

# FMCW 法を用いた マルチパスセル内の光路長測定

富岡直矢

# 目次

第1章 序論.....	2
1. はじめに.....	2
2. 光.....	3
2.1 光の波動性.....	3
2.2 スペクトル.....	3
2.3 分光法.....	4
第2章 レーザー.....	4
1. 概要.....	4
2. 原理.....	4
3. レーザー光の性質.....	5
3.1. 指向性.....	5
3.2. コヒーレント性.....	5
3.3. 単色性.....	5
3.4. 制御性.....	6
4. 半導体レーザー.....	6
4.1. 基本構造.....	6
4.2. 半導体レーザーの種類.....	7
4.2.1. ファブリペロー型レーザー(FP-LD).....	7
4.2.2. 分布帰還型レーザー(DFB-LD).....	7
第3章 マルチパスセル.....	7
1. 概要.....	7
2. 種類.....	8
2.1. White 型マルチパスセル.....	8
2.2. Herriott 型マルチパスセル.....	8
第4章 理論.....	10
1. レーザー吸収分光法.....	10
1.1. 概要.....	10
1.2. 原理.....	10
2. レーザーを用いた距離測定方法.....	11
2.1. パルス方式.....	11
2.2. 光ヘテロダイン法.....	11
2.2.1. 光ヘテロダイン法の原理.....	12
2.2.3. 光ヘテロダイン法の特徴.....	13
2.2.4. FMCW 法.....	13

3. 同期サンプリング .....	14
第5章 実験 .....	15
1. 実験装置 .....	15
1.1. 実験機器 .....	15
1.2. 実験構成 .....	16
2. ビート周波数の測定 .....	17
3. 同期サンプリング法を用いたビート周波数の測定 .....	17
3.1. 同期サンプリングのための実験構成 .....	18
3.2. 同期サンプリングを用いたビートスペクトル .....	19
4. マルチパスセル内の光路長測定 .....	20
4.1. マルチパスセル内の光路長測定のための実験構成 .....	20
4.2. マルチパスセル内の光路長におけるビートスペクトル .....	21
4.3. 測定精度に関する考察 .....	23
第5章 まとめ .....	25
第6章 謝辞 .....	25
参考文献 .....	25

## 第1章 序論

### 1. はじめに

ガスの濃度計測の手法のひとつにレーザー吸収分光法が挙げられる。レーザー吸収分光法は、ガス中をレーザー光が通過し、ガス分子のエネルギー遷移による固有の光吸収スペクトルを測定する方法で、リアルタイム測定、非接触測定、遠隔測定が可能といった特徴がある。しかし、ガスの濃度が小さい場合や、レーザー光がガス中を通過する距離（光路長）が短い場合、光吸収スペクトルの強度が小さく、測定することは難しい。そこで、光路を一直線のまま大きくする構成が考えられるが、この方法では広い設置面積が必要となり、限界がある。そのため、光路長を大きくすることを目的にマルチパスセルが用いられる。マルチパスセルとは複数枚のミラーを設置し、その間をレーザー光が多重反射することで、実効的に光路長を長くする装置である。この装置を用いて、ガスの濃度計測をおこなうためには、セル内の光路長を測定する必要がある。セル内の光路長を測定する方法として、セル内を反射した回数から光路長を導出する方法があるが、レーザー吸収分光法に使われるレーザーは一般的に不可視光であることから、反射点を確認することは難しい。さらに、ミラーの設置位置のわずかなずれによって反射回数が大きく変化するため、マルチパスセル内の光路長を直接的に測定する必要がある。

本研究では距離測定の方法として、光ヘテロダイン法の一つである FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 法を距離測定に応用し、マルチパスセル内の光路長を測定する

ためのシステムの構築をおこなう。また、構築したシステムの距離測定精度について検討する。

## 2. 光

### 2.1 光の波動性

17 世紀、光は微小な粒子であるとするニュートンの粒子説と、光は真空中を伝わる波であるとするホイヘンスの波動説があった。しかし、19 世紀にヤング、フレネルの実験により、光の干渉、回折の現象が確認され、光は波の一種であることが証明された。

さらに、19 世紀中ごろ、マクスウェルによって光は横波の電磁波であることも明らかになった。電磁波を波長または周波数で区分したものを図 1 に示す。その中で、目に見えるものを可視光という。一般的に可視光の波長領域は 380nm～780nm 程度であり、波長の短い光から紫、青、緑、黄、橙、赤と変化する。太陽光のようにすべての波長を含む光を白色光といい、1つの波長を持つものを単色光という。なお、光の波長の国際単位は $10^{-9}\text{m}$ を表す nm(ナノメートル)である。

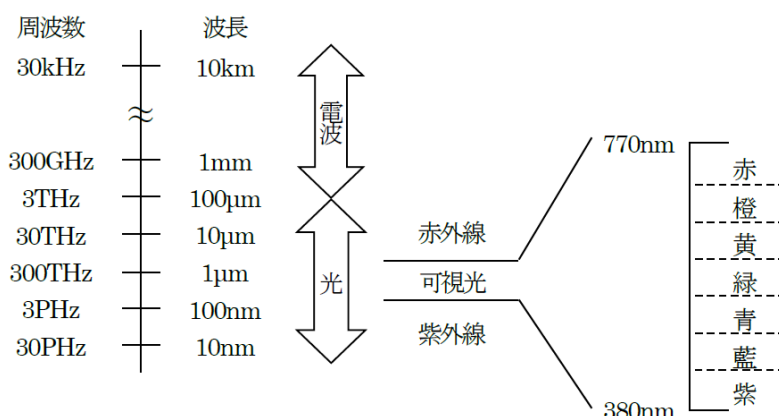


図 1 光の波長と周波数[1]

### 2.2 スペクトル

1666 年、ニュートンは窓に小穴をあけ、その光路にプリズムを置き、反対側の白壁に写し出された色の帯を観測し、この光の帯をスペクトルと名づけた。その後、スペクトルという言葉は広く使われるようになり、光を分光器などで分解したときの各波長成分の強度の分布や、電磁波をフーリエ変換により、その成分の正弦波に分解して波長の順に並べた図自体をスペクトルというようになった。スペクトルはその形によって連続スペクトル、線スペクトルと呼ばれる。連続スペクトルとは、光を分光器などで分解したときの各波長成分が連続的に分布しているときのスペクトルである。一般に高温の物体から出る光は連続スペクトルとなる。線スペクトルとは、波長成分が離散的に分布しているときのスペクトルである。原子や分子には特有の線スペクトルをもつ。

## 2.3 分光法

分光法とは、物質が特定の波長の光を散乱、吸収のいずれかをし、それらを経た光のスペクトルを得て、その物質の特性（濃度、構造など）を知る方法のことである。また、その学問のことを分光学という。分光法における測定装置は大きく分けると光源、試料、分光器、検出器から構成される。光源にレーザー光を用いる場合は、分光器を使用しないこともある。分光法の種類には、吸収分光法、散乱分光法、発光分光法がある。吸収分光法は、試料に光を照射して、透過光のスペクトルを得ることで、試料の特性を知る方法である。分子には固有のエネルギー準位があり、特定の波長の光を与えることでエネルギーを吸収し、基底状態から、励起状態となる特性を利用する、散乱分光法とは、試料に光を照射して、散乱光のスペクトルを得ることで、試料の特性を知る方法である。散乱光の大部分は入射光と同じ波長だが、わずかな成分として、入射光と違う波長の光が含まれることを利用する。発光分光法とは、熱や電気などのエネルギーを試料に与え、その際に発光するスペクトルを得ることで、試料の特性を知る方法である。これは分子によって、励起するためのエネルギーが異なることで、発光する波長が異なることを利用する。[2]

## 第2章 レーザー

ここでは、本研究で使用しているレーザーの原理、特性、種類について説明する。

### 1. 概要

レーザーは、**Light Amplification by Stimulated Emission Radiation** の頭文字をとった言葉で、原子などの放射の誘導放出により光を増幅させる装置である。レーザーは物質の状態によって、気体レーザー、固体レーザー、液体レーザー、半導体レーザーに分けられる。半導体レーザーは媒質が固体であるが、励起方法とエネルギー準位がほかの固体レーザーと異なるため、固体レーザーとは分けて考えられている。

### 2. 原理

レーザーの媒質中に安定した状態（基底状態）で存在する原子に、光などの外部からのエネルギーを与えると、原子に含まれる電子のエネルギー準位が一時的に上がり（励起状態）、その後、基底状態に戻るために、光を放出する。放出される光の波長は、レーザーの媒質に含まれる原子の種類によって異なる。

レーザー媒質にエネルギーを供給することで、励起状態の電子が増加し、基底状態の原子を上回った状態を「反転分布状態」といい、この状態で外部から、放出される光と同じ周波数の光を与えると、励起状態の原子が連鎖反動的に同じ方向に光を放出し、強い光信号が得られる。さらにレーザー媒質を2枚のミラーで挟み込むことで、その間を光が往復し、光をさらに増幅させ、片側の部分反射ミラーからレーザー光として取り出すことができる。図2にレーザー発振の様子を示す。

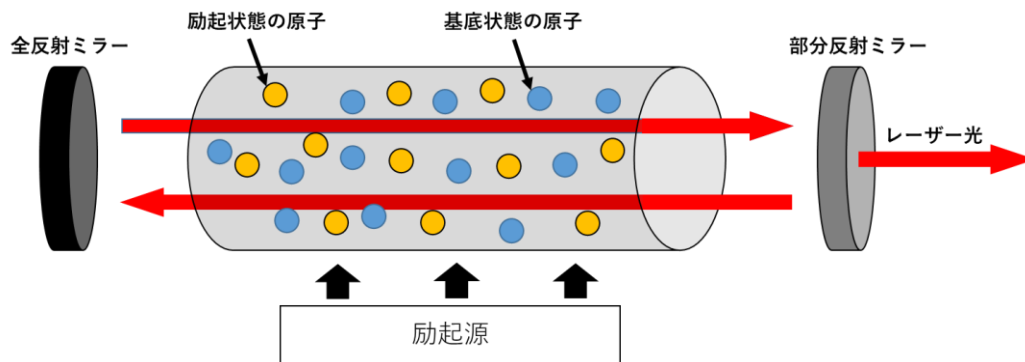


図 2 レーザー発振（ファブリペロー型共振器） [2]

### 3. レーザー光の性質

レーザー光は、太陽光、電灯、蛍光灯のような、白色光、熱放射光の光源とは全く異なる特性を持ち、理想に近い光源といえる。レーザーの媒質によっても、様々な特徴を持つが、全体として次のような性質を持っている。

#### 3.1. 指向性

レーザーは、共振器の軸方向にのみ増幅され、レーザー光として取り出される。したがって、レーザー光は、その共振器の軸方向にのみ進む光になる。しかし、レーザー光でも、波の性質として、回折現象が起こるため、レーザー光も広がりを持つ。ただし、自然光より広がりは、はるかに小さい。

#### 3.2. コヒーレント性

レーザー光は自然光と比較して、コヒーレント性が非常に高い。この理由は光波がレーザーから出射した後、位相が長い距離、長い時間保たれているからである。一般に波動現象において位相の間に相関があることをコヒーレントであると呼ばれ、またその度合いをコヒーレンスと称している。コヒーレンスには2つの概念がある。1つは時間的コヒーレンスと2つは空間的コヒーレンスである。時間的コヒーレンスは、時間的に異なる2つの光波の位相の相関性を表す。位相変調、ヘテロダイン検波においてレーザー光の時間的コヒーレンスが高いことが不可欠である。空間的コヒーレンスは、空間的に異なる位置での2つの光波の位相の相関性を表す。干渉や回折などの波動現象には空間的コヒーレンスが高いことが重要である。

#### 3.3. 単色性

この特性はレーザー光のスペクトルが単一周波数にどの程度近いのか、周波数軸上でのスペクトルの線幅を表すもので、時間的コヒーレンスに直接関係している。つまり、時間的コヒーレンスの高い光は単色性も高い。レーザー光は単色性が高いが、原理に基づく量子的ゆ

らぎが単色性を制限し、スペクトル線幅の広がりとなる。この要因によるスペクトル線幅は気体レーザーで 1Hz 以下、半導体レーザーでは数 MHz 程度だが、光の周波数は数百 THz のため、これらのスペクトル線幅は光周波数の  $10^{-9}$  程度以下であることから、レーザー光の単色性、コヒーレント性が高いことが分かる。

### 3.4. 制御性

レーザーは出力光を制御して、電波技術と同様に振幅変調、位相変調、周波数変調（波長変調）、パルス変調が行える。このように制御が可能であることは、ほかの光源では備えていない、レーザー特有の性質である。この性質があるため、レーザーは人工の光として、各種応用に使われている。[2]

## 4. 半導体レーザー

ここでは本研究で使用した半導体レーザーについて説明する。

### 4.1. 基本構造

図 3 に半導体レーザーの基本構造を示す。半導体レーザーは、p 型半導体（p 型クラッド層）と n 型半導体（n 型クラッド層）で p 型半導体（p 型クラッド層よりエネルギー準位が少し低い）の活性層を挟んだ構造（ダブルヘテロ構造）である。電極から電流を流すことで、p 型クラッド層からホールが活性層に流入し、活性層内で再結合し、発光する。このとき、クラッド層の屈折率は活性層より小さいため、光は活性層内に閉じ込められる。この時点での光は、まだレーザー光ではないが、半導体結晶の性質である「へき開」作用により、活性層の両端面が平行なミラーの役割を果たし、ファブリペロー型共振器が形成されるため、レーザー発振が起こる。「へき開」とは、結晶面が特定方向に割れやすい性質のことをいう。

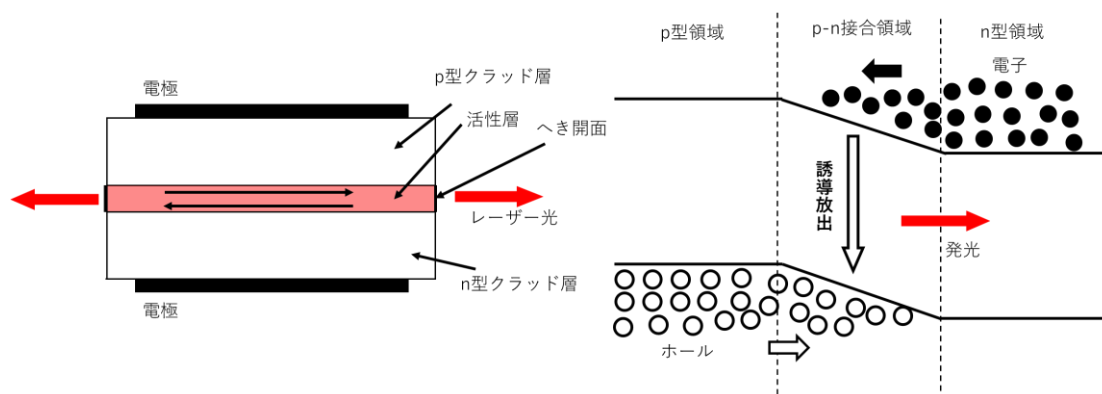


図 3 半導体レーザーの構造[3]

## 4.2. 半導体レーザーの種類

### 4.2.1. ファブリペロー型レーザー(FP-LD)

このレーザーは最も基本的な構造であり、CD、DVD、BDなどの光ピックアップ、レーザープリンターなどに利用されている。レーザー光の波長は活性層のバンドギャップによって決まるが、共振モードとして多くの縦モードが存在し、モード間の競合や温度などの要因でモードの跳び（モードホップ）が起こり、発振波長が不連続になってしまう。波長によって光ファイバー内の伝搬速度が異なるため、長距離の光通信の場合、発振波長の不連続が原因で、データの欠損が生じることがある。今回の研究では、高い波長安定性が求められるため、FPレーザーは使用できない。

### 4.2.2. 分布帰還型レーザー(DFB-LD)

図4にDFB(Distributed FeedBack)レーザーの基本構造を示す。ファブリペロー型共振器構造で構成された半導体レーザーは多モード発振しやすく、注入電流や環境温度の変化により発振波長が変化してしまう。DFBレーザーは共振器内部にグレーティング構造を持っているため、波長安定性が非常に高く、シングルモードで発振する。よって、レーザー光のスペクトル線幅が狭い。さらに、高速変調をしてもシングルモード発振を保持する。

今回の研究では、高い波長安定性とレーザー光の波長変調が求められるという点から、DFBレーザーを使用する。

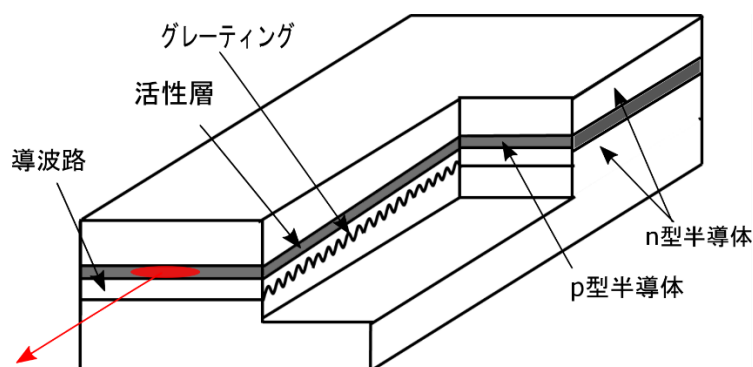


図4 DFBレーザーの構造[4]

## 第3章 マルチパスセル

ここでは、本研究で使用するマルチパスセルについて説明する。

### 1. 概要

マルチパスセルとは、水平面上に向かい合わせに設置された複数枚のミラーによって構成されており、セル内にガスを導入させ、レーザー光がミラー間を何度も反射することで、光路長を長くすることができる装置である。この装置を用いることで、ガスの吸収強度を大きくすることができる。ランバートビアの法則による透過率 $T(\lambda)$ と光路長 $L$ の関係式を式



(1-1)に示す。 $I_0(\lambda)$ は入射光強度、 $I(\lambda)$ は透過光強度、 $\sigma(\lambda)$ は吸収断面積、 $N$ はガスの濃度である。

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-\sigma(\lambda)NL) \quad (1-1)$$

マルチパスセルを使用することで光路長  $L$  を大きくすることができ、濃度  $N$  が小さいガスでも透過率を小さくすることができるため、高感度で測定できる。また、濃度もこの式を用い、透過率と光路長を与えることで測定できる。

## 2. 種類

### 2.1. White 型マルチパスセル

White 型マルチパスセルは 1942 年にジョン・U・ホワイトによって考案されたセルである。[5] 図 5 に White 型マルチパスセルの構成を示す。このセルは、同じ曲率半径を有する 3 枚の凹面ミラーで構成されている。凹面ミラー A と凹面ミラー B の角度を微調整することで、セル内の反射回数を 1 回単位で調整することができる。反射回数を細かく設定できる長所があるが、振動などの外乱に弱く、安定性が低いことが欠点である。

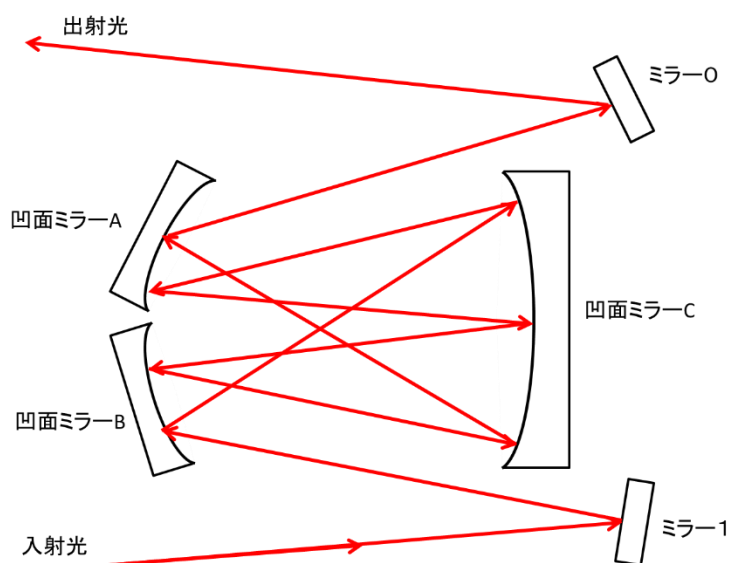


図 5 White 型マルチパスセルの構成図

### 2.2. Herriott 型マルチパスセル

Herriott 型マルチパスセルは 1965 年にドナルド・R・ヘリオットとハリー・J・シュルテによって考案されたセルである。[6] 図 6 に Herriott 型マルチパスセルの構成を示す。このセルは、同じ曲率半径を有する 2 枚の凹面ミラーで構成されている。片方のミラーにレーザー光を入射するための穴がけられている。2 枚のミラーの距離を調整することで、

反射回数を設定することができる。反射回数はミラー間距離に依存し、偶数回数でしか設定できないという欠点があるが、実験機器の振動などの外乱による安定性は White 型マルチパスセルより、優れている。Herriott 型マルチパスセルにおいて、セル内の光路長はミラー間距離の反射回数倍である。以下、マルチパスセルと表記する場合、この Herriott 型マルチパスセルのことを指す。

反射回数とミラー間距離の関係は式(2-1)でされる。[7]ここで  $d$  はミラー間距離、 $R$  は凹面ミラーの曲率半径、 $M$  は任意の自然数、 $N$  は反射回数である。

$$d = R \left\{ 1 - \cos\left(2\pi \frac{M}{N}\right) \right\} \quad (2-1)$$

さらに、式(2.1)を用いた反射回数とミラー間距離の関係を図 7 に示す。曲率半径は 300mm である。この関係から、ミラー間距離のわずかな変化によって、反射回数が大きく変化することがわかる。さらに、ミラー間距離 300mm を軸にして、線対称に分布していることもわかる。

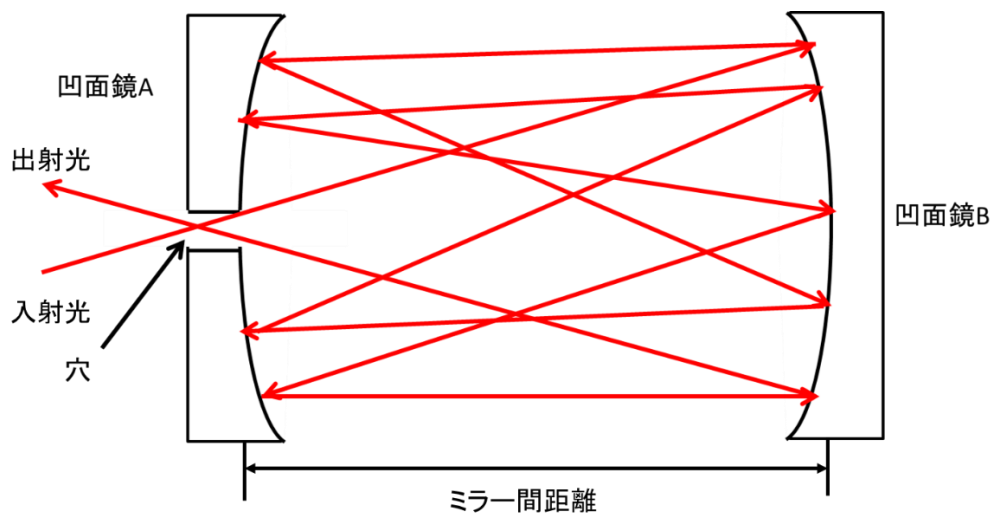


図 6 Herriott 型マルチパスセルの構成図

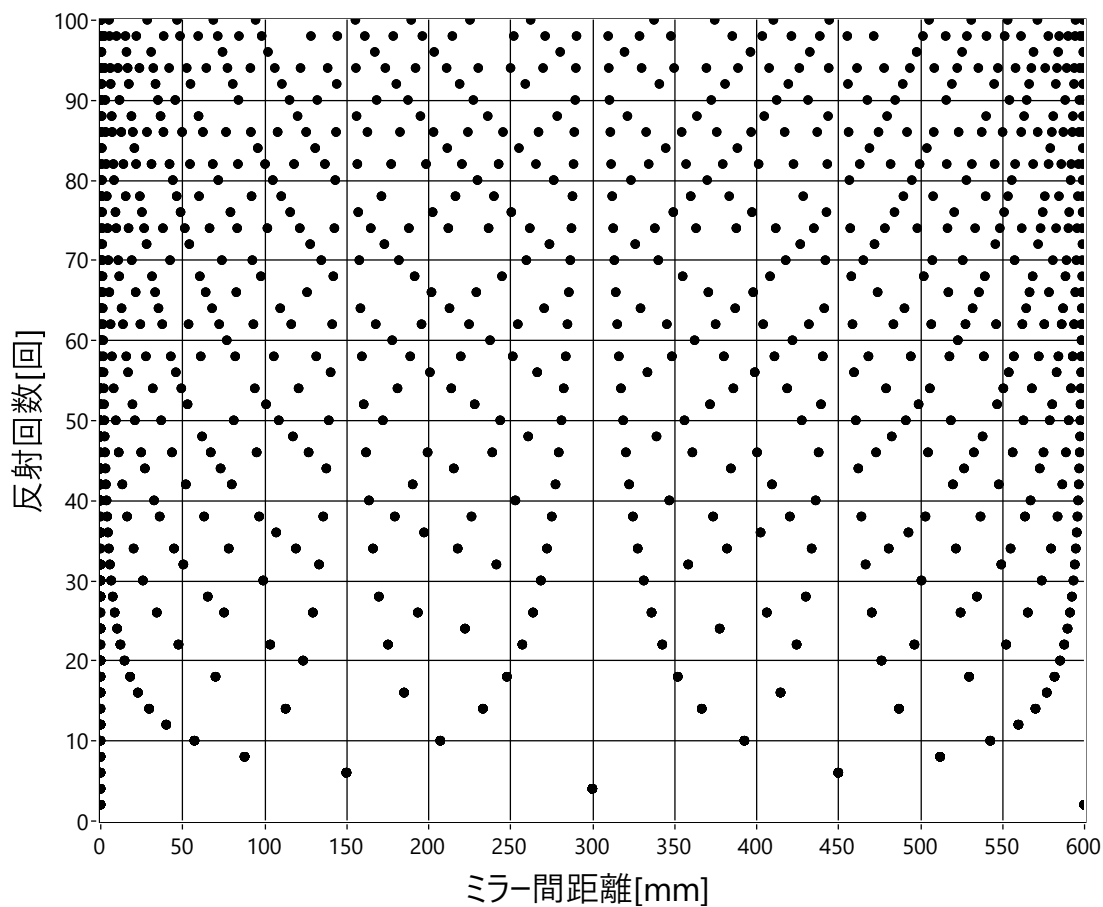


図 7 ミラー間距離と反射回数の関係

## 第 4 章 理論

### 1. レーザー吸収分光法

#### 1.1. 概要

気体検出技術、濃度測定技術としてレーザー吸収分光法がある。この方法は検出対象の気体分子の吸収線に合う発振波長を持つレーザー光を、光源として用いることで、光路上に存在する気体分子の総数を求めることができる。

#### 1.2. 原理

測定したい気体の吸収線付近の波長でレーザー光を掃引し、それによる光応答を測定することで、気体検出、濃度測定をおこなうことができる。図 8 に、直接吸収測定の原理を示す。波長掃引されたレーザー光が測定対象ガス内を伝搬することで、ある特定の波長の時に吸収があり、図 8 の右の波形を得ることができる。吸収の大きいところでは、光の強度は小さくなり、吸収の小さいところでは、光の強度は小さくならない。この測定で得られる測定波形の強度変化は測定対象ガスの濃度を示しており、光の強度が小さくなるほど、濃度は大きい。

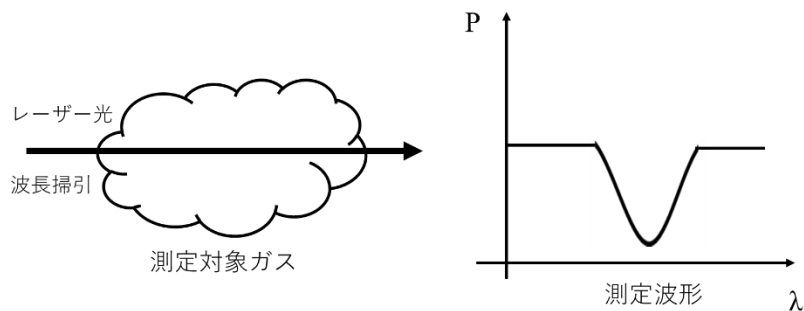


図 8 直接吸収測定

## 2. レーザーを用いた距離測定方法

### 2.1. パルス方式

パルス方式は、矩形信号を測定対象物に送信してから、反射信号が受信されるまでの時間を測定することで測定対象物までの距離を求めることができる。反射信号が受信されるまでの時間を  $\Delta t$ 、真空中の光速を  $c$  とすると、測定対象物までの距離  $R$  は、式(2-1)で表される。

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2-1)$$

この測定方法での距離分解能  $\Delta R$  はパルス幅  $\tau$  によって決定され、式(2-2)で表される。

$$\Delta R = \frac{\tau c}{2} \quad (2-2)$$

この測定方法でミリ単位の距離を測定する場合、パルス幅は  $10^{-12}$  s 以下でなくてはならないため、レーザー、受光素子に高速性が求められる。

### 2.2. 光ヘテロダイン法

周波数のわずかに異なる 2 つの振動を重ね合わせると、差の周波数のうなり（強度の強弱）が生じる。音のうなりは、身近な例として音叉や、鐘の音によって体験することができる。光においても、うなりは起こる。光の場合、周波数のわずかに異なる 2 つの光を重ね合わせてフォトダイオードで検出したときに、光の強度が 2 つの周波数の差で時間的に変動する現象をうなりという。光のうなりを検出することを光ヘテロダイン検出といい、光ヘテ

ロダイン検出した信号から距離や速度などの情報を取り出す手法を光ヘテロダイン法と呼ぶ。[8]今回、光ヘテロダイン検出した信号から距離情報を取り出す。

### 2.2.1. 光ヘテロダイン法の原理

光ヘテロダイン法の原理について述べる。

位置 $x$ における時刻 $t$ での 2 つの光の電界は式(2-3)と式(2-4)で表すことができる。それぞれの光の周波数を $f_s(x)$ 、 $f_r$ とする。ここで $f_s(x)$ は信号光と呼ばれ、周波数変調された光であるため、位置（時間）によって周波数が増減する。 $u_s(x)$ 、 $u_r(x)$ はそれぞれの電場の振幅である。今回、光検出器の位置での 2 つの光の位相はそろっていると仮定する。

$$E_s(x, t) = u_s(x) \cos(2\pi f_s(x)t) \quad (2-3)$$

$$E_r(x, t) = u_r(x) \cos(2\pi f_r t) \quad (2-4)$$

この 2 つの光を重ね合わせると検出される光の強度 $I$ は式(2-6)で表される。

$$E(x, t) = E_s(x, t) + E_r(x, t) \quad (2-5)$$

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T E^2(x, t) dt \quad (2-6)$$

ここで $f_s(x) - f_r \ll f_s(x)$ であるとし、積分時間  $T$ は各々の正弦波の周期( $1/f_s(x)$ 、 $1/f_r$ )よりは十分長い、うなりの周期( $1/(f_s(x) - f_r)$ )よりは十分短いものとする。

$$\begin{aligned} E^2(x, t) = & u_s^2(x) \cos^2(2\pi f_s(x)t) \\ & + 2u_s(x)u_r(x) \cos(2\pi f_s(x)t) \\ & + u_r^2(x) \cos^2(2\pi f_r t) \end{aligned} \quad (2-7)$$

三角関数における半角の公式と、積和の公式により、式(2-7)は式(2-8)と表すことができる。

$$\begin{aligned} E^2(x, t) = & \frac{u_s(x) + u_r(x)}{2} \\ & + \frac{1}{2} (u_s^2(x) \cos(4\pi f_s(x)t) + u_r^2(x) \cos(4\pi f_r t)) \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned}
&+u_s(x)u_r(x) \cos(2\pi(f_s(x) - f_r)t) \\
&+u_s(x)u_r(x) \cos(2\pi(f_s(x) + f_r)t)
\end{aligned}$$

積分時間の条件により、光の強度 $I$ は式(2-9)で表すことができる。

$$I(x, t) = \frac{u_s(x) + u_r(x)}{2} + u_s(x)u_r(x) \cos(2\pi(f_s(x) - f_r)t) \quad (2-9)$$

式(2-9)の第 1 項は信号の直流成分に対応し、第 2 項は 2 つの光の差の周波数である  $(f_s(x) - f_r)$  で正弦波上に変化するうなり信号に対応する。この式が表すように、うなりは 2 つの光波を重ね合わせる位置 $x$ が変化しない場合、一定の周期であることが分かる。[9]

### 2.2.3. 光ヘテロダイン法の特徴

光ヘテロダイン法では、一定のうなりを検出するため周波数の異なる雑音光の影響を受けない。さらに信号光が微弱であっても、参照光を大きくすることで、検出される信号を大きくすることができる。よって高感度で高精度な測定ができる。このほかにも、リアルタイム測定ができる、非接触測定ができるといった特徴がある。

### 2.2.4. FMCW 法

FMCW 法は、周波数変調されたレーザー光を使用して距離を測定方法である。周波数変調されたレーザー光を信号光と参照光に分け、それぞれ異なる長さの光路を経由させる。そのあと、再び 2 つの光を合わせる。このとき 2 つの光波には光路差に比例する時間差が生じているため、わずかに周波数が異なる。よってうなりが発生し、このうなりから距離を導出することができる。図 9 に FMCW 法を用いた距離計測系の概略図を示す。

うなりから光路差を導出する方法について述べる。図 10 にレーザー光の周波数を三角波で変調した時の周波数変化と時間の関係を示す。ここで $f_b$ はうなりの周波数、 $\tau$ は 2 つの光の時間差、 $f_m$ は変調周波数、 $\Delta F$ は周波数変調幅、 $c$ は真空中の光速、 $n$ は屈折率である。である。この条件で、光路 1 と光路 2 の光路差  $D$  は式(2-10)で表すことができる。この式より、光路差とビート周波数は比例の関係にあることが分かる。

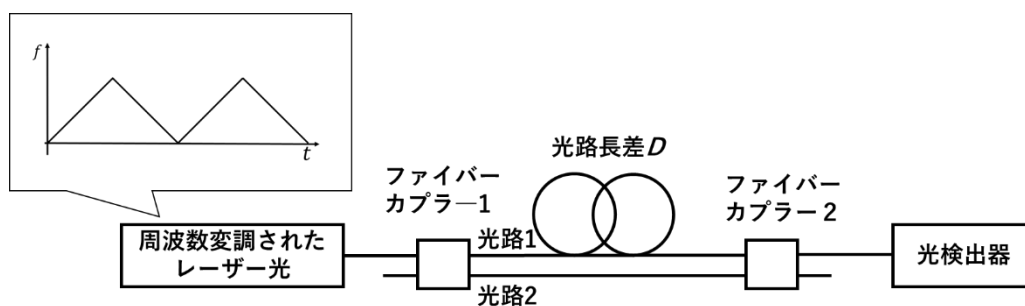


図 9 FMCW 法を用いた距離計測の概略図

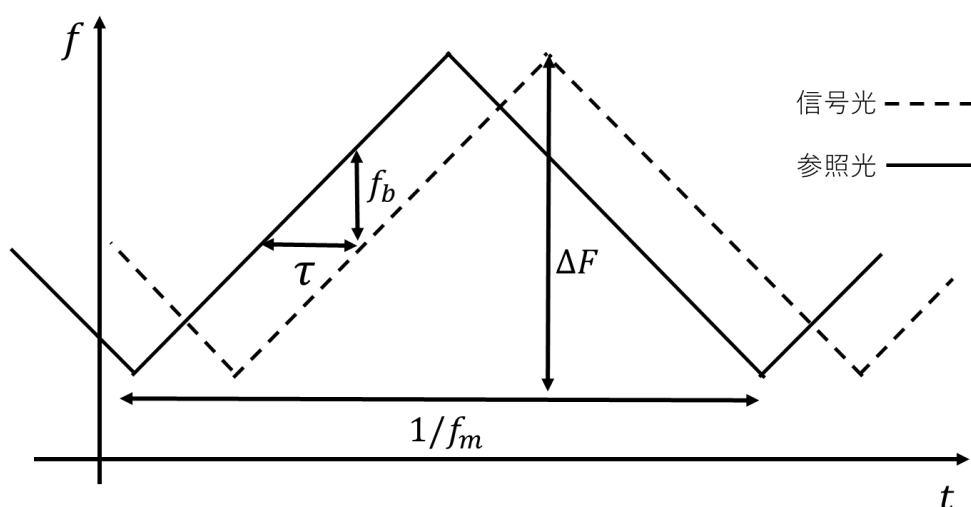


図 10 レーザー光を三角波で変調した時の周波数変化と時間の関係

$$D = \frac{c}{n \cdot \Delta F \cdot f_m} f_b \quad (2-10)$$

### 3. 同期サンプリング

同期サンプリングとは、測定対象の周波数の変化に同期して測定波形データのサンプリングをおこなうことである。この方法は主に、回転機械の振動や騒音の回転次数比分析に用いられる。周波数分析で、1Hz とは 1 秒間に 1 周期を完了する成分である。これに対して、回転次数分析は、回転体の 1 回転に 1 周期を完了する成分のことをいう。回転体に取り付けられたパルス発生器のパルスを A/D 変換の外部サンプリングクロックとして測定信号のサンプリングをおこなう。非同期サンプリングの場合、回転機械の回転数が上昇または減少し、回転速度の変化によって振動や騒音の周波数は変化したとき、1 回転あたりのサンプル点数も変化する。しかし、同期サンプリングの場合は、サンプリングクロックも

同期して変化するため、1回転あたりのサンプル数は変化しない。よって、回転速度の変化による影響を受けず、1回転に1周期を完了する成分に着目することが容易となる。図11に同期サンプリングによる測定の概略図を示す。

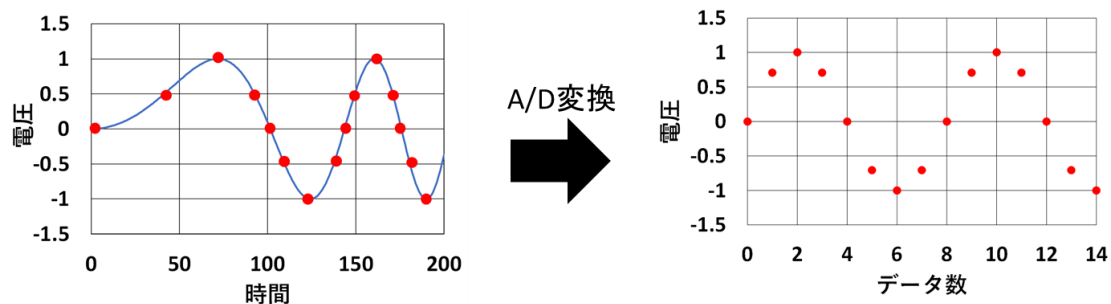


図 11 同期サンプリングによる測定

## 第5章 実験

### 1. 実験装置

#### 1.1. 実験機器

表1に本実験での使用機器を示す。



表 1 使用機器一覧

名称	型番	仕様	メーカー
DFBレーザー	NLK1S5GAAA	波長:1460-1530nm 光強度:20mW 発振線幅:12MHz以下	NTTエレクトロニクス
波形発振器	AFG3102	正弦波:1 $\mu$ Hz-100MHz 高調波ひずみ:0.2%以下	TEKTRONIX
温度コントローラー	TED200C	温度分解能:1 $\Omega$ 温度安定性:0.002度以下	THORLABS
電流コントローラー	LDC202C	変調係数:20mA/V $\pm$ 5% 変調帯域幅:0-250kHz	THORLABS
A/D変換器	USB-6251	サンプリングレート:1.25MS/s ビット数:16-bit 帯域幅:1.7MHz	National Instruments
フォトダイオード	G9801-22	応答速度:2GHz 受光感度:0.9A/W typ. 1310nm 帯域幅:0.9-1.7 $\mu$ m	浜松ホトニクス
コンパレーター	LM339-N	応答速度:1.3 $\mu$ s	TEXAS INSTRUMENTS
オペアンプ	OP07CP	供給電圧: $\pm$ 3V $\sim$ $\pm$ 18V 単位利得帯域幅:0.6MHz	TEXAS INSTRUMENTS
可変光ファイバー減衰器	VOA50-APC	帯域幅:1550 $\pm$ 20nm 減衰幅:1.5-50dB 減衰分解能:0.1dB	THORLABS
凹面ミラー	CM508-200-E04	曲率半径:400mm 帯域幅:1280-1600nm ミラー直径:50.8mm	THORLABS
光サーキュレータ	6015-3-APC	帯域幅:1525nm-1610nm 挿入損失:0.8dB 損傷閾値:500mW ダイレクティブリティ: $>$ 50dB	THORLABS

## 1.2. 実験構成

図 12 に光ファイバーで光路差を与えた場合の実験構成図を示す。波長 1.52 $\mu$ m、出力 7mW の DFB レーザーを光源とし、ファイバーカップラー1(FC1)により、50:50 に光を分け、一方は長さのある光ファイバー通過させ、FC2 に接続する。もう一方は、そのまま FC2 に接続する。FC2 によって合わさった光は光検出器によって電気信号に変換される。この電気信号は A/D 変換器で PC に取り込まれたあと、FFT 解析される。ここでビートスペクトルのピーク値をビート周波数とする。

レーザー光は発振器によって電流変調されており、変調周波数は 50Hz、変調振幅は 10mA<sub>p-p</sub>、オフセット電流は 60mA である。この条件でのレーザー光の周波数掃引幅は 6.9GHz である。レーザーはコントローラーによって電流と温度が制御されており、安定性

はそれぞれ 0.01mA 及び 1Ω(約 0.01°C)以下である。

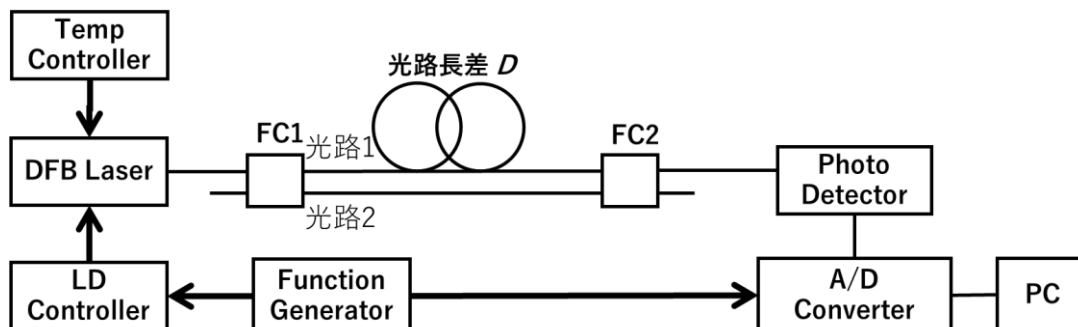


図 12 光路 1 と光路 2 の光路長差を測定する実験系

## 2. ビート周波数の測定

図 13 に光路 1 と光路 2 の光路差が 1m、2m、3m の時のビートスペクトルを示す。サンプリングレートは 100 kS/s でサンプル数は 2000 サンプルで測定した。光路長差が大きくなると、ビート周波数が大きくなる。しかし、光路差が大きくなるほど、ビートの振幅が小さくなり、スペクトル線幅が大きくなる。このことがわかる。

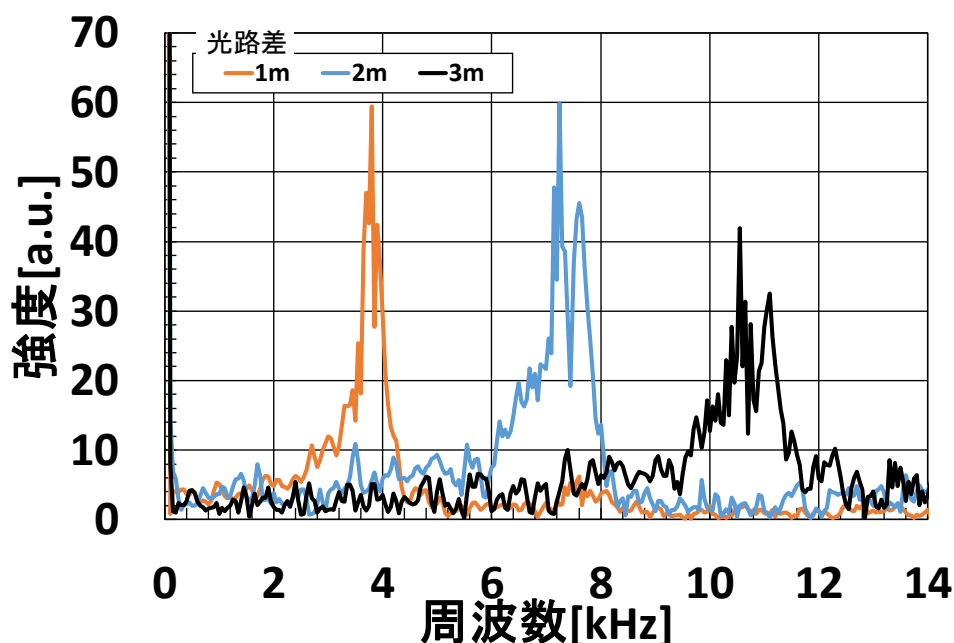


図 13 光路 1 と光路 2 の光路長差が 1m、2m、3m の時のビートスペクトル

## 3. 同期サンプリング法を用いたビート周波数の測定

第 4 章で示した同期サンプリングを用いてビートスペクトルの測定をおこなった。

スペクトル線幅が大きい原因として、ビート周波数が一定でないことが考えられる。そして、ビート周波数が一定でない理由として、レーザー光の周波数掃引が線形でないことが挙げられる。図 14 に本研究で使用した DFB レーザーの電流波長特性を示す。これより、電

流とレーザーの発振波長が線形でないことがわかる。したがって、電流を掃引したとき、時間によってビート周波数が増加し、ビートスペクトルの線幅が大きくなってしまおうと考えられる。そこで、この周波数変化に同期してサンプリングおこなう、同期サンプルを用いることで、レーザーの電流波長特性の非線形性によるビート周波数の変化を低減できると思われる。[10]

同期サンプリングで使用する外部サンプリングクロックは、光ファイバーによる干渉計によって発生させたビートを使用する。この方法により、測定信号の周波数変化に同期して、外部サンプリングクロックも変化するため、同期サンプリングがおこなえる。

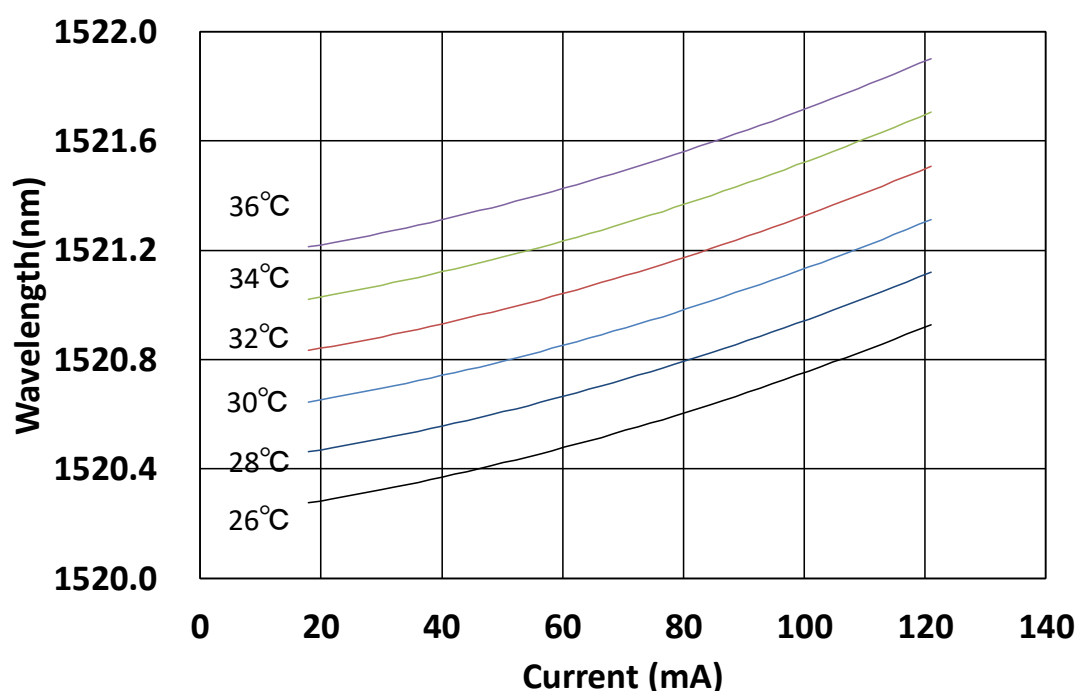


図 14 DFB レーザーの電流波長特性

### 3.1. 同期サンプリングのための実験構成

図 15 に実験構成を示す。基本的な構成は図 12 と同じであるが、A/D 変換に用いる外部サンプリング信号を生成する系（補助干渉計）を加えた。この信号を A/D 変換の外部サンプリングクロックとすることで、測定信号の周波数変化に同期して、サンプリング間隔を変化させることができる。ナイキスト・シャノンのサンプリング定理より、A/D 変換においてサンプリング周波数は測定信号の最大周波数の 2 倍以上でなくてはならない。そのた

め、補助干渉計の光路長差は、測定する距離の2倍以上の長さに設定する。

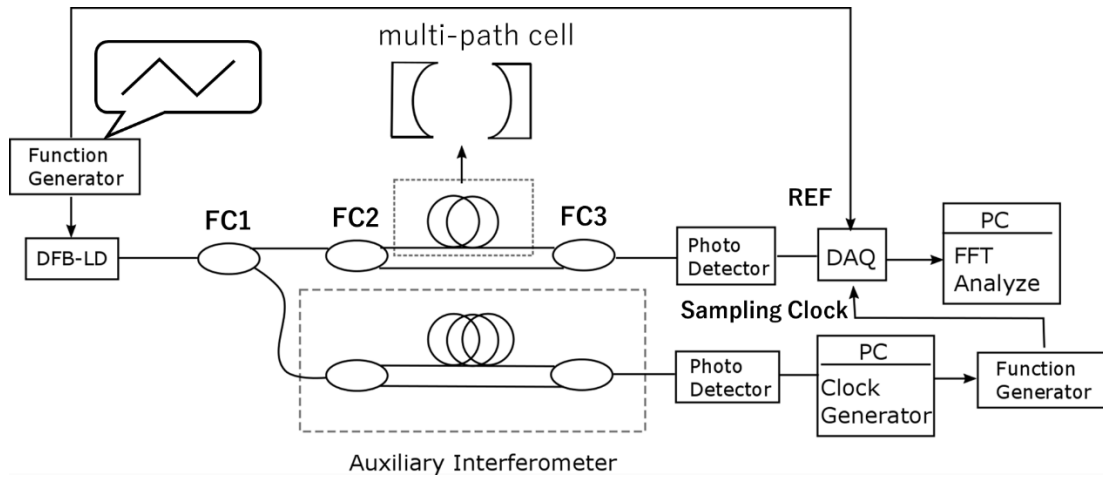


図 15 同期サンプリングを用いた実験構成

### 3.2. 同期サンプリングを用いたビートスペクトル

図 16 に同期サンプリングを用いて測定したビートスペクトルを示す。図 17 にビートスペクトルのピーク周波数と式(2-3)による計算結果の比較を示す。この結果より、同期サンプリングを使用する前と同じく、光路長差とビート周波数は比例していることがわかる。さらに、同期サンプリング前と比較して、ビートスペクトルの線幅が小さくなっていることがわかる。よってビートスペクトルの測定において、同期サンプリングは、レーザーの電流波長特性の非線形性によるビート周波数の変化を低減することが確認できた。

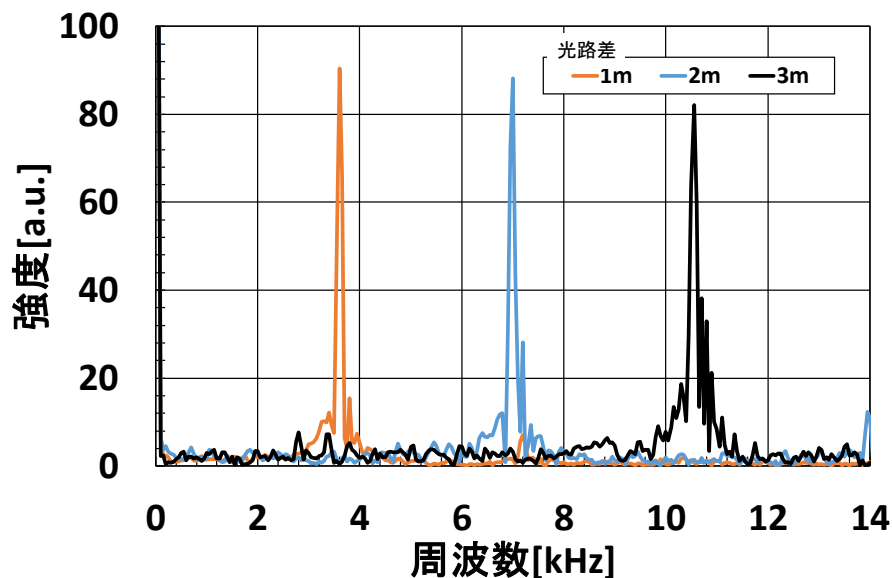


図 16 同期サンプリングを用いて測定したビートスペクトル

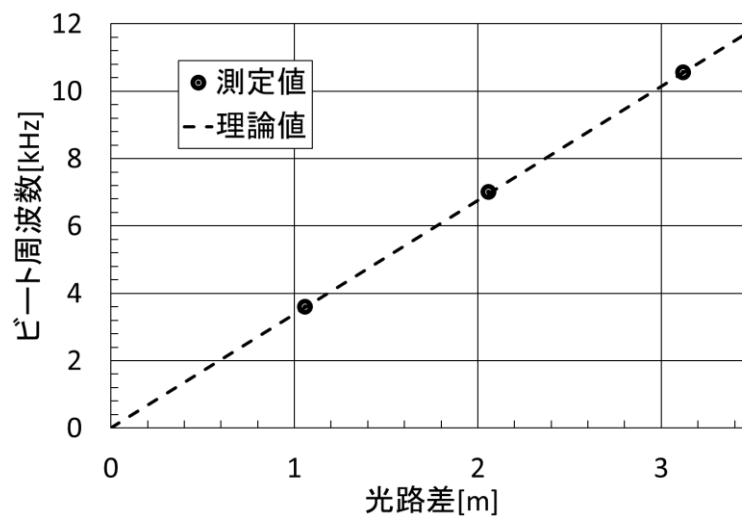


図 17 ピーク周波数と理論値の比較

#### 4. マルチパスセル内の光路長測定

光ファイバーを使った干渉計の光路長差を測定する実験において、ビートの特性を確認し、同期サンプリングによって、スペクトルの線幅を小さくすることができ、精度が改善されたため、マルチパスセル内の光路長を測定する。

##### 4.1. マルチパスセル内の光路長測定のための実験構成

図 17 にマルチパスセル内の光路長を測定する実験構成を示す。マルチパスセル内の光路長を測定するために、光サーキュレータを用いた。サーキュレータから出射したレーザー光はマルチパスセル内を反射した後、再びサーキュレータに入射し、ファイバーカップラーで干渉する。

測定されるビートの距離情報には、レーザー光がマルチパスセル内に入射するまでの距離、光サーキュレータ内の光路長も含まれ、それらを合計した光路差は **2m** である。よって総光路長は、セル

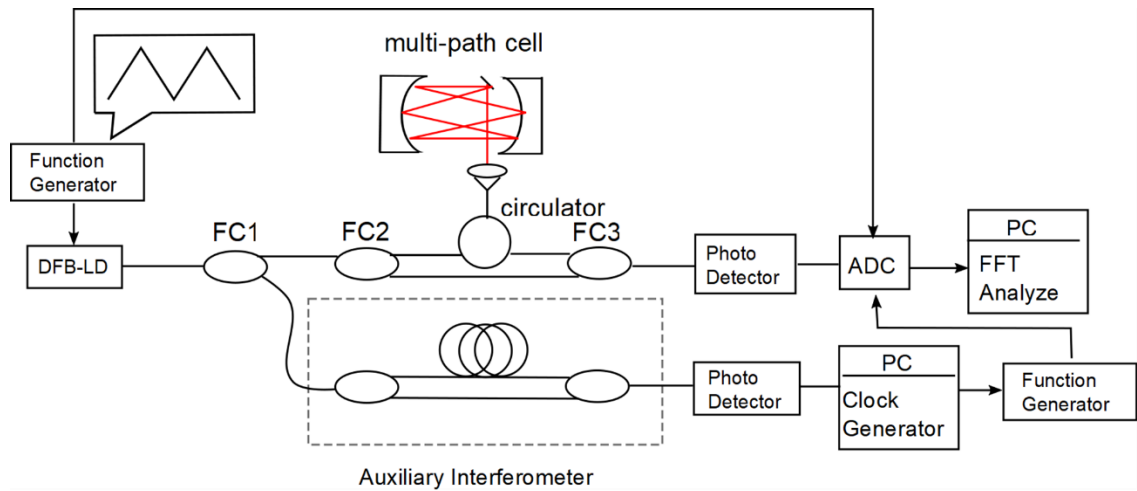


図 18 マルチパスセル内の光路長を測定する実験構成図

#### 4.2. マルチパスセル内の光路長におけるビートスペクトル

マルチパスセル内で反射回数が 4 回と 10 回、14 回の場合で、光路長を測定した。図 19 にセル内の反射回数が 4 回、10 回、14 回の時のビートスペクトルを示す。このとき、セルのミラー間距離は 300mm、207mm、216mm で、総光路長は 3.20m、4.07m、5.02m ある。7.60kHz、9.70kHz、11.85kHz にスペクトルが見られる。光ファイバーで光路長を測定したときと比較して、スペクトルの強度は小さいが、スペクトル線幅は大きくなっておらず、鋭いピークが確認できた。2kHz と 4kHz 付近に小さなスペクトルが確認できるがこれは、反射回数の増加により、ビームの一部が先に出射したためと思われる。

ビートスペクトルから計算した光路長と反射回数から計算した光路長の比較した結果を図 20 に示す。この結果から、測定値と計算値は近似直線で表すことができ、傾きは 1 で切片は約 16cm であることがわかる。全ての結果が 16cm 長く測定されたことに関して、セル外の光路差や、ミラー間距離を目視による測定による誤差、もしくは、ビート周波数から光路長に変換する時に用いる、数値の有効桁数が原因として考えられる。この結果を踏まえて、校正を行うことで正確にセル内の光路長測定ができると考える。

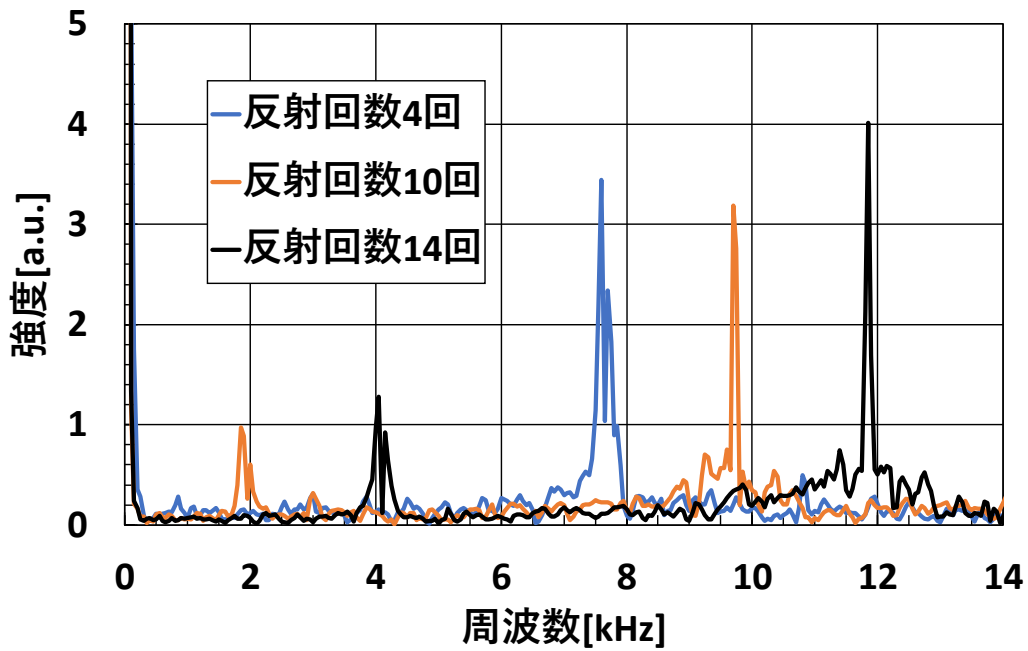


図 19 反射回数 4 回、10 回の場合のビートスペクトル

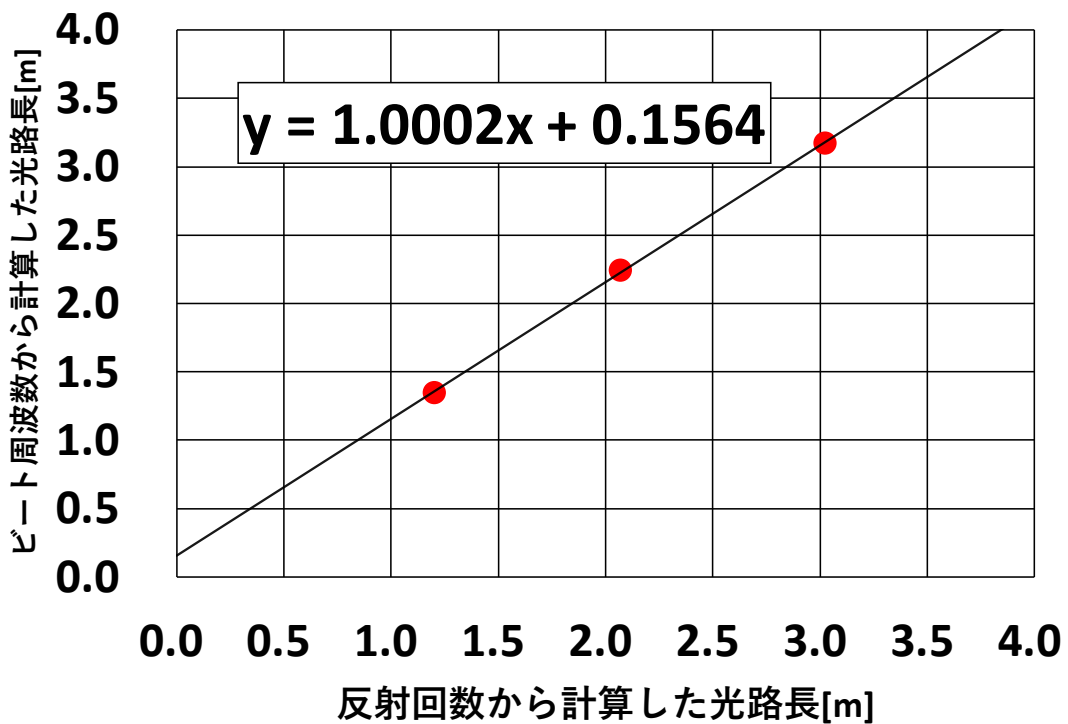


図 20 ビートスペクトルから計算した光路長と反射回数から計算した光路長の比較

### 4.3. 測定精度に関する考察

ここでは、光路長の測定精度に関して考察をおこなう。マルチパスセル内の光路長を 1000 回測定し、そのときのビートスペクトルのピーク周波数をヒストグラムとして表した。図 21、図 22、図 23 に反射回数 4 回、10 回、14 回の時のヒストグラムを示す。各反射回数におけるピーク周波数の標準偏差は 38.5Hz、37.1Hz、36.8Hz であり、距離のばらつきは 16.7mm、16.1mm、16.0mm である。この結果から、ばらつきがセルのミラー間距離であることが確認され、セル内の光路長を測定するには十分な精度が得られた。

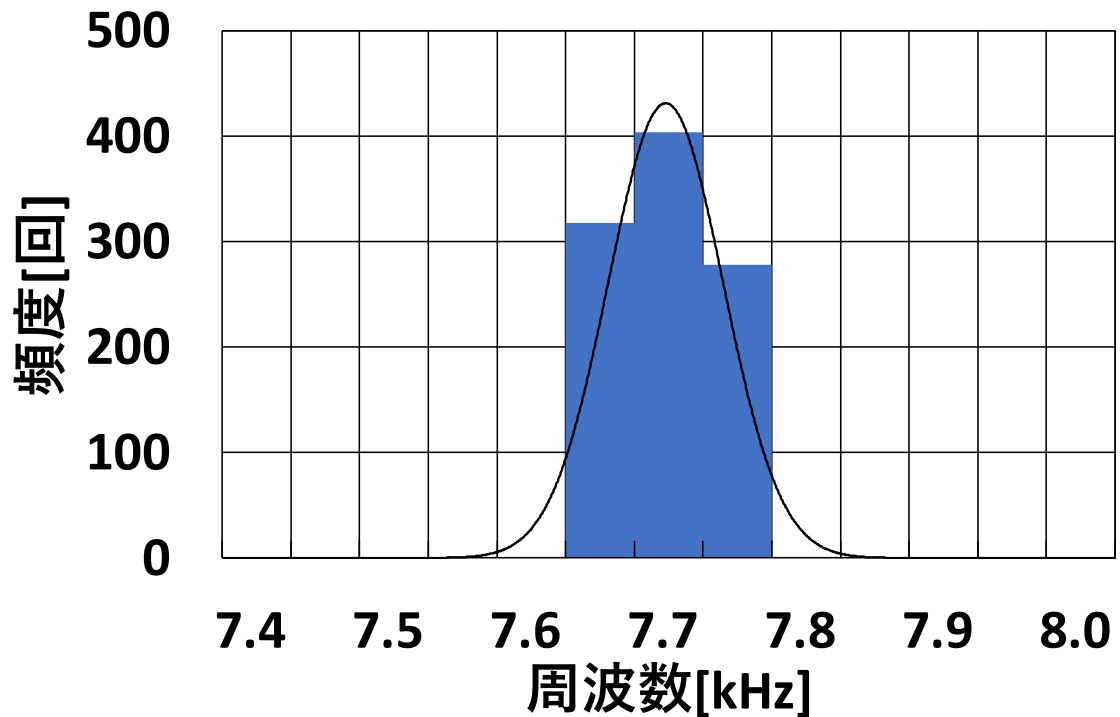


図 21 反射回数 4 回のときのピーク周波数のヒストグラム



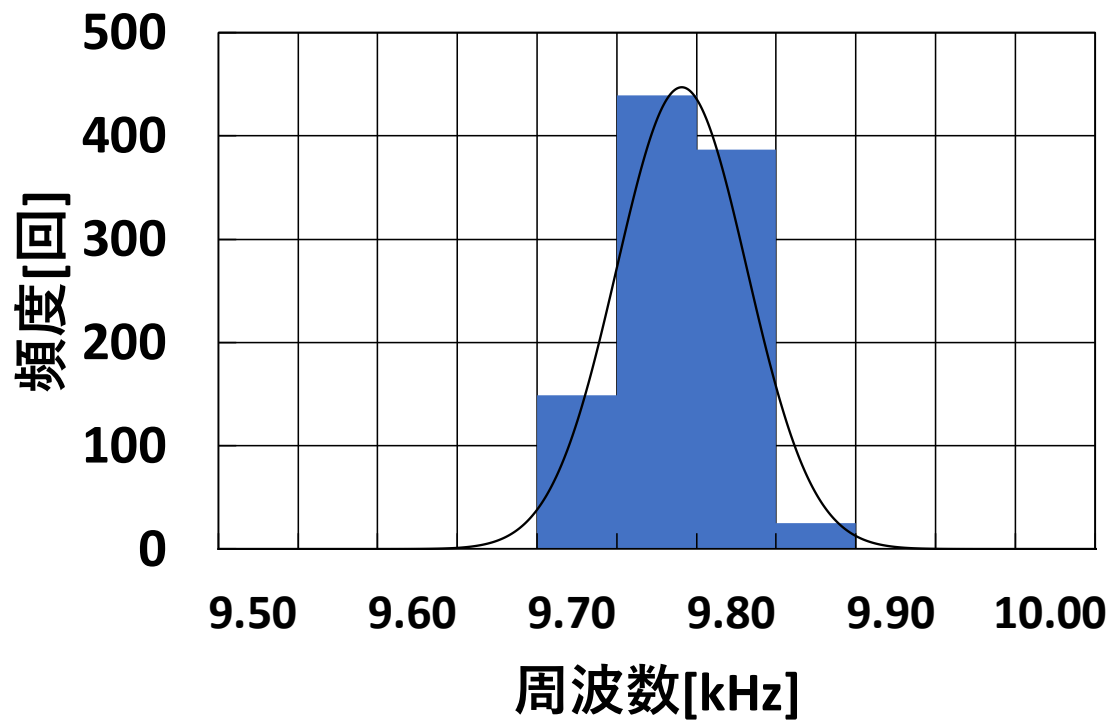


図 22 反射回数 10 回の際のピーク周波数のヒストグラム

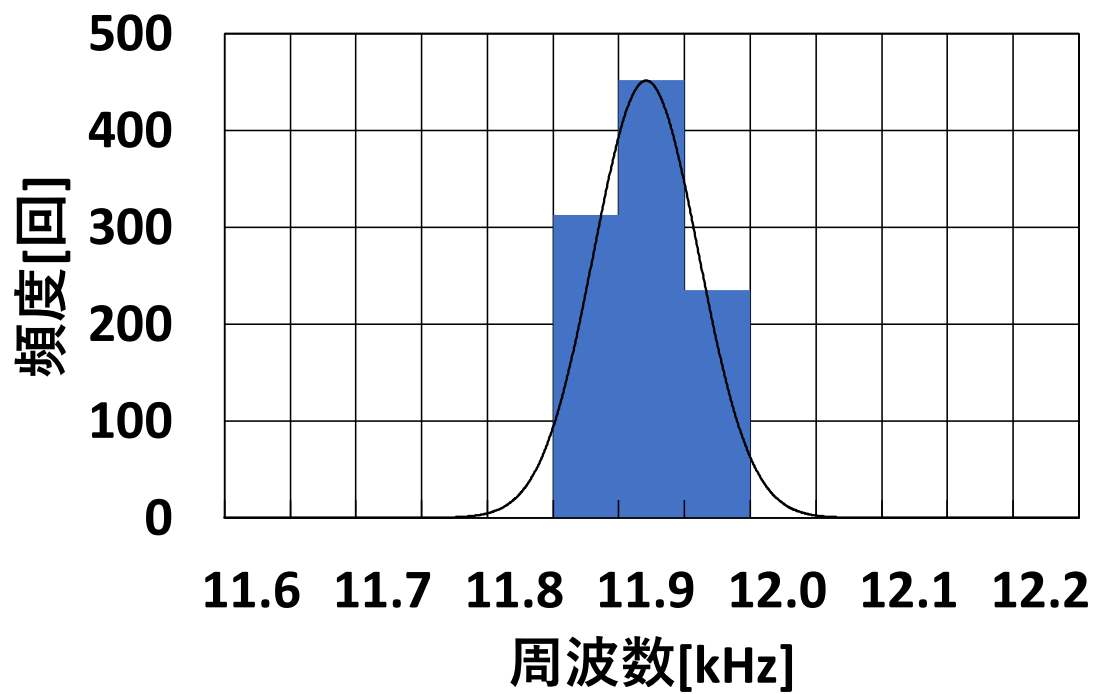


図 23 反射回数 14 回の際のピーク周波数のヒストグラム

## 第5章 まとめ

光ヘテロダイン法の1つである、FMCW法を用いて干渉計の光路長差をビートとして検出することを試み、光路長差に比例するビート周波数を得ることができた。発生したビートをA/D変換器の内部クロックでA/D変換し、FFT解析した結果、スペクトルの線幅が大きいことがわかった。同期サンプリングを用いることで、スペクトルの線幅を小さくすることができた。

マルチパスセル内の光路長を測定する実験では、セル内の反射回数4回、10回、14回でビート周波数を測定し、各反射回数において、ピークを持つスペクトルを確認できた。精度に関しては、スペクトルのピーク周波数のヒストグラムを作成した。ピーク周波数のばらつきは16mm程度であったことから、セル内の光路長を測定するには十分な精度が得られた。

将来的に、マルチパスセルを用いたガスの濃度測定システムにおいて、セル内の光路長とガスの濃度を同時に測定できることが期待される。

## 第6章 謝辞

本研究に際して、国立高等専門学校由井四海准教授に3年間に渡ってご指導ならびに様々な経験する機会を与えて頂きました。心より深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1]. 黒澤宏.“入門まるわかり非線形光学”. オプトロニクス社. 2008.
- [2]. 大津元一.“入門レーザー”. 裳華房. 1997.
- [3]. 平田照二.“わかる半導体レーザーの基礎と応用”. CQ出版. 2001
- [4]. 栖原敏明.“半導体レーザーの基礎”. 共立出版株式会社. 1998.
- [5]. White, John (1942). "Long Optical Paths of Large Aperture". *Journal of the Optical Society of America* **32** (5): 285
- [6]. Herriott, Donald; Schulte, Harry (1965). "Folded Optical Delay Lines". *Applied Optics* **4** (8):
- [7]. G.Durry , T.Danguy , I.Pouchet : “Open multipass absorption cell for in situ monitoring of stratospheric trace gas with laser diodes” , *Applied Optics* ,41,424-433-2002
- [8]. 吉澤徹・瀬田勝男. “光ヘテロダイン技術”. 新技術コミュニケーションズ. 1994年
- [9]. Amnon Yariv (1997). *Optical Electronics in Modern Communications* 5th edition .Oxford University Press. (ヤリーヴ 多田邦雄・神谷武志(訳) (2000). ヤリーヴ光エレクトロニクス 基礎編 丸善株式会社)
- [10] K.Iiyama, M.Yasuda, S.Takamiya, “Extended-Range High-Resolution FMCW Reflectometry by Means of Electronically Frequency-Multiplied Sampling Signal Generated from Auxiliary Interferometer”,*IEICE Trans.on Elec.*, E89-C, pp823-829 (2006)