

強度モニターを利用した共振器の制御方法の開発

飯田 克也 埼玉大学教育学部理科教育講座
近藤 一史 埼玉大学教育学部理科教育講座
大向 隆三 埼玉大学教育学部理科教育講座

キーワード：光学共振器、共鳴周波数、安定化制御、光強度補償

1. はじめに

1954年にタウンズらによってメーザーが開発され、1960年にメイマンらによって光におけるメーザーである「レーザー」が、ルビーをレーザー媒質として初めて開発された。その後、1962年に半導体レーザーの発振が確認されてから、急速にその技術は発展してきている。半導体レーザーはレーザーの中でも小型軽量であり、エネルギー効率がよく、幅広い波長の選択性、操作性の高さなど様々な技術的メリットを有している。また、半導体レーザーは他のレーザーに比べ比較的出力が低かったが、近年では高出力の素子が開発されたことなどもあり、従来、固体レーザーや気体レーザーが用いられていた分野でも半導体レーザーが用いられるようになってきている。

この半導体レーザーの物理学への利用方法として、原子分光実験の光源としての利用が挙げられる。原子分光実験とは、原子の準位間エネルギーに等しい周波数の光を原子に当てて励起させ、吸収スペクトルや透過スペクトルを測定し、その原子の特性を調べる研究である¹⁾。

原子を励起するためにはその原子に固有の周波数で、かつその付近で周波数を連続的に変化する光を発生できる光源であることが望ましい。そのため、原子分光実験の光源としてレーザーが用いられることが多い。特に半導体レーザーは出力光の単色性以外にも、先に述べた波長の選択性などのメリットがあるため有望な光源と期待されている。しかし、半導体レーザーには原子分光実験の光源として用いる上で重大なデメリットも併せ持っている。半導体レーザー装置はその内部において、共振器によって光を共鳴させることによって発振している。そのため、外部環境の変化によって共振器長の変動が起こり、安定した発振周波数を維持することが困難である。

近年、このデメリットを克服するためのレーザー制御に関する研究が行われている。この研究の中で、光学共振器の一つであるファブリー・ペロー共振器から参照信号を得て、半導体レーザーの発振周波数をPI制御²⁾により安定化を行った。しかしながら、ファブリー・ペロー共振器もまた外部要因によって共鳴周波数が変動してしまう。そのため、一定の共鳴周波数を持った参照信号を維持することが困難である。そこで、ファブリー・ペロー共振器の共鳴周波数の安定化制御がPI制御回路を用いて試みられた。共振器の透過光は共鳴周波数を横軸、光強度を縦軸にとると、鋭いピークのフリンジを描く。この制御は共振器からの透過光信号をフォトダイオードによって電圧に変換し得られた値から、フリンジのピーク値の半分の値に相当する直流電圧分を減算し、エラー信号を得ることによってPI制御による共鳴周波数の安定化が行われた。その結果、共鳴周波数の安定度を1時間にわたり1.84MHz以下にすることができたと報告されている³⁾。しかし、この制御方法では一定電圧を用いて透過光信号を減算しエラー信号を得ているため、光強度が変動した時、その前後では異なる共鳴周波数で安定化してしまう問題点が存在している。

図1において、 V_1 は光強度変動が起こる前のエラー信号、 V_2 は光強度変動後のエラー信号を表す。強度変動前後においてエラー信号を得るための減算用信号を一定の直流電圧とすると、フリンジと0Vの交点であるゼロクロスポイントが光強度の低下に伴い、内側にずれてしまう。制御はゼロクロスポイントを制御の基準であるロッキングポイントとして行われるため、制御時に共鳴周波数が一定に保たれているように見える状態であっても、実際には光強度の変動

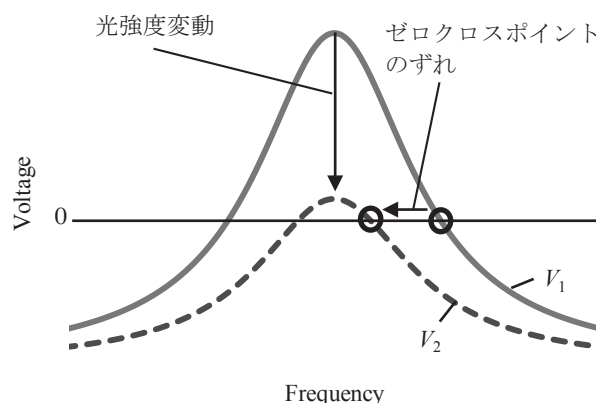


図1 光強度変動とゼロクロスポイントのずれ

とともに共鳴周波数が変化してしまっていることが予測される。このことは、レーザー制御用の参照共振器としては大きな欠点である。これを解決する1つの方法として、除算回路を用いて光強度補償を組み合わせた制御方法が提案された。この研究では、透過光信号とは別に強度モニターの信号を検出し、除算回路を用いて透過光信号を強度モニター信号により除算することで、光強度補償を達成する試みが行われた。透過光信号を V 、強度モニター信号を V_a とすれば、透過光信号と強度モニター信号は同じ割合で変動すると考えられるため、次の式が成り立つと考えられる。

$$\frac{V}{V_a} = \text{一定} \quad (1)$$

つまり、光強度が変動しても強度モニター信号によって除算すれば、光強度変動が補償され、常に同じ光強度と見なせるエラー信号を得ることが可能になる⁴⁾。しかしながら、除算回路はアナログ演算子を用いる以外ではトランジスタなどを多用しなければ製作できず、回路構成が複雑で、安定して所望の動作をさせることが難しい。そのため、本研究ではこれよりも簡単に光強度補償を実現する方法として、強度モニター信号による減算を用いた方法を提案し、その方法の有効性を実験によって検証する。

ファブリー・ペロー共振器の透過光強度は一般にローレンツ型曲線を描く。したがって、その透過光強度スペクトル I は、ローレンツ型曲線のピークの高さを決定する強度を a 、フリンジの線幅を b 、フリンジのピーク位置を c とした時、周波数 x の関数として次の式で表すことができる。

$$I(x) = \frac{a}{b + (x - c)^2} \quad (2)$$

この時、ピーク値は a/b 、半値全幅は $2\sqrt{b}$ である。

本研究では制御のために用いるエラー信号を得る際に、透過光信号からそのピーク値の半分の値を減算することによって、ゼロクロスポイントを作り出し、これをロッキングポイントとして制御を行う。そこで、ローレンツ型曲線を表す式からゼロクロスポイントを得るためにピーク値の半分の値を減算する。ここで、最初の強度を100%とし、減算量は強度によらず100%の時のピーク値の半分の値で一定とした場合について考える。この条件で入射光強度が最初の50%になった時の減算後のフリンジについて計算するとその結果は図2のようになる。図2において、入射光強度が50%時のフリンジのピークは0Vである。また、フリンジと0Vの交点は入射光強度が50%未満になると得られなくなる。このことは実際の制御において、ゼロクロスポイントを得ることができず、入射光強度が当初の半分未満になった時に制御不能状態に陥ることを予見させるものである。

これに対して、図3はエラー信号発生のための減算量がフリンジの強度と同じ割合で変動した場合について計算したものである。この場合では、入射光強度が当初の25%の状態であってもゼロクロスポイントが存在し、ピークの半分位置で一定を保っている。このことから、一定電圧の信号によって透過光信号から減算するのではなく、透過光信号と同じ割合で変動する強度モニター信号電圧によって減算を行えば、大きく入射光の光強度が変動したとしても制御不能状態にならず、一定の共鳴周波数を維持することができると考えられる。

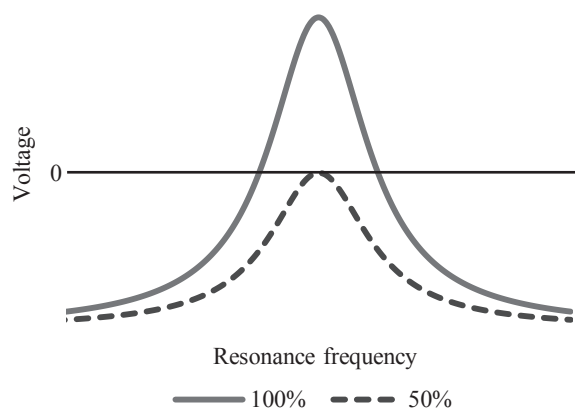


図2 強度補償を行わない時のエラー信号

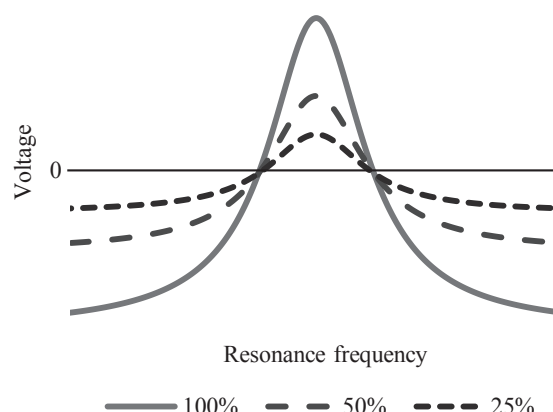


図3 強度補償を行った時のエラー信号

2. ファブリー・ペロー共振器の設計と組み立て

本研究においては、調整の容易さと安定性の高さという観点から共焦点型ファブリー・ペロー共振器を組み立て、使用することとした。共焦点型ファブリー・ペロー共振器では凹ミラーを平行に向かい合わせて配置する。また、一方のミラーと金属胴体の間にピエゾ素子を設置した。ピエゾ素子は印加された電圧に応じて体積膨張を起こす素子であり、これによって共振器長を意図的に変化させ、共鳴周波数を制御することができる。本研究室ではこれまでに金属胴体部にスーパーインバーと呼ばれる鉄、ニッケル、コバルトによる合金を用いて共鳴周波数の安定化制御実験を行った実績がある。スーパーインバーは非常に線膨張率が小さいが、加工を行うためには専門的な業者へ依頼しなければならず、製造量も少ないことなど汎用性が低い。そのため、本研究ではこれよりも高い汎用性を得るために、金属胴体部にアルミニウムを用いた。スーパーインバーとアルミニウムの線膨張率は表1の通りである⁵⁾。これを見ると、アルミニウムはスーパーインバーと比べ約180倍も線膨張率が多いことが分かる。しかし、入手や加工の容易さを考慮に入れた時、汎用性の高さを優先させて金属胴体部にアルミニウムを用いることに至った。

表1 各金属の線膨張率

金属	線膨張率($\times 10^{-6}$ 1/K)
スーパーインバー	0.13
アルミニウム	23.1

ファブリー・ペロー共振器の性能は自由スペクトル領域 (FSR) 間の周波数 ν_{FSR} 、共鳴の鋭さ表すフィネス F 、周波数分解能 $\Delta\nu$ で示される。この中で $\Delta\nu$ はフリンジの半値全幅に相当するものである。これら3つの値を光速 c 、共振器長 L 、ミラーの反射率 R を用いることによって、以下の式で表すことができる。

$$\nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{4L} \quad F = \frac{\pi R}{1 - R^2} \quad \Delta \nu = \frac{\nu_{\text{FSR}}}{F} \quad (3)$$

本研究では金属胴体部として外径15mm、内径13mm、長さ286.5mmのアルミパイプを用いた。またミラーには直径20mm、曲率半径300mm、波長780nmの光に対して反射率98%の平凹ミラーを用いた。共振器長を変化させるための piezo 素子には Piezomechanik 社製のリング型 piezo である HPST 150/14 - 10/12 を用いた。この piezo 素子は、外径13.7mm、内径9.7mm、長さ13.5mm、最大ストロークは印加電圧150Vで12 μm である。なお、各部の接着にはエポキシ系接着剤であるアラライトを用いた。使用した部品の仕様より設計値を求めると、 $\nu_{\text{FSR}}=250\text{MHz}$ 、 $F \approx 77.75$ 、 $\Delta \nu \approx 3.2\text{MHz}$ となった。

製作したファブリー・ペロー共振器の性能評価を行うために図4に示す実験配置を用いて共振器に波長780nmの光を入射させ、周波数分解能である半値全幅を求める実験を行った。この時、piezo 素子にファンクションジェネレータから振幅8.0V、周波数50Hzの三角波の信号を印加して共振器長を変化させた。ファブリー・ペロー共振器から

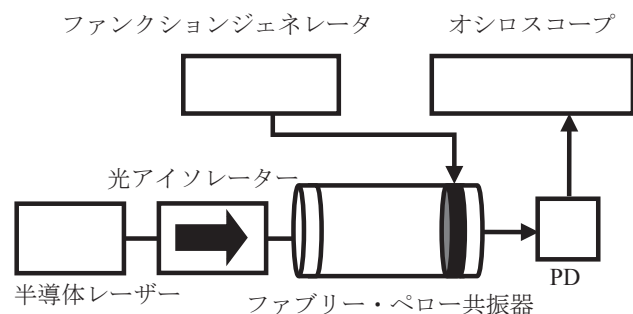


図4 共振器性能評価時の実験配置図 (PDはフォトダイオードを示す)

の透過光はフォトダイオードを用いて受光し、デジタルオシロスコープでその波形を観測した。図5はその結果で、縦軸が透過光強度、横軸はpiezo 素子に印加した電圧による共振器長の変化、即ち時間的に変化する共振器の共鳴周波数を表している。図5では2つのピークが観測されているが、これらのピーク間の周波数が ν_{FSR} に相当し、今回はこれを250MHzと見なしている。その値から、観測されたピーク自身の半値全幅を見積もったところ、およそ3.2MHzであり、設計上の周波数分解能の値(3.2MHz)と数字の上で等しくなった。このことから、今回製作したファブリー・ペロー共振器は当初設計した通りの性能を持っていると考えられる。

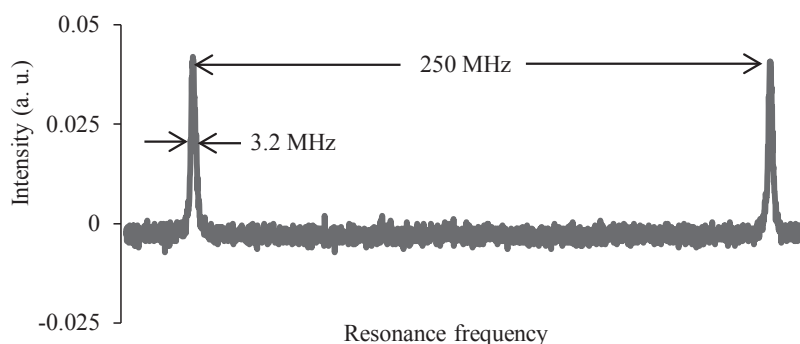


図5 三角波を印加した時のファブリー・ペロー共振器の透過光強度

3. 光強度補償を備えた共振器の共鳴周波数安定化実験

3-1 PI制御による共振器制御の確認

本研究では、ファブリー・ペロー共振器の共鳴周波数をPI制御回路によって安定化することを目指す。このPI制御はオペアンプを用いた回路によって実現でき、この制御回路によって出力さ

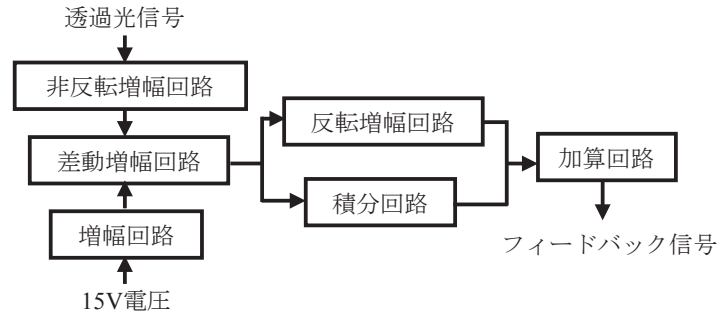


図6 制御用回路の構成

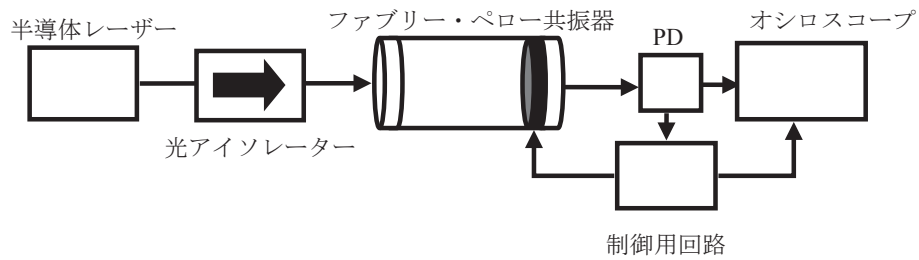


図7 安定化制御実験時の実験配置図 (PDはフォトダイオードを示す)

れた電圧を共振器の piezo 素子に印加することによって制御を行う。そこでまず、差動増幅回路、反転増幅回路、積分回路、加算回路を製作し、組み合わせることによって、PI 制御回路を構成し、その動作確認を行った。この時、フォトダイオードの出力信号が弱くノイズに信号が紛れやすいため、増幅してノイズと区別するために非反転増幅回路を製作した。更に、直流電源電圧を減算用信号として用いるために反転増幅回路を2つ組み合わせた増幅回路を製作した^{6,7)}。この時の回路構成の概略図を図6に示す。また、安定化制御実験時の実験配置図を図7に示す。

まず、図7の実験配置においてファンクションジェネレータから振幅8.0V、周波数は50Hzの三角波を piezo 素子に印加した状態で、共振器からの透過光信号を非反転増幅回路によって100倍に増幅し、この信号のピーク値の半分の値として1.7Vを減算した後の電圧信号を観察した。この時の様子を図8に示す。図8中の f_1 、 f_2 については後述する。制御の手順としてはまず、piezo 素子に何も印加していない状態で、P制御を行った。この時、ロックポイントとして設定している0Vとの偏差に応じて制御が行われ、一時的にエラー信号が0Vになるように変化した。しかし、周囲の温度変化などにより共振器長が常に変動するため、回路の出力が飽和し、安定化されていない状態となり、エラー信号は-1.7V程度で一定となった。この状態からI制御を開始すると、エラー信号はロックポイントである0Vを中心として上下に一定の幅を持って小さく変動する信号に変化した。信号が小さく変動しているのは、周囲の機械的振動でエラー信号が変動しており、この変動を打ち消すための制御が行われているからである。このことから、製作した回路によって共鳴周波数の安定化が行われていることが分かった。図9は制御開始時から約5分間のエラー信号の変化の様子である。図9中の f_1 が測定中のエラー信号電圧の最小値、 f_2 が最大値である。前述の通り干渉フリンジの半値全幅は3.2MHzであり、図8におけるフリンジのゼロクロスポイントは、フリンジのピーク値の半分の値である1.7Vを減算して作りだしたものであるため、ゼロクロスポイント間の周波数を、半値全幅と同じ3.2MHzと見なすことができる。したがって、図8において半値全幅との比を用いることにより f_1-f_2 間の周波数を見積もることができる。その結果 f_1-f_2 間の周波数として2.2MHzという値を得ることができた。これが制御開始から約5分間における共

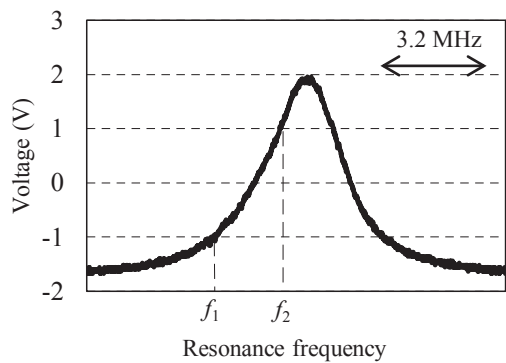


図8 半値減算後の透過光信号

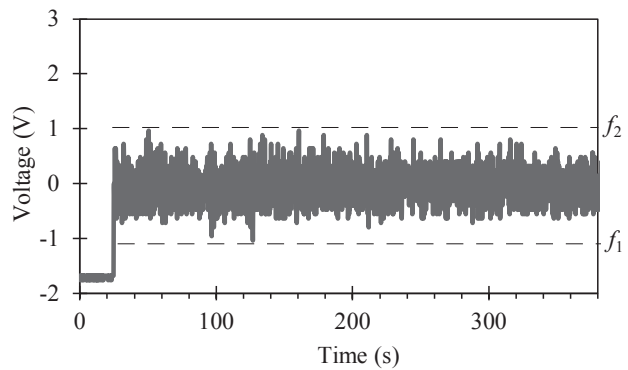


図9 PI制御による共振器長制御の様子

鳴周波数の安定度である。また、さらに時間を延長して安定化実験を行ったところ、安定化制御を約1時間にわたり維持することができた。

3-2 光強度補償性能の確認

前節においてはPI制御動作の確認のために一定電圧を共振器の透過光信号から減算してエラー信号を発生させたが、光強度補償を行うためには強度モニターを配置し、強度モニター信号を減算用信号として用いることとなる。そこで実験配置図を図10のように変更した。本研究で用いた半導体レーザーは一般に比較的強度変動が起りにくい光源である。そこで、強度変動を人為的に起こすためにNDフィルターを配置した。NDフィルターは回転させることによって減光量を連続的に変化させることができる。図10において、NDフィルター1は全体の強度を変動させるためのものであり、NDフィルター2はモニター光の強度を調節するためのものである。なお、PD1が透過光信号を、PD2が強度モニター信号をそれぞれ検出する。また、各フォトダイオードの出力値が小さいため減算後にその信号を増幅する必要がある。それに応じて、回路の構成を図11のように変更した。さらに、この実験配置及び制御用回路を用いて光強度補償が可能であるかの検証を行った。

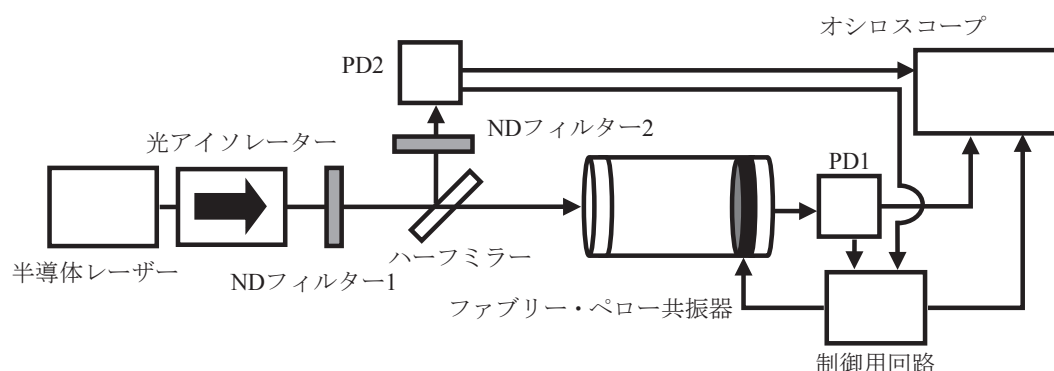


図10 光強度補償確認実験時の実験配置図 (PDはフォトダイオードを示す)

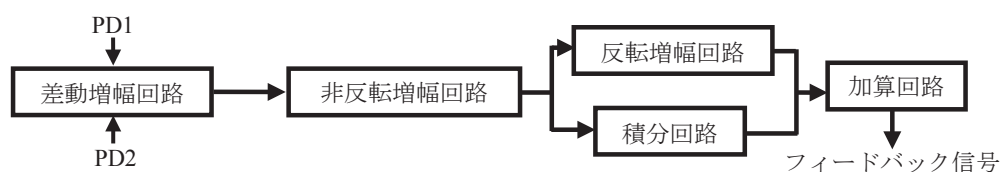


図11 光強度補償確認実験時の制御用回路の構成

図10の実験配置において、 piezo素子へのフィードバックを行わず、ファンクションジェネレータを用いて振幅8.0V、周波数50Hzの三角波をpiezo素子に印加した。また、NDフィルター2は、PD2の出力信号がPD1によって出力された透過光信号のフリンジのピーク値の半分となるように調節した。この条件下でNDフィルター1を用いて光強度をそれぞれ50%、25%に変化させ、エラー信号である図11における非反転増幅回路の出力を観察した。この時の実験結果を図12に示す。

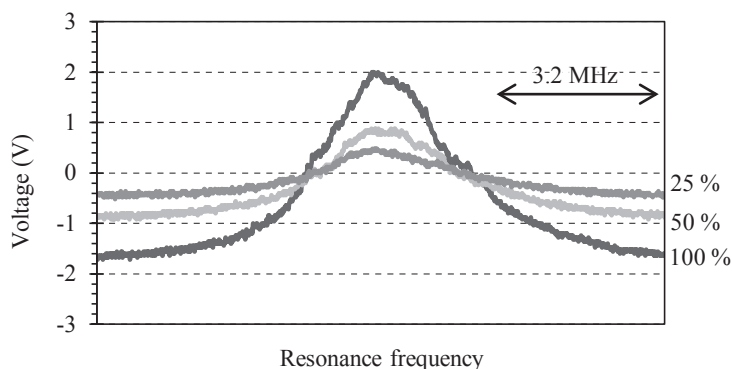


図12 光強度を変えた時のゼロクロスポイント

図12において3つのフリンジのゼロクロスポイントは、全てほぼ1点で交わっていることが分かる。このことは1章において述べた図3の計算と同様の結果であり、エラー信号の発生において実際に減算による光強度補償が達成されていると確認できた。

3-3 光強度補償性能を加えたPI制御動作

ここではまず、図10の実験配置で光強度補償がない時に光源からの光強度が変化すると共鳴周波数の安定化制御にどのような変化が生じるかを実際に確かめた。この時の減算用信号は光強度によらず一定であるべきなので、図7の制御用回路の構成を用いて直流電源の電圧値を調節して減算用信号とした。NDフィルター1を動かし光強度を人為的に変化させたときの制御の様子を図13に示す。

図13においてエラー信号とフィードバック信号の縦軸は左側の、強度モニター信号の縦軸は右側の座標軸である。強度モニター信号の値は当初の入射光強度を100%とした時の実際の入射光強度の割合を示した。3章1節の時と同様に共振器をPI制御により安定化制御を行った。共鳴周

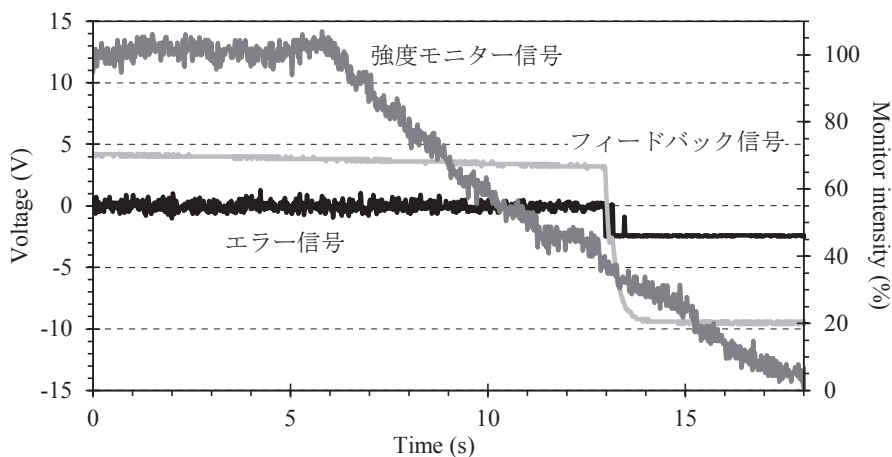


図13 非光強度補償時における光強度変動と制御の様子

波数がPI制御によって安定化されたことを確認した後、NDフィルター1で人為的に入射光強度を低下させた。図13より、入射光強度が約40%になった時に制御が外れ、エラー信号は安定化がなされていた時の0V付近から、安定化されていない時の約-2.5Vに出力が急激に低下した。これは、透過光信号の強度がほぼ0の時である。また、フィードバック信号は光強度が40%以上の時、エアコンなどによる温度変化や周囲の振動などによりエラー信号が変化するため、エラー信号が0Vとなるように制御を行い続けており、一定の割合で変化している。しかし、40%を境に-10Vまで瞬間的に低下した。これはフィードバック信号の出力値が飽和した状態である。このことから、光強度が最初の光強度と比べ40%未満になってしまうと安定化制御を行うことが出来なくなっていることが分かる。この結果は、光強度補償がなされなかったときは入射光強度が50%未満で制御不能になるという1章での予測を裏づける結果である。なお、制御不能になった光強度(40%)が事前の予測の値(50%)と差が生じた原因は、2つのフォトダイオードにおいて暗電流による電圧に若干の差があること、実際の信号にはノイズがあることなどが挙げられる。

以上のことより、光強度補償がなされていない場合でも光強度が最初の光強度に対して約40%以上を保ち続けているならば制御をおこなうことができる。しかしながら、この間の共鳴周波数は1章でも述べたように変化していることが予想され、一定の共鳴周波数を持った参照信号とは必ずしも言えない状態である。また、光強度が40%未満になるとエラー信号のピークが0Vまで到達できなくなり、それに応じてフィードバック信号が飽和してしまうため制御不能になってしまうことが分かった。

最後に図10の実験配置を用いて、光強度補償がなされている時に光強度が変化しても共鳴周波数の安定化制御が維持されることを確かめた。この時、減算用信号には入射光強度モニター信号を用いた。PI制御がなされた状態でNDフィルター1を動かし、光強度を人為的に変化させた。その時のエラー信号とフィードバック信号、強度モニター信号の測定結果を図14に示す。

図14においてエラー信号とフィードバック信号の縦軸は左側の座標軸、強度モニター信号の縦軸は右側の座標軸である。図13の実験時と同様に、PI制御によって安定化されたことを確認した後、NDフィルター1によって人為的に入射光強度を変化させた。図14を見ると強度モニター信号の値が100%から減少していき、約5%付近に至るまで、エラー信号は常に0Vを中心に小さく変動し続けていた。つまりこの入射光強度範囲内で制御が保たれ続けられていることを示している。た

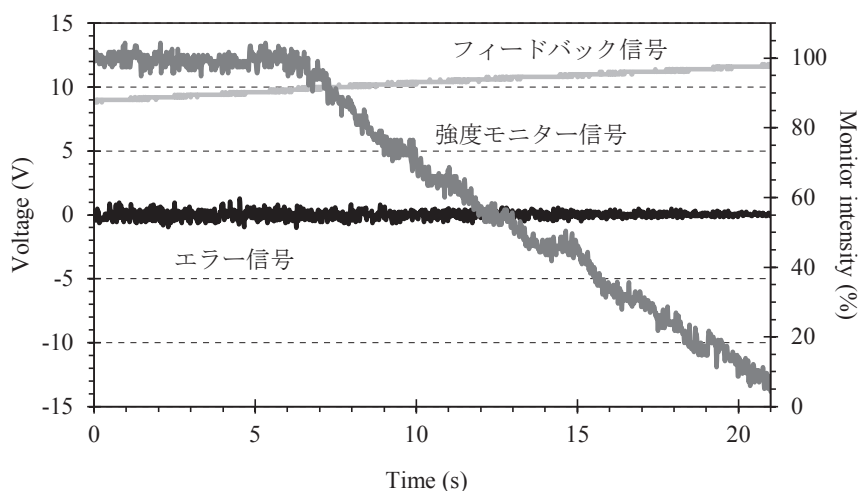


図14 光強度補償時における光強度変動と制御の様子

だし、変動するエラー信号電圧の幅は光強度の低下に伴い狭くなった。これは図12における結果と同様に、光強度の低下とともに強度モニター信号と透過光信号の双方が小さくなったことによって、エラー信号の取り得る電圧の幅が小さくなったためである。あくまで電圧の取り得る値の範囲が狭くなったことによるものであるため、安定度が向上していることを示すものではない。また、フィードバック信号は一定の割合で変化し続けている。この原因は光強度補償を行っていない時と同様に周囲の温度変化や振動によるエラー信号の変化を受けて制御を行っているためである。このフィードバック信号は先程とは異なり、光強度が約5%まで低下していても飽和することなく一定の変化を保っている。このことから、光強度が極めて小さくなった状態であっても図13の実験時のように制御不能になることがなく、制御が続いていると判断できた。

以上の結果より、強度モニター信号を用いて透過光信号を減算することによって、光強度補償が行われていない時には制御不能となった光強度40%未満の状態であっても、共鳴周波数の安定化制御を維持することができたと言える。このことは本研究の目的である強度モニター信号による減算によって光強度補償を目指すことを達成したものと考えられる。

4. まとめ

金属胴体部にアルミニウムを用いたファブリー・ペロー共振器を製作し、PI制御によって2.2MHzの安定度で共鳴周波数の安定化制御を行うことができた。また、光強度補償を行わない制御方法では光強度が40%未満となった時、制御不能となることが分かった。これに対し、強度モニター信号により減算して得られたエラー信号を用いることによって安定化制御を行い、光強度が極めて小さい約5%の状態でも共鳴周波数の安定化を維持する技術の開発に成功した。このことから、本研究で用いた制御方法を用いることによって、光強度が変動しやすいレーザーを用いた場合であっても、半導体レーザーのように光強度が比較的変動しないレーザーを用いた時と同様にファブリー・ペロー共振器の安定化を行うことが可能であると期待される。しかし、使用した回路に用いたオペアンプの関係上、フィードバック信号の取りうる値の幅が $\pm 15V$ までに限られるため、共振器の周囲で極端な温度変化や振動が発生した場合、制御が追い付かなくなり、制御が外れてしまうことがある。これを解決するための改善策としては、電源電圧の許容範囲がより大きいオペアンプに変更することが挙げられる。

参考文献

- 1) 上敷領静香、大向隆三、兵頭政春、近藤一史：「交差共鳴を用いたレーザーの発振周波数制御」埼玉大学紀要（教育学部）第62巻第1号（2013）pp.241-248.
- 2) 山本重彦、加藤尚武：「PID制御の基礎と応用」（朝倉書店 2005）pp.57-71.
- 3) 管野敬之：「レーザーの発振周波数制御に向けた高安定参照共振器の開発」（埼玉大学大学院教育学研究科修士論文 2013）pp.35-37.
- 4) 和泉勇輝：「光変動補償機構を備えた参照共振器制御方法の開発」（埼玉大学教育学部理科専修卒業論文 2013）pp.17-34.
- 5) 国立天文台：「理科年表 平成19年」（丸善株式会社2006）pp.397-398.
- 6) 角田秀夫：「実用オペアンプ回路」（東京電機大学出版局 1983）pp.10-39.
- 7) 岡村勉夫：「定本OPアンプ回路の設計」（CQ出版 1990）pp.161-230.

Controlling Resonance Frequency of Cavity by Monitoring Incident Light Intensity

IIDA, Katsuya

Faculty of Education, Saitama University

KONDO, Hitoshi

Faculty of Education, Saitama University

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

We developed a novel technique for controlling the resonance frequency of a cavity that is maintained even when the incident light intensity fluctuates. To achieve this, we produced a circuit to generate an error signal for controlling the cavity length that subtracts the signal monitoring the incident light intensity from that monitoring the transmitted light intensity. With a conventional feedback circuit, the resonance frequency of a confocal Fabry-Perot cavity was stabilized when the incident light intensity was greater than or equal to 40 % of the initial intensity. By combining the conventional feedback circuit with our subtraction circuit mentioned above, we demonstrated that we could stabilize the resonance frequency even when the incident light intensity was decreased to 5 % of the initial one. Our technique is applicable to the long-term stabilization of a cavity that has complex structures like an external enhancement cavity for the frequency doubling of the laser light.

Key Words: cavity, resonance frequency, stabilization, compensation for intensity fluctuation