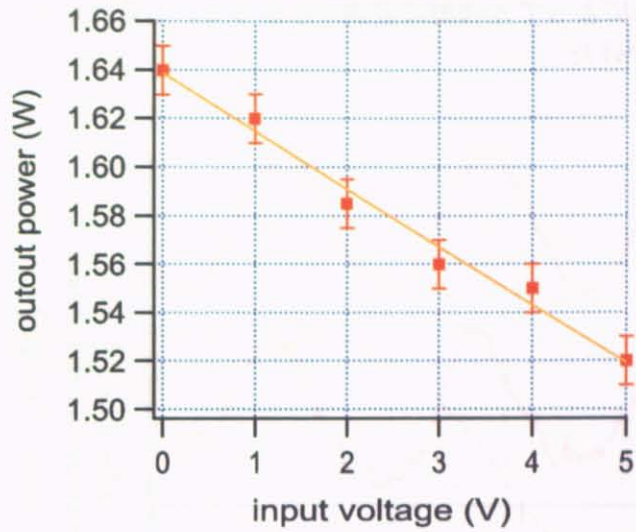


図 4.5: 電流引き込み回路への入力電圧に対する光強度の変化. 直線はフィッティング値.

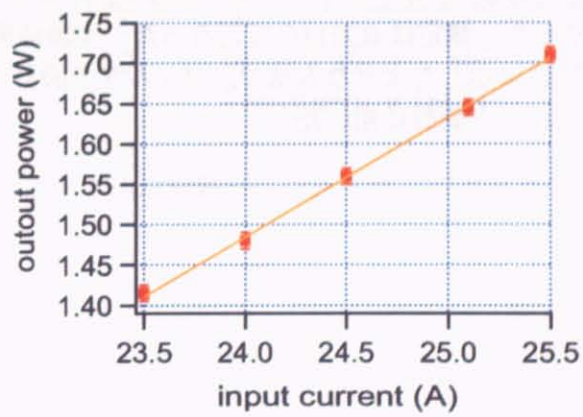


図 4.6: レーザーモジュールへの供給電流に対する光強度の変化. 直線はフィッティング値.

#### 4.2.2 正弦波入力による光強度出力の変化

電流引き込み回路に正弦波を入力し、フォトディテクタで出力を測定した。そして、入力と出力をスペクトル・サーボアナライザ R9211C で記録した。実験結果を図 4.7 に示す。電流引き込み回路への入力によって光強度に変調がかかっていることがわかる。このとき入力は 5 V のバイアスをかけた。

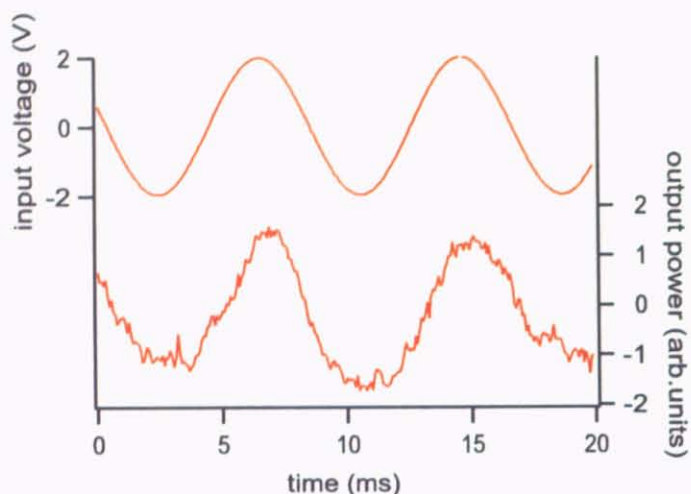


図 4.7: 電流引き込み回路への正弦波入力電圧と出力強度。どちらも AC モードで測定したため、バイアス成分はなくなっている。

#### 4.2.3 伝達関数の測定

電流引き込み回路に信号を入力し、フォトディテクタの出力を測定することにより、この部分の伝達関数の測定を行なった。測定は R9211C で行なった。実験結果を図 4.8 に示す。

この伝達関数を元に、付録 B に示したような方法で、フィルタの設計をおこない、フィルタ回路を作製してフィードバック制御に用いた。

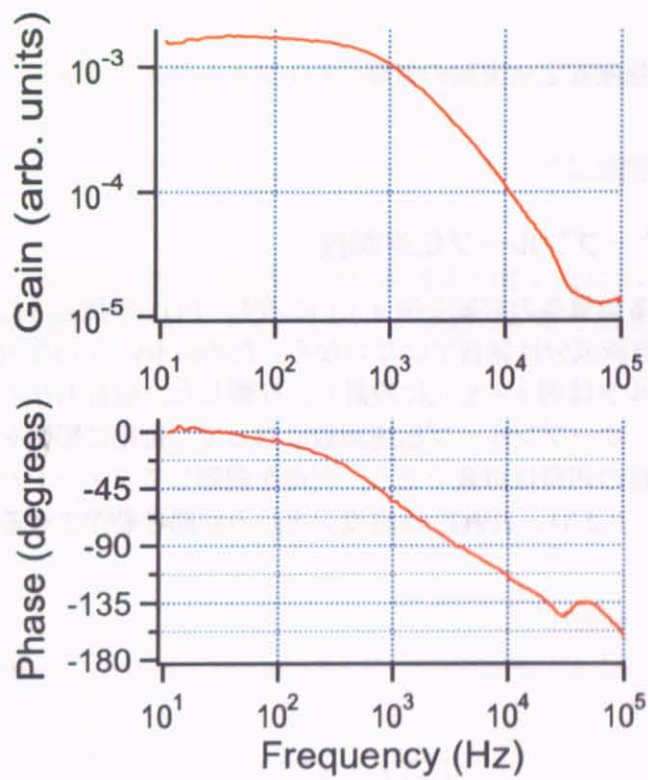


図 4.8: 電流引き込み回路からフォトディテクタまでの伝達関数.

### 4.3 レーザー強度安定化実験

電流引き込み回路を用いてフィードバック制御によるレーザー強度安定化実験をおこなった。実験の概略図を図 4.9 に示す。

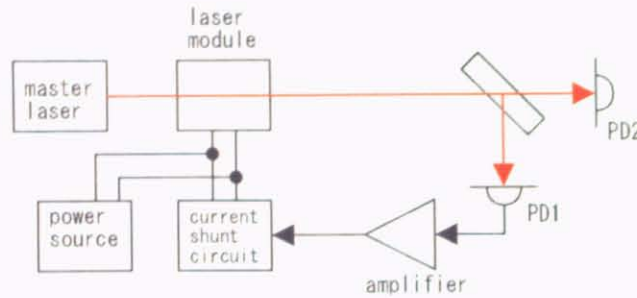


図 4.9: 強度安定化実験の概略. PD:フォトディテクタ.

#### 4.3.1 電気系詳細とオープンループ伝達関数

強度安定化実験における電気系の詳細を図 4.3.1 に示す。PD1 で測定された光強度信号の直流成分を 0 にする（直流成分は雑音ではないから）ために RVG1 の参照電圧を差し引いている。ローパスフィルタは図 4.8 を元に設計し、作製した。設計方法の詳細は付録 B に示す。直流増幅回路は、オープンループ伝達関数に対して、位相に影響を与えずに利得のみに寄与する。この回路の利得は可変であり、利得を調節してフィードバック制御が安定するようにできる（図 2.2,2.3）。RVG2 は電流引き込み回路を動作させるためのバイアスである。

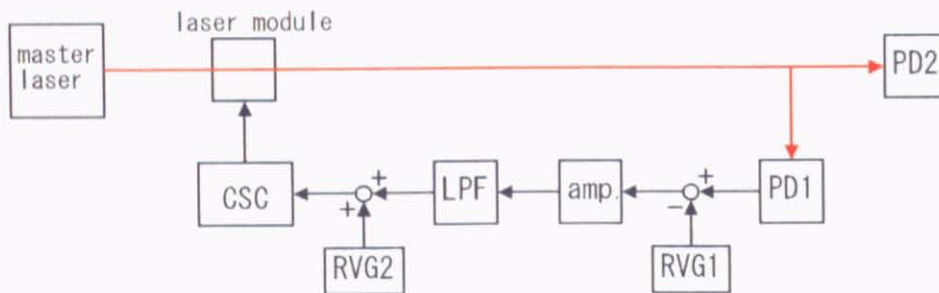


図 4.10: 強度安定化実験の電気系. PD1,2:フォトディテクタ, RVG1,2:参照電圧発生回路, amp.:直流増幅回路, LPF:ローパスフィルタ, CSC:電流引き込み回路.

このように構成したフィードバック制御系について、そのオープンループ伝達関数を測定した。図 4.11 にオープンループ伝達関数の測定方法を示す。系に周波数  $f$  の正弦波を入力することによって、

$$s_{in} = a_{in}(f)e^{2i\pi ft} \quad (4.1)$$

$$s_{out} = a_{out}(f)e^{2i\pi ft} \quad (4.2)$$

と表せる場合、オープンループ伝達関数  $H_{op}(f) = A(f)h_1(f)h_2(f)$  は

$$H_{op}(f) = a_{out}(f)/a_{in}(f) \quad (4.3)$$

となる。したがって、 $s_{in}, s_{in}$  から  $f$  での伝達関数が出る。今回の実験では、R9211C で正弦波の入力と2つの出力信号の解析をおこなった。

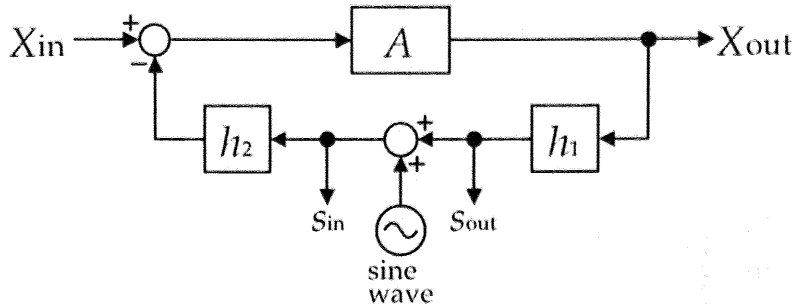


図 4.11: 一般フィードバック系におけるオープンループ伝達関数測定法の概略.

上記のようにして測定したオープンループ伝達関数を図 4.12 に示す。単位利得周波数は 30 kHz, 位相余裕は  $23^\circ$  だった。フィードバック制御は安定であることがわかった。

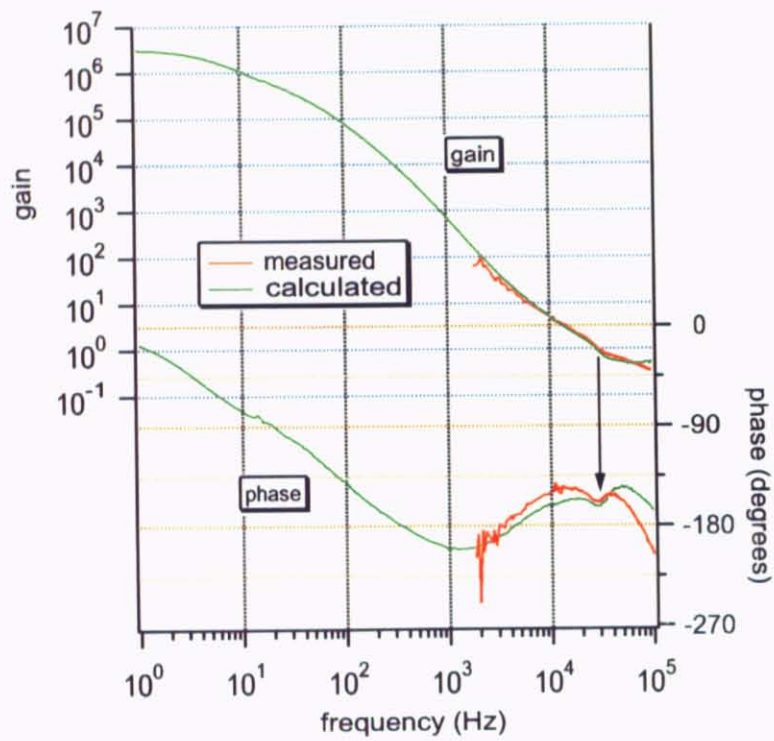


図 4.12: フィードバック制御系のオープンループ伝達関数. 図中の計算値 (緑) は, 図 4.8 の伝達関数と電気系の伝達関数の設計値を掛け合わせたもの.

### 4.3.2 強度安定化実験の結果

前節で紹介したフィードバック制御系を用いてレーザー強度安定化をおこなった。結果を図 4.13 に示す。制御により雑音レベルが下がり、安定化に成功していることがわかる。

制御時の強度雑音について、2.1.2 節での議論から、PD2 の雑音を実際の強度雑音とみなせばよい。また、制御時の PD1 と PD2 の強度雑音スペクトル  $S_1, S_2$  が 200 Hz 以下で  $S_1 \ll S_2$  となっているため、光強度雑音をさらに改善するためにはディテクタ系（広義）の雑音を減らせばよいことがわかる。

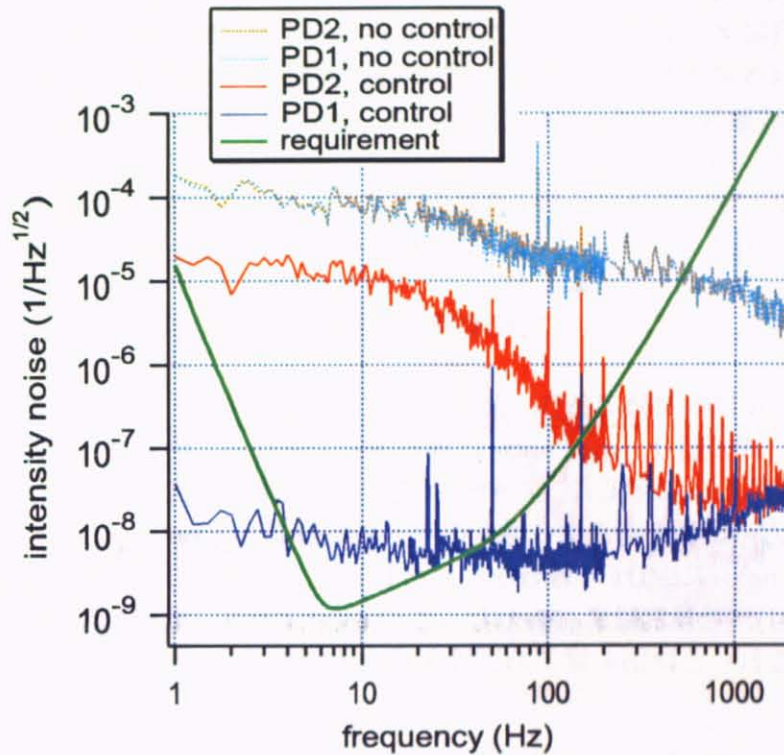


図 4.13: フィードバック制御による強度安定化。要求値は付録 A から。



### 4.3.3 雑音についての考察

光をフォトディテクタに入射せずに雑音を測定すると、ディテクタ系（図 2.7）の電氣的部分の雑音がわかる。そこでディテクタ系の電氣的雑音を測定した。これを図 4.14 に示す。電氣的雑音の単位は強度雑音に換算した。また、電氣的雑音のデータについては、PD1 を含んだ制御側の雑音とともに PD2 側の雑音も調べ、足し合わせた（二乗和の平方根）上で示してある。ここで、強度安定化の測定をおこなったディテクタ系についての雑音は improved のほうである。

これを見ると、光強度雑音 (PD2) は電氣的雑音よりも、低周波側では十倍以上大きく、光強度雑音は他の雑音によって生じていることがわかる。そのため、電氣的雑音の改善によっては光強度雑音は改善されない。実際、電氣的雑音の改善をおこなった（worst から improved へ）が低周波数側の改善は見られなかった（200 Hz 以下では改善し、その結果図 4.14 に示しているレベルになった）。

また、光強度の測定においては光の量子性に起因する shot noise が発生することが知られている。この雑音のスペクトル  $S_{\text{shot}}$  は、フォトダイオードでの測定において、

$$S_{\text{shot}} = \frac{2e}{\bar{I}} \quad (e: \text{電荷素量}, \bar{I}: \text{平均光電流値}) \quad (4.4)$$

となる（このスペクトルは相対値であり、また、SI での単位は  $\text{Hz}^{-1}$  である。グラフはこれの平方根である。）。式の通り、shot noise は周波数によらない、白色雑音である。この shot noise を、併せて図 4.14 に示した。この値は測定時の光電流 (PD1: 6.6 mA, PD2: 6.2 mA) から計算し、両方の影響を考慮して二乗和の平方根を計算して得た。

電氣的雑音と shot noise に PD1 の雑音を足し合わせた（同様に二乗和の平方根）値を図 4.14 に示した (total)。光強度雑音 (PD2) は、この total よりも、低周波数側ではずっと大きい。すなわち、これらとは別の雑音の影響を受けている。

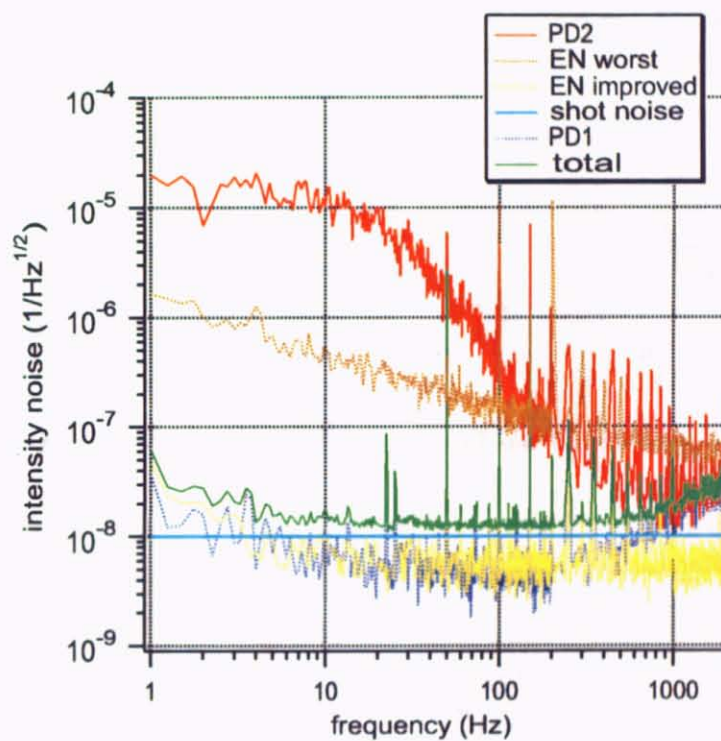


図 4.14: 安定化における雑音の比較. EN:電氣的雑音.

## 4.4 強度雑音改善のための実験

強度雑音をさらに改善するために実験をおこなった。結果として改善には至らなかったが、有用と思われる情報も得られたので以下に示していく。

### 4.4.1 アクチュエータによる強度雑音の違い

4.3 節ではアクチュエータに電流引き込み回路を用いた (図 4.9)。今回は別のアクチュエータを用いてフィードバック制御をおこない、そこでの強度雑音雑音を電流引き込み回路を用いたときの雑音と比較した。

フィードバック制御の概略を図 4.15 に示す。ディテクタは 4.3 節で用いたものと同じである。電気系については、フィードバックの安定性などに注意して適宜おこなった。AOM にはオプトサイエンス社製 AO モジュレーター TEM-80-20-1.06 を用いた。

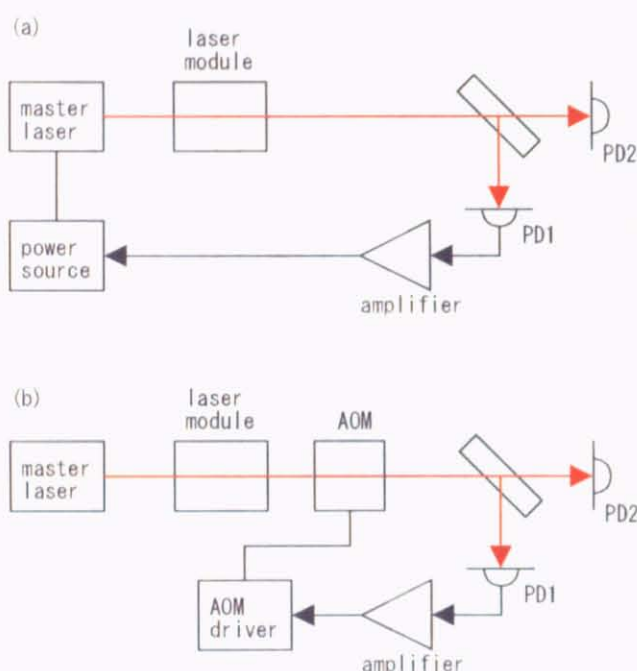


図 4.15: 他のアクチュエータを用いたフィードバック制御。(a) マスターレーザー制御, (b) AOM 制御。

フィードバックによって安定化した強度雑音の測定結果を図 4.16 に示す。100 Hz 以下では強度雑音は 3 種類ともほぼ等しくなっている。したがって、安定化時の強度雑音はアクチュエータによるものではなく、図 4.13 における雑音の原因は電流引き込み回路ではないことがわかった。マスターレーザー制御だけ 100 Hz 以上で雑音が大きくなっているのは、制御の利得が足りなかったためである。

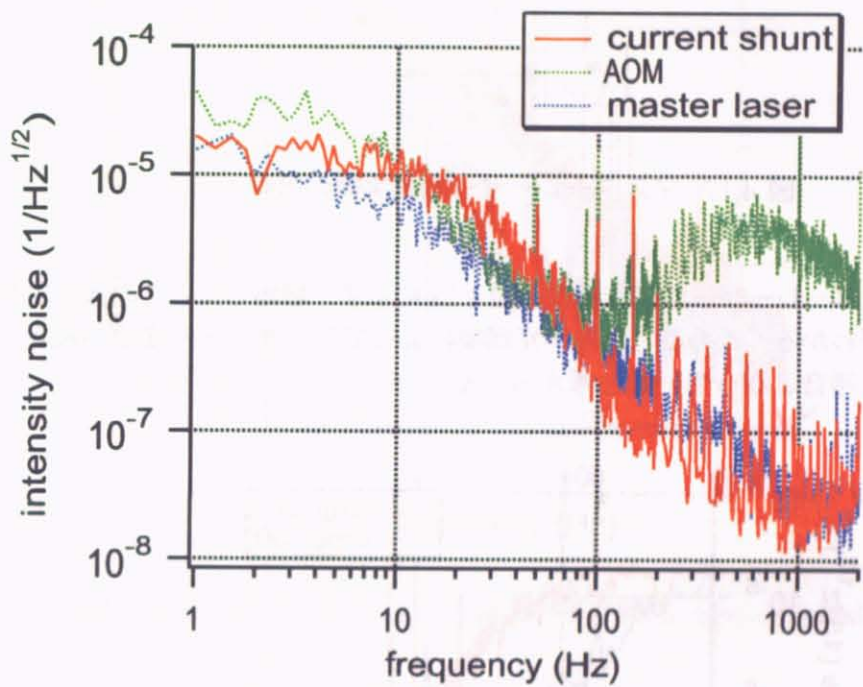


図 4.16: アクチュエータによるフィードバック制御時レーザー強度雑音の違い (PD2 での強度雑音).

#### 4.4.2 マスターレーザーだけの強度安定化

マスターレーザーだけの光をフィードバック制御で安定化し、強度雑音を測定した。そして、増幅をおこなっているときの雑音と比べた。

制御のアクチュエータには AOM を用いた (図 4.17)。増幅していないときには電流引き込み回路による制御はできないからだ。また、このとき光学系は図 4.2 に示したものをそのまま用いた。すなわち、マスターレーザーだけといっても増幅器のレーザーモジュールは通過している。ただ、モジュールに励起電流を流していないため、増幅してはいない。

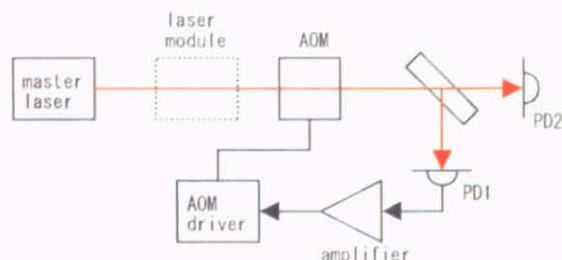


図 4.17: マスターレーザー制御実験の概略.

安定化したマスターレーザーの強度雑音を図 4.18 に示す。増幅したときの雑音よりも雑音が小さいことがわかる。このことから、光増幅によってレーザー光に変化が起き、それがディテクタ系の雑音となっていると考えられる。

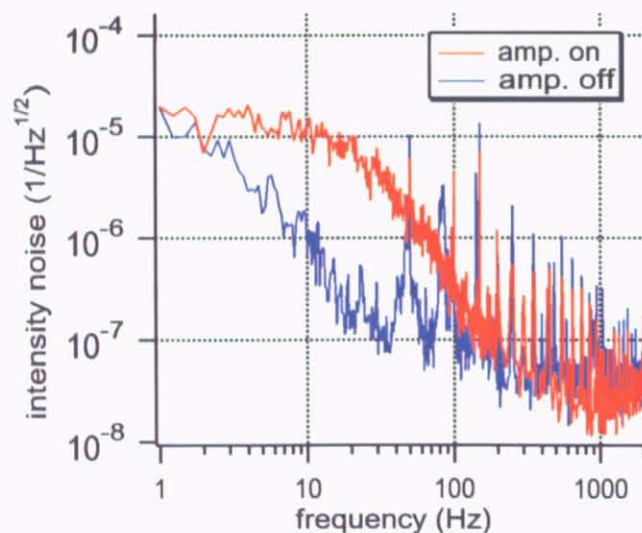


図 4.18: マスターレーザーだけの強度雑音と増幅時の強度雑音.

### 4.4.3 レーザーの位置揺らぎの測定

レーザーの、進行方向と垂直な面方向の揺れは、広義ディテクタ系の雑音となる可能性があることが指摘されている [16]. そこで、レーザーの位置揺らぎを調べた. 位置揺らぎは、四分割フォトダイオードを用いて測定した. 増幅しているときと増幅していないときの両方について測定した.

図 4.19 に測定した位置揺らぎを示す. 増幅したときに位置揺らぎが増えることがわかる. この位置揺らぎの増加と強度雑音の増加 (図 4.18) には関連性があることが考えられる.

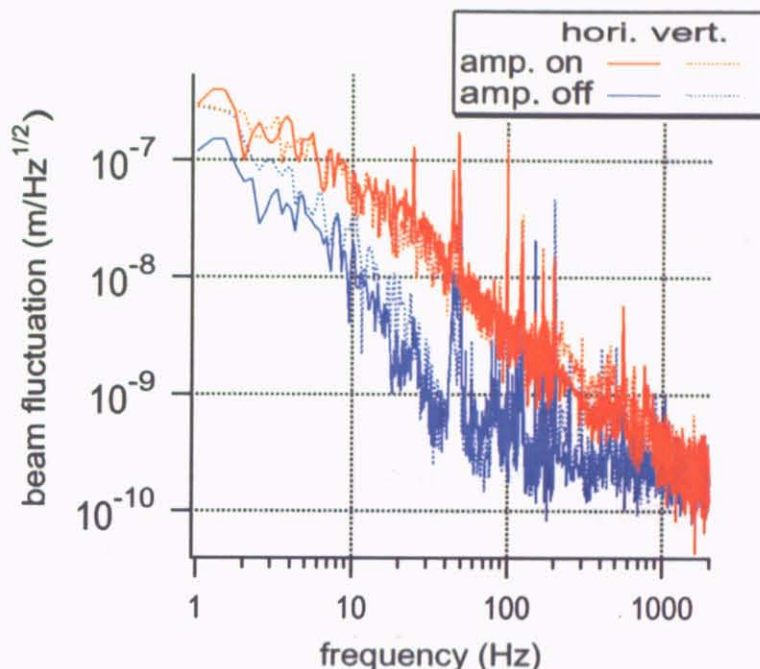


図 4.19: ビームの位置揺らぎ. hori.:horizontal (水平方向), vert.:vertical (鉛直方向).

### 4.4.4 その他の調査

強度雑音を改善するため、実験装置のいくつかの部分を変えて調査をおこなった. 内容と結果を以下に示していく. これらの実験においては、雑音について改善だけでなく悪化も見られなかった. そのことから、これら調査した部分の改善によっては強度雑音の改善はできないことがわかった.

- フォトダイオード

先にも少し書いたが、Nd:YAG レーザーの測定に用いるフォトダイオードには、Si 製と InGaAs 製がある. そこで、まず Si 製のフォトダイオード 2 個 (S1223-01×2) を PD1 と PD2 (図 4.9) に用いて安定化、測定をおこなった. 同様に InGaAs 製のフォトダイオー

ド 2 個 (G5832-02×1,G8370-02×1) を用いて安定化, 測定をおこなった. そして強度雑音を比べたが, 差はみられなかった.

- ファラデー・アイソレータ

ファラデー・アイソレータはマスターレーザーへの戻り光を防ぐための光整流器である. はじめは 1 つだけ使用していたが, 後には 2 つ使用して (図 4.2) 強度安定化実験をおこなった. その結果, アイソレーターを増やしても強度雑音は改善しなかった. 図 4.13 などの実験結果はすべてファラデー・アイソレータを 2 つ用いた状態での結果である.

- フォトダイオード入射時のビーム半径

フォトダイオード入射時のビーム半径をレンズで絞って強度安定化をおこなったが, 強度雑音は改善しなかった.

- 偏光

光を偏光ビームスプリッタに入射し, より直線偏光になるようにしてからディテクタ系に入射した. そして強度安定化をおこなったが強度雑音は改善しなかった.

- 風・照明

ディテクタ系の光学部分に, レーザーの通り道に穴を開けたダンボール箱をかぶせ, 室内の風や照明光, レーザーの散乱光を防いだ. その状態で強度安定化をおこなったが強度雑音は改善しなかった.

- フォトダイオード入射時の光量

フォトダイオード入射時の光量を, 部分反射鏡などを用いて増減し, 強度安定化をおこなったが強度雑音は改善しなかった.

- 50-50 ビームスプリッタ

PD1 に入射する光と PD2 に入射する光が分かれる場所である 50-50 ビームスプリッタについて, 別のものを用いたり, これを用いずに wedge 窓による分岐で PD1 と PD2 に対する入射光をそれぞれ作ったりしたが, 強度雑音は改善しなかった.

## 第5章 モードクリーナーを導入した強度安定化

4.4節において、光増幅をするとフィードバック制御時の雑音が大きくなることがわかった。この原因は光増幅によるビーム品質の悪化であると考え、モードクリーナーを導入することにした。この章では光学系にモードクリーナーを導入して、その透過光の光強度のフィードバック制御をおこなった結果を示す。なお、実験環境として、第4章とこの章では実験をおこなった部屋が違っていることを記しておく。

### 5.1 モードクリーナー

モードクリーナーは光共振器である。光共振器は固有の共振周波数を持つ。モードクリーナーに光が入射した場合、周波数が共振周波数に等しい光は共振器を透過し、違う周波数の光は反射する。この性質から光を整形する。このとき、共振周波数を光の周波数に一致させる必要があり、フィードバック制御を用いてこれをおこなう。

今回用いたモードクリーナーは、当研究室の森脇氏が設計、作製した金属製の枠に鏡を取り付けたものである。モードクリーナーの構成を図5.1に示す。凹面全反射鏡一枚と平面結合鏡2枚からなる。凹面鏡にはPZTという piezoelectric 電気素子を取り付け、これに電気信号を入力して共振周波数を制御する。ここで、結合鏡の振幅透過率、反射率が  $t_c, r_c$ 、凸面全反射鏡の振幅反射率を  $r_c$  と書く。これらの透過率、反射率の記述について、強度の場合は  $T, R$  と大文字にし、裏面は  $t', r'$  とする。また、鏡のロスは無視する。

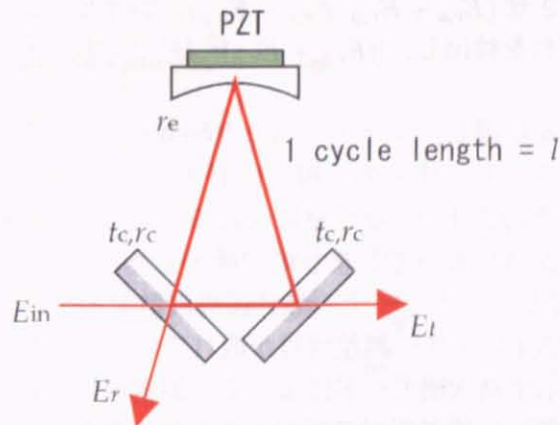


図 5.1: モードクリーナー。鏡は白面が表。



### 5.1.1 共振と周波数制御

モードクリーナーのフィードバック制御には、偏光による鏡に対する応答の違いを用いた [28]. この方法について説明する.

図 5.1 について、入射光  $E_{in}$  は、周波数  $f$  の単色平面波と考えると、

$$E_t = \frac{T_c}{1 - R_c r_c \exp(-2\pi i l f / c)} E_{in} \quad (5.1)$$

$$E_r = \left( -r_c + \frac{T_c r_c}{1 - R_c r_c \exp(-2\pi i l f / c)} \right) E_{in} \quad (5.2)$$

である. 今回は反射光をフィードバックに使ったので、反射光のほうを考える.

ここで、s 偏光と p 偏光で鏡の反射の位相が  $\pi$  ずれることを考える. また、結合鏡は反射率、透過率も変化する. このとき、s 偏光がそのまま書ける場合は、

$$E_{r,s} = \left( -r_{c,s} + \frac{T_{c,s} r_{c,s}}{1 - R_{c,s} \exp(-2\pi i l f / c)} \right) E_{in,s} \quad (5.3)$$

$$E_{r,p} = \left( r_{c,p} + \frac{-T_{c,p} r_{c,p}}{1 + R_{c,p} \exp(-2\pi i l f / c)} \right) E_{in,p} \quad (5.4)$$

となる. ここで、入射光について、位相を  $\pi/2$  ずらすことを考え、

$$E_{in,s} = 1 \quad (5.5)$$

$$E_{in,p} = i\alpha \quad (5.6)$$

とする. そして、誤差信号  $P_{ersig}$  として

$$P_{ersig} = |E_{r,s} + E_{r,p}|^2 - |E_{r,s} - E_{r,p}|^2 \quad (5.7)$$

を得る. この  $P_{ersig}$  をプロットしたのが図 5.2 である.

以上の計算を実験的に実現するためには、まず  $1/4$  波長板で楕円偏光をつくり  $(1, i\alpha)$ , 反射光を  $1/2$  波長板で回転させ  $(E_{r,s} + E_{r,p}, E_{r,s} - E_{r,p})$ , 偏光ビームスプリッタでわけてフォトディテクタでそれぞれを検出し,  $[|E_{r,s} + E_{r,p}|^2, |E_{r,s} - E_{r,p}|^2]$ , 最後にその 2 つの信号を引き算する.

このようにして誤差信号を取得し、フィードバック制御をかけるシステムが図 5.3 である. この図において、モードクリーナーの反射光に対する一枚目の  $1/2$  波長板は、元々 s 偏光の光が大きいところでそのままウェッジ窓に入れると、ウェッジ窓の反射率の偏光依存性によりさらにアンバランスになってしまうので挿入した.

PZT へ正弦波を入力してモードクリーナーの共振周波数を掃引し、誤差信号の波形を実際に取得した. 波形を図 5.4 に示す. 誤差信号が取れていることがわかる. 波形が鋭い方が s 偏光である. 次節で示す高次横モードによって、誤差信号に非対称性ができ、大きな誤差信号の横 (図では左側) に誤差信号の列が小さくなりながら並んでいる. 誤差信号の零点と共振点はずれることがあるため、図 5.5 のように誤差信号と透過光強度 (最大時が共振点) を比べながら波長板や引き算回路を調節し、誤差信号の零点と共振点を一致させる必要がある.

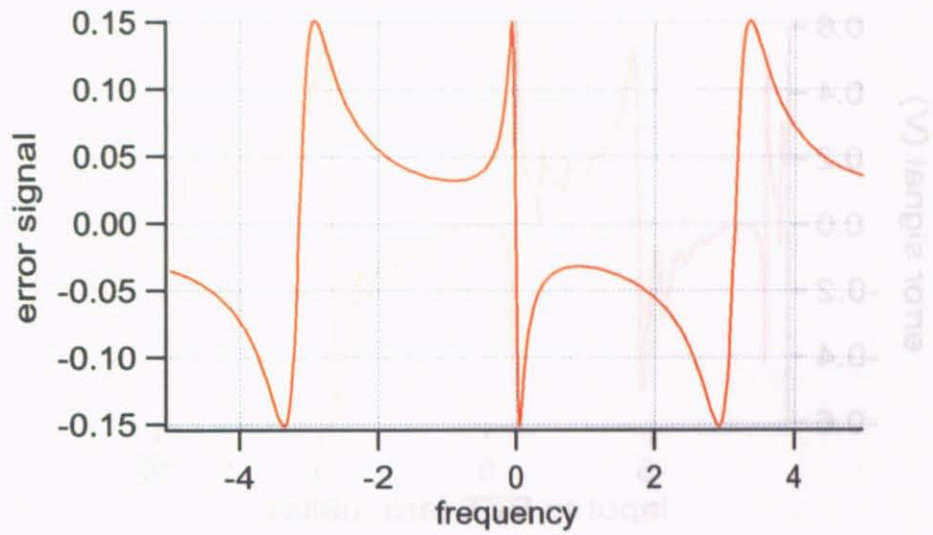


図 5.2: 偏光を用いた誤差関数の計算値.  $\alpha = 0.1, R_{c,s} = 0.95, R_{c,p} = 0.80, 2\pi l = c$  とした.

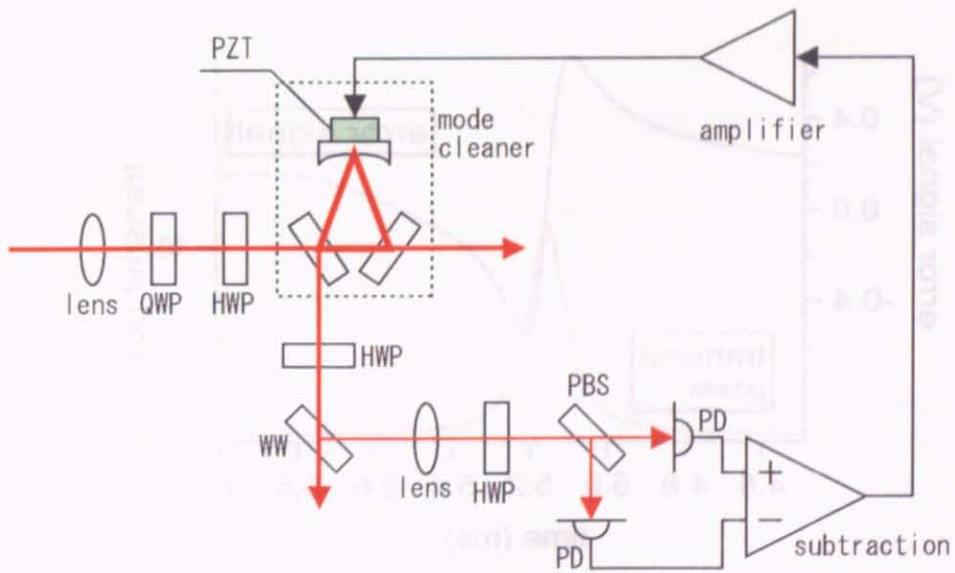


図 5.3: モードクリーナーのフィードバック制御系



図 5.4: 測定した誤差信号の波形.

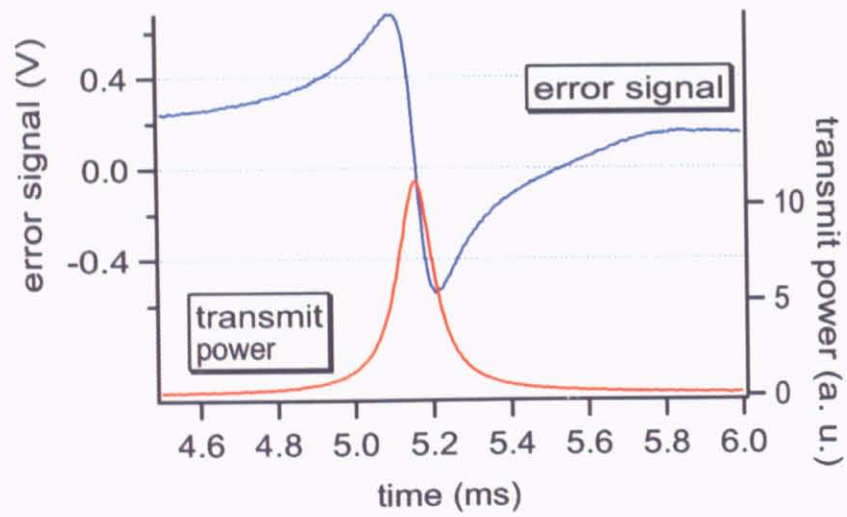


図 5.5: 測定した誤差信号と透過光強度.

### 5.1.2 横モードとモードクリーナー

Maxwell 方程式から得られるレーザーの伝播の形として,

$$E_{l,m}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} H_l \left( \sqrt{2} \frac{x}{w(z)} \right) H_m \left( \sqrt{2} \frac{y}{w(z)} \right) \times \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} - \frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)} - ikz + i(l + m + 1)\eta \right] \quad (5.8)$$

という式がある [23]. ここで, レーザーの進行方向は  $z$  であり,  $H_l, H_m$  はそれぞれ,  $l$  次,  $m$  次のエルミート多項式 [29] である.  $k$  は波数であり,  $w(z)$  は  $z$  におけるビームの広がりを表し,  $w(0) = w_0$  であり,  $R(z)$  は波面の曲率を表す.  $\eta$  は位相のずれを表す. この式はビームの,  $x, y$  方向 (横方向) の分布を表していて, 離散的でもあるので, ビームの横モードという. ここで,  $l = m = 0$  のときのレーザーのモードを基本モードといい, それ以外を高次モードという.

さて, モードクリーナーを考える. モードクリーナーにおいて, 鏡の曲率から, 共振が可能な横モードの  $w_0$  は一意に決まる. ここで, 位相における  $\eta$  の効果から,  $l + m$  が違えば共振周波数も一般には異なる. 特に基本モードが共振した場合,  $l + m = 0$  はほかにはないので, 高次モードは共振しない. 光共振器は共振する光しか透過しないので, モードクリーナーの出力は基本モードだけに行うことができる.

横モードについて, 基本モードのビームが  $x$  方向に  $x_1$  だけ平行移動した場合を考える. このとき,

$$E_{0,0}(x + x_1, y, z) = E_{0,0}(x, y, z) \times \exp \left( -\frac{x_1^2}{w(z)^2} - \frac{ikx_1^2}{2R(z)} \right) \times \exp \left[ -\left( \frac{2x_1}{w^2(z)} + \frac{ikx_1}{R(z)} \right) x \right] \quad (5.9)$$

である. ここで上式の下段は, テイラー展開を考えれば,  $x$  についての無限次元の多項式である. したがって,  $H_l(\sqrt{2}x/w(z))$  の重ね合わせで書ける. つまり, 係数  $a_l$  を用いて,

$$E_{0,0}(x + x_1, y, z) = \sum_l a_l E_{l,0}(x, y, z) \quad (5.10)$$

で書ける. レーザーの位置揺らぎについての 1 つの記述の仕方として, この議論における  $x_1$  の揺らぎが考えられる. この場合, 式 (5.10) の  $a_l$  の時間依存で位置揺らぎが説明できる. ここでモードクリーナーに光を通すことを考えると, このような多モードの存在はなくなるので, 位置揺らぎもなくなると考えられる.

また,  $w(z)$  は,

$$w^2(z) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2 n} \right)^2 \right] \quad (5.11)$$

を満たす。ここで  $n$  は屈折率,  $\lambda$  は波長である。ところで式 (5.8) について, 強度のみを考え, さらに  $(x, y)$  依存性だけを見ると, 基本モードについては,

$$|E_{0,0}(x, y, z)| \propto \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \quad (5.12)$$

と書ける。なぜなら 0 次エルミート多項式は定数だからである。このとき断面の強度分布はガウス関数となる。光がこれだけであればガウス関数なので正しく  $w(z)$  が得られる。一般の場合は, エルミート多項式の影響もあり, 複数のモードがある場合は位相による干渉のようなものも発生するので, 断面はきれいなガウス関数にはならない。そこを無理にガウス半径のようなもの  $W(z)$  を求めた場合, 一般にエルミート多項式は半径を太くするように働くので, 大きめの結果がでる。これを式 5.11 に近い式で書こうとした場合, 書き方の 1 つとして,

$$W^2(z) = M^2 w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2 n} \right)^2 \right] \quad (5.13)$$

というように,  $M^2$  という値によって全体的に太くするやり方がある。この  $M^2$  という値は,  $M^2 = 1$  のとき基本モードであり, 最善であるのは確かだが,  $M^2 > 1$  のとき, その値が何を意味するかは必ずしも自明でない。

## 5.2 強度安定化実験

5.1.1節で示したような方法でモードクリーナーに基本モードを共振させ、レーザー光を透過させた。モードクリーナーを透過させた光についての強度安定化の実験を以下に示す。

### 5.2.1 実験方法

実験の概略を図 5.6 に示す。モードクリーナーを導入した以外は前章と同じである。

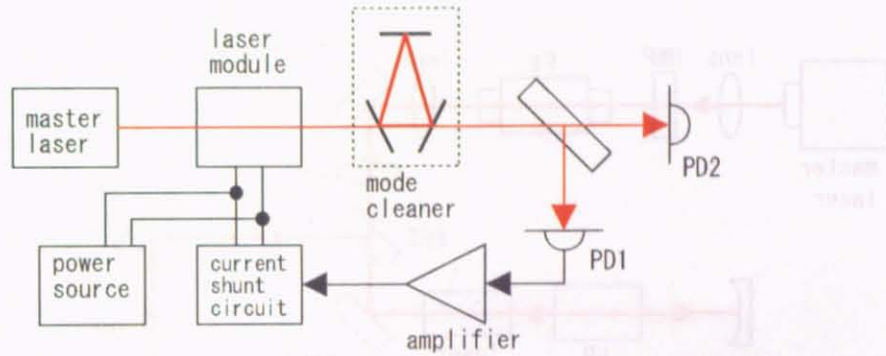


図 5.6: モードクリーナーを用いた強度安定化実験の概略。

光学系の詳細を図 5.7 に示す。モードクリーナー及びその制御のための光学系が加わる。ハイパワーメーター、フォトディテクタは前章と同じものを用いた。ただし、フォトディテクタは、モードクリーナーの制御に Si 製を、強度制御と測定に InGaAs 製を用いた。マスターレーザーとレーザーモジュールも前章と同じものを用いた。

電気系は、前章とすべて同じである (図 4.3.1)。

これらの強度安定化フィードバック制御系について、オープンループ伝達関数を測定した。結果を図 5.9 に示す。このフィードバック制御は安定であり、単位利得周波数: 28 kHz, 位相余裕: 63° である。

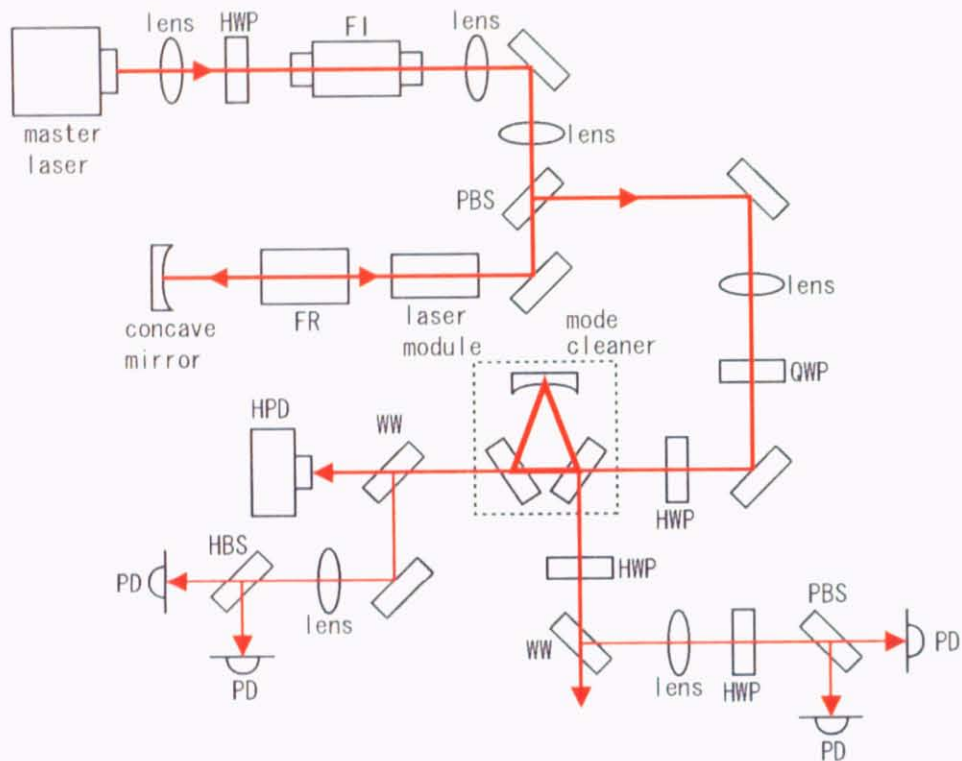


図 5.7: モードクリーナーを用いた強度安定化実験の光学系. QWP:1/4 波長板, HWP:1/2 波長板, FI:ファラデー・アイソレータ, FR:ファラデー・ローター, PBS:偏光ビームスプリッター, WW:ウェッジ窓, HPD:ハイパワーディテクタ, HBS:50-50 ビームスプリッター, PD:フォトディテクタ.



図 5.8: 実験系写真. ここでは四分分割フォトディテクタが加わっている (下部中央寄り右側).

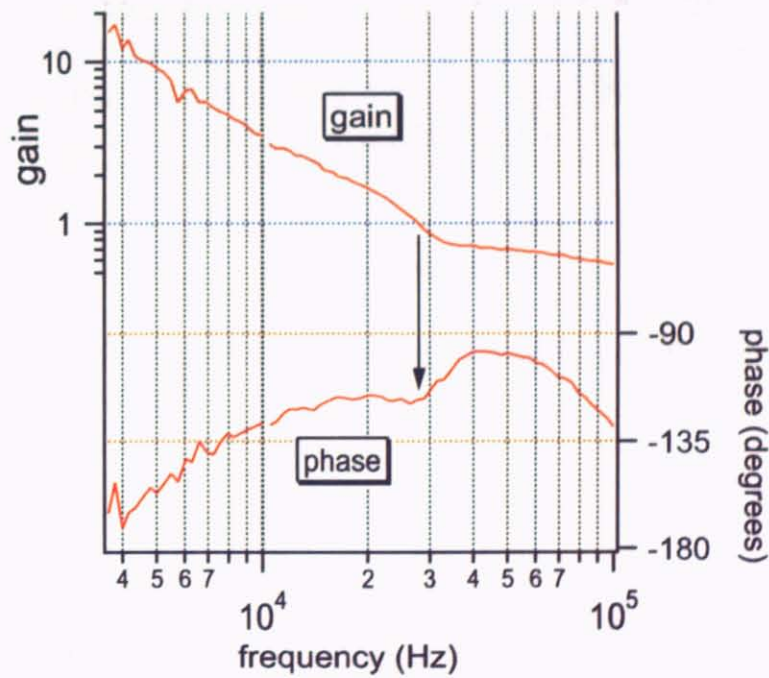


図 5.9: 強度安定化フィードバック制御のオープンループ伝達関数. 単位利得周波数付近.



### 5.2.2 強度安定化の実験結果

モードクリーナーを通した光に対する強度安定化をおこなった。強度安定化の結果を図 5.10 に示す。

安定化制御をおこなったときの、各フォトディテクタで出力される強度雑音を測定した。制御したときの PD1 の雑音は PD2 と比べても十分抑制されており、フィードバック系の利得は十分であることが図からわかる。PD2 で観測される、実際の強度雑音は、300 Hz 前後で最も安定化し、このとき強度雑音は  $2 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1/2}$  程度だった。制御をしないときの強度雑音も測定した。制御しないときはどちらのディテクタの出力もほとんど同じだったため、PD2 の出力データのみ示した。

また、比較のためモードクリーナーがない状態でも安定化をおこない、同様に測定した。このときも制御時の PD1 の雑音は PD2 の雑音と比べて十分小さく、フィードバック系の利得は確保できている。環境変化の影響を考慮して前章の測定とは別に新たに測定したが、雑音レベルは前章の結果とほぼ同水準だった。付録 A で計算した強度雑音への要求もあわせて示した。

安定化制御したときの実際の強度雑音 (PD2 の雑音) を、モードクリーナー使用時と非使用時で比べると、モードクリーナー使用時の雑音は 1 kHz 以下で低く、特に 5 Hz から 200 Hz までの帯域では 1 桁以上改善している。したがってモードクリーナーによってフィードバック制御時の強度安定性は改善することがわかった。

非制御時の強度雑音は、300 Hz 以下でモードクリーナー導入により悪化している。これは基本横モードのみを通すというモードクリーナーの性質により、ビームの揺れなど高次モードの効果で説明できる雑音が強度雑音に変換されるためと考えられる。この悪化は、フィードバック系の利得があれば問題にはならない。実際、安定化後の雑音は前述の通りモードクリーナーを使用したときのほうが良いので、問題になっていないことがわかる。

モードクリーナーを通し、安定化をおこなったときの強度雑音は、強度雑音への要求を、150 Hz 以上では満たしているが、それ以下では満たしていない。これについては次節で考える。

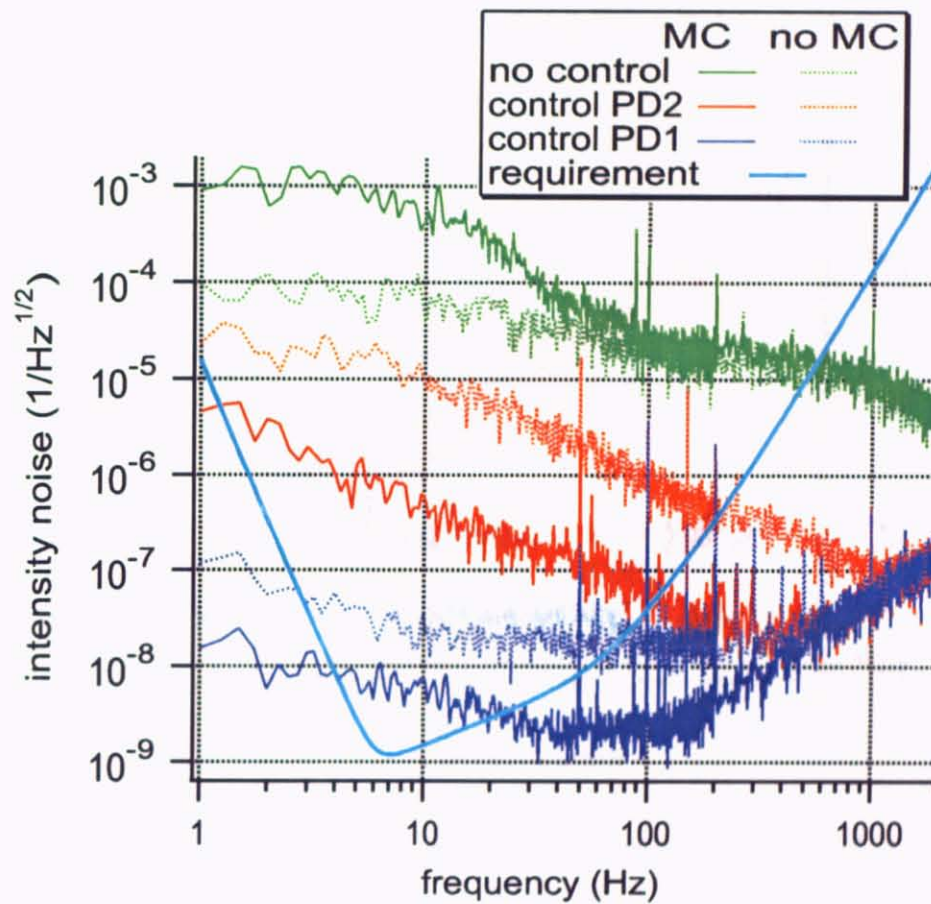


図 5.10: モードクリーナーを使用した強度安定化の実験結果. MC:モードクリーナー, モードクリーナー非使用時と比較.

### 5.2.3 雑音についての考察

強度雑音のレベルは 150 Hz 以下ではまだ大きいので、強度雑音の原因を調べ、今後の改善の方針を考える。

安定化時の強度雑音 (図 5.10) について、4.3.3 節と同様に考察した。すなわち、光を入射せずにディテクタの出力を測定して電気雑音を調べた。また、ディテクタにおける測定時の直流成分から shot noise を計算した。それらの雑音を強度雑音と比べた結果を図 5.11 に示す。

強度雑音は、150 Hz 以下ではこれらとは別の雑音によることがわかった。原因となっている雑音としては、前章と同じくディテクタ系の光学的雑音が挙げられる。

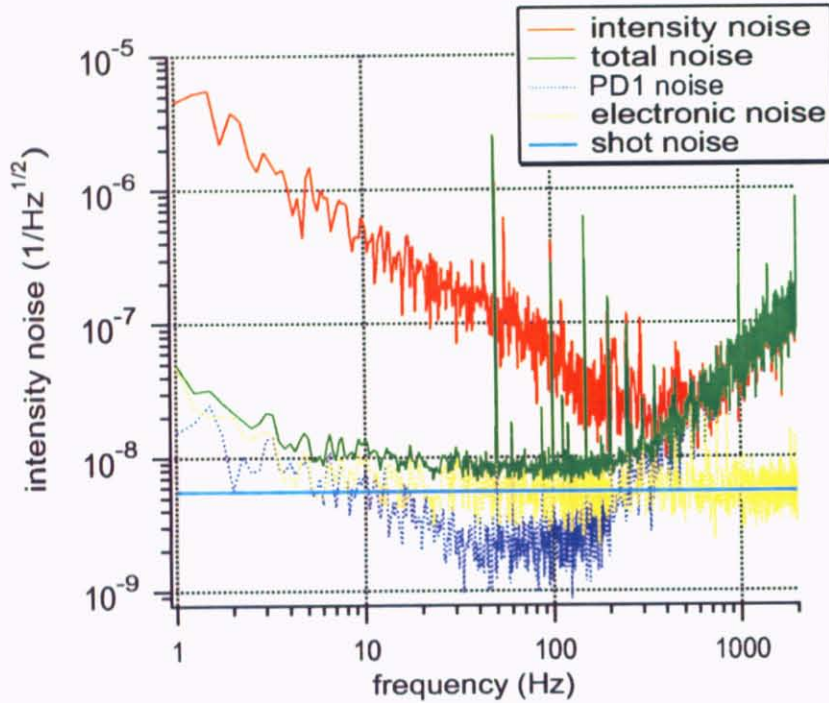


図 5.11: 強度雑音と原因の雑音. total noise: PD1 雑音, 電気雑音, shot noise の 3 つを足した合計の雑音.

## 5.3 その他の実験

モードクリーナーを通したことによって強度雑音が改善したのはなぜか、さらに強度雑音を改善するにはどうすればよいかを考察するために実験をおこなった。

### 5.3.1 レーザーの位置揺らぎの測定

レーザーの照射位置揺らぎを、4.4.3節と同じようにして四分割フォトダイオードで測定した。まず、モードクリーナー透過時と非透過時で位置揺らぎをそれぞれ測定した。その2つを比べたのが図5.12である。モードクリーナーにより位置揺らぎが改善したことがわかる。測定において、モードクリーナー透過後の位置揺らぎは、位置揺らぎの小ささと非制御時の強度雑音の大きさ(図5.10)のため、強度安定化をおこなう必要があった。そのため強度安定化して測定をおこなった。その他の位置揺らぎ測定においては、強度安定化してもしなくても測定結果は変わらず、そのため強度安定化は必要ない。そのため強度安定化はせずに測定をおこなった。

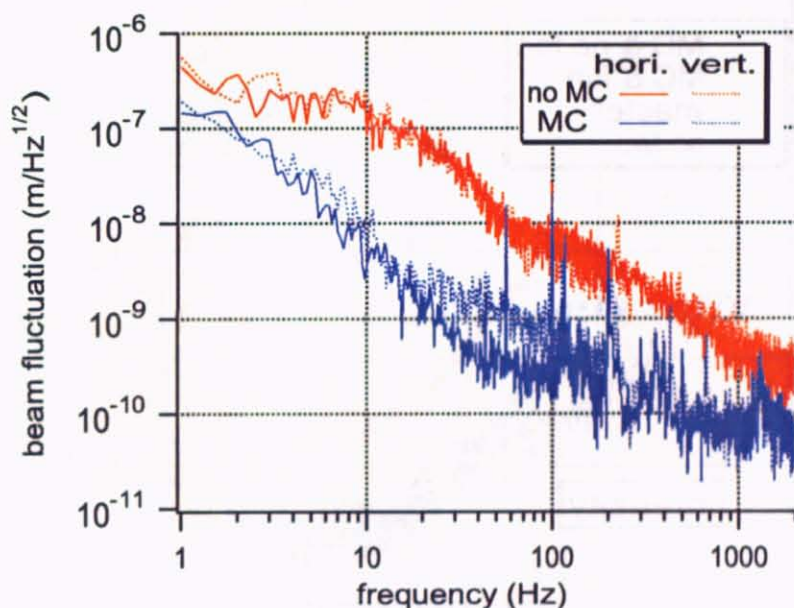


図 5.12: モードクリーナーによる位置揺らぎの変化. MC:モードクリーナー, hori.:水平方向, vert. 鉛直方向.

この章における実験では、実験機器はクリーンブース内にある。このクリーンブースは、ファン(換気扇)のon-off切り替えが可能である。実験は、雑音を減らすために原則としてファンはoffにしておこなっていた。ここで、ファンをonにしてモードクリーナー透過光の位置揺らぎを測定したところ、位置揺らぎはファンによって増加することがわかった。そこで、強度安定化についてもファンがonのときでおこない、位置揺らぎや強度雑音を他のデータと比較した(図5.13)。

その結果、ファンを動かすことによって、位置揺らぎは増加するが、強度雑音はほとん

ど増加しないことがわかった。すなわち、MC（モードクリーナー）あり、ファンありのデータは、位置揺らぎはMCなしで増幅だけのものに近く、強度雑音はマスターレーザーだけのものに近い。つまり、位置揺らぎと強度雑音の相関がくずれている。したがって、強度雑音の原因は位置揺らぎではないと考えられる。

また、マスターレーザーだけで安定化したものとモードクリーナーを通して安定化した光の強度雑音がほぼ同水準にあることから、増幅器によるレーザーの乱れは、モードクリーナーによって解消できたと考えられる。

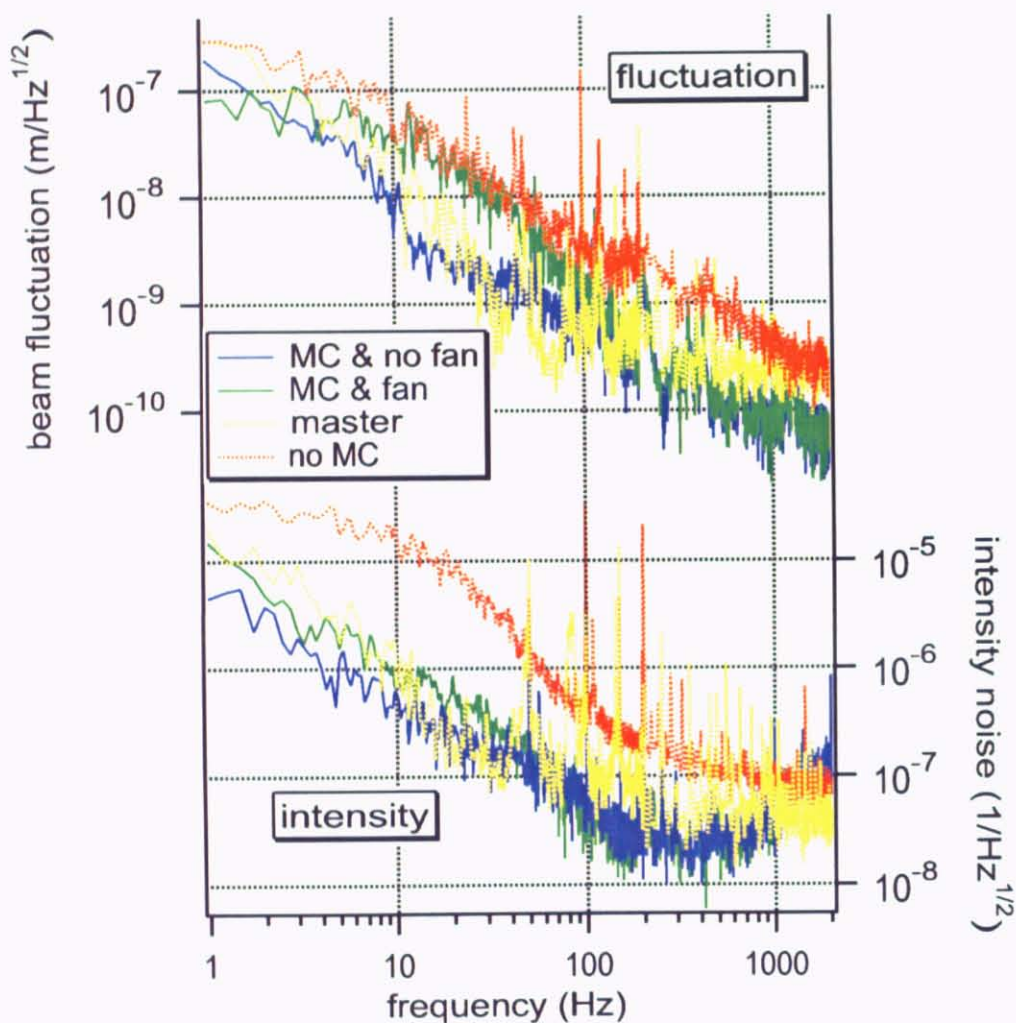


図 5.13: 位置揺らぎと制御時の強度雑音の関係。実線はモードクリーナー透過時でファンありとファンなし。点線はモードクリーナーは無しで増幅ありと増幅なし（図 4.18,4.19）。位置揺らぎは鉛直方向について。

### 5.3.2 $M^2$ の測定

複数の場所でナイフエッジ法によりビーム半径（水平方向）を求め、ビーム半径の拡がり方を測定した。そこから  $M^2$  を求めた。この測定をモードクリーナーを通したときと通さないときでそれぞれおこない、両者の  $M^2$  を比べた。

ナイフエッジ法の概略を図 5.14 に示す。入射する光の電場分布が  $E_{in}(x, y, z)$  で表せるとする。ここに光をさえぎる「ナイフ」を挿入する。ここでの「ナイフ」は、光をさえぎるものならば本物のナイフでなくても良いが、干渉を抑えるためエッジが鋭角なものが好ましい。本実験ではカッターナイフの刃を用いた。ここで、ナイフのエッジが  $(x, z) = (x_1, z_1)$  にあり、しかもこれらが  $y$  によらないとする。このとき全出射光強度  $P_{out}$  は、ナイフにより  $z = z_1$  で  $x > x_1$  である光ははじかれるため、

$$P_{out}(x_1, z_1) \propto \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{x_1} dx |E_{in}(x, y, z_1)|^2 \quad (5.14)$$

となる。この  $P_{out}$  を  $x_1$  の関数として得れば、電場が  $y$  方向について対称な場合、 $z = z_1$  での  $|E_{in}|^2$  の  $x$  についての分布がわかる。さらに、複数の  $z$  について同様の測定をすれば、光の伝播の様子がわかる。

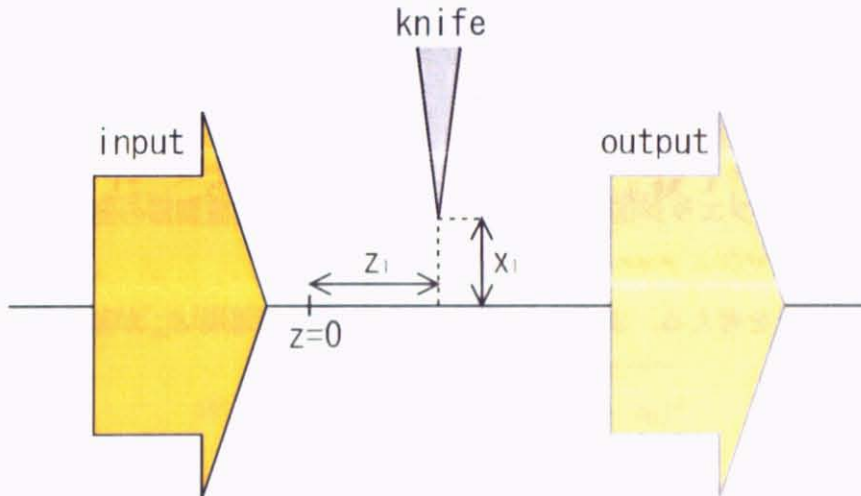


図 5.14: ナイフエッジ法の概略。

実際にナイフとして用いたのが図 5.15 に示す器具である。マイクロメーターによるステージの移動が可能なので、これを用いて図 5.14 における  $x_1$  の調節をおこなった。ナイフは水平方向に動かしたので、得られたのは水平方向の分布である。

測定としては、まず  $z$  方向の原点を決め、次に図 5.15 の器具を適切な位置に置き、光学ベースに固定した。それからナイフの位置を調整しつつ、その時々光出力強度をハイパワーディテクタで測定した。その位置での測定を終えたら器具を次の位置に移動し、同様の測定を繰り返した。この一連の測定をモードクリーナー透過前、透過後に対しそれぞれおこなった。

なお、後に述べるビーム伝播のフィッティングのため、モードクリーナー透過前、透過後の光について、レンズであらかじめ集光させ、ビームの最も細い領域とそこから離れた

領域 (式 (5.13) での  $W^2 \approx M^2 w_0^2$  の領域と  $W^2 \propto z^2$  の領域) がどちらも観測できるようにした。

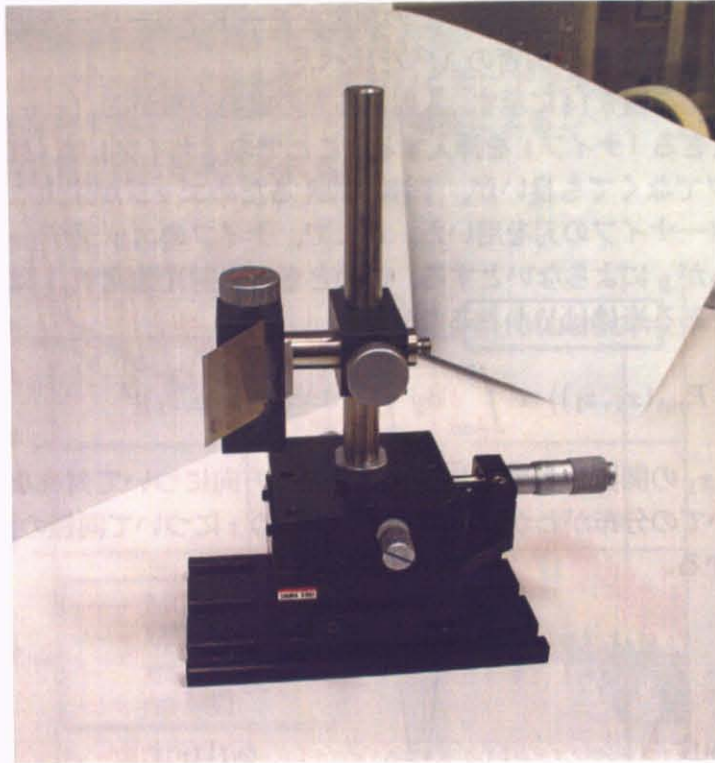


図 5.15: ナイフエッジ法に用いたナイフ及びエッジ位置調節の器具.

得られた結果の解析を考える。まず、ナイフに入射する光の電場  $E_{\text{in}}$  が基本横モードの場合を考えると、

$$|E_{\text{in}}(x, y, z)| \propto \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right) \quad (5.15)$$

$$\therefore P_{\text{out}}(x_1, z_1) \propto \int_{-\infty}^{x_1} \exp\left(-\frac{2x^2}{w^2(z_1)}\right) \quad (5.16)$$

となる。ここで、

$$\text{erfc}(z) = \int_{-\infty}^z \exp(-t^2) dt \quad (5.17)$$

となるような関数  $\text{erfc}$  (これを余誤差関数と言う) を導入すると、

$$P_{\text{out}}(x_1, z_1) \propto \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{2} x}{w(z_1)}\right) \quad (5.18)$$

と書ける。

そこで、各  $z$  について、エッジ位置  $x$  に対する出力強度に対し、式 (5.18) を考えて余誤差関数でフィッティングし、ビーム半径  $W(z)$  を得た。測定の一部を図 5.16, 図 5.17 に示す。フィッティングによく一致していることがわかる。

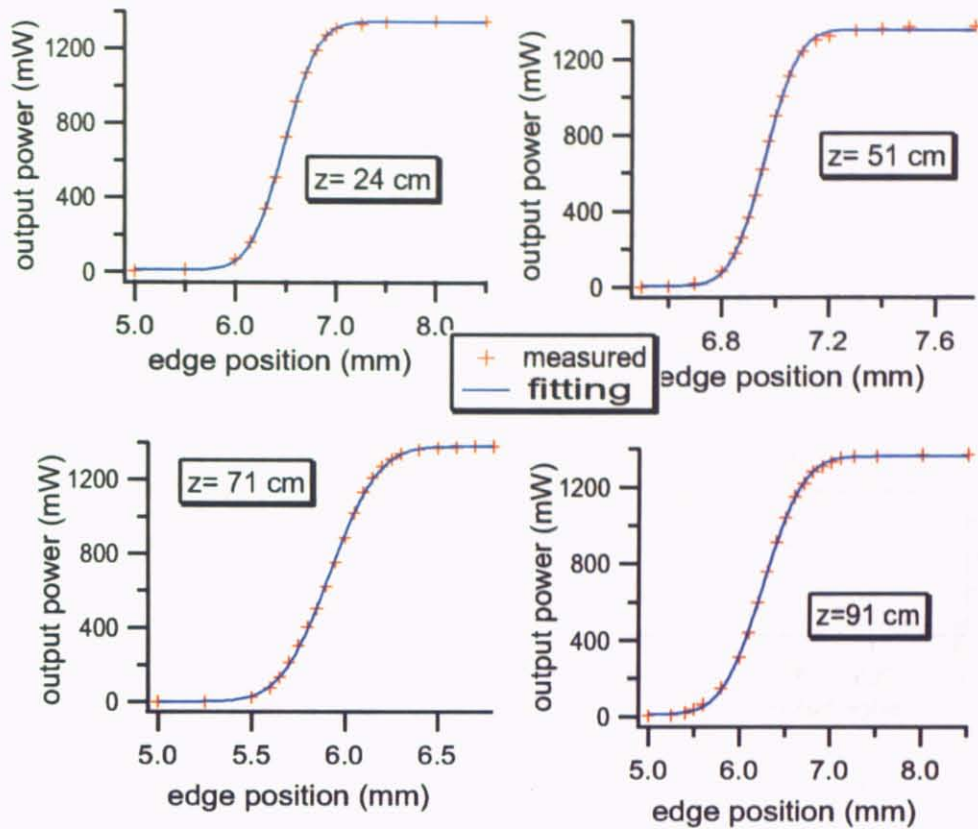


図 5.16: ナイフエッジ法によるビーム半径の測定. マスターレーザー透過前.

そして, 得られたビーム半径  $W(z)$  のデータを,

$$W(z) = \sqrt{M^2} w_0 \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2 w_0^4} (z - z_0)^2} \quad (5.19)$$

という関数でフィッティングした. フィッティングの様子をそれぞれ図 5.18, 図 5.19 に示す.

その結果, モードクリーナー透過前で  $M^2 = 1.10 \pm 0.04$ , 透過後は  $M^2 = 1.004 \pm 0.007$  だった. そのことから, モードクリーナーにより  $M^2$  は改善していることがわかった.

また, 明らかに  $M^2 \neq 1$  であるモードクリーナー透過前の光では, 図 5.16 も図 5.19 も, 図 reffig:KnifeEdgeAfter1 や図 5.19 と比べてフィッティングカーブに対する一致性が悪い. これは,  $M^2 \neq 1$  の光は基本横モードのみによる記述ができないため,  $x$  方向においてはガウス関数に一致せず,  $z$  方向についても式 5.19 のような関数では記述できないためと考えられる.

強度雑音と  $M^2$  の関係を考えると, モードクリーナー透過前の光について, フィードバック制御における雑音の原因は  $M^2$  の悪さによるものとも考えられる. ただ, モードクリーナー透過後の光は誤差の範囲内で  $M^2 = 1$  となっており, 横モードとしてはほぼ完璧な状態であることから, 透過後におけるフィードバック制御の雑音の原因は横モードに関する雑音ではないと考えられる. そのため, モードクリーナー透過後の光の横モードを改



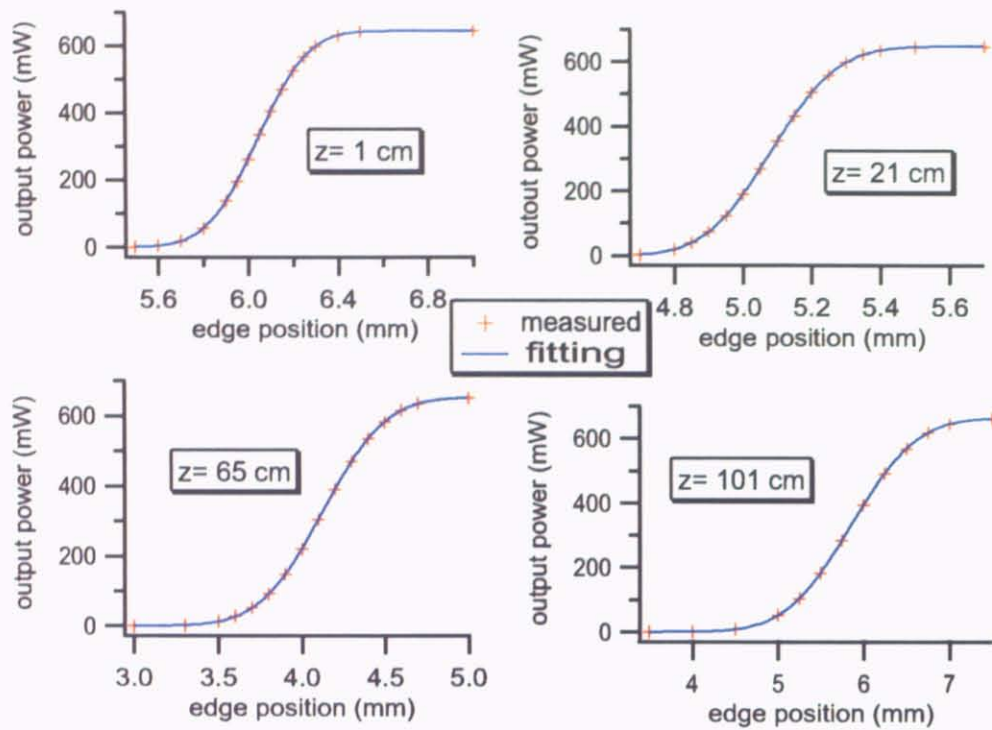


図 5.17: ナイフエッジ法によるビーム半径の測定. マスターレーザー透過前.

善することによる制御時光強度雑音の改善は期待できない. また,  $M^2 = 1$  であるからこれ以上の改善は不可能である.

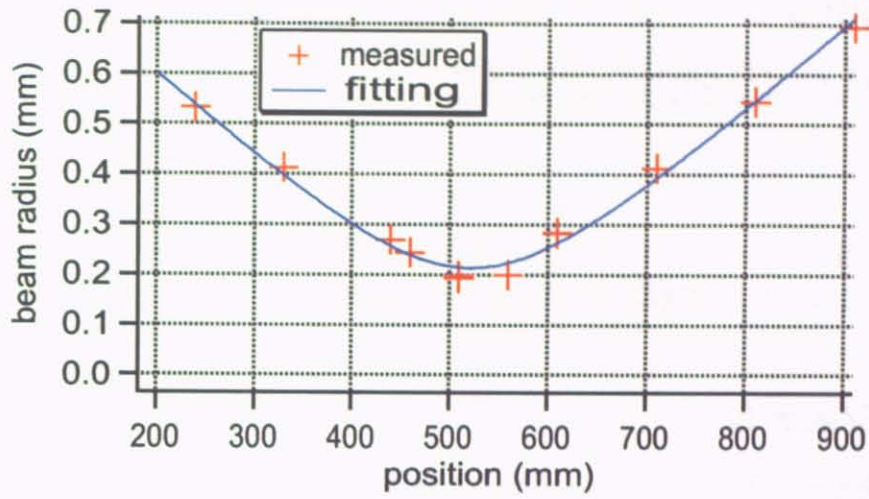


図 5.18: モードクリーナー透過前のビーム伝播.

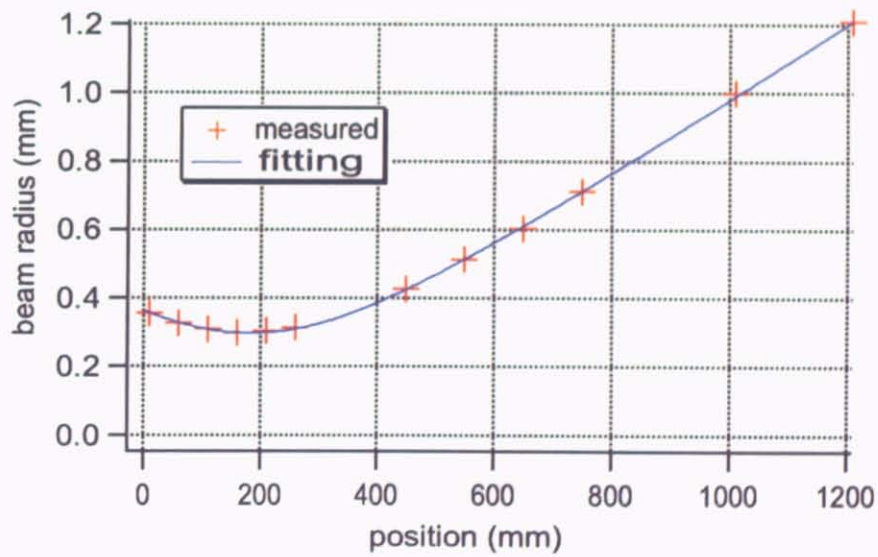


図 5.19: モードクリーナー透過後のビーム伝播.

## 第6章 別のレーザーモジュールを用いた光学系への強度安定化

第4章, 第5章で用いたレーザーモジュール (CEO 社製) とは別のレーザーモジュールを用いて実験をおこなった. 実験環境は第5章と同じである.

### 6.1 実験のシステム

光学系は引き続きマスターレーザーと増幅器で構成した. マスターレーザーも同じもの (Innolight 社製 Mephisto) を用いた. またフィードバック制御は増幅器に対しておこなった.

光学系の詳細を図 6.1 に示す. ハイパワーメーター, フォトディテクタは前章, 前々章と同じものを用いた. また, これまでと同様にレーザーモジュールに光を2回通す設計にした. また, 図 6.2 には写真を示す.

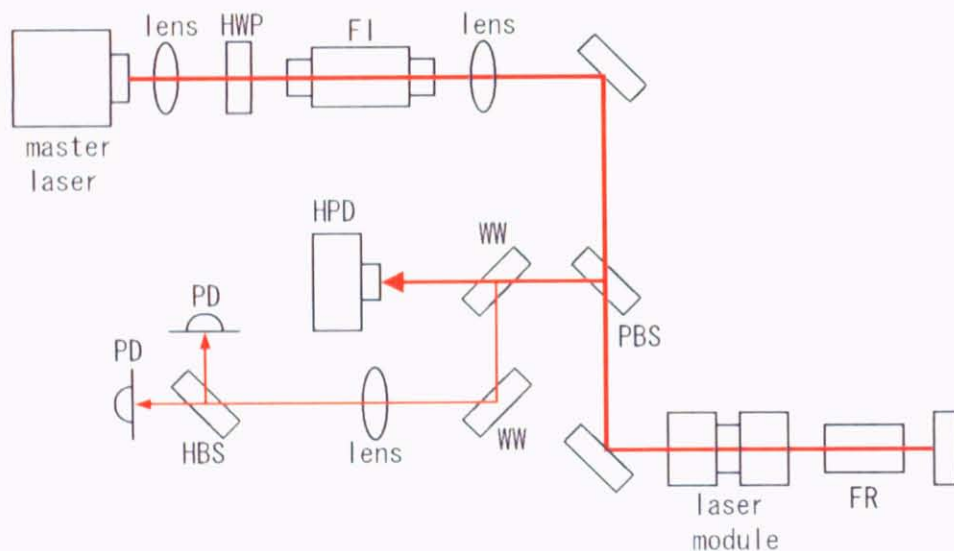


図 6.1: 実験の光学系詳細.

#### 6.1.1 レーザーモジュール

レーザーモジュールには三菱電機で開発されたものを用いた. このモジュールは, CEO 社のものと同じく Nd:YAG 円筒型結晶 (ロッド) を使用しており, 半導体レーザー励起,

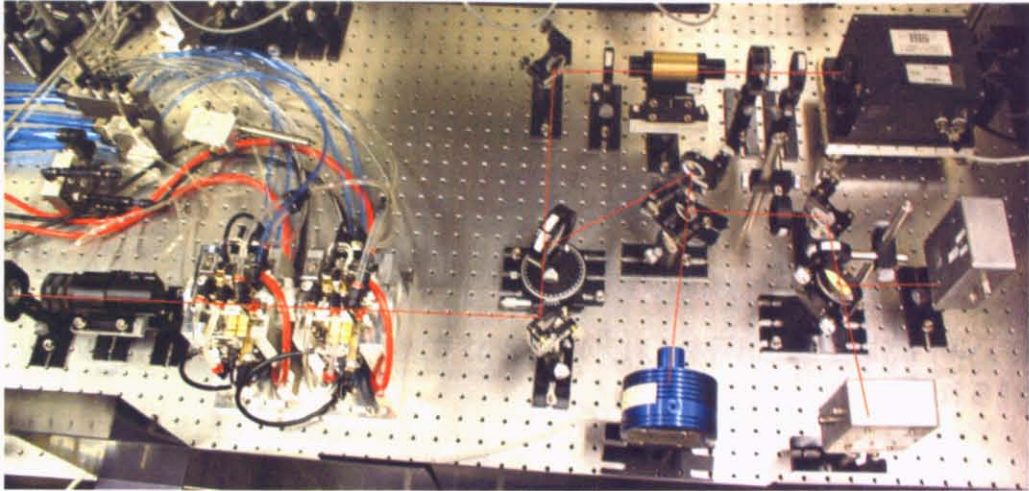


図 6.2: 実験系の写真. 左側が増幅.

水冷である. CEO 社のモジュールと大きく異なる点は, ロッドを2つ使用していて, その間に偏光回転子があり, それによって熱の効果を補償している点である. このモジュールを2つ用いた, 注入同期法による 100 W 出力の高品質レーザーが, 既に開発されている [24].

このレーザーモジュールは, 図 6.3 のように, 1つのロッドに電源が1つ対応している. そこで, 電流引き込み回路も両方につけた. この電流引き込み回路は2つとも図 3.6 に示す回路で構成した. 図 6.3 の左右2つについて, 電源の設定値も電流引き込み回路の入力も, 常に互いに同じになるように使った.

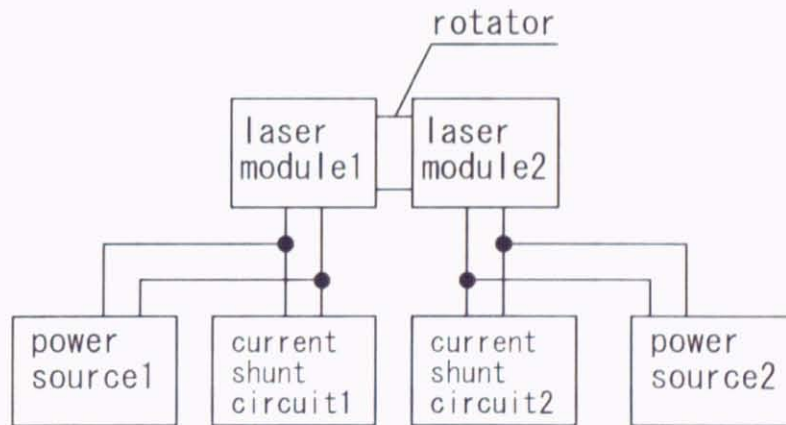


図 6.3: レーザーモジュールと駆動系.

## 6.2 電流引き込み回路の評価実験

4.2 節でおこなった実験と同様の実験をおこない、このモジュールに対する電流引き込み回路の特性を評価した。このとき、マスターレーザーは2 A 駆動にし、モジュールの電源は55 A の定電流モードに設定した。

### 6.2.1 定電圧入力による光強度の変化

電流引き込み回路に定電圧信号を入れ、光強度出力の変化を観測したが、光強度の有意な変化は見られなかった。

### 6.2.2 正弦波入力による光強度出力の変化

電流引き込み回路にバイアスかけた上で正弦波を入力したところ、図 6.4 のように出力強度が変調された。正負が反転しているが、そのほかにも位相遅れが見える。また、低周波数の雑音が強く、波形がゆがんでいる。

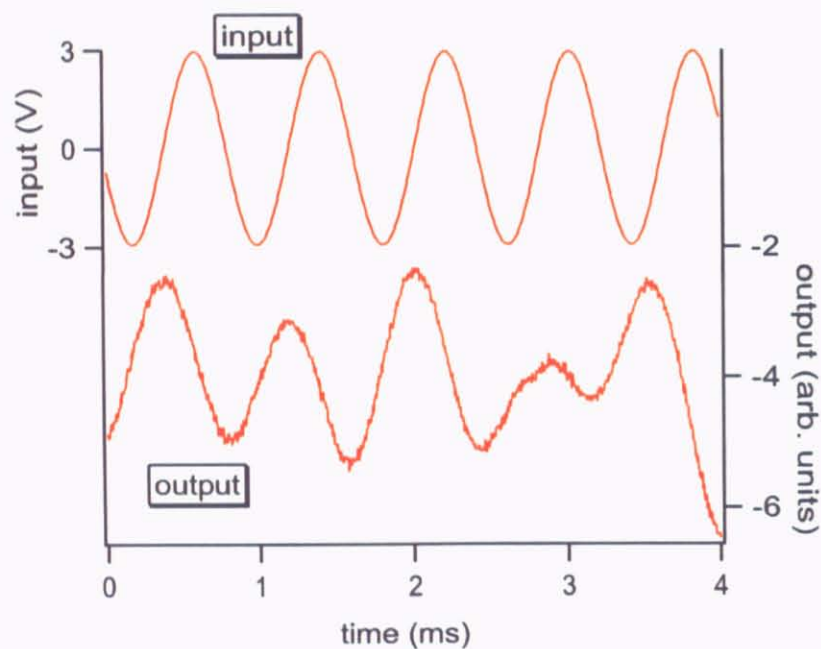


図 6.4: 電流引き込み回路による強度変調。

### 6.2.3 伝達関数の測定

電流引き込み回路からフォトディテクタまでの伝達関数を測定した。CEO のモジュールと比較したところ、明らかな違いが観測された。三菱電機のモジュールを用いた場合は、1 kHz 以上における位相の戻りが大きい。この場合でも、フィルタを設計してオープンループ伝達関数を整形し、フィードバック制御を安定にかけて利得を確保することは可能と考えられる。

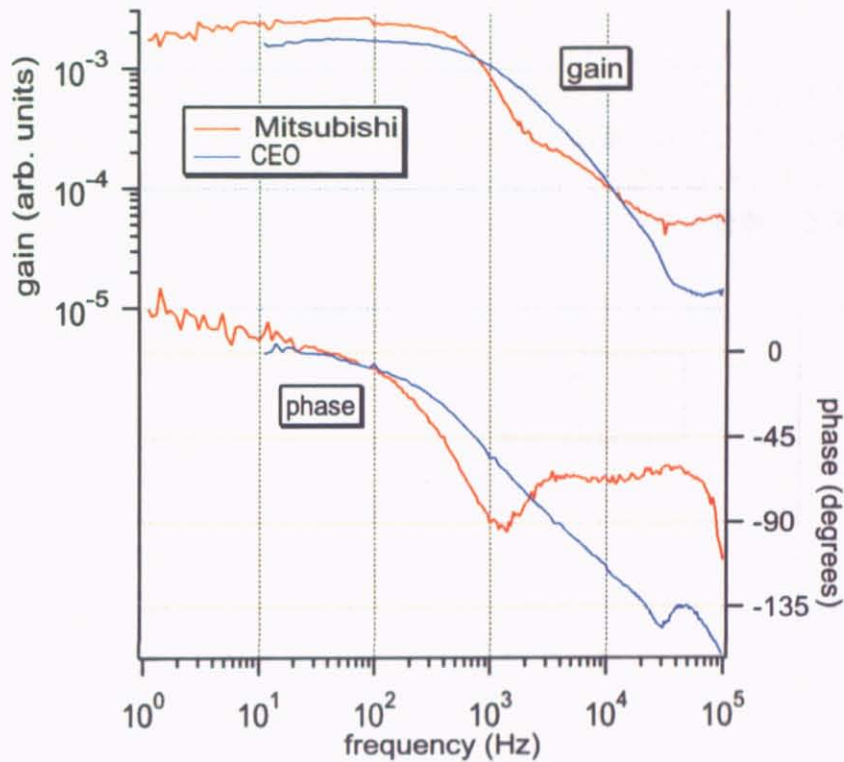


図 6.5: 電流引き込み回路からフォトディテクタまでの伝達関数.

### 6.3 レーザー強度安定化実験

フィードバック信号を電流引き込み回路に返し、安定化を試みたが、雑音を押さえ込むことはできなかった。フォトディテクタからの信号をオシロスコープで観測した限りでは、原因は雑音が大きすぎて、電流引き込み回路による制御が届かなくなっていることのように見えた。増幅器の励起電流を 30 A, 40 A にしてフィードバック制御をおこなったが、そのときも安定化できなかった。そこで、今後安定化を実現するために以下の実験をおこない、考察した。

### 6.3.1 増幅器の励起電流依存性

マスターレーザーの出力を一定にして増幅器の励起電流を調節し、出力をハイパワーディテクタで観測することにより光強度の増幅器に対する励起電流依存性を調べた。ここで電流は2つの電源1つあたりの値であり、それぞれの電源が指定された電流を出力している。

図 6.6 は増幅器を1回通過した場合と2回通過した場合（図 6.1 の状態）の光強度である。2回通過の場合は特に、電流に対するレーザーの強度の依存性が滑らかでない。

励起電流の値を細かく取ったのが図 6.7 である。この図から、電流の増加に対して光強度が減少する領域も存在することがわかる。ここでは、電流増加時と電流減少時にそれぞれ測定したが、ほぼ再現されたので、時間による変化などではなく実際に電流による変化であると推察できる。そのため、電流の設定値は適正な値にしなければ、電流制御による強度安定化は難しいのかもしれない。また、このようなことが起こる原因は光学設計が正しくないことである可能性もあり、アラインメントやレンズの位置を考える必要もある。

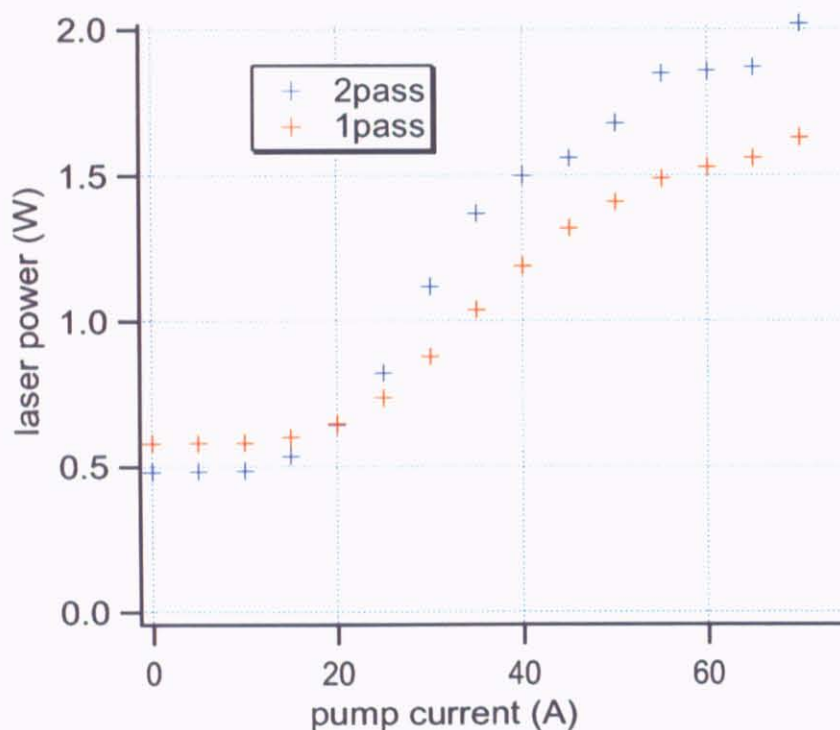


図 6.6: 励起電流に対する光強度. 1回通過と2回通過.

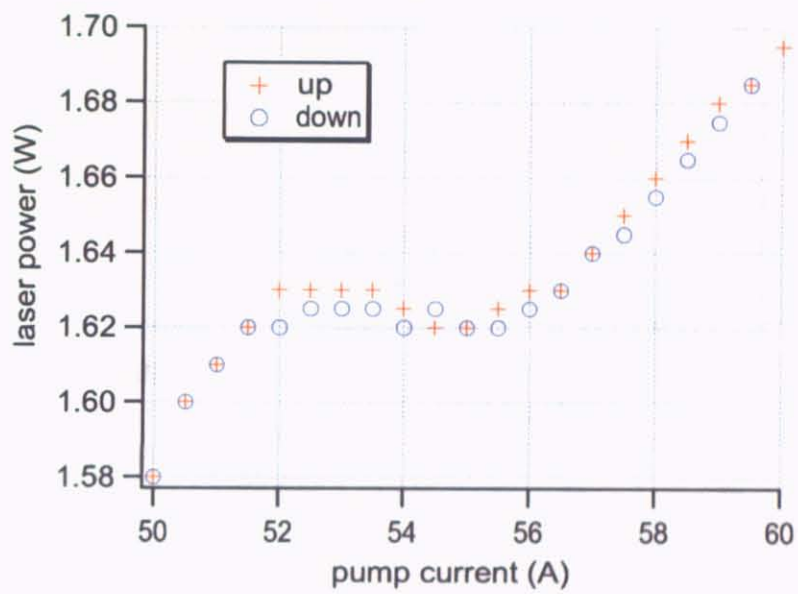


図 6.7: 局所的な光強度の励起電流依存性. 電流を増加させながら測定したデータ (up) と減少させながら測定したデータ (down).



### 6.3.2 非制御時の強度雑音

マスターレーザー 2 A, 増幅器 55 A の状態で非制御時の強度雑音をフォトディテクタで測定した。結果を図 6.8 に示す。CEO 励起と比べると, 100 Hz を境に, それ以下では三菱レーザー増幅の雑音のほうが大きい。このこともフィードバックがうまくいかない原因になっている可能性がある。

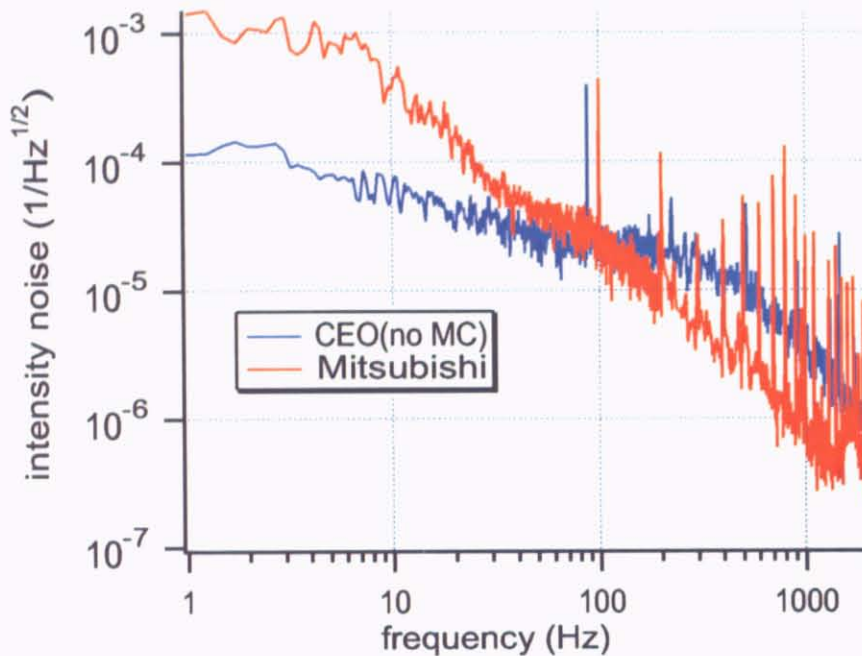


図 6.8: レーザー光の非制御時の強度雑音。

### 6.3.3 電源直接制御について

低周波での大きな強度雑音には, 電源直接制御を併用して対処するという方法がある [17]。そこで, 三菱電気製レーザーモジュールの電源として用いている, 高砂製作所製の EX-1125L2 の, 「外部電圧による出力電流のコントロール」という機能を用いた制御について検討した。

電源への電圧入力による強度変調について, 伝達関数が測定できたので図 6.9 に示す。この変調単独でも約 700 Hz で 180° 遅れてしまうが, 大きな利得は特に必要ないので, フィードバック制御に使用可能と思われる。今後フィルタを設計, 製作し, フィードバックをおこなう予定である。そして, 図 6.10 のように電流引き込み回路と併用し, 直接制御によって雑音に対する追従性をもたせ, 電流引き込み回路によって高周波成分の制御と大きな利得の確保をおこなうことにより強度安定化が機能するようにする予定である。

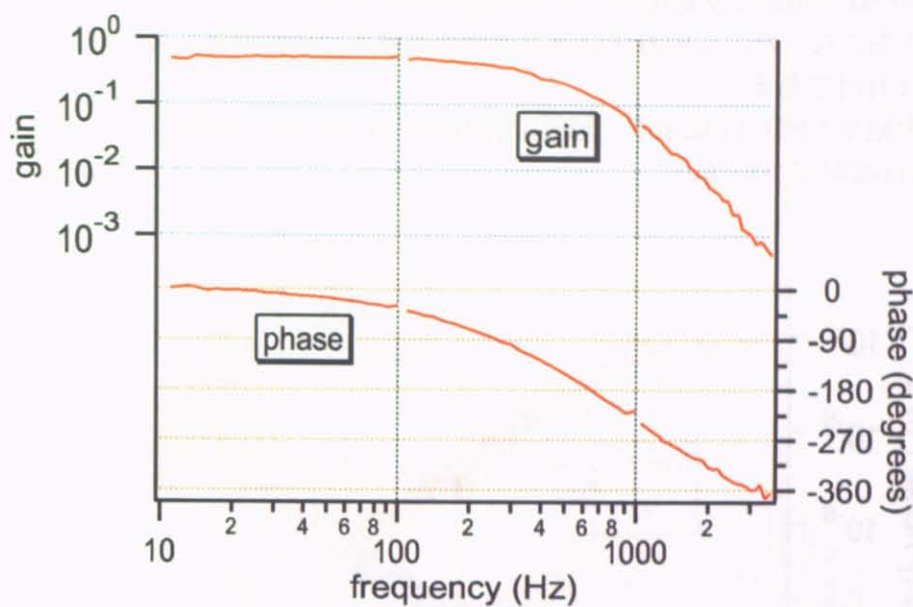


図 6.9: 電源直接制御の伝達関数.

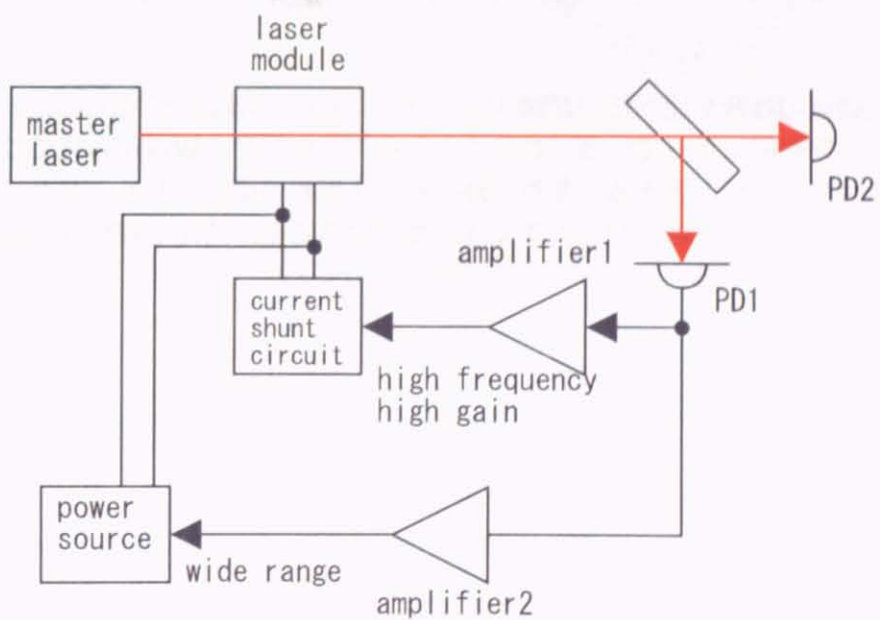


図 6.10: 電源直接制御と電流引き込み回路を併用した強度安定化の概略.

## 6.4 マスターレーザーへのフィードバック制御

電流引き込み回路を用いた安定化はできなかったため、マスターレーザーに対するフィードバック制御をおこなった。この方法は重力波検出を考えた場合望ましくないが、雑音の評価のためには有用である。

強度安定化の結果を図 6.11 に示す。記号は前の章で用いたものを踏襲した。やはり 200 Hz 以下の雑音は説明がつかない。

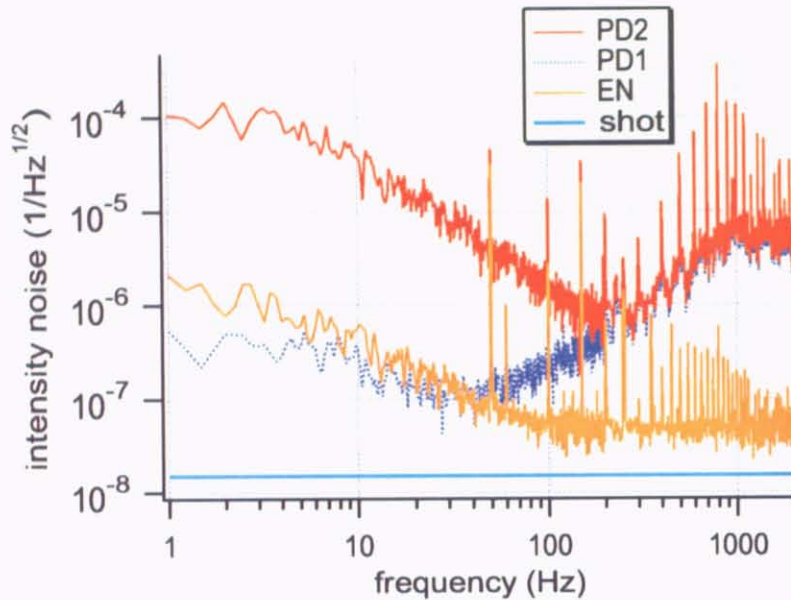


図 6.11: マスターレーザーへのフィードバック制御による強度安定化。

強度安定化制御後の雑音を比べたのが図 6.12 である。CEO 増幅時と Mitsubishi 増幅時で雑音のレベルが同程度になっている。このことから、強度雑音の観点から見てこの 2 つの増幅器の性能は同程度だと言える。また、Mitsubishi 増幅の場合でもモードクリーナーを透過させ、フィードバック制御をおこなえば、増幅器の効果が消えて同程度の雑音レベルに達することが期待される。

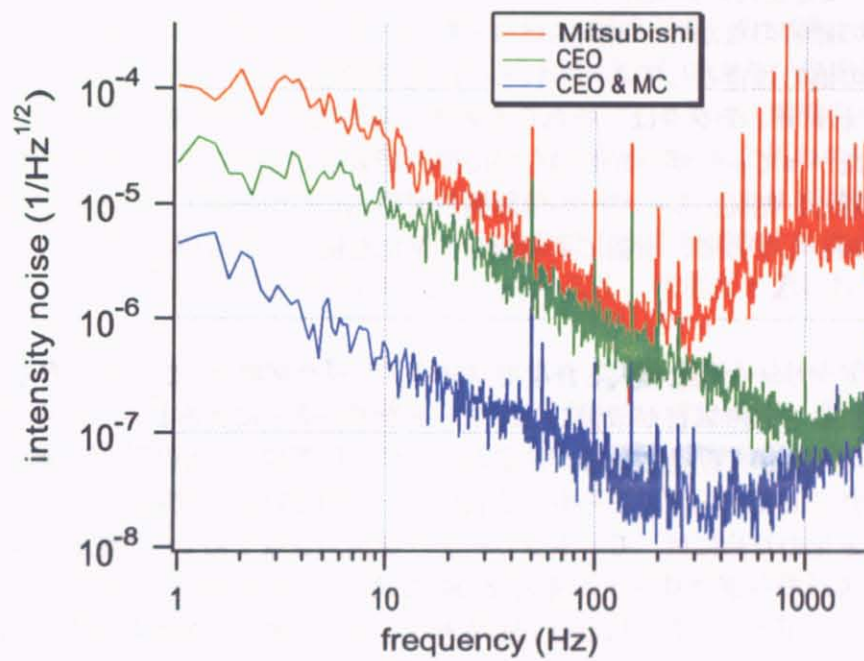


図 6.12: 残留雑音の比較.