

第7章 考察

本研究で得られた結果について考察し、今後の展開について議論する。

7.1 雑音の原因と改善方法

第4章において、安定化時の強度雑音は、ディテクタ系の雑音によることがわかった。また、ディテクタ系の雑音のなかで、電氣的雑音と量子的雑音は原因ではないことがわかった。ディテクタ系の他の雑音として考えられるのが光学的雑音だが、そのなかでも、ビームスプリッタやフォトディテクタは、それらを変えても改善しないので、原因ではない。散乱光も違う。したがってレーザー光そのものに原因があると思われる。そのなかでも偏光やビーム半径は違う。結局、レーザーの位置揺らぎや M^2 の悪さなど、横モードに関する雑音の原因の候補として残る。増幅による雑音の悪化も横モードの悪化によるものと考えられる。

第5章ではモードクリーナーを導入した上でフィードバック制御をおこない、その結果、第4章での安定化よりも強度雑音が改善した。モードクリーナーによるレーザー光への効果としては横モードの改善が期待されるが、これについて位置揺らぎや M^2 が改善されていることを確認した。したがって横モードの改善によって強度雑音が改善したと考えられる。また、強度安定化のためには、モードクリーナーを透過させて横モードを改善する必要があると思われる。モードクリーナー導入後の強度雑音の原因については、まず、第4章についての議論で却下されたものはほぼ同じく却下できる。また、実験により、位置揺らぎの雑音は違うらしいという結果を得、 M^2 についてはモードクリーナーが完璧に働いて $M^2 = 1$ になったという結果も得た。そのため横モードの影響は取り除かれたものと考えられる。

残る強度雑音の原因として、

- レーザーの周波数雑音
- 環境における音の雑音

の2つが考えられる。レーザーの周波数雑音は、光の干渉などを通して、制御側、検出側で非対称な強度雑音（即ちディテクタ系の雑音）を生み出す可能性がある。一方、音の雑音は、屈折率の空間依存、時間依存を生み出し、光の干渉、あるいはフォトダイオードの感度不均一性などから非対称雑音となる可能性がある。音については実験中に気づいたことであり、何か音がすると強度雑音をモニターしているオシロスコープの波形が反応していたのである。

これらへの対策として、まず周波数雑音に対しては、周波数安定化をおこなえばよい。安定化の方法としては、安定な共振周波数をもつ共振器にレーザーの周波数をロックする方法がある [30]。音への対策としては、音の少ない環境を作ることや、ディテクタ系の光学部分を真空にすることが考えられる。

現在問題となっている雑音の原因を排除できたとしても、最終的な LCGT の要求を達成するためには、ディテクタ系の電氣的雑音や量子的雑音が残っている。電氣的雑音については、電気回路の設計を工夫することにより克服可能と思われる。量子的雑音は、ディテクタで検出できる光のパワーを大きくして対処する必要がある。

7.2 安定化システムについての考察

本研究で構築した安定化システムは、第4章、第5章で用いたレーザーシステムに対しては（ディテクタ系の雑音を除くと）よく機能した。電流引き込み回路は十分な強度変調性能を持っていた。フィードバック制御における利得は十分であり、安定性もあった。

第6章での実験では、安定化システムは機能しなかった。これは、電流引き込み回路の強度変調性能がここでのレーザーシステムには十分でなかったためと思われる。強度変調性能の改善のためには、電源直接制御の併用が有力である。これにより変調性能が確保できれば、電流引き込み回路によってフィードバック制御の利得を確保することは、このレーザーシステムに対する同回路の変調の伝達関数をみても、可能だと思われる。

最後に LCGT 用レーザー光源への、強度安定化システムの組み込みを考える。この光源には第6章で用いられた増幅器が使われる可能性がある。その場合、第6章のレーザーシステムで制御可能なシステムであれば LCGT にもほぼそのまま用いることができると思われる。そのためにも、第6章のレーザーシステムについての安定化システムを構築することが重要である。

ところで、重力波検出用干渉計においては、レーザー光源の周波数雑音や位置揺れは、雑音となることが知られている [2, 31]。そのため、レーザー光源にはモードクリーナーと周波数安定化が必須である。もし強度雑音について、周波数雑音が原因になっているのだとすると、その雑音は重力波検出用レーザーにおいては解消されていることも期待できる。

第8章 まとめ

本研究では、電流引き込み回路を作製し、これを用いてフィードバック制御による強度安定化システムを構築した。そして、

- 電流引き込み回路によるレーザー強度制御に成功した。
- 電流引き込み回路を用いてレーザー強度安定化に成功した。
- 強度安定化のために十分なフィードバック制御の利得を確保した。
- モードクリーナーの使用によりさらに強度安定化できた。

強度安定化のためにモードクリーナーは必要であると考えられる。また、電流引き込み回路を用いたシステムは重力波干渉計用レーザーに対する強度安定化に用いることができると思われる。

今後、周波数雑音や音への対処をおこない、強度雑音をさらに下げる必要がある。また、電源直接制御を併用したフィードバック制御システムを構築する必要がある。

付録 A 光源の強度安定度への要求

ここでは、重力波検出のためにレーザー光源の強度安定度が、なぜ必要か、どの程度必要か、を議論する。

重力波は一般相対性理論によって予言される時空間の波動現象 (ripples in spacetime, 時空間のさざ波) である [1]。理論によれば重力波によって空間が伸縮するので、これを計測すればよい。

計測には Michelson 干渉計 (図 A.1) を用いる。Michelson 干渉計の原理を示す。図 A.1 において、入射光電場として、波長 λ の単色光を考える。このとき、出力電場 E_{out} は、理想的には

$$E_{\text{out}} = \frac{E_{\text{in}}}{2} (e^{2\pi i l_1/\lambda} + e^{2\pi i l_2/\lambda}) \quad (\text{A.1})$$

となる。直接観測できる光強度 I_{out} は、

$$I_{\text{out}} \propto |E_{\text{out}}|^2 = |E_{\text{in}}|^2 \cos^2(2\pi(l_2 - l_1)/\lambda) \quad (\text{A.2})$$

である。したがって、光強度を観測すれば $l_2 - l_1$ がわかる。

重力波検出では重力波による $l_2 - l_1$ の変化を観測する。だがレーザーに強度雑音があると、強度雑音が $l_2 - l_1$ を変化させてしまい、干渉計にとっての雑音になってしまう。だから強度安定化をおこなう必要がある。

強度雑音による干渉計への雑音について以下に詳しく述べる。

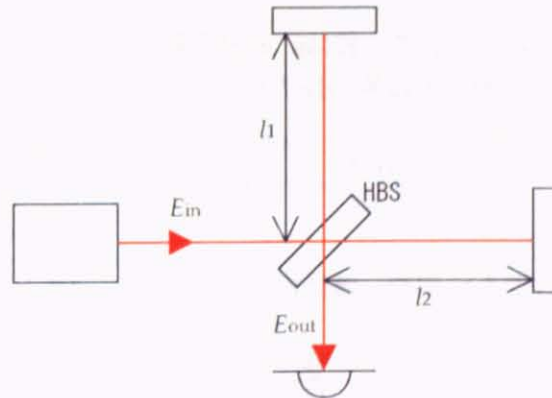


図 A.1: マイケルソン干渉計。HBS: 50-50 ビームスプリッター。

A.1 強度雑音と電場

光の強度雑音 $\sigma(t)$ について考える. 光の全強度を $I(t)$, 全電場を $E(t)$ とし, それぞれの直流成分を I_0, E_0 とする. 光の角周波数は ω とする. このとき,

$$I(t) = I_0 + \sigma(t) \quad (\text{A.3})$$

$$E(t) = \sqrt{I_0 + \sigma(t)} e^{i\omega t} \quad (\text{A.4})$$

$$\approx \left\{ E_0 + \frac{1}{2E_0} \sigma(t) \right\} e^{i\omega t} \quad (\text{A.5})$$

である. ここで, $\sigma(t)$ のフーリエ変換を考え,

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(\omega') e^{i\omega' t} d\omega' \quad (\text{A.6})$$

とすると,

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma(\omega')}{2E_0} e^{i(\omega+\omega')t} d\omega' \quad (\text{A.7})$$

となり, 角周波数が ω であるキャリア光のまわりに角周波数 $\omega + \omega'$ のサイドバンド光が存在することになる.

A.2 輻射圧雑音

光は運動量をもつ. そのため, 光が鏡に照射されると鏡は力を受ける. この力 F は, 光の (単位時間あたり) 出力 P を用いて

$$F = 2P/c \quad (c: \text{光速}) \quad (\text{A.8})$$

である.

重力波検出用レーザー干渉計において, 鏡は, 地面振動の影響を除くために振り子状に吊られている. そのため, 鏡に働く力は光の圧力のみであり, 質量 M の鏡に対する運動方程式は,

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = 2P/c \quad (\text{A.9})$$

である.

そして, 光強度が雑音 $\sigma(t)$ をもつ場合, 鏡は振動する. $P = \sigma(t)$ とし, 式 (A.9) をフーリエ変換すると,

$$X(\omega) = \frac{2}{cM\omega^2} \sigma(\omega) \quad (\text{A.10})$$

となる.

A.3 共振器を含んだ干渉計

実際の重力波検出用レーザー干渉計では, 図 A.2 のように, 中央のビームスプリッタの四方に鏡を配置することにより感度を上げている [2, 12, 32]. この場合も, 得るべき信号

は $l_2 - l_1$ である (腕のビームスプリッタ側の長さは無視できる)。この干渉計はいくつかの鏡に対してフィードバック制御をかけることにより機能する。制御をかけた状態では、

- 出力側 (図 A.2 下側) に定常の出力はない。
- 両腕 (図 A.2 上, 右) の2つの鏡がなす共振器はいずれも共振。
- 入力側 (図 A.2 左) の鏡と腕の手前側の鏡がなす共振器はいずれ (の腕に対して) も反共振。

という状態になる (キャリア光に対して)。

このとき、出力側に定常の出力はないという条件により、出力側の鏡は、ここでの雑音の計算においては無視できる。ここでさらに、干渉計の腕はほぼ対称である ($R_{f1} \approx R_{f2}$, $R_{e1} \approx R_{e2}$, $l_1 \approx l_2$) という事を利用すると、光強度に関して、図 A.2 の干渉計は図 A.3 のように単純化できる [33]。ただし、腕にあたる部分においては、両腕分を一本に考えているので、実際の片腕における光強度は半分である。

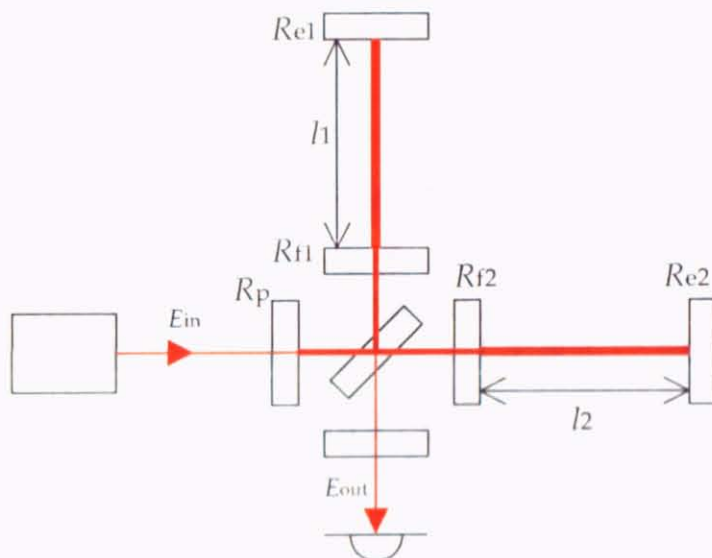


図 A.2: 実際の重力波検出用レーザー干渉計。 R : 各鏡の強度反射率。

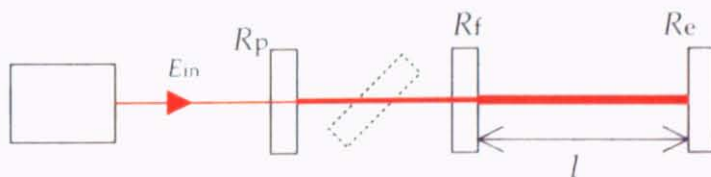


図 A.3: 単純化した図 A.2 の干渉計。

強度雑音を考えるため、図 A.3 の共振器に対して電場の周波数応答を考える。ここで、共振器のビームスプリッタ側は共振状態が常に保たれるとすると、共振器は図 A.4 のよう

に書ける。ここで各鏡の振幅透過率、振幅反射率をそれぞれ t, r と表記し、また、鏡の表裏を考えなければならないので裏側の振幅透過率、反射率は t', r' と表記する。また、ここでは光のロスを考えない。このとき、一般に、

$$r' = -r \quad (\text{A.11})$$

$$r^2 + tt' = 1 \quad (\text{A.12})$$

が成り立つ。また、強度透過率 T 、強度反射率 R は、

$$T = tt' = |t|^2 = |t'|^2 \quad (\text{A.13})$$

$$R = r^2 = r'^2 \quad (\text{A.14})$$

である。

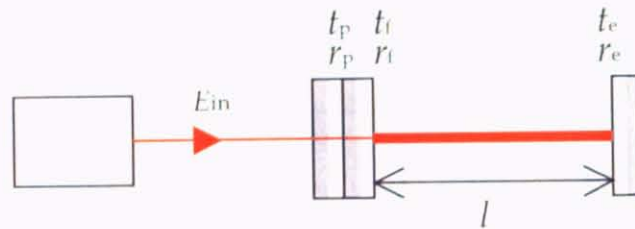


図 A.4: さらに単純化した干渉計。白面が表。

この共振器について、まず入射側の二枚の鏡を一体として考え、この透過率 t_{fp} 、反射率 r_{fp} を算出する。内側を表とした場合、

$$\begin{aligned} t_{fp} &= t_p (1 + r'_f r_p + (r'_f r_p)^2 + \dots) t_f \\ &= \frac{t_p t_f}{1 - r'_f r_p} \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

$$r_{fp} = r_f + \frac{t_f t'_f r_p}{1 - r'_f r_p} \quad (\text{A.16})$$

$$t'_{fp} = \frac{t'_p t'_f}{1 - r'_f r_p} \quad (\text{A.17})$$

$$r'_{fp} = r'_p + \frac{t_p t'_p r'_f}{1 - r'_f r_p} \quad (\text{A.18})$$

である。ここでこの2枚の鏡の反共振から、 $r'_f = -\sqrt{R_f}$ 、 $r_p = \sqrt{R_p}$ と置ける。また、 $r_{fp} = -r'_{fp}$ が成り立つ。

次に、入射側の鏡を一体として考えた上での、共振器内部への電場透過率 t_{arms} を考える。

$$t_{arms} = \left(1 + r_c r_{fp} e^{4\pi i l / \lambda} + (r_c r_{fp} e^{4\pi i l / \lambda})^2 + \dots \right) t'_{fp} \quad (\text{A.19})$$

$$= \frac{t'_{fp}}{1 - r_c r_{fp} e^{4\pi i l / \lambda}} \quad (\text{A.20})$$

である。ここで、キャリア光（周波数 f_0 ）が共振するという条件を考えると、 $\lambda f = c$ なので、

$$e^{4\pi i l f_0 / c} = 1 \quad (\text{A.21})$$

である。このとき、 $f = f_0 + \delta f$ の周波数のサイドバンドについて考えると、

$$\begin{aligned} t_{\text{arms}}(\delta f) &= \frac{t'_{\text{fp}}}{1 - r_c r_{\text{fp}} \exp(4\pi i l \delta f / c)} \\ &\approx \frac{t'_{\text{fp}}}{1 - r_c r_{\text{fp}} (1 + 4\pi i l \delta f / c)} \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

となり、

$$\begin{aligned} T_{\text{arms}}(\delta f) &= |t_{\text{arms}}|^2 \\ &= \left| \frac{t'_{\text{fp}}}{1 - r_c r_{\text{fp}}} \right|^2 \left\{ 1 + \left(\frac{r_c r_{\text{fp}}}{1 - r_c r_{\text{fp}}} 4\pi l \delta f / c \right)^2 \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

となる。

ここで、現在計画中の重力波検出器 LCGT のパラメーターを代入してみる。

$$l = 3 \text{ km} \quad (\text{A.24})$$

$$R_p = 0.76 \quad (\text{power recycling mirror}) \quad (\text{A.25})$$

$$R_f = 0.995 \quad (\text{arm front mirrors}) \quad (\text{A.26})$$

$$R_c = 0.99995 \quad (\text{arm end mirrors}) \quad (\text{A.27})$$

$$I_{\text{in}} = 100 \text{ W} \quad (I_{\text{in}}: \text{入射光強度}) \quad (\text{A.28})$$

$$M = 50 \text{ kg} \quad (\text{arm mirrors}) \quad (\text{A.29})$$

まず、

$$R_{\text{fp}} = 0.9996567 \quad (\text{A.30})$$

を得る。これを用いて式 (A.23) を計算すると、

$$T_{\text{arms}}(\delta f) = 8876 \times \frac{1}{1 + \{\delta f / (1.57 \text{ Hz})\}^2} \quad (\text{A.31})$$

となる。

ここで、入射光の相対強度雑音スペクトルが $S_{\text{in}}(f)$ で書けるとする。このとき、干渉計の腕にある鏡に照射される光強度のスペクトル $S_{\text{inten}}(f)$ は、

$$S_{\text{inten}}(f) = (440 \text{ kW}) \times \sqrt{\frac{1}{1 + \{f / (1.57 \text{ Hz})\}^2}} \times S_{\text{in}}(f) \quad (\text{A.32})$$

である。この式の平方根は、強度雑音キャリア光とサイドバンド光できていることに由来する。ここから鏡の揺れのスペクトル $S_{\text{mirror}}(f)$ を算出すると、

$$\begin{aligned} S_{\text{mirror}}(f) &= \frac{1}{2\pi^2 c M f^2} S_{\text{inten}}(f) \\ &= \frac{(1.49 \times 10^{-6} \text{ mHz}^2)}{f^2} \sqrt{\frac{1}{1 + \{f/(1.57 \text{ Hz})\}^2}} S_{\text{in}}(f) \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

となる。

干渉計の片腕を考えた場合、鏡二枚が l の変化を強めあうので、このスペクトル $S_l(f)$ は、

$$S_l(f) = 2S_{\text{mirror}}(f) \quad (\text{A.34})$$

である。ここで、干渉計の二本の腕が互いに完全に等しいとすると、 $l_2 - l_1$ の揺らぎは生じないことになる。しかし、ビームスプリッタの反射率と透過率の違いや、腕にある鏡の反射率、質量などの違いにより、 $l_2 - l_1$ にも違いが生じる。 $l_2 - l_1$ のスペクトル $S_{l_2-l_1}(f)$ は、

$$S_{l_2-l_1}(f) = 0.01 \times S_l(f) \quad (\text{A.35})$$

と見積もる。結局、強度雑音による干渉計の雑音は、

$$S_{l_2-l_1}(f) = \frac{(3.0 \times 10^{-8} \text{ mHz}^2)}{f^2} \sqrt{\frac{1}{1 + \{f/(1.57 \text{ Hz})\}^2}} S_{\text{in}}(f) \quad (\text{A.36})$$

である。

目標感度を $l_2 - l_1$ 換算で S_{req} と表すと、

$$S_{l_2-l_1}(f) < 0.1 \times S_{\text{req}} \quad (\text{A.37})$$

が満たされているべきである。この不等式から、強度雑音に対する要求を導くと、

$$S_{\text{in}}(f) < 0.1 \times S_{\text{req}} \times \frac{f^2}{(3.0 \times 10^{-8} \text{ mHz}^2)} \times \sqrt{1 + \{f/(1.57 \text{ Hz})\}^2} \quad (\text{A.38})$$

である。

ここで S_{req} として LCGT の目標感度 [34] を採用する。これを図 A.5 に示す。この時強度雑音への要求は図 1.1 のようになる。

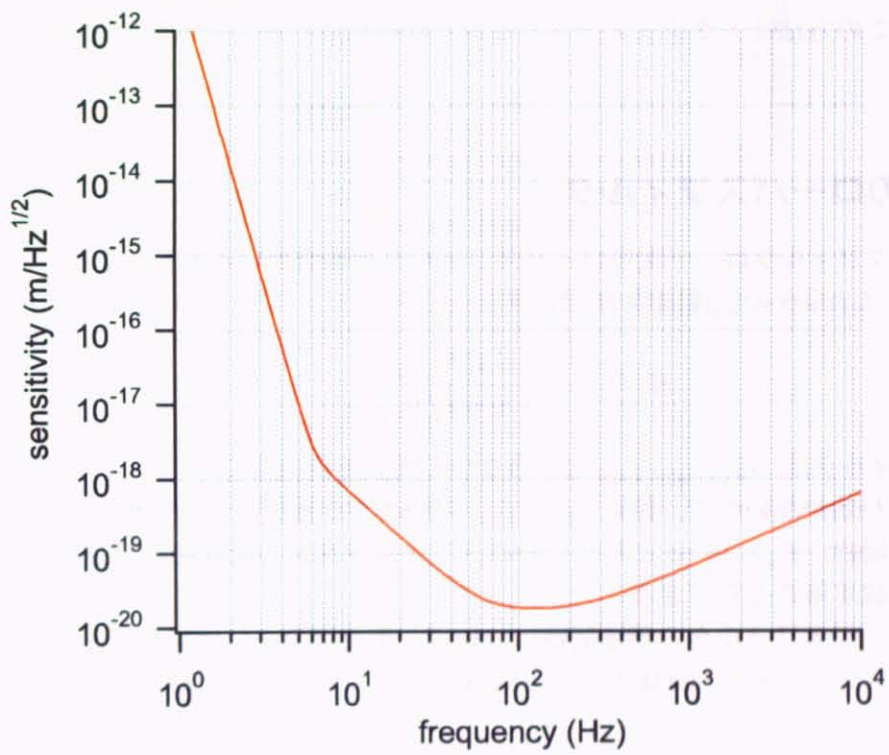


図 A.5: LCGT の目標感度 [34]. $l_2 - l_1$ 換算.

付録B フィードバックフィルタの設計方法

第2章によれば、フィードバック制御におけるオープンループ伝達関数は、絶対値が大きければ大きいほどよく、一方で安定性も必要である。このような要請を満たすオープンループ伝達関数を実現するために用いたフィルタ設計手順をここに示す。設計において、最後に全体の利得を調節することを前提としていて、問題とするのは伝達関数の周波数依存性である。また、この方法はアクチュエータとセンサが位相遅れ系であることを前提とした方法である。

B.1 一次のローパスフィルタ

フィードバックフィルタは、一次のローパスフィルタを複数用いることにより作成した。一次のローパスフィルタの伝達関数 H は、

$$H(f) = G \frac{1 + i(f/f_{\text{high}})}{1 + i(f/f_{\text{low}})} \quad (\text{B.1})$$

である。このフィルタは、 $G, f_{\text{high}}, f_{\text{low}}$ という3つの実数を自由度に持つ。このうち、 G は全体の利得にしか効かないので、特に $f_{\text{high}}, f_{\text{low}}$ の決め方が重要である。利得に対する要請が厳しくない場合、 $f_{\text{high}} \rightarrow \infty$ としたローパスフィルタを一つだけ用いてフィードバックフィルタを構成することもできる。

この一次のローパスフィルタの伝達関数について一例を図B.1に示す。

一次のローパスフィルタは、図B.2のような、OPアンプを用いた回路で実現できる。このとき、

$$\begin{aligned} G &= R_2/R_1 \\ f_{\text{high}} &= \frac{1}{2\pi C_1 R_3} \\ f_{\text{low}} &= \frac{1}{2\pi C_1 (R_2 + R_3)} \end{aligned}$$

となるので、回路の抵抗やコンデンサを適切に選べば任意のローパスフィルタを実現できる。

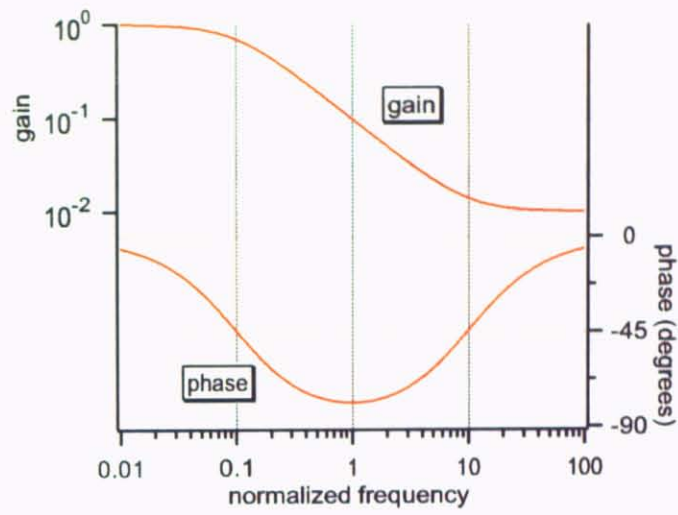


図 B.1: 一次のローパスフィルタの伝達関数. $G = 1$, $f_{\text{high}} = 10$, $f_{\text{low}} = 0.1$

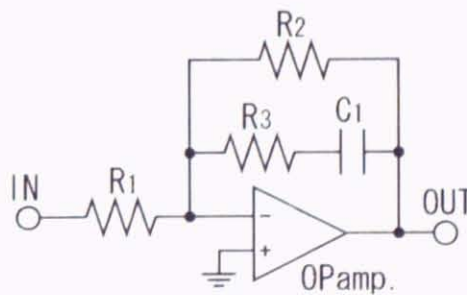


図 B.2: 一次のローパスフィルタの回路図.

B.2 フィードバックフィルタの設計手順

1. アクチュエータ&センサの伝達関数を測定

オープンループ伝達関数の構成要素であるアクチュエータとセンサを併せた伝達関数を計測した。

2. 単位利得周波数& (その周波数での) 位相余裕を設定

アクチュエータとセンサを併せた伝達関数から、単位利得周波数 f_0 を設定した。伝達関数が $120^\circ - 140^\circ$ 程度遅れた周波数を目安にした。また、そこでの位相余裕を $20^\circ - 30^\circ$ に設定した。

3. フィルタの段数を設定

一次のローパスフィルタの段数を設定した。

4. 位相の配分

手順2から、 f_0 においてさらに遅らせることのできる位相 P が得られる。すなわち、

$$P = 180^\circ - (\text{アクチュエータ\&センサによる遅れ}) - (\text{設定した位相余裕})$$

である。この P を、各フィルタに P_i として配分した。このとき各フィルタの伝達関数 $H_i(f)$ について、

$$\angle H_i(f_0) = P_i \quad (\text{B.2})$$

となる必要がある。

5. 各フィルタの中心周波数の設定

各フィルタの中心周波数 $f_{i,\text{center}}$ を設定する。このとき、

$$f_{i,\text{center}} = \sqrt{f_{i,\text{high}} f_{i,\text{low}}} \quad (\text{B.3})$$

である。

6. フィードバックフィルタの決定

式 (B.2) と式 (B.3) から $f_{\text{high}}, f_{\text{low}}$ が決まる。最後に G_i を適当に決めて各 $H_i(f)$ が決めた。これを実現するような回路を構成した。回路の抵抗やコンデンサは離散的な値しか作れないので、実際のフィルタの伝達関数は設計値からずれる。そのため、使用する抵抗やコンデンサの値を代入して伝達関数を計算し、オープンループ伝達関数をチェックする必要がある。

実際には、手順1の伝達関数に、設計したフィルタの伝達関数を掛けて得られるオープンループ伝達関数を吟味しながら、手順2-6を繰り返した。

B.3 設計の実例

実例 1. 電流引き込み回路のフィルタ

1. アクチュエータの伝達関数は図 4.8.
2. $f_0 = 25$ kHz, 位相余裕: 20° .
3. フィルタは3段.
4. 残った位相を $A : B : C = 1 : 0.8 : 0.8$ の割合で配分.
5. 中心周波数を, $A : 5$ kHz, $B : 600$ Hz, $C : 200$ Hz と設定.
6. 図 B.3 のような伝達関数を得た. これを実現するような回路を作製した (図 B.4).

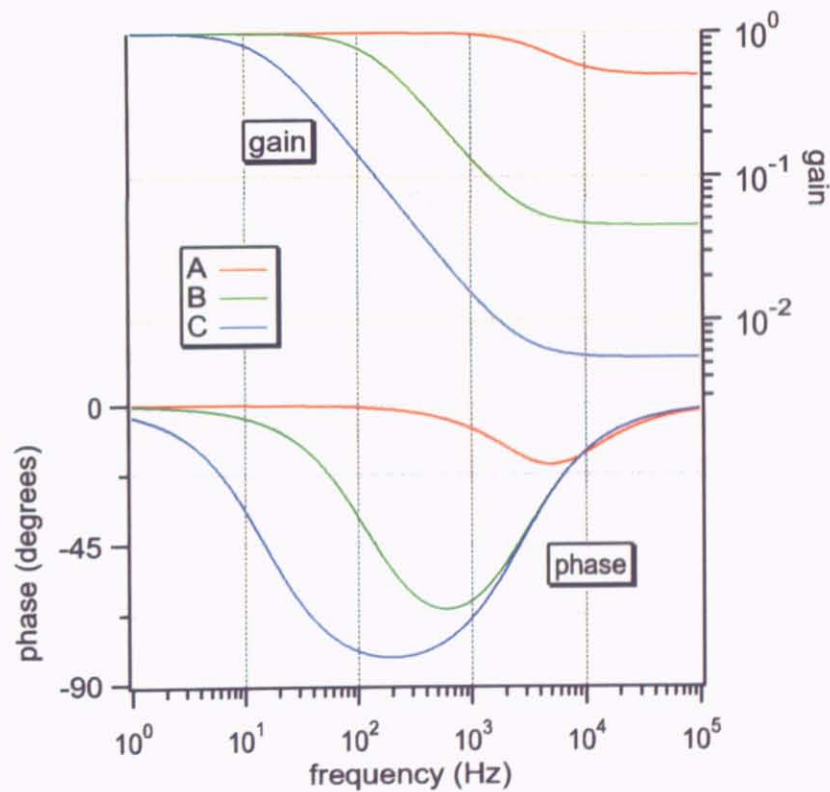
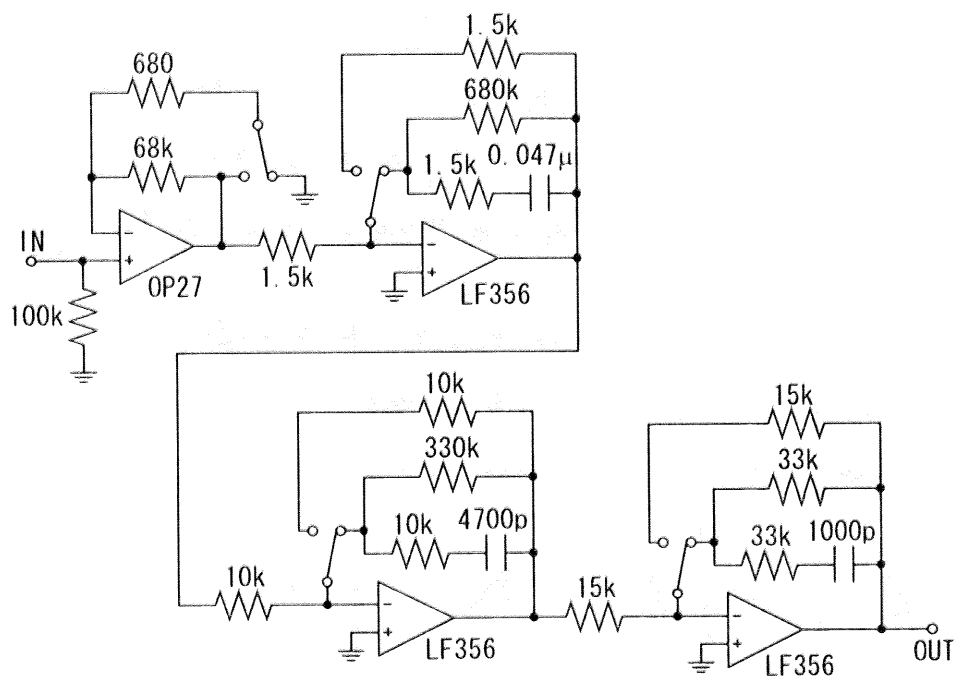


図 B.3: 設計した伝達関数. 直流の利得は未調整.



・ 図 B.4: 電流引き込み回路を用いたフィードバック制御のフィルタ回路。初段は直流利得。各段に対して、フラットな伝達関数と切り替え可能。

実例 2. マスターレーザー制御のフィルタ

1. アクチュエータの伝達関数を測定した (図 B.5).
2. $f_0 = 1.5$ kHz, 位相余裕: 30° .
3. フィルタは 3 段.
4. 位相を A : B : C = 1 : 0.6 : 0.3 で配分.
5. 中心周波数を, A : 1 kHz, B : 100 Hz, C : 10 Hz と配置.
6. 図 B.6 のような伝達関数を得た. 図 B.7 の回路で実現した.

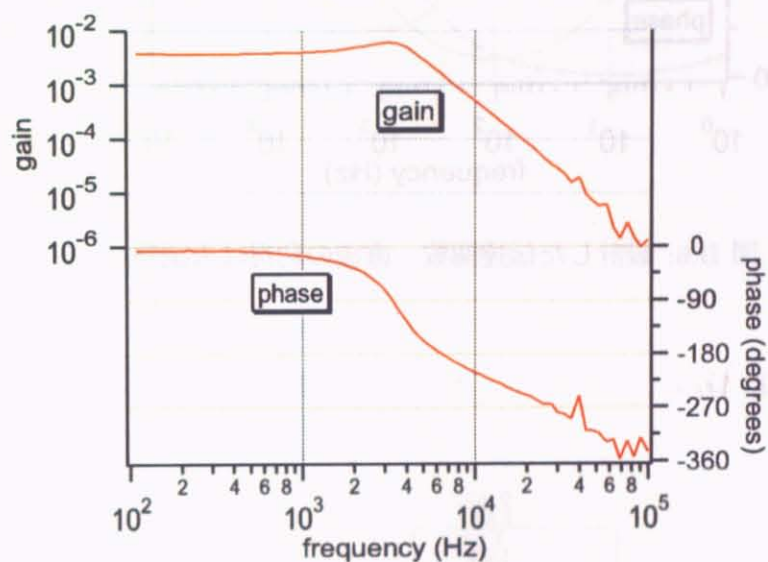


図 B.5: マスターレーザー変調の伝達関数.

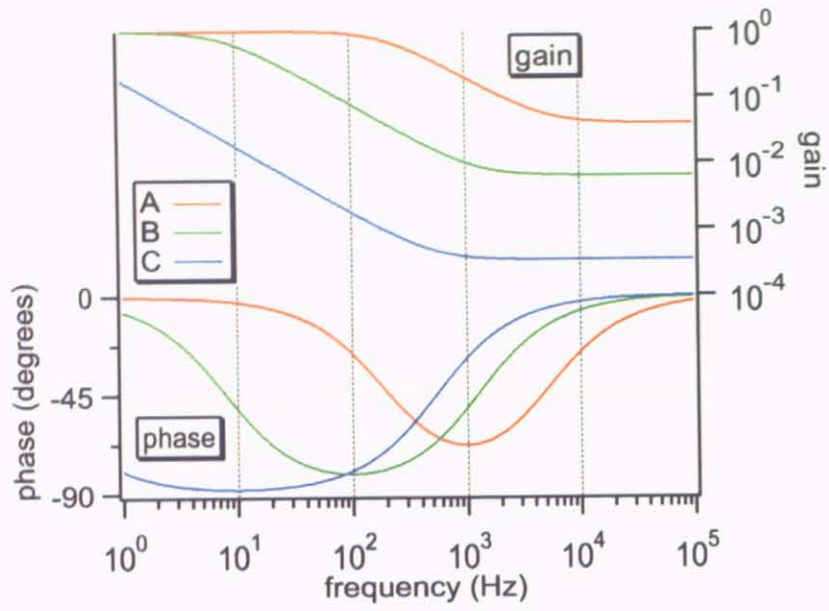


図 B.6: 設計した伝達関数. 直流の利得は未調整.

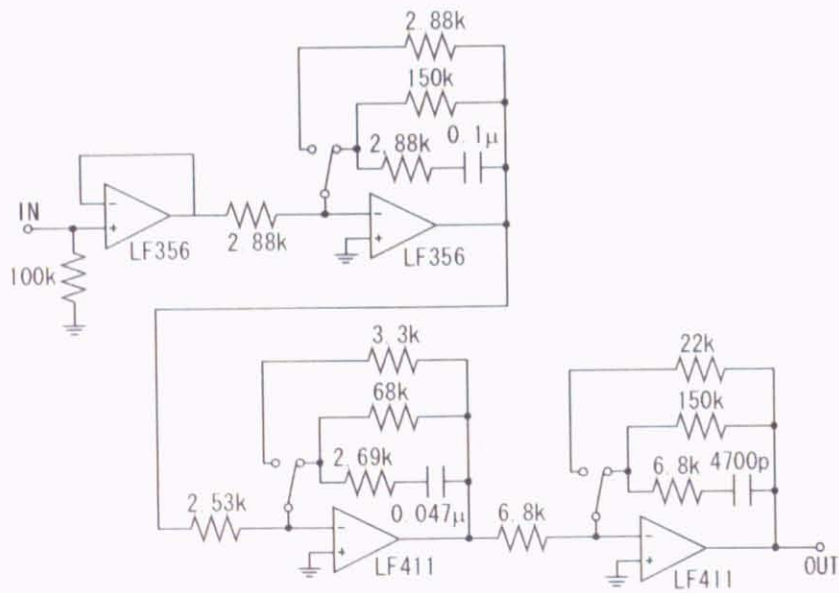


図 B.7: フィルタ回路.

付録C 実験に用いた電気回路

実験に用いたが紹介する機会がなかった電気回路をここに示す。なお、ここに示す回路は、実験の過程で少しずつ変えたり、複数使ったりしている。

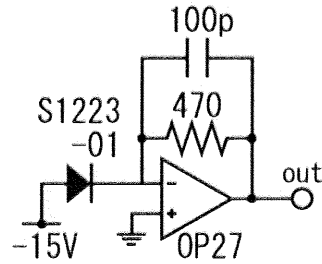


図 C.1: シリコン結晶のフォトダイオードを用いたフォトディテクタの回路。InGaAs 結晶によるフォトディテクタは 2.2.1 節に掲載。

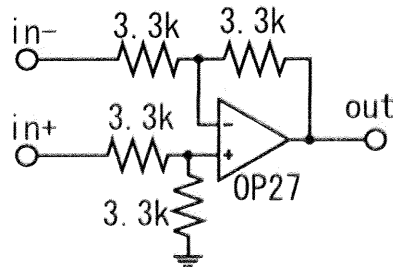


図 C.2: 減算回路。

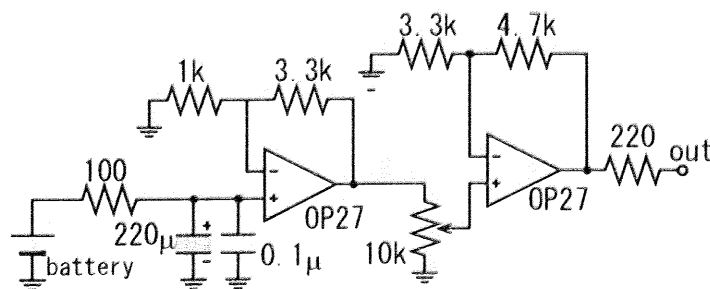


図 C.3: 参照電圧発生回路。参照用電圧として乾電池を用い、OP アンプ回路でインピーダンス変換している。参照電圧は可変である。

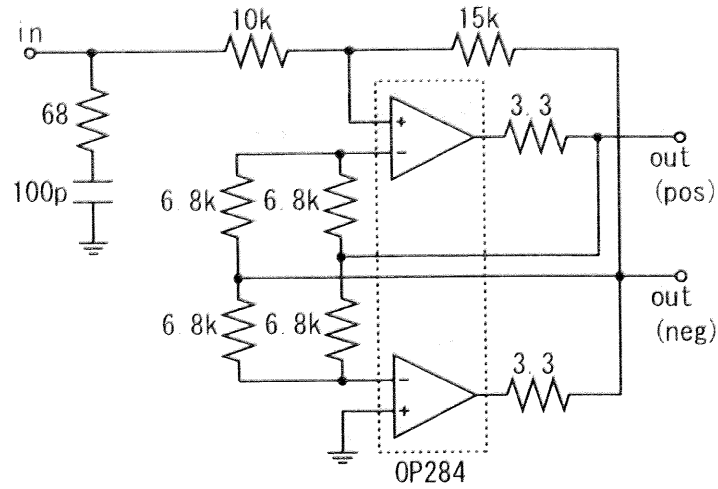


図 C.4: 差動型ピエゾドライバ回路. 三尾研究室助手の森脇氏が設計.

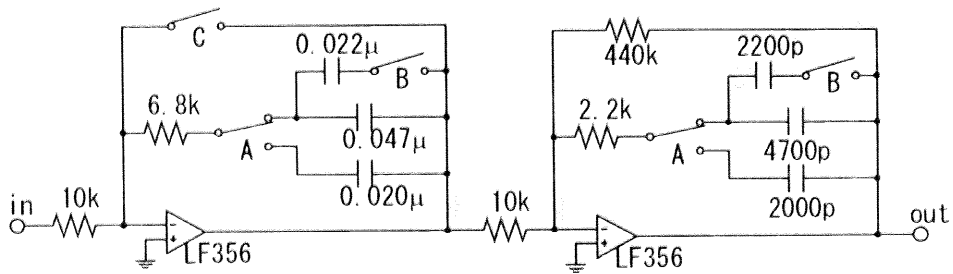


図 C.5: ピエゾ (モードクリーナー) 制御用フィルタ回路, 対応するピエゾの共振周波数が 3 種類選べる. フィードバックの on-off も可能.

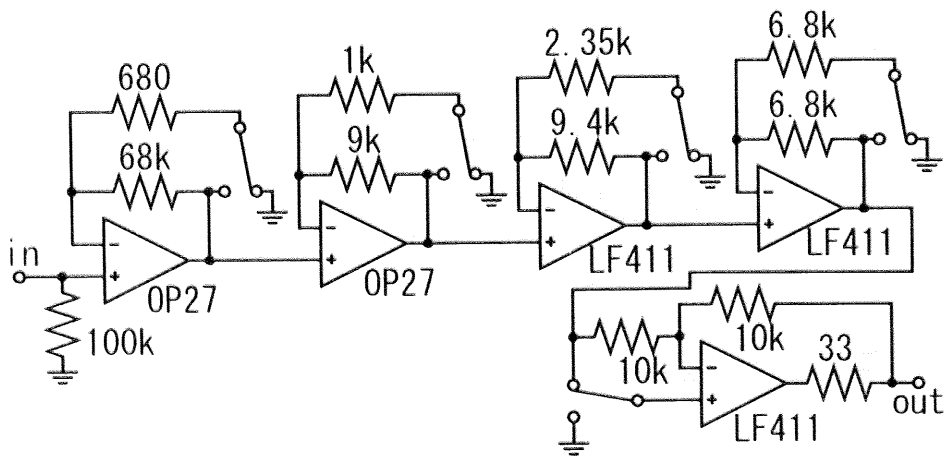


図 C.6: 可変直流増幅器. 初段以外は森脇氏が設計.

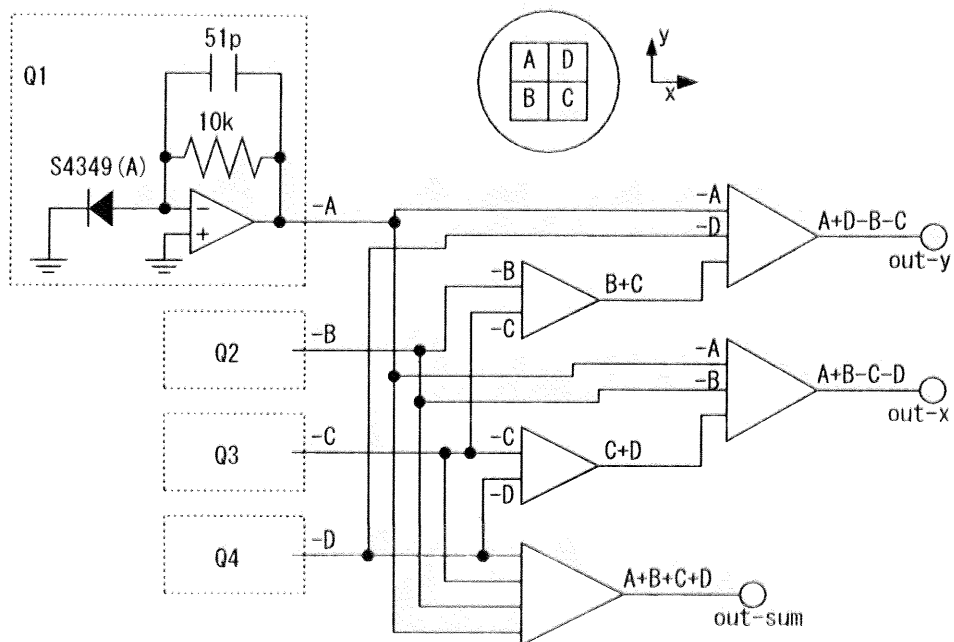


図 C.7: 四分割フォトディテクタの回路の概略. 4つのフォトダイオードの光電流をそれぞれインピーダンス変換し, 回路による加算, 符号反転で出力を得る. Q2, Q3, Q4 は Q1 と同様の回路. 中央上の図は光検出面を表す. これは三尾研究室に昔からあった回路である.

謝辞

この研究は多くの方々のご協力により進めることができました。ここに感謝の辞を表したいと思います。

指導教官である三尾典克助教授には、何より研究の場を与えていただきました。そして右も左もわからないこの私に、研究のテーマや方針を与えていただきました。理論面でも実験面でも遅々として成長しない私に対して粘り強くご指導いただき、相談に参る毎に的確なアドバイスをいただきました。また、基礎的な物理理論について勉強する機会も与えていただきました。本当にありがとうございました。

三尾研究室助手の森脇成典氏には、物理や計測に関する様々なことを教わりました。ご自身がお忙しいときでもわれわれ学生の研究を優先する方で、特に光学、回路に関する膨大な経験、知識から、一人では気づき得ないようなことを沢山教えていただきました。本当にありがとうございました。

三尾研究室の博士課程3年である竹野耕平氏は、同じくレーザーを研究されているということもあり、同氏からは卒業研究のときから色々な助言をいただきました。研究に対してもほかのことについてもとにかく真摯、誠実であり、人間的にも多くのことを学びました。本当にありがとうございました。

同じく博士課程3年の丹治亮氏には、鋭い直感と豊富な知識で、私が研究室で発表するときなどに意見をいただきました。性格は温和で、研究室内の親睦にも色々骨を折ってくださいました。本当にありがとうございました。

博士課程2年の堀輝人氏は、普段は地震研究所にて研究をされているのですが、研究室のセミナーや輪読では遠いところから毎回お越しいただきました。食生活など見習うべき点が多く、色々勉強させていただきました。本当にありがとうございました。

修士課程1年の川浪徹氏は、物理理論からPC、社会情勢に至るまで幅広い知識を有し、同氏からは色々な話を聞くことができました。勉強も精力的にされていて、よい刺激となりました。本当にありがとうございました。

同じく修士課程1年の太斎徹氏は、学部ของときは物理の理論研究をしていたそうで、研究室のセミナーでは難しい素粒子論を披露してくださいました。行動力があって見識も広く、色々教えてもらいました。本当にありがとうございました。

学部4年の大前宣昭氏、高橋裕之氏は、二人とも知力、体力、気力すべてを併せ持ち、昼夜を問わず非常に熱心に実験をおこなっています、私は彼らを見習わなければならないと常々感じました。本当にありがとうございました。

また、このほかにも多くの方々の協力を得ることによって、研究を進めることができました。皆さん本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Bernard F. Schutz. *A first course in general relativity*. Cambridge University Press, 1985.
- [2] 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健. 重力波をとらえる—存在の証明から検出へ. 京都大学 学術出版会, 1998.
- [3] 日本物理学会 (編) . 宇宙を見る新しい目. 日本評論社, 2004.
- [4] Ryutaro Takahashi and the TAMA Collaboration. Status of TAMA300. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 21, pp. S403–S408, 2004.
- [5] Daniel Sigg. Commissioning of LIGO detectors. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 21, pp. S409–S415, 2004.
- [6] F Acernese et al. Status of VIRGO. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 21, pp. S385–S394, 2004.
- [7] B Willke et al. Status of GEO 600. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 21, pp. S417–S423, 2004.
- [8] Andrea Viceré. Advanced gravitational wave detectors and the global network. *International Journal of Modern Physics A*, Vol. 20, pp. 7045–7053, 2005.
- [9] Norikatsu Mio and the LCGT Collaboration. Large-scale cryogenic gravitational wave telescope (LCGT). *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No. 151, pp. 221–225, 2003.
- [10] S. Miyoki and LCGT Collaborations. Large scale cryogenic gravitational wave telescope. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 138, pp. 439–442, 2005.
- [11] <http://www.ligo.caltech.edu/advLIGO/>.
- [12] LCGT design document (version 1.0), 2003.
- [13] Teviet Creighton. Advanced LIGO: sources and astrophysics. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 20, pp. S853–S869, 2003.
- [14] Shigeo Nagano et al. Development of a light source with an injection-locked Nd:YAG laser and a ring-mode cleaner for the TAMA 300 gravitational wave detector. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73, pp. 2136–2142, 2002.

- [15] I Zawischa et al. The GEO 600 laser system. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 19, pp. 1775–1781, 2002.
- [16] Michael Zucker Rainer Weiss Jameson Rollins, David Ottaway and Richard Abbott. Solid-state laser intensity stabilization at the 10^{-8} level. *Optics Letters*, Vol. 29, pp. 1876–1878, 2004.
- [17] F Nocera. LIGO laser intensity noise suppression. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 21, pp. S481–S485, 2004.
- [18] B W Barr, K A Strain, and C J Killow. Laser amplitude stabilization for advanced interferometric gravitational wave detectors. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 22, pp. 4279–4283, 2005.
- [19] B. S. Sheard, M. B. Gray, B. J. J. Slagmolen, J. H. Chow, and D. E. McClelland. Experimental demonstration of in-loop intracavity intensity-noise suppression. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 41, pp. 434–440, 2005.
- [20] R. S. Abbott and P. J. King. Diode-pumped Nd:YAG laser intensity noise suppression using a current shunt. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, pp. 1346–1349, 2001.
- [21] 安藤繁. 電子回路 –基礎からシステムまで–. 培風館, 1995.
- [22] H. M. Wiseman. Using feedback to eliminate back-action in quantum measurements. *Physical Review A*, Vol. 51, pp. 2459–2468, 1995.
- [23] Amnon Yariv. *Optical Electronics*. Saunders College Publishing, fourth edition, 1991.
- [24] Takeno K, Ozeki T, Moriwaki S, and Mio N. 100 w, single-frequency operation of an injection-locked Nd:YAG laser. *Optics Letters*, Vol. 30, pp. 2110–2112, 2005.
- [25] 遠坂俊昭. 計測のためのアナログ回路設計. CQ 出版社, 1997.
- [26] Walter Koechner and Dennis K. Rice. Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-6, pp. 557–566, 1970.
- [27] Renzhong Hua, Satoshi Wada, and Hideo Tashiro. Analytical method for design a TEM₀₀ mode resonator of a dual-rod Nd:YAG laser with birefringence compensation. *Optics Communications*, Vol. 232, pp. 333–341, 2004.
- [28] 北島未来. マイケルソン干渉計用出力光モードクリーナーに関する研究, 2005. 東大理工卒業論文.
- [29] ジョージ・アルフケン. 基礎物理数学 第3巻 特殊関数と微分方程式. 講談社, 1978.

- [30] 頼本賢治. Fabry-perot 共振器を用いた半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーの周波数安定化. Master's thesis, 東大工学系物理工学専攻, 1999.
- [31] Guido Mueller. Beam jitter coupling in advanced LIGO. *Optics Express*, Vol. 13, pp. 7118–7132, 2005.
- [32] Guido Müller, Tom Delker, David B. Tanner, and David Reitze. Dual-recycled cavity-enhanced michelson interferometer for gravitational-wave detection. *Applied Optics*, Vol. 42, pp. 1257–1268, 2003.
- [33] 宗宮健太郎, 三木聡. 2周波位相変調を用いた結合光共振器の制御, 1999. 東大物工卒業論文.
- [34] http://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/yamamoto/yamamoto_home-j.html.