

目次

第1部 序論.....	3
1.1 はじめに.....	3
1.2 SiN マイクロリング共振器.....	4
1.3 SiN によるソリトンの発生.....	6
1.4 PID 制御.....	7
1.4.1 PID 制御とは.....	7
1.4.2 比例制御.....	8
1.4.3 微分制御.....	8
1.4.4 積分制御.....	8
1.4.5 パラメータ調整.....	10
1.5 Red pitaya について.....	12
1.5.1 Red pitaya とは.....	12
1.5.2 PyRPL の活用.....	12
1.6 本研究の目的.....	14
第2部 理論.....	15
2.1.....	15
第3部 レーザシステムの制御実験.....	18
3.1 レーザシステムの安定化.....	18
3.2 パラメータ別の性能比較.....	21
3.2.1 P 制御におけるパラメータ.....	21
3.2.2 PI 制御におけるパラメータ.....	21
3.3 周波数特性の評価.....	23
3.3.1 P 制御における周波数特性.....	23
3.3.2 PI 制御における周波数特性.....	25
第4部 ソリトンコムの制御実験.....	26
4.1 SiN マイクロリング共振器の特性評価.....	26
4.2 ソリトンコムの生成と安定化.....	28
第5部 結論.....	35
5.1 レーザシステムの制御について.....	35
5.2 ソリトンコムの安定化について.....	35
謝辞.....	36

第1部 序論

1.1 はじめに

光は、我々にとってもっとも身近な研究対象の一つである。紀元前から太陽光や虹などの自然現象を解き明かそうとする動きから始まった。光の性質の解明に最初に触れたのは Euclid であり、反射の法則を見出した。その後 Snell により屈折の法則が発見され、Grimaldi が回折現象を発見し、基本的な現象が続々と発見されていった。17 世紀には Newton により光の微粒子説が提唱される一方、Hoygens や Young が光の波動説を提唱し、議論は長い間平行線となっていた。その間にも Herschel や Ritter によって赤外線及び紫外線の存在が明らかになり、光学の研究対象が不可視光領域までおよぶこととなった。その後 Einstein により光子の存在が示され、「光は粒子と波動の両方の特性を併せ持つ」と結論付けられることになった。

光の物理的な性質が明らかになるにつれて、人類の生活をよりよくするために、光の活用が進んできた。19 世紀にはアーク灯や白熱電球など、燃焼以外の手法による照明が発明された。より発光効率をよくするために研究は進み、蛍光灯や LED など、今日の我々の生活に欠かせない存在となっている。また同時に、照明のみならず通信媒体としての光の応用研究も始まった。レーザー、光ファイバ、フォトダイオードの開発により光通信が実現したことで、光通信は一躍注目の的となった。

光通信が従来の電気通信に勝るメリットの例として、エネルギー損失の少なさや多重化の可能性が挙げられる。電気信号が回路中を伝わる際、その性質上少なからずジュール熱が発生する。これによるエネルギーの損失は避けられない。しかし光通信であれば、ファイバ内で熱が発生することは物理的にあり得ないので、損失回避につながる。電気通信において超電導の研究が進めば、エネルギー損失に関する優位性が失われてしまうかもしれないが、もう一つのメリットとして信号の多重化が可能であるという点がある。光はその性質上、相異なる複数の波長をもつ信号同士が、互いに干渉せずに行進することができる。これを電気信号で再現しようとする、適切な絶縁が必要となる。より多くの情報を一度に送受信できることは、光通信ならではの恩恵である。

しかし送受信する情報を我々が操作するためには、電気と光の相互変換を避けては通れない。結果として光通信の送受信の際に、通信システムが複雑かつ巨大化してしまう。今後幅広く光通信が用いられることを想定した際、システムはより単純かつ小型であることが望ましいといえる。

本論文は、光通信に用いられるレーザーシステムの小型化および、扱う信号の安定性の向上を期した研究の成果について報告するものである。

1.2 SiN マイクロリング共振器

光共振器とは、特定の周波数を持つ光を蓄積・増幅するはたらきを有するデバイスであり、平面鏡型やリング型などの種類が存在する。もっとも代表的な平面鏡型共振器の一例として、ファブリペロー共振器があげられる。これは、平行に向かい合った2枚の平面鏡から成り、内部に入射された光は2枚の平面鏡間を交互に反射する。

共振器内を一往復する際の光路長が、入射光の波長の整数倍となった場合、定常波が形成されることで蓄積・増幅されるという原理を活用している。これにより、波長の変化につれて一定の間隔で出力光のピークが現れるということになる。このときの共振器の透過スペクトルは Figure1.2.1 のようになる。

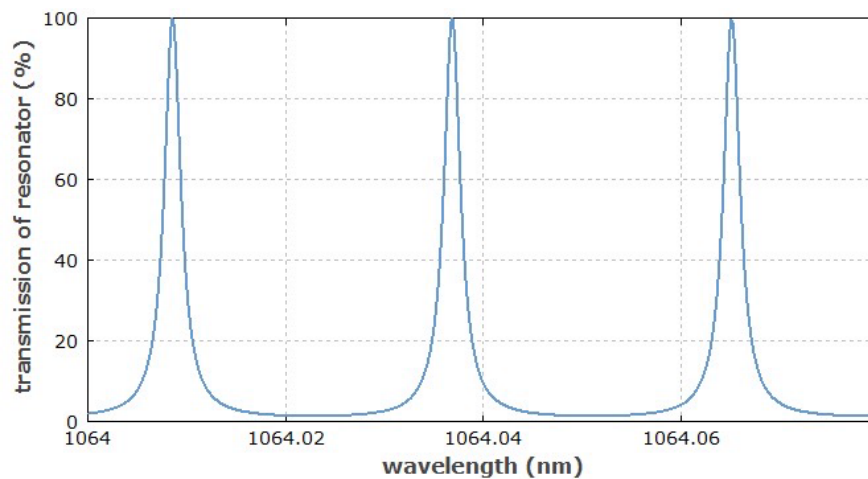


Figure1.1 Transmission spectrum of resonator

一方リング型共振器は Figure1.2(a)に示すように、入射光が円形の共振器の内部を全反射しながら進行し、周回を終えたあと共振器外に出力される。この際、光路長が波長の整数倍となるような入射光にのみ作用するはたらきを有する。上述した平面鏡型共振器と同様、透過スペクトルは Figure1.2(b)のようになる。

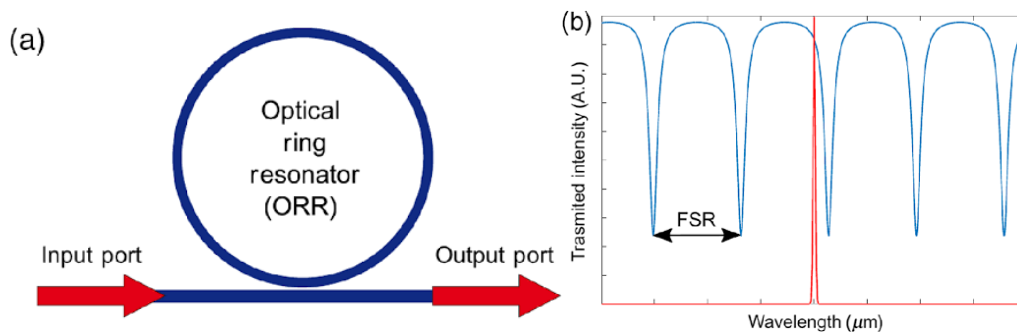


Figure1.2 (a) ORR schematic (b) Transmittance of ring resonator. The red line represents the narrow laser (width not at scale) used to interrogate the OFRR system. The FSR is also indicated by arrows in this figure.

[Damián Presti, Fabian A. Videla, Gustavo A. Torchia “Optical fiber ring resonator as a high-resolution spectrometer. Characterization and applications with single line diode lasers” *Optical Engineering*, Vol. 57, Issue 5, 057108 (May 2018).]

これらの共振器のうち、微細加工技術の進歩に伴い小型化された共振器を、とくに微小光共振器とよぶ。SiN マイクロリング共振器は、名前の通りリング型共振器に該当し、シリコンナイトライド (Si_3N_4) を用いたものである。SiN は他の材料と比較して、Q 値はさほど高くないものの、数 THz まで及ぶ FSR の高さや非線形性の高さが特長であり、光学分野における非常に重要な材料のひとつである。

1.3 SiN によるソリトンの発生

ソリトンは、非線形シュレディンガー方程式の解となるような特殊な光パルスであり、長距離の伝搬による波形の変化はなく、またソリトン同士で衝突しても互いに影響を及ぼすことがない。異常分散領域において、群速度分散の影響で生じるパルス幅広がり、自己位相変調に伴うパルス圧縮が釣り合ったときに光ソリトンが発生する。

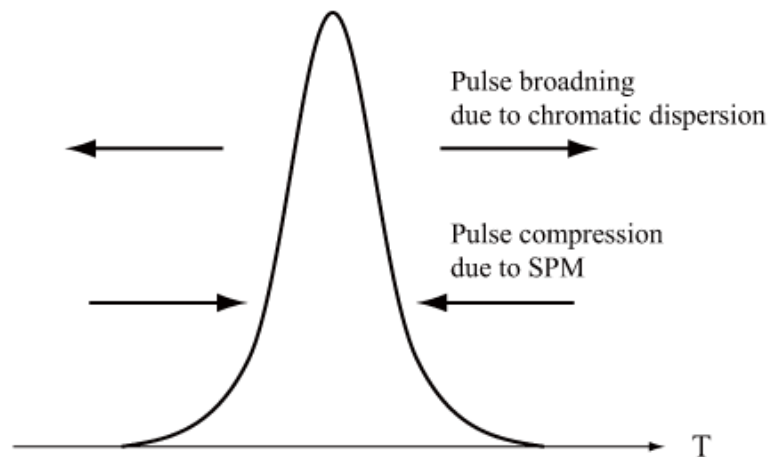


Figure1.3 Principle of soliton generation

ソリトン発生条件を満たし、さらに維持するためにはポンプ光のパワーと波長に関するデチューニングの制御が必須となる。デチューニングとは共振器波長とポンプ光波長との差であり、ポンプ光の波長が共振器波長よりも短い状態をブルーデチューン、逆の状態をレッドデチューンという。

具体的な発生方法として、ポンプ光の波長スweepを考える。ポンプ光の波長を短波長側から長波長側へとスweepすると、複数のパターンの共振が発生する。やがてポンプ光の波長が共振波長を上回ると、ポンプは共振を外れてソリトン領域に入る。このときパワーが非連続的に変化することから、ソリトンステップとよぶ。

さらに波長スweepを継続した場合、別のソリトン領域に遷移するか、または単にソリトン領域から外れるという結果になる。

ソリトンの状態を長時間維持するうえでの問題として、共振器の温度変化とパワーの変化がある。温度変化によって共振波長が短波長側に遷移してしまうと、ポンプ光はソリトン領域から外れてしまう。またこのとき、共振器内のパワーも減少してしまう。そこで波長及びパワーに対してフィードバック制御を用いることにより、ソリトンの状態維持すなわち安定化を図ることができる。制御システムの詳細は 1.4 にて詳しく解説する。

1.4 PID 制御

1.4.1 PID 制御とは

現在の社会においては、いたるところに制御システムが組み込まれている。もっとも身近な例として空調設備があげられる。空調設備は常に一定の温風または冷風を放出しているわけではなく、温度変化に合わせて放出する空気の量を調節する。具体的には、室温と設定温度との差が大きいほど、その差を減少させるような温度の空気がより強力に放出されることになる。この働きによって室温を一定に保つことができる。

こういった制御システムは、ほかにも自律飛行ドローンやエレベーターなど、我々の日常生活に深くかかわっている。

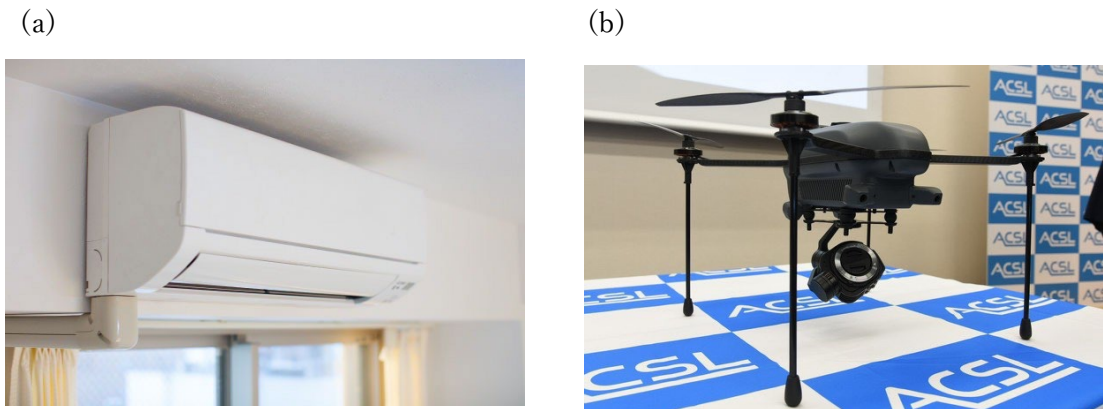


Figure1.4. Examples of machines control systems are used.

(a)Air conditioner (b)Drone

利便性や安全性を追求する上で、より高性能な制御システムの開発が必要となる。制御システムにおいては、目標とする値に対してどれほどの時間をかけてたどりつくか、オーバーシュートの有無、外乱への耐性を示すロバスト性といった要素が、そのシステムの性能評価にかかわる。より高性能なシステムの開発競争が今日も盛んにおこなわれている。制御システムと一口で言っても、多くの種類が存在する。

PID 制御はそのうちの一つであり、フィードバックを用いた制御方法である。比例 (Proportional)、積分 (Integral)、微分 (Derivative) の頭文字を取って名付けられた。目標値に対する誤差情報をもとに、負のフィードバックをかけることによる制御をめざすものである。

1.4.2 比例制御

これは、誤差を減少させる方向に、誤差の大きさに比例した力が出力されるという制御方法である。力学においてもっとも基本的な運動の一つである単振動も、比例制御によって引き起こされているといえる。

目標値に近づくまでの挙動は、比例制御項の係数（以下比例ゲインとよぶ）の大きさのみ依存する。比例ゲインが小さいときは誤差に対する修正力が弱いため出力変化が小さい。これによりシステム自体の変化が少なく安定するが、誤差を減少させるのに多くの時間を費やすことになる。

一方比例ゲインを大きくした場合、応答速度がゲインに比例して早くなるものの、オーバーシュートを起こし振動する。このことから、比例制御は最も基本的なフィードバック制御であるものの、それ単体では十分な制御を行うには至らない。

1.4.3 微分制御

これは、単位時間当たりの誤差変化率に比例した力が出力されるという制御手法である。目標値に対して測定値が過剰に素早く接近している場合、その接近速度を抑える必要が生じる。接近速度は、誤差の値を時間で微分することにより求められる誤差変化率と同義である。

微分制御項の係数（以下微分ゲインとよぶ）が小さいときは誤差変化率の抑制力が小さく、オーバーシュートを起こす可能性がある。微分ゲインを大きくすると目標値に達する前に減速あるいは停止し、応答速度に関するデメリットが生じる。比例ゲインに合わせて適切な微分ゲインを設定することで良好な反応を示す。

1.4.4 積分制御

これは残存する誤差を修正するための制御手法である。定常的に加わる外力に対して、比例制御及び微分制御は感度を持たない。一定の負の外力が系に加えられている場合、比例制御及び微分制御では、目標値まで達して安定化することが原理的に不可能になる。そこで、修正されない誤差が残存している程度に比例した力を加えることにより、この問題は解決される。この時の力の大きさを決定する要素が積分制御項の係数（以下積分ゲインとよぶ）である。

積分ゲインが小さいほど定常誤差に対する感度が減少し、目標値に達するまでの時間が長期化する。積分ゲインが大きくなるほど定常誤差に対する感度が向上し、速やかな応答が見られる。

これら3種を用いて Figure1.5 のようなモデルを構成し、パラメータを適正值に設定することで、高性能な PID 制御システムの構築が可能になる。

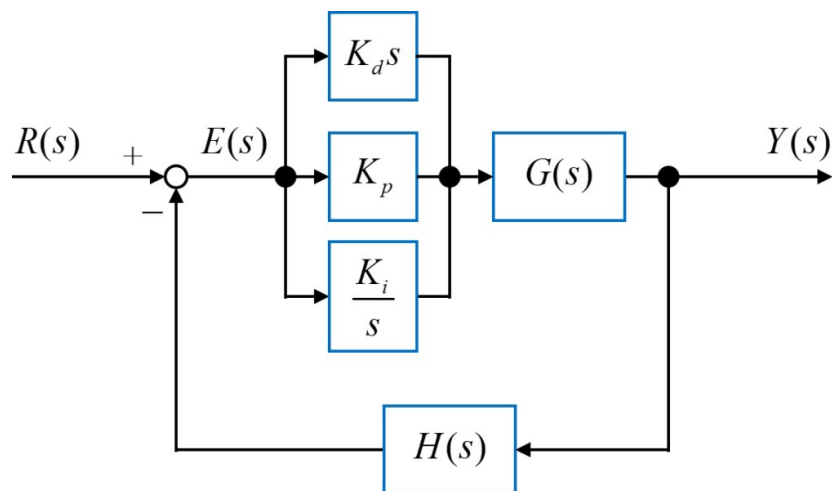


Figure1.5 Block diagram of a typical PID control.

また、比例積分微分の全てのゲインを導入することによる性能の変化が Figure1.6 である。外乱への応答速度やオーバーシュートの強度から判断して、PID 制御は最も安定した性能を発揮する。

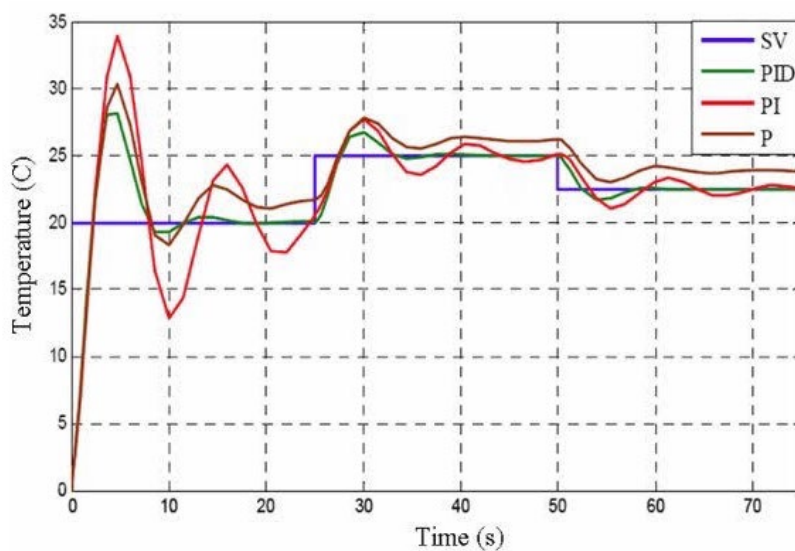


Figure1.6 PID control behavior

しかし一般に、ゲインの設定において代数的な手法を用いて最適パラメータを導くことは不可能である。実際に入出力の応答を測定して試行錯誤を繰り返すか、シミュレーションを用いて求めるしかない。その際に効率的にパラメータを探し出す手法が Ziegler と Nichols により提案されている。

1.4.5 パラメータ調整

システム全体の安定限界における振る舞いに基づいてチューニングを行う手法を2つ挙げる。

一つ目は限界感度法である。ここで比例ゲインを K_p 、積分ゲインを K_I 、微分ゲインを K_D とする。 K_p を徐々に増加させると、応答の振動が持続するような安定限界に達する。この時のゲインを K_u 、また応答の振動周期を P_u とし、これらの数値をもとに積分時間 $T_I (= K_p/K_I)$ および微分時間 $T_D (= K_D/K_p)$ を設定する。この際、以下の調整則が発見されている。

Table1.1 Marginal sensitivity method

コントローラ	K_p	T_I	T_D
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$P_u/8$

二つ目はステップ応答法である。制御系においては、Figure1.7のようなプロセス反応曲線とよばれるステップ応答が見られる。

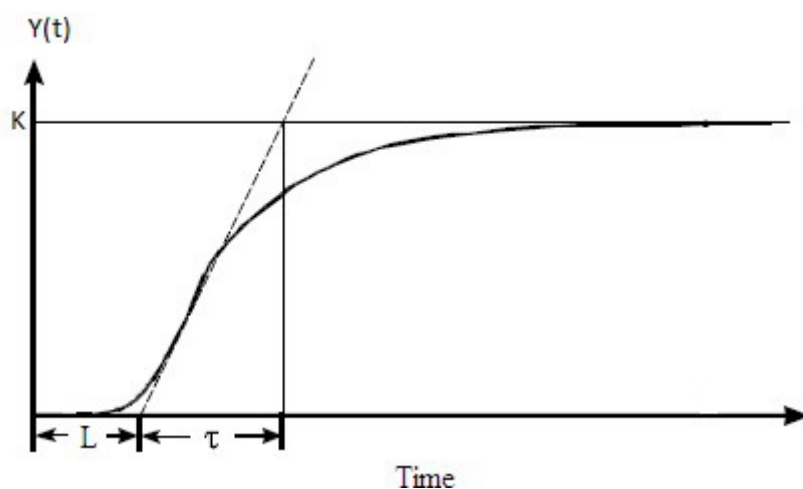


Figure1.7 Step response

この曲線の変曲点における接線を引き、横軸と交わる時刻を L とし、応答の定常値を K とする。また接線の傾きを $R(=K/T)$ とおく。なお、このときのプロセス反応曲線は、

$$P(s) = \frac{K}{1 + T_s} e^{-Ls}$$

によって近似されるものとする。

この際、以下の調整則が発見されている。

Table1.2 Step response method

コントローラ	K_P	T_I	T_D
P	$1/RL$	-	-
PI	$0.9/RL$	$L/0.3$	-
PID	$1.2/RL$	$2L$	$0.5L$

1.5 Red pitaya について

1.5.1 Red pitaya とは

Red pitaya とは、信号処理に重点を置いたシングルボードコンピュータである。サイズは 10 cm 程度であり、比較的廉価で入手が可能であり、様々な研究機関および教育機関で導入されつつあるデバイスの一つとなっている。

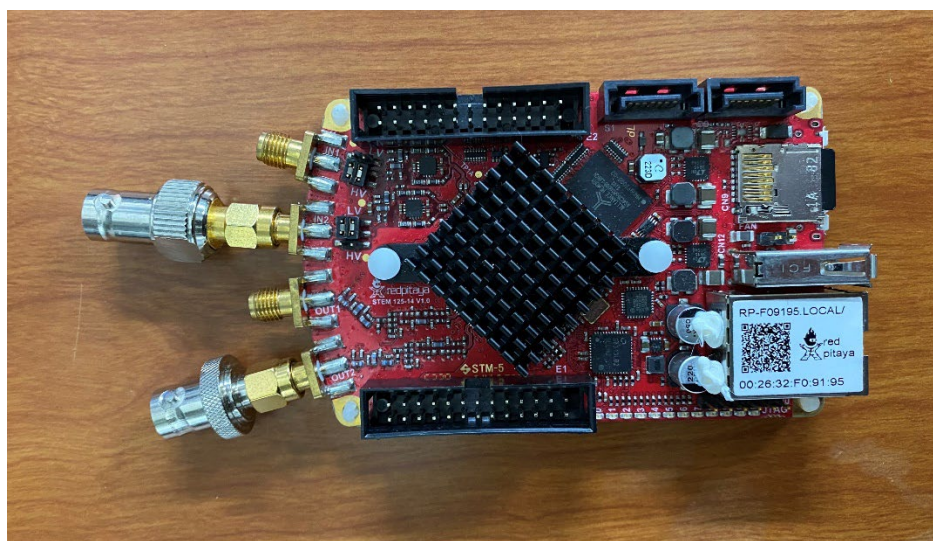


Figure1.8 Red pitaya

Red pitaya には入力端子と出力端子が 2 つずつ設置されており、ユーザーが自由に内部のプログラムを書き換えることが可能なデバイスであるため、用途は多岐にわたる。本研究においては、PyRPL とよばれるソフトウェアパッケージを用いて、Red pitaya を操作した。

1.5.2 PyRPL の活用

PyRPL は Leonhard Neuhaus によって 2014 年に開発されたソフトウェアであり、主に Red pitaya のオープンソースコードに基づいて設計されている。現時点でさまざまなモジュールが実装されているが、どれも唯一 Red pitaya のみを対象としている。

本実験では、PyRPL の機能のうち PID Control のモジュールを用いた。



Figure1.9 PyRPL operation screen

Figure1.9はPyRPLの操作画面である。入出力の端子を選択し、各パラメータを調整し入力することで、フィードバック信号が設定値で固定されるようにRed pitayaから信号が出力される。パラメータ調整も、上述したようにリアルタイムでの測定結果と比較しながら手動で調整する必要がある。これによって手軽にシステム全体の安定化を図ることができる。

1.6 本研究の目的

従来の光通信の制御システムに Red pitaya を用いた PID 制御を導入することで、システム全体の小型化, 低価格化, 省エネルギー化を実現できる可能性がある。また複雑な制御系を Red pitaya 一つで置き換えることにより構造が単純化し, 容易に再現できるといったメリットもある。

そこで本研究においてシステムの制御に取り組み, レーザシステムの安定化を目指す。

第2部 理論

2.1

PDH ロック

PDH (Pound Drever Hall) 法によるロックは、レーザの出力光の周波数制御を行う上で広く用いられる手法である。システムを不安定化させる要因としては、温度変化をはじめとする外乱の影響や利得の変化による内的影響などが挙げられるが、PDH 法は強度の揺らぎに対して比較的強い堅牢性を持ち、強力な安定化を図ることが可能であることが知られている。これは、PDH 法が共振器の透過スペクトルの導関数の情報をもとにフィードバックすることによるものだと考えられる。

まず Figure のような透過スペクトルをもつ共振器に対してロックすることを考える。波長が変化した際にデチューニングが生じるものの、短波長側に移動したのか長波長側に移動したのかわからない。これはデチューニングが左右どちらにずれたとしても出力光のパワーが減少してしまうためである。そのため正しくフィードバックをすることは不可能になってしまう。これを避けるためにディップの側面にロックすることをサイドロックという。デチューニングの上下と出力光パワーの上下が対応しているため、誤差を是正する方向に正しくフィードバックすることが可能になる。

熱周波数シフト

SiN マイクロリング共振器のような比較的小さな共振器は温度変化の影響を受けやすく、安定してソリトンコムを発生させることのできる手法が限られている。これは共振器内のパワーが変化して温度 T が変化した際に、熱周波数シフトが発生することに起因する。共振器内の屈折率 n および共振器の半径 r が変化することで、共振波長 $\lambda(n, r)$ が変化するためである。共振波長の温度依存性は次式で表される。

$$\frac{d}{dT} \lambda(n, r) = \lambda \frac{dn}{dT} + \lambda \frac{dr}{dT}$$

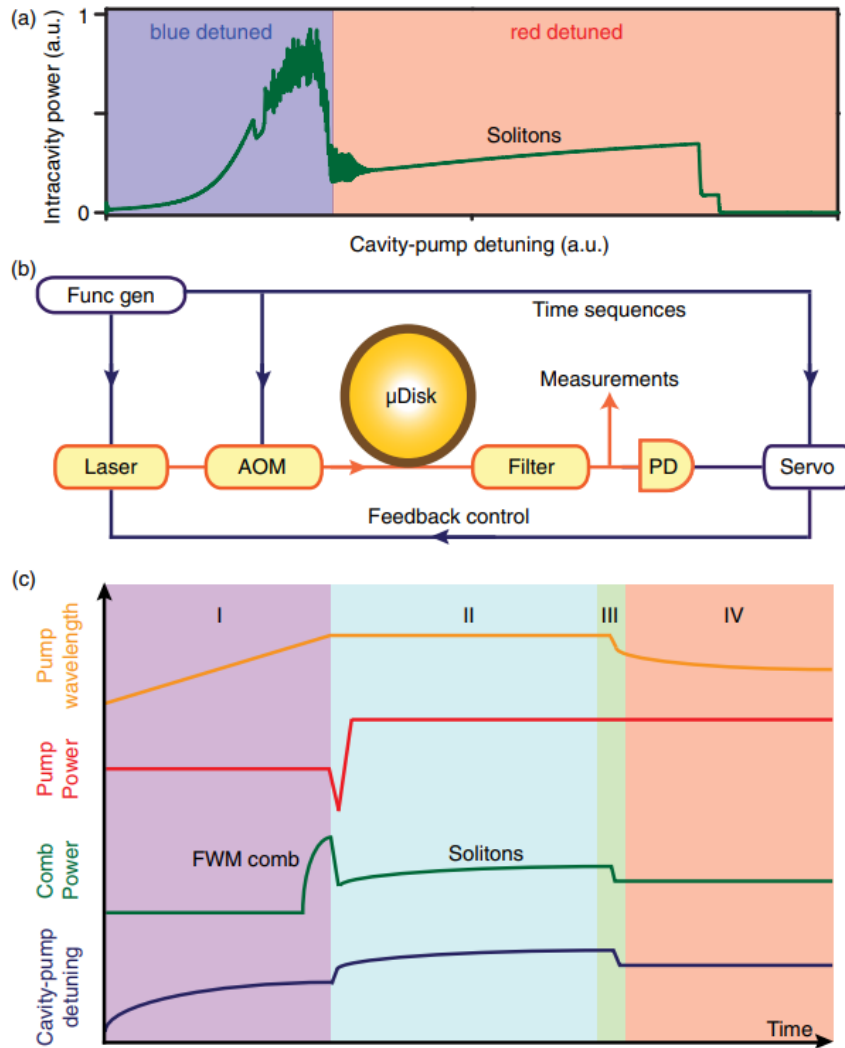
温度変化の影響を受けた共振器の共振波長は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \lambda &\approx \lambda_0 \left[1 + \left(\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \right] \frac{dL}{dT} \\ &= \lambda_0 (1 + \alpha \Delta T) \end{aligned}$$

ここで dL/dT は熱膨張係数、 dn/dT は熱光学係数である。一般的に、熱光学係数のほうが大きい。また α は、熱膨張係数と熱光学係数の両方を含み、まとめて表記したパラメータである。 λ_0 は熱の影響を受けていないときの共振波長であり、温度の上昇によって共振波長が長波長側へシフトすることが分かる。

パワーキック法

上述の通り、共振波長は温度の影響を受けて変化する。一方、入射パワーの変化によっても共振波長は変化する。このパワーの変化によって温度変化による影響を相殺することが、パワーキック法の狙いとなる。



Figure

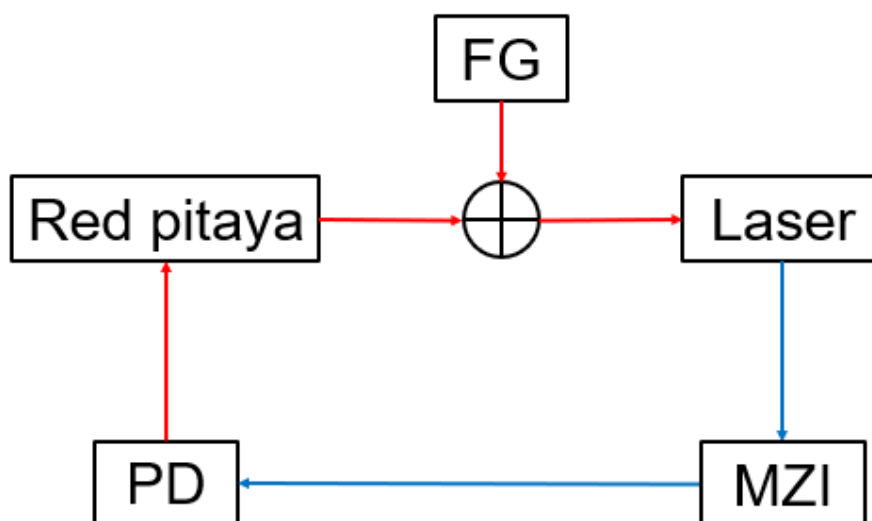
(a) Simulated intracavity power in which the pump laser scans over the resonance from the blue side to the red side. The steps on the red-detuned side indicate soliton formation. (b) Schematic of experimental setup. (c) Four phases of feedback-controlled soliton excitation: (I) pump laser scans into cavity resonance from the blue-detuned side; (II) laser scan stops and pump power is reduced ($\sim 10 \mu\text{s}$) to trigger solitons, and then increased ($\sim 100 \mu\text{s}$) to extend soliton existence range; (III) servo control is engaged to actively lock the soliton power by feedback control of laser frequency; (IV) lock sustains and solitons are fully stabilized. The cavity-pump detuning (vertical axis) is relative to the hot cavity resonant frequency

[Xu Yi, Qi-Fan Yang, Ki Youl Yang, and Kerry Vahala, “Active capture and stabilization of temporal solitons in micro resonators,” Opt. Lett. 41, 2037-2040 (2016).]

第 3 部 レーザシステムの制御実験

3.1 レーザシステムの安定化

Red pitaya による PID 制御の効果を測定する際のセットアップを, Figure3.1 に示す. レーザとしてファイバーレーザを用いた.



FG: function generator, MZI: Mach-Zehnder Interferometer

Figure3.1 Experimental setup for laser system control

まず実験で用いた MZI の透過特性を測定した. FG から三角波を出力し, その信号がレーザ光の波長を変調させることで生じるマッハツェンダ干渉計の透過スペクトルを観測した. その結果が Figure3.2(b)である. また測定時のセットアップを Figure3.2(a)に示す.

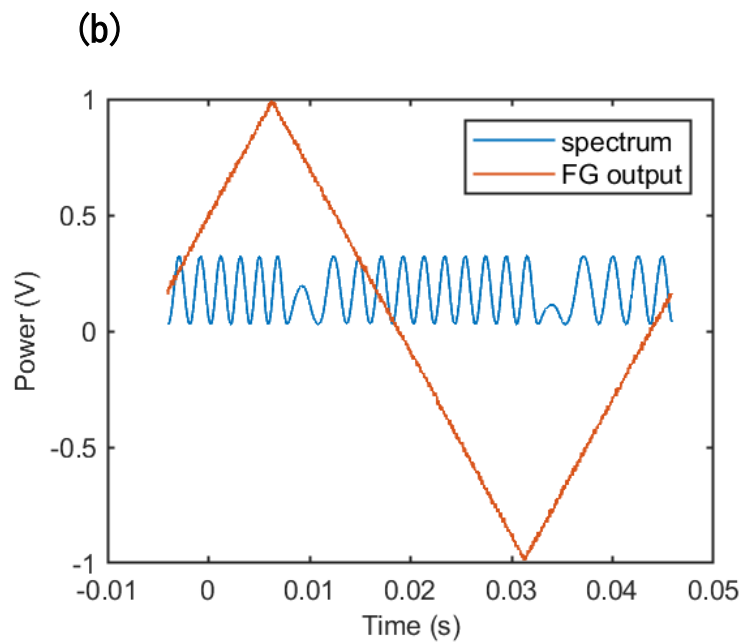
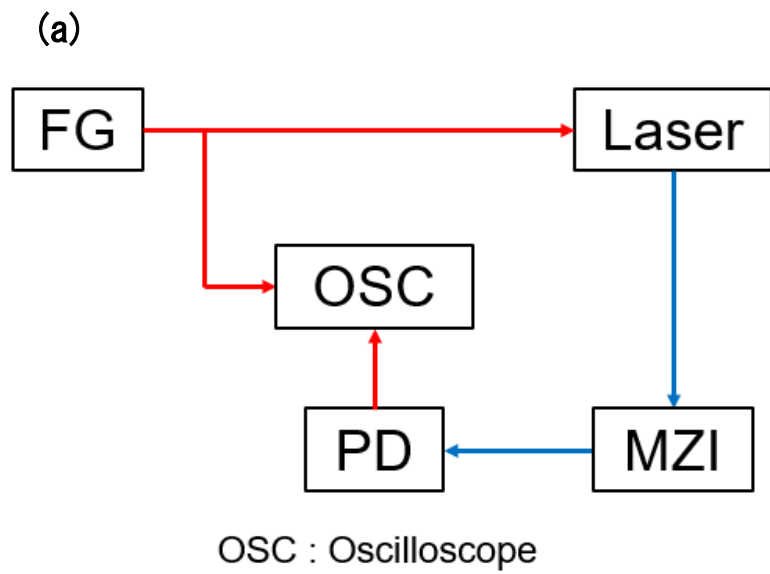


Figure3.2 Measurement results of transmission spectrum of MZI
 (a) Experimental setup for Measurement
 (b) transmission spectrum of MZI

FG からの出力に伴いレーザ光波長が変化することで、干渉縞が生成されていることが確認できた。

次に MZI の透過光強度に対して Red pitaya を用いた PID 制御を実行することにより、レーザシステムのロックを試みた。ゲインのパラメータを変化させつつ複数のパターンでテストを行った。ロックに成功し安定化したときの信号変化を Figure3.3 に示す。

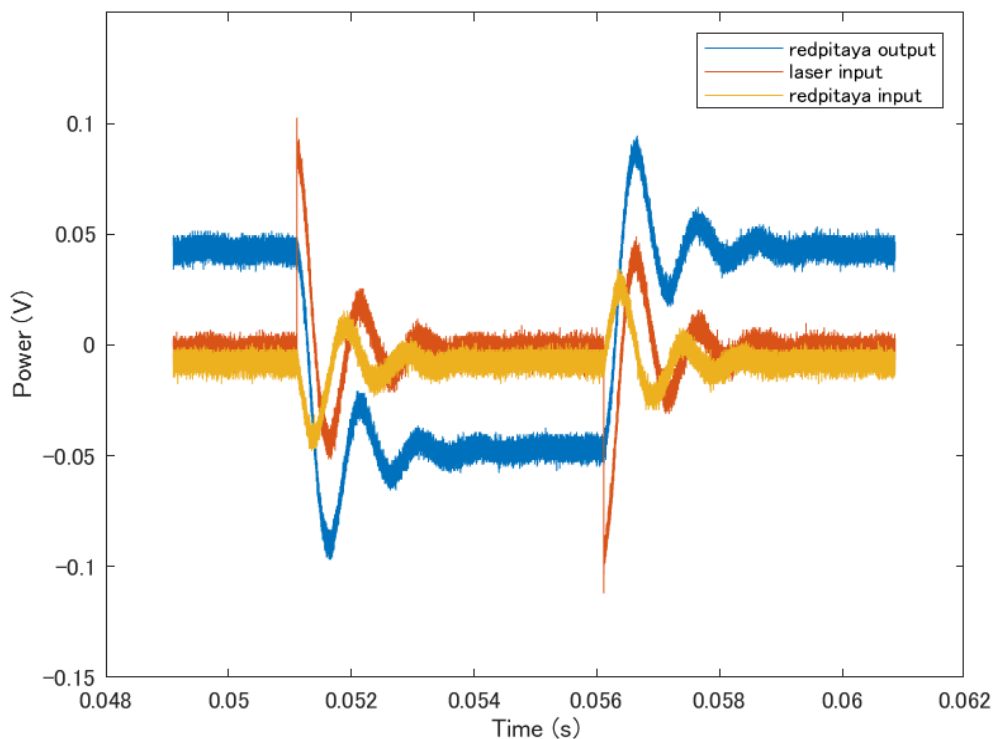


Figure3.3

この時の入力外乱の周波数、PI 制御の P ゲイン、I ゲインはそれぞれ、 $f = 1.00 \times 10^2 \text{Hz}$, $K_p = 0.414$, $K_I = 2.13 \times 10^3$ であった。

外乱の加算によってレーザ入力信号がステップ状に変化した際、システムからの出力が変化することによって Red pitaya への入力信号も同時に変化していることが確認できた。また PID 制御によりレーザへの入力信号を 0 に打ち消すため、逆位相の信号が出力されていることが確認できた。ある程度の時間が経過したのち信号は 0 に収束していることから、Red pitaya を用いた PID 制御によってレーザシステムの安定化を図ることに成功したといっていよう。

3.2 パラメータ別の性能比較

3.2.1 P制御におけるパラメータ

続いて、パラメータ別の比較を行った。P制御がかかった状態でPゲインを変更し、Red pitayaの入出力電圧の大きさを測定した。その結果がFigure3.4である。またこの時のPゲインの値と入出力電圧の振幅をTable3.1に示す。

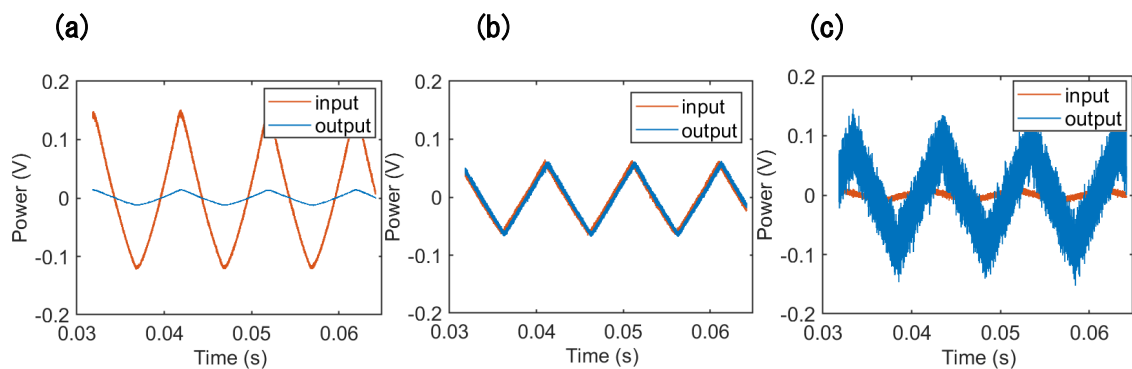


Figure3.4 Waveform comparison with each K_p

(a) $K_p = 0.10$, (b) $K_p = 1.0$, (c) $K_p = 10$,

Table3.1 Measured voltage with each parameter.

K_p	0.10	1.0	10
入力電圧(mV)	138	65.3	15.1
出力電圧(mV)	13.9	65.5	151

この結果から、入力電圧に対する出力電圧の比が K_p と一致していることが確認できた。したがって正常に制御が作動していることが分かった。しかしゲインが10を超えて大きくなると出力信号の振動も大きくなり、 $K_p > 16.1$ においてハンチングが生じたことで制御が利かなくなった。このレーザシステムに対するP制御の際、有効なゲインの最大値は $K_p = 16.1$ であった。

3.2.2 PI制御におけるパラメータ

同様にIゲインのパラメータ別の比較を行った。PI制御がかかった状態でIゲインを変更し、Red pitayaの入出力電圧の大きさを測定した。その結果がFigure3.5である。

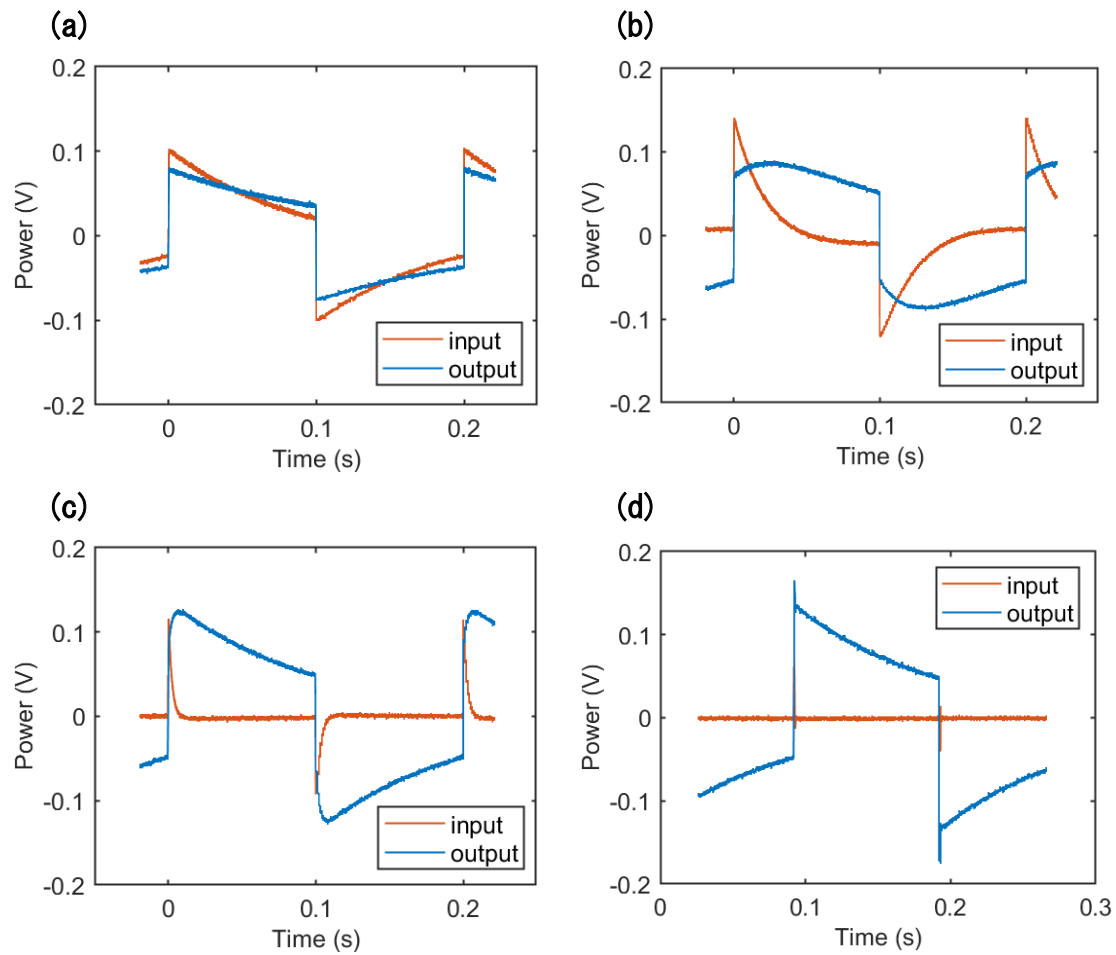


Figure3.5 Waveform comparison with each K_I

- (a) $K_p = 1.0, K_I = 1.0$
- (b) $K_p = 1.0, K_I = 10$
- (c) $K_p = 1.0, K_I = 100$
- (d) $K_p = 1.0, K_I = 1000$

これらを比較することで、

また、システムの応答に関する性能を評価するため、 $K_p = 1.0, K_I = 1000$ における整定時間を測定した。測定時の Red pitaya への入出力信号を Figure3.6 に示す。

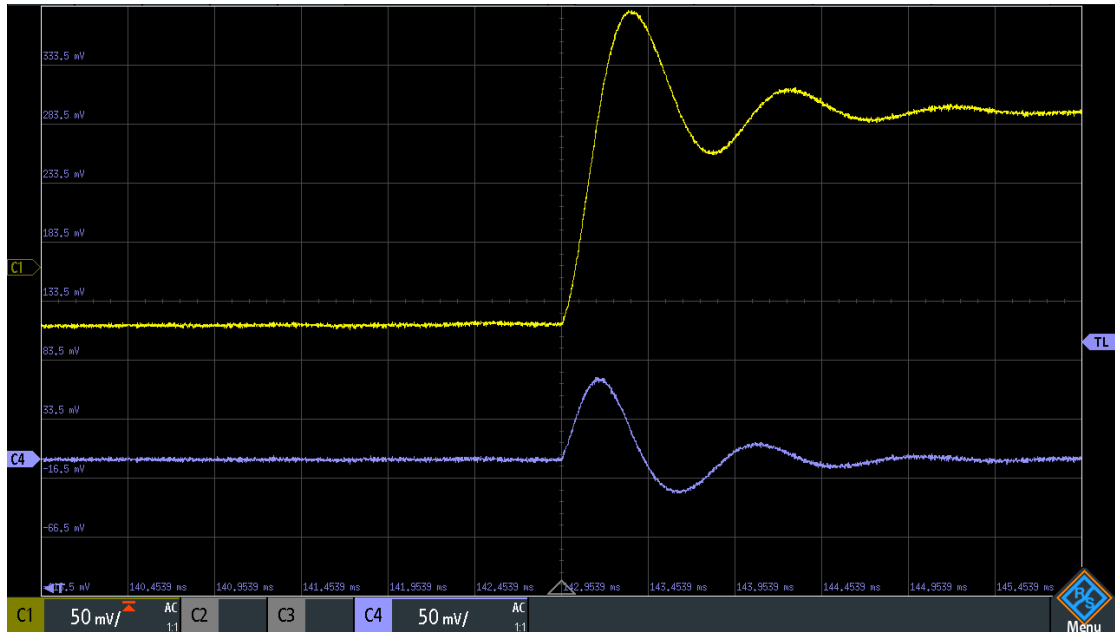


Figure3.6 Measurement of settling time

C1: Red pitaya output

C4: Red pitaya input

応答が定常値に対して $\pm 2\%$ 以内に収まるまでの整定時間は、およそ 3.0 ms であった。さらにIゲインを増加させるとハンチングが生じることで制御不能となった。したがってこのシステムの整定時間の限界は 3.0 ms となった。

3.3 周波数特性の評価

3.3.1 P制御における周波数特性

続いて実験で用いたレーザシステムの周波数特性の測定を行った。FGからシステムに対して、三角波を外乱要素として入力する。この時の振幅を V_{in} [V]、周波数を f_{in} [Hz]とする。外乱によってレーザ出力光の波長が変化し、干渉縞に変化が生じる。フォトディテクタで電圧に変換された信号が変化した際の振幅を V_{out} [V]とする。入出力時の電圧をもとに、ゲインを算出する。ゲインは以下の式で表される。

$$G = 20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} [dB]$$

したがって、ゲインの値が小さいほど V_{out} が小さいということになり、優れた応答を示すということが分かる。

まず P ゲインの値の違いによる周波数特性の差を測定した。積分制御が入らないように I ゲインを 0 に固定したうえで P ゲインを 0.10, 1.0, 10 の 3 パターンに設定し、測定を行った。 f_{in} を 5.0 Hz から $5.0 \text{ Hz} \times 10^4 \text{ Hz}$ まで変化させ、一定の周波数感覚で 20 回測定し、それぞれの周波数における波形の振幅を読み取ることで、 V_{out} を記録した。なお、この時の外乱の振幅は $V_{in} = 0.20 \text{ V}$ であった。制御システムの周波数特性を示すボード線図が、 Figure3.7 である。

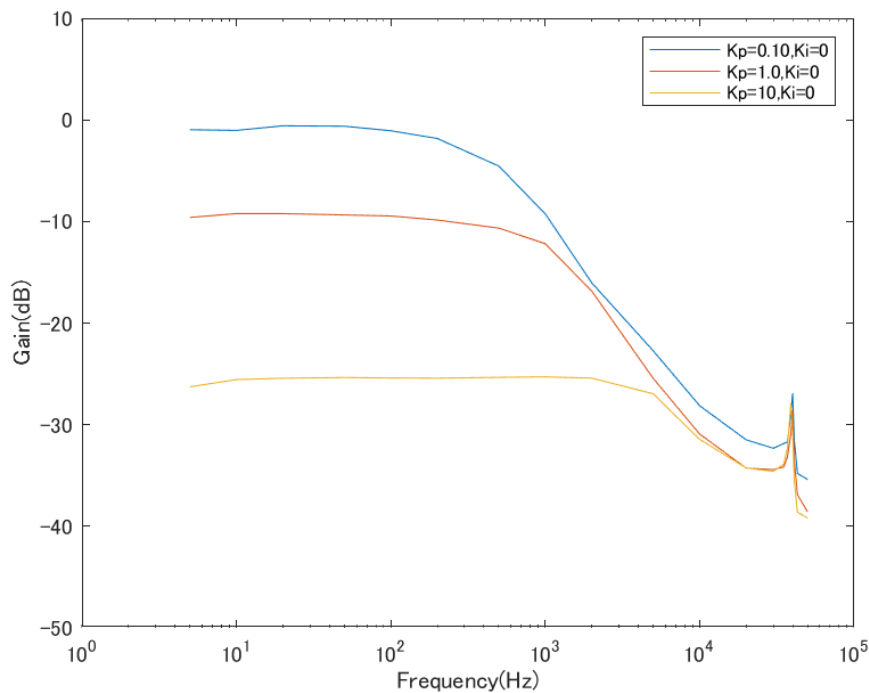


Figure3.7 Frequency response for each value of K_p

P ゲインの値がいずれの場合も、 $f_{in} = 10^3 \text{ Hz}$ からゲインが急激に低下している。これは実験に用いたファイバーレーザの応答速度による影響であり、Red pitaya の制御帯域に起因するものではないことが分かった。また $f_{in} = 3.9 \times 10^4 \text{ Hz}$ において急激なゲイン上昇が確認できるが、これもファイバーレーザの特性によるものである。

P ゲインの値の差による性能を比較すると、まず $K_p = 0.10$ のときは $5.0 \leq f_{in} \leq 1.0 \times 10^2$ において $G \approx 0$ となっていることが確認できた。これは外乱による影響を打ち消すことができていないことを表している。

次に $K_p = 1.0$ のときは $5.0 \leq f_{in} \leq 1.0 \times 10^3$ において $G \approx -10 \text{ [dB]}$ 、 $K_p = 10$ のときは $5.0 \leq f_{in} \leq 1.0 \times 10^3$ において $G \approx -25 \text{ [dB]}$ となっていることが確認できた。どちらにおいても外乱要素が入力時よりも小さくなっていることから、制御ができていていることを示している。

3.3.2 PI制御における周波数特性

続いてPゲインの値を $K_p = 16.1$ で固定し、Iゲインを導入することでPI制御を実行した。Iゲインの値を 1.0 から 2.28×10^3 まで変更し、4つのパターンで測定を行った。3.1と同じように、 f_{in} を 5.0 Hz から $5.0 \text{ Hz} \times 10^4 \text{ Hz}$ まで変化させ、一定の周波数感覚で20回測定し、それぞれの周波数における波形の振幅を読み取ることで、 V_{out} を記録した。なお、この時の外乱の振幅は $V_{in} = 0.20 \text{ V}$ であった。その結果を Figure3.8 に示す。

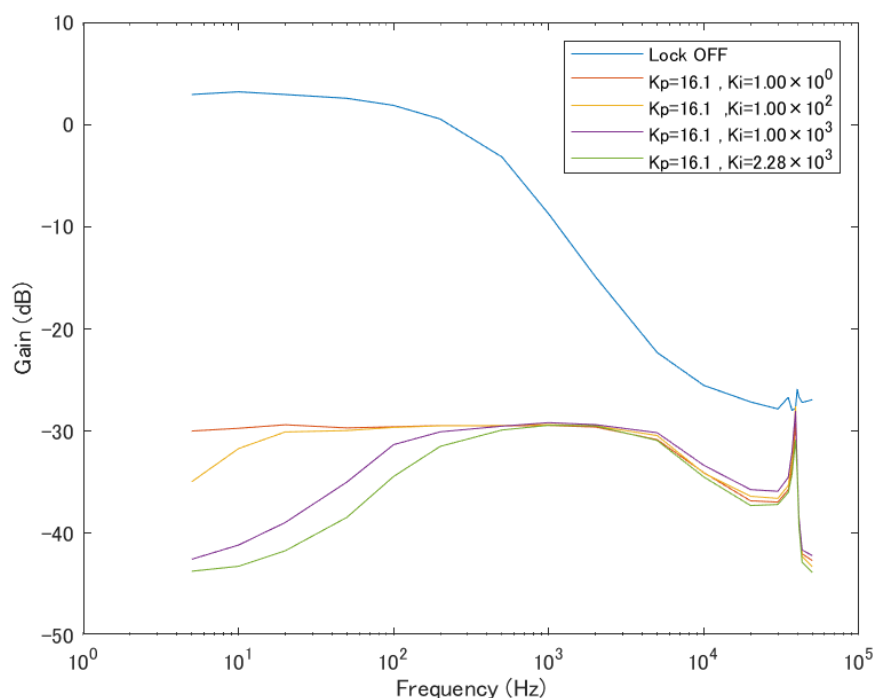


Figure3.8 Frequency response for each value of K_I

$5.0 \leq f_{in} \leq 1.0 \times 10^3$ においてIゲインの値を問わず、 $G \leq -30 \text{ [dB]}$ まで抑えられていることが確認できた。またIゲインもPゲイン同様に、値が大きくなるにつれてシステムがより安定することを示した。しかしIゲインもまた、過剰な値をとるとハンチングが生じた。このレーザーシステムにおいては、 $K_I > 2.28 \times 10^3$ においてハンチングが生じたことから、有効なIゲインの最大値は $K_I = 2.28 \times 10^3$ であることがわかった。またこの際のゲインは -30 dB を下回っており、P制御単体と比較してもより良好な制御を実行可能であることが確認できた。

第4部 ソリトンコムの制御実験

4.1 SiN マイクロリング共振器の特性評価

本研究においてソリトンを発生させるにあたり，SiN マイクロリング共振器を用いた．使用した共振器は，リング幅 1550 nm，ギャップ 500 nm，FSR=300 GHzであった．(Figure4.1)

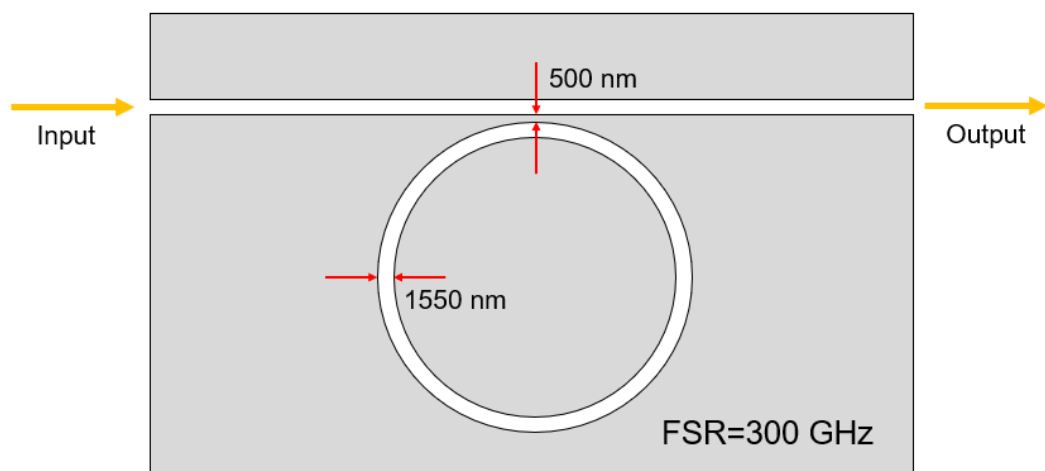


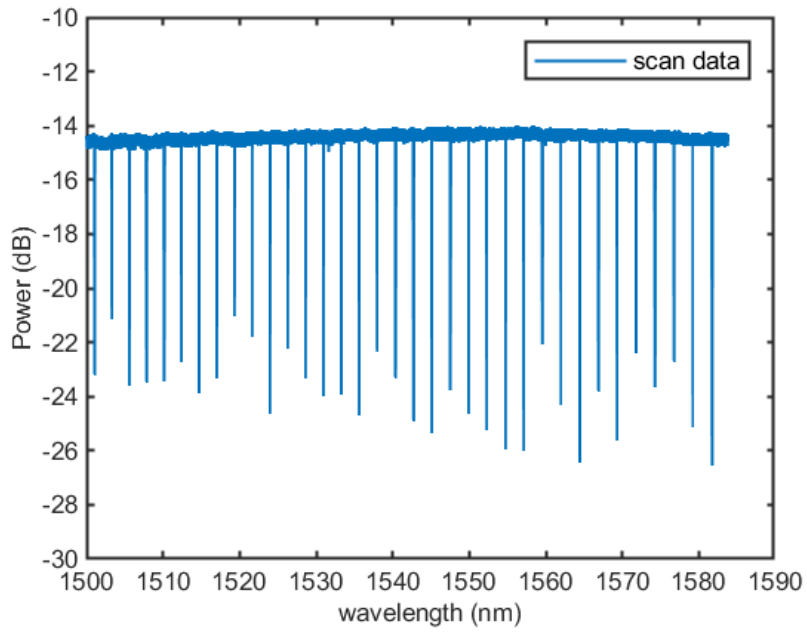
Figure4.1.

Cross-sectional view of the SiN micro ring resonator used in this experiment.

はじめに，この SiN マイクロリング共振器の Q 値を測定した．Q 値とは，共振器の「光を閉じ込める性能」を数値化した無次元の物理量である．波長スイープの機能が実験で用いたレーザに備わっていたため，出力光波長 (nm) を横軸とし，透過光強度 (dB) を縦軸とすることで，SiN マイクロリング共振器の透過スペクトルを測定した．

次にローレンツ関数を透過スペクトルのグラフに対してフィッティングし，半値幅を計算することで Q 値を得た．この時の共振器の透過スペクトルとフィッティングの結果を Figure4.2 に示す．

(a)



(b)

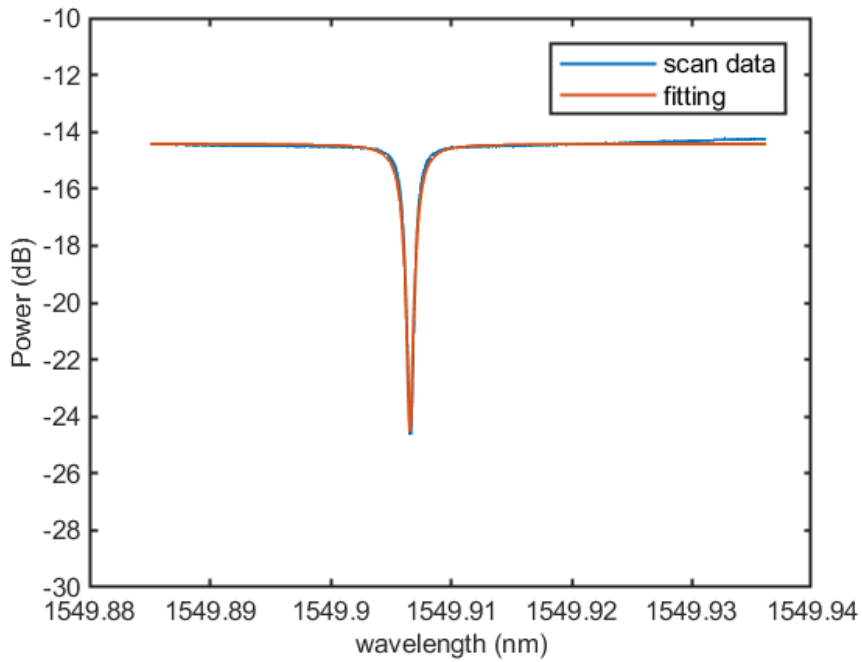


Figure4.2 Q-value measurement results

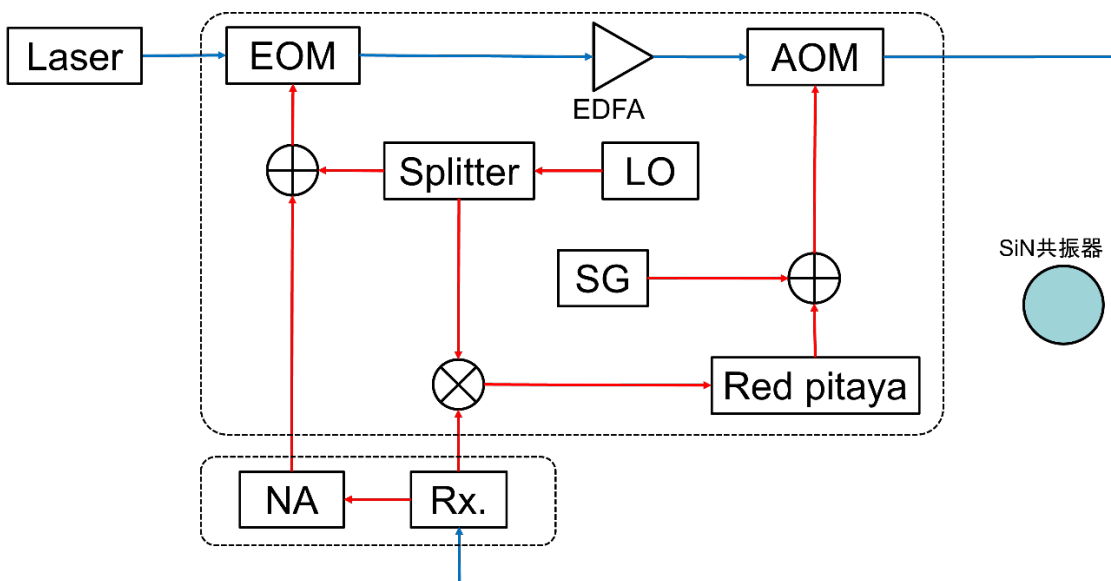
(a)Transmission spectrum of SiN micro ring resonator

(b)Fitting curve

この測定の結果、使用した SiN マイクロリング共振器の Q 値は 1.1×10^6 となった。

4.2 ソリトンコムの生成と安定化

パワーキック法で発生させたソリトンコムを，PDH 法を用いてロックするため，Figure4.3 のようなセットアップを構築した．



EOM : electro-optic modulator , AOM : acousto-optic modulator ,
EDFA : erbium doped fiber amplifier , LO : local oscillator ,
SG : signal generator , NA : network analyzer , Rx : receiver

Figure4.3 experimental setup for PDH locking and detuning measurement

このセットアップの中で Red pitaya が果たす役割は，エラーシグナルの打ち消しである．まずデチューニングと LO からの出力信号との乗算から成るエラーシグナルが，Red pitaya に入力される．そのエラーシグナルが 0 となるように Red pitaya 内で PI 制御が実行され，出力信号が AOM へとフィードバックされる．

具体的には，例えばポンプ光強度が不足しているときは，共振波長が短波長側へシフトすることデチューニングが生じる．それにより発生したエラーシグナルを Red pitaya が感知し，PI 制御によって逆の電圧信号を AOM に向けて出力する．結果，デチューニングが 0 となるように AOM がポンプ光強度を調整し，共振波長が長波長側へ戻ることによってソリトンが安定する．

なお，Red pitaya を作動させた瞬間の出力電圧のステップによりソリトンが消滅することを防ぐため，非常に小さな P ゲインによる P 制御を先に作動させ，次いで I ゲインを立ち上げることで，PI 制御によるフィードバックを実現した．

エラーシグナルの測定結果を、Figure4.4 に示す。また3つのエラーシグナル測定時に対応するデチューニングを Figure4.5 に示す。

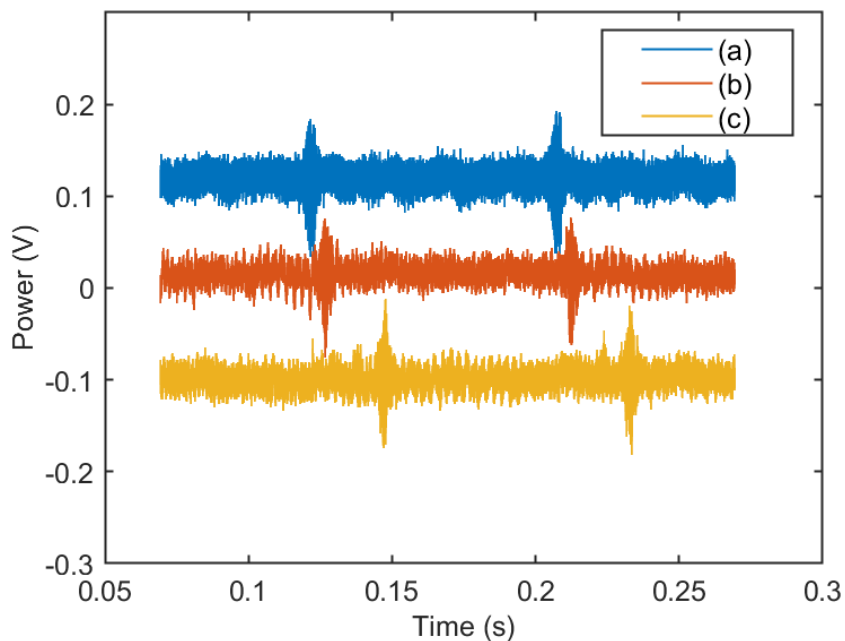


Figure4.4 Comparison of error signals

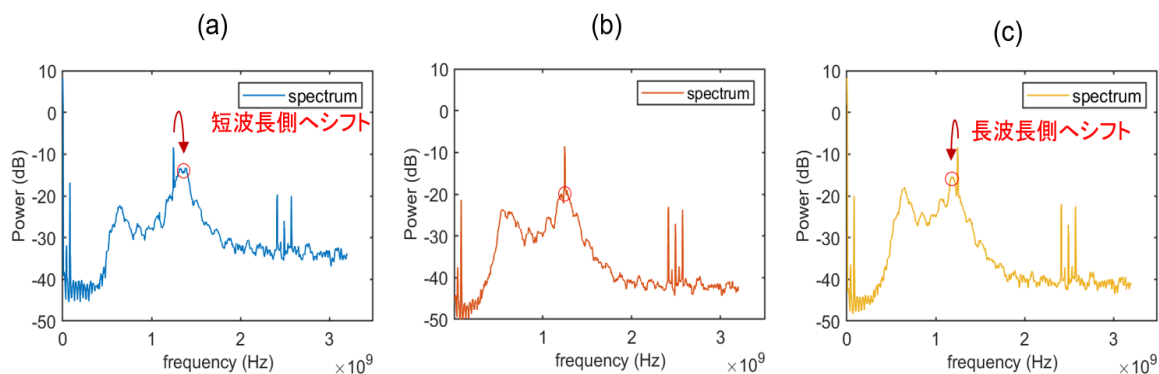


Figure4.5 Results of detuning measurement

- (a) Resonance wavelength moves to the short wavelength side.
- (b) Resonant wavelength is the same as the wavelength of the pump light.
- (c) Resonance wavelength moves to the long wavelength side.

安定性を評価するうえで、パワーの揺らぎを直接測定することが困難であったため、間接的な評価を行った。共振波長は温度によって変化する性質を持ち、温度はコムのパワーの影響

響を受けて変化する。すなわちコムのパワーが大きくなると熱の影響により共振波長が大きくなる。逆にコムのパワーが小さくなると共振波長は小さくなる。また、そのような共振波長の変化によってデチューニングが変わり、それがエラーシグナルとなって現れることが分かっている。本実験におけるポンプ光の周波数は 1.24593 GHz であった。

Figure4.5 より、エラーシグナルが正の値をとるときに共振波長が短波長側へシフトしていることから、パワーが減少しているということが確認できた。またエラーシグナルが負の値をとるとき、共振波長が長波長側へシフトしていることから、パワーが増加しているということが確認できた。このようにエラーシグナルの測定を行うことにより、間接的に安定性を評価できることが分かった。

ソリトンコムが発生した状態から Red pitaya の制御によって安定化するまでのエラーシグナルの時間変化が Figure である。

まず、測定開始から 40 秒後に Red pitaya の P 制御を作動させた。その瞬間の P ゲインの値は 0.10 であり、その後 1 秒以内に 0.40 まで引き上げた。測定開始から 60 秒後に I ゲインを立ち上げた。およそ 10 秒をかけて I ゲインを 0 から 5.0 まで引き上げた。そのままロックされた状態を保ち、合計 180 秒間にわたる測定を行った。

続いて、ロックがかかった状態から 2 度目の測定を開始した。この時のパラメータは上記と同じく、 $K_p = 0.40, K_I = 5.0$ である。測定開始から 40 秒後に PI 制御を解除し、そのまま合計 180 秒間にわたる測定を行った。

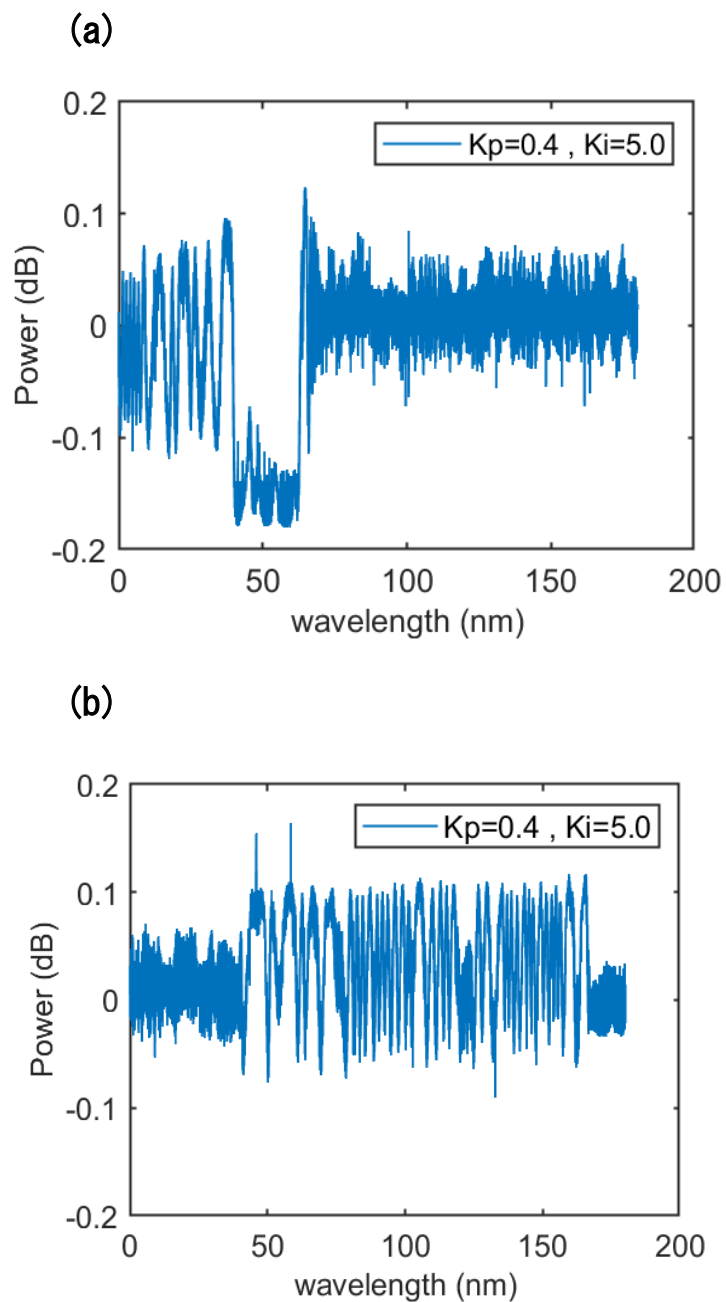


Figure Error signal measurement results

(a) P control 40 seconds after start of measurement, and PI control 60 seconds after start of measurement

(b) Measurement starts in PI control state, and PI control is turned off after 40 sec.

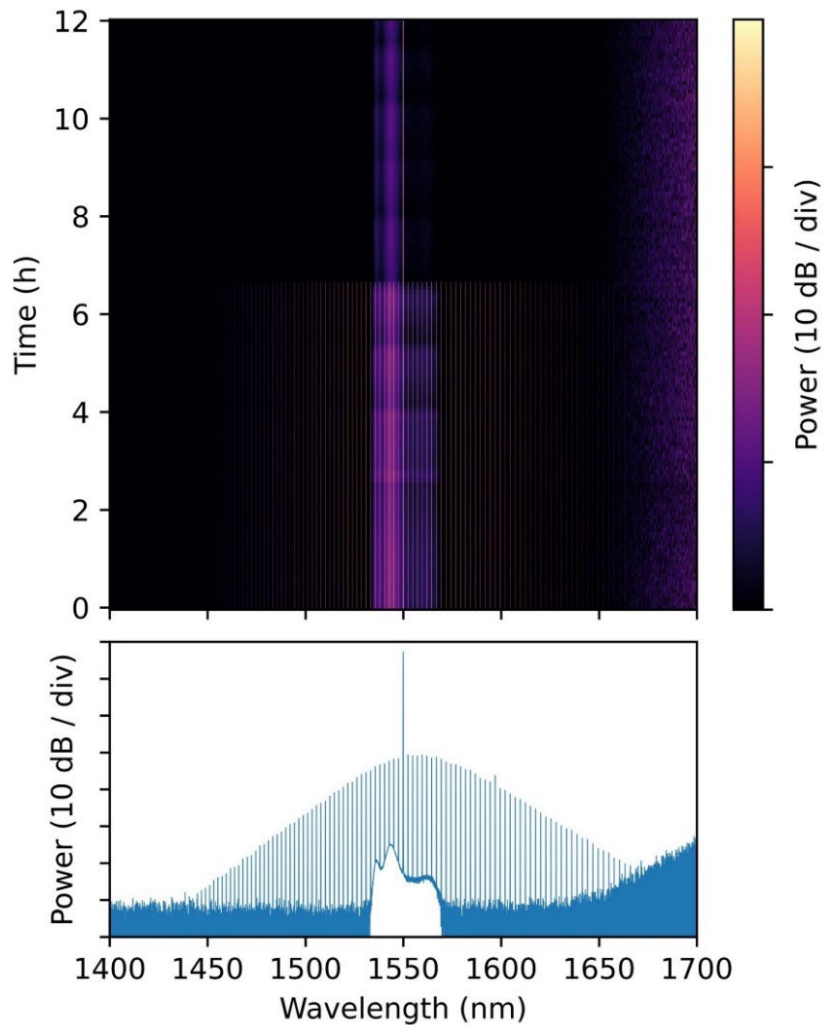
Figure より、 $t = 40 \text{ s}$ において振動が抑制されていることが確認できた。これは P 制御が作動し、入力信号と逆位相の信号が正常に出力されていることをよく示している。しかしエ

ラーシグナルが 0 になることはなく、 -0.15 dB で付近で停滞した。これは定常偏差に起因するものであり、定常偏差はシステム全体の遅延などの要素から生じる。P 制御だけでは定常偏差まで是正することは不可能である。

次に、 $t = 60$ s におけるエラーシグナルを見て、0 に収束している様子が確認できた。これは I ゲインを立ち上げることで P 制御から P I 制御に切り替わったことが要因である。残存する定常偏差の積算に比例した信号を、偏差を打ち消す方向に働かせることによりエラーシグナルを 0 に近づけている。この波形から、P I 制御が正常に作動していることが確認できた。

また Figure を見ると、 $t = 40$ s において PI 制御を停止すると同時に、エラーシグナルが大きく振動している様子が確認できた。このグラフから、ソリトンコムの制御システムにおける Red pitaya の功績を評価することができた。

また、ソリトンの安定化を定量評価するため、Red pitaya による PI 制御を作動させたまま、どの程度の時間ソリトンが維持されるかを計測した。パラメータは上記と同じく、 $K_p = 0.40$, $K_I = 5.0$ である。測定したソリトンコムのスペクトルとパワーの持続時間の関係を表すグラフが、Figure である。



Relationship between the spectrum of soliton combs and the duration of power

本実験において、ソリトンコムはおよそ7時間にわたって維持された。途中でソリトンが安定せずに消滅してしまった原因として、パラメータ設定に問題があったということが考えられる。ソリトンコムを安定化させる実験の際、PI制御のゲインは $K_p = 0.4, K_I = 5.0$ に設定した。ソリトン発生させ、ロックをかける際にもっとも都合の良いパラメータがこの値であった。Figure3.1のセットアップを用いて、このパラメータにおける制御信号の測定を行った結果をFigureに示す。

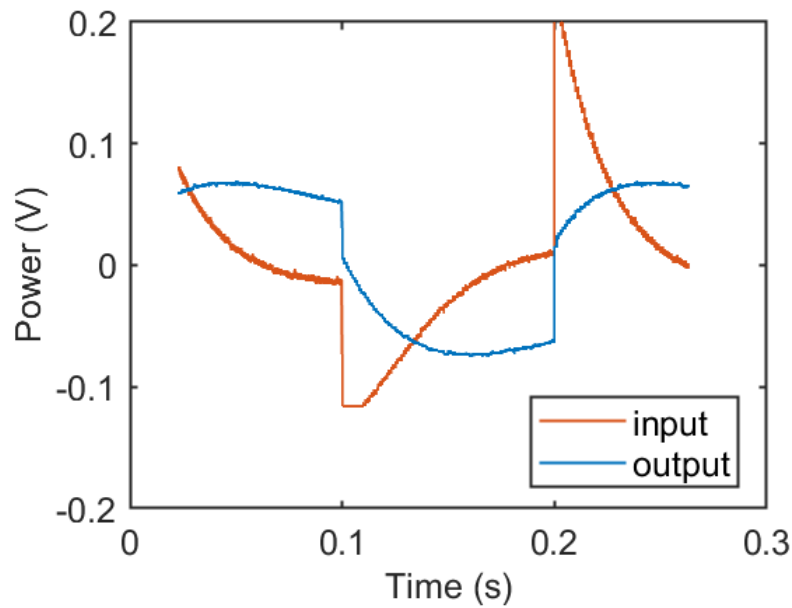


Figure Waveform comparison ($K_p = 0.4, K_I = 5.0$)

この信号では、行過ぎ時間が $T_p = 0.165\text{ s}$ となっていた。この時間はエラーシグナルが1往復する時間よりも大きな値であることから、ソリトンコムを安定化させるうえでPI制御の応答が間に合っていなかったということが確認できた。

ただしこれは Red pitaya の性能による問題ではなく、パラメータの設定が最適でなかったことが原因だと考えられる。Figure3.6より、少なくとも Red pitaya を用いて整定時間 $T_s = 3.0\text{ ms}$ を達成し、行過ぎ時間 $T_p = 0.50\text{ ms}$ を達成している。

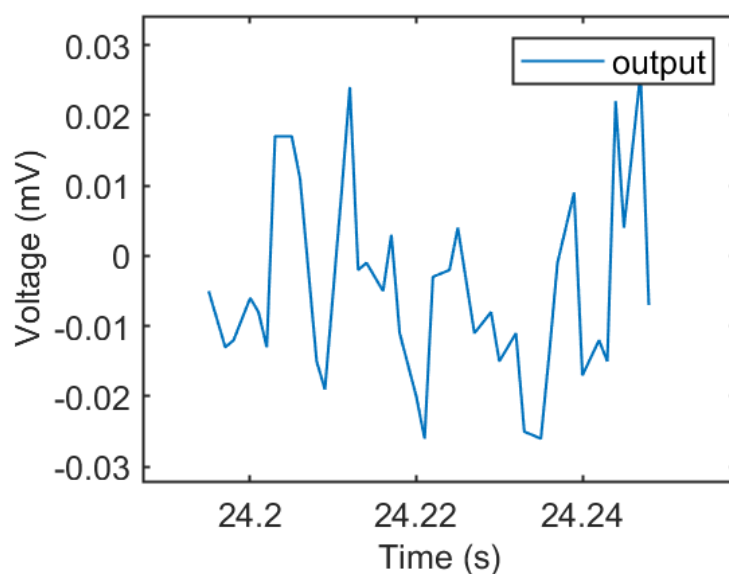


Figure Error Signal (enlarged)

これはエラーシグナルの一部を拡大し、切り取ったものである。およそ 5.0 ms ごとにエラーシグナルの正負が反転していることが確認できる。PI 制御はエラーシグナルを 0 に抑えるためのものであるから、P ゲインの影響によりエラーシグナルが正の時はマイナス補正をかけ、負の時はプラス補正をかけることになる。しかし光や電流の速度が有限である以上、エラー発生と同時に 0 に戻すことはできず、必ず遅れが発生する。本研究においては PI 制御を実行した瞬間、または実行中にソリトンが消滅することを防ぐために、パラメータを小さくした状態で実験に臨んだ。パラメータ設定によって得られた最小の整定時間が $T_s = 3.0$ ms であることから、Red pitaya を用いたフィードバック制御により、エラーシグナルの振動に対して安定化を図ることは可能だと考えられる。

第 5 部 結論

5.1 レーザシステムの制御について

本研究では Red pitaya を用いた PID 制御をレーザシステムに対して作動させた。Red pitaya からの出力をファイバーレーザの波長に対応させ、マッハツェンダ干渉計の透過光をフォトディテクタで電圧に変換し、Red pitaya へと戻した。またその際に外乱を加えることにより、ロバスト性能の評価を行った。パラメータの最適化により、外乱による影響を -40 dB 未満まで抑えることに成功した。外乱の周波数 $f = 10^3$ Hz を境に制御機能が低下したことは、Red pitaya の特性ではなく、レーザシステムすなわちファイバーレーザの制御帯域によるものであると考えられる。

5.2 ソリトンコムの安定化について

SiN マイクロリング共振器においてパワーキック法を用いてソリトンコムを発生させ、ソリトンコムに対して Red pitaya を活用した PDH ロックにより、安定性を計測した。

Red pitaya による PID 制御を作動させたときにエラーシグナルの振動が抑制され、0 に近づくことを確認した。またエラーシグナルとデチューニングの測定により、コムパワーの安定性を評価することができた。この制御系を用いることで、7 時間にわたるソリトンコムの維持に成功した。