

# 目次

第1章 序論.....	4
1. はじめに.....	4
2. 光.....	4
3. 距離計.....	5
3.1. 三角測量法.....	6
3.2. タイムオブフライト方式.....	6
3.3. 位相差計測.....	7
3.4. 光ヘテロダイン法.....	7
第2章 レーザ.....	8
1. 概要.....	8
2. レーザの原理.....	9
3. レーザ光を発生するための条件.....	9
3.1. 反転分布.....	9
3.2. フィードバック.....	10
4. レーザ光と自然光の違い.....	11
5. レーザ光の特徴.....	11
5.1. 指向性.....	12
5.2. 集光性.....	12
5.3. 単色性.....	12
6. 半導体レーザー.....	13
6.1. 半導体レーザーの発光原理.....	13
6.2. 半導体レーザーの種類.....	14
6.2.1. ファブリ・ペローダイオードレーザー.....	14
6.2.2. 分布帰還形レーザー.....	14
第3章 使用機器.....	15

1. マルチパスセル .....	15
2. スペクトラムアナライザ .....	16
2. 1. 高速フーリエ変換 .....	16
2. 2. サンプリング .....	17
2. 3. 窓関数 .....	18
3. 光ファイバ .....	18
3. 1. 光ファイバの構成 .....	18
3. 2. 全反射 .....	19
3. 3. 光ファイバの種類 .....	20
4. 偏光コントローラ .....	20
5. 光減衰器 .....	21
6. ビームスプリッター .....	24
7. レーザスペクトラムアナライザ .....	24
7. 1. ファブリ・ペロー共振器 .....	24
7. 2. 圧電素子 .....	26
7. 3. ファブリ・ペロー干渉計 .....	26
第4章 理論 .....	27
1. 変調・復調 .....	27
2. 波の干渉 .....	27
3. 理論式の導出 .....	29
第5章 ビート周波数と光路長差の関係 .....	30
1. 使用機器 .....	31
2. 実験構成図 .....	31
3. 実験結果 .....	32
第6章 空間伝搬が測定に及ぼす影響の検証 .....	36
1. 使用機器 .....	37
2. 実験構成図 .....	37

3. 実験結果.....	38
第7章 変調周期と発振振幅における光周波数掃引幅への影響 .....	40
1. 使用機器.....	41
2. 実験構成図 .....	42
3. 実験結果.....	42
第8章 第7章の実験結果を考慮した上での計測 .....	43
1. 使用機器.....	43
2. 実験構成図 .....	44
3. 実験結果.....	45
第9章 まとめ .....	46
1. まとめ及び考察 .....	46
謝辞 .....	47
参考文献.....	47

## 第 1 章 序論

### 1. はじめに

光吸収分光法を応用したガス計測では高感度化のために、マルチパスセルが用いられる。マルチパスセルとは、2 枚以上の鏡を使って実効光路長を伸ばすことのできる機器である。マルチパスセル内のガス濃度を求めるには、ランベルト・ベールの法則が用いられ、マルチパスセル内の光路長が必要となる。マルチパスセル内の光路長は反射回数で決まる。しかし、レーザガス計測では不可視光を用いるため反射点の確認は難しい。反射点の確認には使用波長に応じたカメラが必要であり、光路長の確認に新たな実験系が必要となる。そこで FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave)方式を採用する。光周波数が時間的に掃引された光源を用いることで、送信波と反射波の周波数差により距離を求めることができる。FMCW 方式はレーザガス計測の実験系にそのまま応用できるという利点を持つ。

本研究では、FMCW 方式を用いてマルチパスセル内の光路長を計測するシステムの構築を行う。

### 2. 光

光はとても身近なものである。1867 年イギリスのファラデーの発見した電磁誘導現象をもとにマクスウェルが 1 つの答えを導いた。“光とは、目に見える電波である。”これが、古典的答えで 1900 年までの唯一の正しい答えだった。

電波が目に見えるか見えないかは電波の波長によって分類でき、図 1-1 に電磁波の波長による分類図を示す。単に光という時は可視光を意味し、可視光はおよそ 770nm から 380nm の範囲の波長を指す。そして、波長の短い方から長い方につれて、赤、橙、黄、緑、青、藍、紫という虹の色が順番に現れることになる。

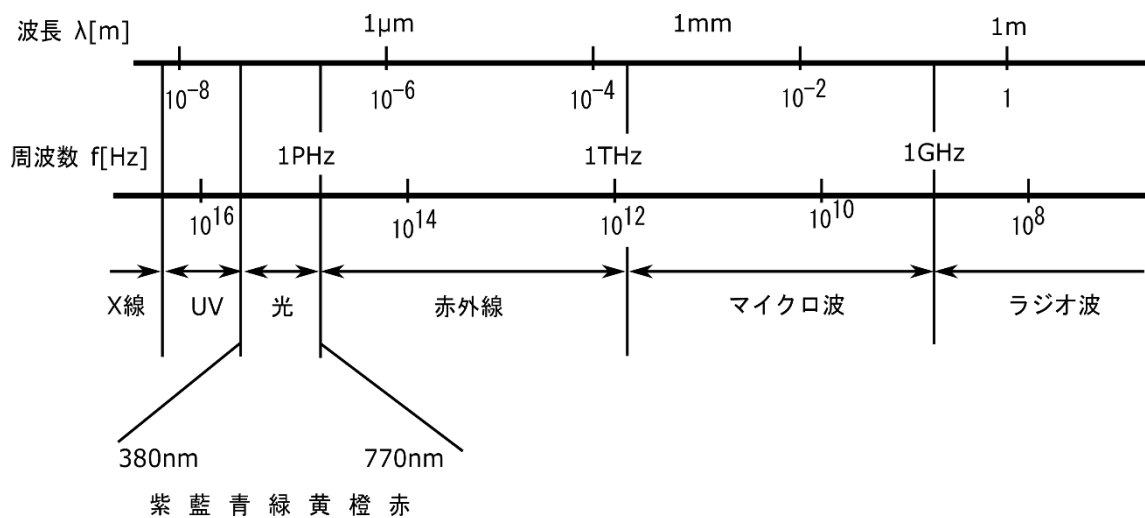


図 1-1 電磁波の波長による分類

しかし、1900 年にプランクとアインシュタインによって、“光は粒子の一種であり、エネルギー  $h\nu$ 、運動量  $\frac{h\nu}{c}$  の塊として、光速  $c$  で飛んでいると”解釈し、光を“光子量”（後に光子）と名付けた。この意味づけは今までの古典的な考え方を覆す巨大な革命であり、光は波と粒子、両方の側面を持っているとした。<sup>[1]</sup>

### 3. 距離計

距離計は、受動型計測と能動型計測に分けられる。能動態計測とは、対象物に対して光、電波、音波等を照射することで得られる情報を利用して計測を行う手法である。受動態計

測は、計測の補助となる特定の光や電波等を照射することなく行う計測である。今回、マルチパスセル内の光路長を計測するシステムの構築を行う。そのため、それに適した能動態計測を用いて計測を行う。能動態計測には、三角測量法、タイムオブフライト方式、位相差計測、光ヘトロダイン計測が挙げられ、それぞれに関し以下に計測方法、特徴について示す。<sup>10)</sup>

### 3.1. 三角測量法

三角測量法は、今現在でも測量、天文学、航海で用いられる最も原始的な方法である。ある基線の両端にある既知の点から測定したい点への角度をそれぞれ測定することによって三角形の3番目の頂点として測定点を決定することができる。そこから三角形の合同を用いて、測距点までの距離を導出することができる。三角測量を応用して、レーザを用いる三角測距方式がある。レーザを対象物に照射し、反射光をセンサ内にある受光素子にて読み取り、測距する方法である。受光素子も様々で、安価なものもあるが、比較的小さな対象物に適しており、長距離の測定には向いていない。

### 3.2. タイムオブフライト方式

タイムオブフライト方式は、パルス波を用いた手法である。月から地球までの距離を計測するときに用いられた方法で、照射し測定物に反射し、返ってくるまでの往復時間を計算する方法である。さまざまな動物もこの方法を用いて周囲の状況を察知している。例え

ば、コウモリが挙げられる。一般に小型コウモリ類に属するものは、目が小さく、耳が薄くて大きいことが特徴である。コウモリは超音波を発して、返ってきた波を利用して木の枝や、虫の位置を察知している。しかし、この方法をレーザに用いると、光は極めて速度が速いため、半導体レーザ素子、受光素子などに高速性が要求される。

### 3.3. 位相差計測

位相差計測とは、発振器を用いて照射する光を連続的に AM 変調する方法である。出射され、フォトダイオードに受光される光は距離に応じた時間差が生じる。これにより、元の波と受光する波との間に位相差が発生する。測定距離が異なる場合、それに応じた位相差が生じる。この位相差から時間を導き、距離を導出する方法である。

### 3.4. 光ヘテロダイン法

光ヘテロダイン法とは、周波数の異なる 2 つの波形を干渉させることによって、新たな波形を生成する。その波はビート周波数(2 つの波の周波数の差)をもち、その波をビートと呼ぶ。ビートの身近な例として寺院にある鐘の音が挙げられる。鐘の形状により複数のわずかに周波数の違う音が発せられ、それらがビートを生むと考えられる。

わずかに異なる周波数をもった 2 つの光を重ね合わせることでビートを発生させる。これを光ヘテロダイン検出と呼び、光ヘテロダイン検出した信号から情報を取り出す手法を

光ヘテロダイン法と呼ぶ。光ヘテロダイン法の利点として、ビート周波数から情報を得るのでノイズによる強度変動に影響されない、微小な信号でも検出が可能である等が挙げられる。<sup>[3]</sup>

本研究の目的は、ガス計測で用いた実験系でマルチパスセル内の光路長を計測することである。光ヘテロダイン法を用いることで、光源から出射される光を変調することで距離の計測が可能である。そのため、光ヘテロダイン法がよりよい方法である。

## 第2章 レーザ

本章では、レーザの原理、種類等に関して記述する。本研究では、1500 nm帯の半導体レーザを用いた。<sup>[4,5,6,7]</sup>

### 1. 概要

レーザ (LASER) の用語は、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字をとってつくられたもので、“放射の誘導放出による光の増幅”を意味する。世界初のレーザ発信は米ヒューズ社のメルマンによってルビー・レーザでなされた。レーザは物質の状態によって気体レーザ、固体レーザ、色素レーザ、自由電子レーザ、半導体レーザに分類される。半導体は固体であるが、励起方法とエネルギー順位が異なるため固体レーザと分けて考えられる。



## 2. レーザの原理

安定状態（基底状態）に属する原子は外部からエネルギーを得ると電子がいったん外の軌道へと乗り移る。この状態を励起状態という。励起状態は不安定な状態であり、すぐに安定状態に遷移する。その時、エネルギー差と同等の光を放出して安定状態に遷移する。プランクの公式  $E_g = hv$  で関係づけられる振動数  $\nu$  をもつ光がその際出てくることになる。この光を放出する現象を自然放射といい、放射された光は励起状態にある他の原子にぶつかり、同様の遷移を誘発する。この照射を誘導照射という。

私達の周りにある光(太陽光, 蛍光灯の光等)はほぼ自然放射によって放射された光である。しかし、誘導放射によって出た光はその引き金になった光と同じ波長と位相を性質を持っている。レーザーは、この性質を利用することで一定の波長をもつ光を照射することができる。

## 3. レーザ光を発生するための条件

レーザー光を出すために、“反転分布な状況を作ること”, “フィードバック構造を作ること”の二つの条件が挙げられる。これらについて以下で示す。

### 3.1. 反転分布

内側の軌道に存在する電子の数を  $N_1$ , 外側を  $N_2$ , とする。平衡状態だと,  $N_1 > N_2$ , の関係が成り立つ。そして平衡状態では誘導放射は生じないことが分かっている。そのため、誘

導放射を起こすためには、 $N_2 > N_1$ の条件を満たす必要があり、この条件を満たす状態を反転分布と呼ぶ。反転分布の状態は非平衡状態であり、長い間実現することは難しいと考えられていた。しかし、強い光を物質に照射することや、強い放電をさせること、物質を強く活性化させることで反転分布を実現することができる。この反転分布がレーザ発光の第一必要条件である。

### 3.2. フィードバック

レーザ発光させる第二必要条件として、“フィードバック機構を有すること”が挙げられる。光のフィードバックは図 2-1 のようなシステムで実現することができる。反転物質を鏡の中心に置くことで、ひとつの光が発生するとそれが種になって誘導放射を繰り返しながら増幅され物質中を進んでいく。片方の鏡に到達すると反射し、また増幅されながら反転物質中を進む。そしてレーザ光として出射される。これをレーザ発振と呼ぶ。光のアンブに対し平行な鏡のフィードバックを与えることで、鏡の内部で光増幅を行い、レーザ光線生み出す。

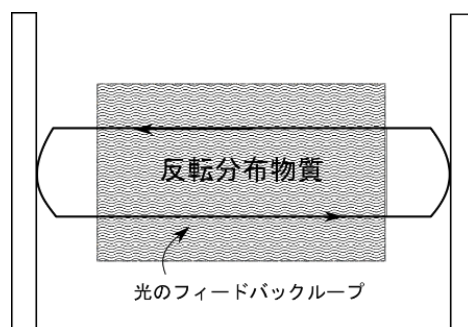


図 2-1 発振に必要な光のフィードバック

#### 4. レーザ光と自然光の違い

前節でも示した通り、自然光は波長も位相もランダムな波が混ざり合った光であり、レーザー光は波長が単一で位相のそろった光であるといえる。このような波長や位相の整い具合をコヒーレンスという言葉で呼んでいる。

コヒーレンスには時間的コヒーレンスと空間的コヒーレンスという概念が存在する。時間的コヒーレンスとは、時間的に光の波がどの程度一定の周期で振動しているかであり、空間的コヒーレンスとは、空間的に光の波がどの程度一様であるかということを示す。時間的コヒーレンスの意味を別の言葉で言い換えるならば、異なった時刻に光源を出た光が干渉するか、しないかである。時間的コヒーレンスが良いということはスペクトル線幅が狭く、コヒーレンス長が長いことを意味する。

空間的に異なった場所から出る光の間の干渉性を問うのが空間的コヒーレンスである。空間的コヒーレンスが悪いと、波の一定の方向に進むのではなく、波面にゆがみができて空間的に広がっていき、レンズによる集光性が悪くなる。レーザー光は自然光に比べ空間的コヒーレンスが良いといえる。

#### 5. レーザ光の特徴

上記にも示したように、レーザー光は誘導放射という特別な仕組みで作られている。

そのため、指向性や集光性等優れた特性をもっている。これらに関し、以下で説明する。

### 5.1. 指向性

自然光はほとんど指向性を持っておらず、四方八方に広がってしまう性質を持っている。それに比べて、レーザー光は極めて指向性が高く、一方向に直進する。レーザー光の指向性が高い理由として、ビームの断面内で光の位相がそろっており、空間的コヒーレンスが良いということが挙げられる。このレーザーの特徴は、人口衛星や海底トンネル工事等で利用されている。

### 5.2. 集光性

前述したように、自然光は指向性が低い。そのため、どれだけ性能の良いレンズを使用しても光源以上のエネルギーを集めることはできない。しかし、レーザー光は指向性が良く、一方向に直進するので、レンズを用いると数倍程度の小さな点に集光させることができる。レーザー光の優れた集光性は鉄板の溶接、医療・美容等幅広い分野で利用されている。

### 5.3. 単色性

太陽光(白色光)をスリットに通してプリズムに入射させると、波長成分のスペクトルに分光される。これは、屈折率が波長によって異なるため起きる現象といえる。しかし、レーザー光をプリズムに通してもこのような現象は起きない。このような単色性を言い換えると、

周波数幅が非常に狭いということになる。

## 6. 半導体レーザー

1962年ほぼ同じ頃、GE、IBM、MITの各研究所で波長約0.85nm帯の最初のパルス発振の半導体レーザーの開発に成功した。以降、半導体に関して様々な研究が進み、現在ではダブルヘテロ接合構造のレーザーがごく一般的になった。

半導体レーザーはレーザーダイオード(LD: Laser Diode)とも呼ばれる。小型で軽量、低電力での動作からCD、DVDの記録読み出し光源、レーザーポインタ等さまざまな場面で利用されている。この半導体レーザーの発光原理、種類に関し、以下に示す。

### 6.1. 半導体レーザーの発光原理

ここでダブルヘテロ構造の半導体レーザーの基本構造を図2-2に示す。一般的にLDはp-n接合ダイオードからなっている。半導体チップに電流を順方向に流すとp型とn型の接合部分(活性層)に電子と正孔が大量に注入され、反転分布が形成される。これにより、バンドギャップエネルギーに相当する光が放出される。活性層はクラッド層より高い屈折率を持つ物質で構成するため、活性層内に光が閉じ込められる。注入電流を高めることにより、誘導放出の割合が増すことにより、利得が共振器の損出を超えるとレーザー発振が起きる。

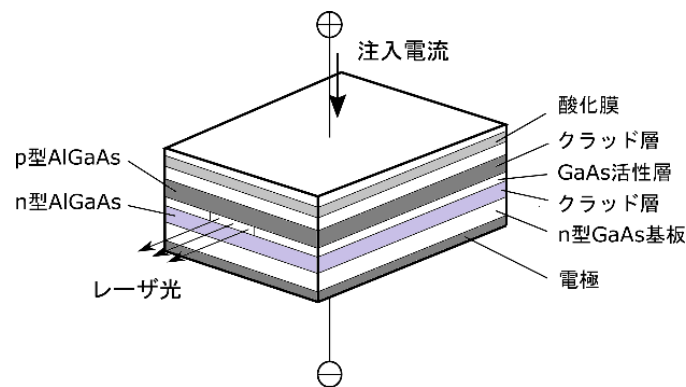


図 2-2 ダブルヘテロ構造半導体レーザーの基本構造

## 6.2. 半導体レーザーの種類

### 6.2.1. ファブリ・ペローダイオードレーザー

ファブリ・ペロー共振器は、最もレーザー発振が簡単な共振構造を持つ。2枚のガラス板の間で光を多重反射・干渉させることによって特定の波長の光だけを取り出す装置である。

一般にファブリ・ペローダイオードレーザーでは、複数縦モードと呼ばれる複数の離散的な発光波長が得られる。この半導体レーザーの欠点として、高速パルスで直接変調すると、発振縦モードが跳躍したり、その数が増加したりして光ファイバの質を低下させてしまう。

### 6.2.2. 分布帰還形レーザー

DFB-LD の概念図を図 2-3 に示す。レーザーダイオード素子の内部の光の増幅部である活性層に溝のついた回折格子を設けた半導体レーザー。回折格子で特定の波長の光のみを反射させることができる。DFB-LD は FP-LD と違い特定の波長の光を出射する単一縦モードである。そのため、レーザーガス計測に適している。

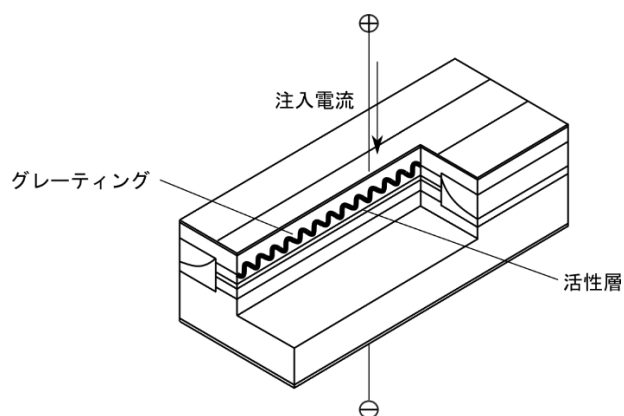


図 2-3 DFB-LD の概念図

### 第 3 章 使用機器

本章では実験に使用した機器について説明する。

#### 1. マルチパスセル

本研究の目的はマルチパスセルの光路長計測である。マルチパスセルの概要について述べる。

マルチパスセルとは、2 枚以上の鏡を使って光路を多重化することで実効的な光路長を長くする装置である。レーザを使った気体の吸収分光計測で使われることが多く、さまざまな種類が考案されている。

本研究室では、ガス計測に 2 枚の凹面鏡を向かい合わせにしたヘリオット型のマルチパスセルを用いており、凹面鏡の間を光が多重往復することで通常の約 10 倍以上の長い光路長を得ることができる。

本研究室で使用するマルチパスセルの部品表を表 1-1 に示す。

表 1-1 マルチパスセルの部品表

品名	メーカー	規格	数量	備考
cage plate	THORLABS	LCP06/M	2	
cage mounting bracket	THORLABS	LCP01B	2	
丸棒		φ6 ステンレス	4	
角パイプ		t3 L103	1	

## 2. スペクトラムアナライザ

電気信号を観測するために一般的にオシロスコープという電気計測機が使用される。オシロスコープは横軸を時間、縦軸を電圧で表す。しかし、複数の周波数成分が合成された波を観測した際、それぞれの波の周波数を求めることは難しい。スペクトラムアナライザ (spectrum analyzer) とは、横軸を周波数、縦軸を電圧とする二次元のグラフを表示させる電気計測機である。スペクトラムアナライザを使用することで、周波数成分を分離し、それらの周波数での電圧レベルを表示する。

### 2.1. 高速フーリエ変換

ここでは高速フーリエ変換(FFT)という概念を説明する。フランスの数理学者フーリエの発見したフーリエ変換はフーリエ級数が源となっている。フーリエ級数とは、どのような波であってもその波が周期性を持つならば、複数の単純な波形(正弦波と余弦波)の級数で表現することのできるという理論である。さらにこの級数を $+\infty \sim -\infty$ まで拡張したものがフーリエ変換である。しかし、無限大時間までの測定はできないので、一般には時間分を切り取り、その波形が無限に広がっていると仮定してフーリエ変換を行う。ここで、ジェイム



ズ・キュリー(J. W. Cooley)とジョン・テューキー(J. W. Tukey)が FFT を発見した。フーリエ変換より計算回数を格段に減らすことのできる方法として、さまざまな場面で活用されている。スペクトルアナライザは内部で FFT 解析を行い、画面に表示させている。<sup>[8]</sup>

## 2.2. サンプリング

アナログ信号は値が連続的で時間的にも変化する信号である。コンピュータはデジタルシステムである。そのため、アナログ信号をサンプリングにより時間的な離散化と量子化を行いデジタル信号へと変換する。

ここで、サンプリングを一定時間間隔 $\Delta t$ とすると、 $\Delta t$ の逆数を サンプリング周波数 $f_s$ 、または標本化周波数という。その波の最大周波数成分 $f_{max}$ とサンプリング周波数 $f_s$ の間に式(3.1)の関係が成立する場合、サンプリングされたデータは、元の信号の情報を保存している。

$$f_{max} \leq \frac{f_s}{2} \quad (3.1)$$

ここでサンプリング周波数 $f_s$ に対して、ナイキスト周波数 $f_N$ を式(3.2)で定義する。

$$f_N = \frac{f_s}{2} \quad (3.2)$$

ここで、含まれる最高周波数がナイキスト周波数以下であるような信号は、サンプリングによって保存される。

### 2.3. 窓関数

まず FFT 解析は本当に周波数成分を的確に示しているのか. ある波の一定区間をサンプリングした図 3-1 を示す. 両端が不連続であるため, 有限個の  $N$  個のデータを FFT 解析し表示させると, 不要な高周波信号が出てきてしまう. これは図 3-1 のような複雑な波形でなく単一周波数の正弦波であっても起こりうる問題である.

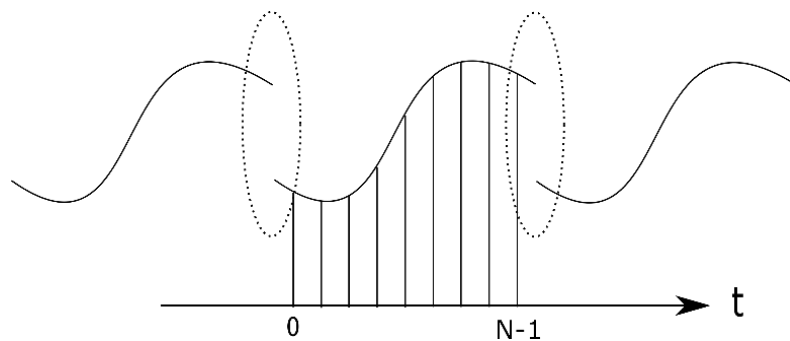


図 3-1 サンプリングの概念

この問題を解決するために切り出したデータ数の区間に対して補正を行う方法が考案された. この補正に用いる関数を窓関数と呼ぶ. 本研究では窓関数として, 周波数分解能が良く, ダイナミック・レンジが狭いとされる, ハミング関数を用いて FFT 解析を行った.

## 3. 光ファイバ

光ファイバ(Optical fiber)は, 離れた場所に光を伝える伝搬路としてさまざまな分野に利用されている. ここでは, 光ファイバの概要に関し説明する.

### 3.1. 光ファイバの構成

光ファイバは石英ガラスやプラスチックで形成されており, 中心部のコアとその周辺を

覆うクラッドの二層構造となっている。コアはクラッドと比較して屈折率が高く設計されており、光の全反射という現象を利用してコア内に光を閉じ込め伝搬している。

### 3.2. 全反射

まず初めに屈折の概念について説明する。光が、ある媒質からある媒質に入射する際、進行方向を変えることがある。これを屈折といい、屈折した波の進行方向が境界面に垂直な線(法線)となす角を屈折角という。ここで、入射角を $\theta_i$ 、屈折角を $\theta_r$ とし、入射前の光の速度を $v_i$ 、入射後屈折した後の光の速度を $v_r$ としたとき、式(3.3)のスネルの法則が成り立つ。このとき $n$ を絶対屈折率といい、 $n_i$ 、 $n_r$ をそれぞれ入射側、屈折側の相対屈折率という。

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_i}{v_r} = n = \frac{n_i}{n_r} = \text{一定} \quad (3.3)$$

そして媒質中の速度 $v_1$ は式(3.4)によって表すことができる。

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \quad (3.4)$$

光がある媒質からある媒質へ屈折して進むとき、一部は反射して戻ってくる。光が屈折率の大きい媒質から小さい媒質へ進むとき、入射角を大きくしていくと光はすべて反射するようになる。これを全反射という。全反射が起こる直前の入射角を臨界角といい、このときの屈折角は90度である。そのため、全反射が起きる条件として不等式(3.5)が得られる。

$$n_1 < n_2 \quad (3.5)$$

つまり、全反射が起きる場合、入射側の屈折率は出射側に比べ必ず大きくなる。

### 3.3. 光ファイバの種類

光ファイバの中の光の伝わり方は、光ファイバのコアとクラッドの屈折率、コアの太さなどの関係から、全反射し伝搬する。全反射が発生する、特別な角度を光ファイバの伝搬モードという。この角度が多数ある場合をマルチモード、ただ一つだけの場合をシングルモードという。

マルチモードファイバはコア径がシングルモードファイバより大きく、空間モードの異なる複数の信号を同時に伝搬することが可能である。しかし、ファイバに入射した光はモード間で伝搬速度が異なり分散が生じる。それにともない、伝搬信号に歪みが生じる。

それに対し、シングルモードファイバはコア径が小さく、分散が生じないため伝搬に伴う信号の劣化が少ない。そのため長距離の信号伝搬に用いられる。本研究室では、ガス計測には特定の波長の光を用いるため、信号劣化の少ないシングルモードファイバを用いる。そのため、本研究でもシングルモードファイバを使用する。

## 4. 偏光コントローラ

レーザー光は電磁波である。進行方向に対して、垂直な方向に振動している電場とそれに対し直角に振動している磁場が存在する。一般に電場の伝搬方向の面を偏波面という。偏波面が異なる二つの光(振動方向が互いに直角)場合干渉しない。今回2つの光路を通った

光がファイバケーブルによって干渉されビートが発生する。その際、偏波面を一致させるために偏光コントローラを用いる。本研究では、THORLABS 社の 3 パドル型偏光コントローラを使用した。

実際に偏光コントローラを接合せず観測した干渉信号スペクトルを図 3-2 に示す。偏光コントローラを導入することにより、ビート信号強度が増幅したことがわかる。

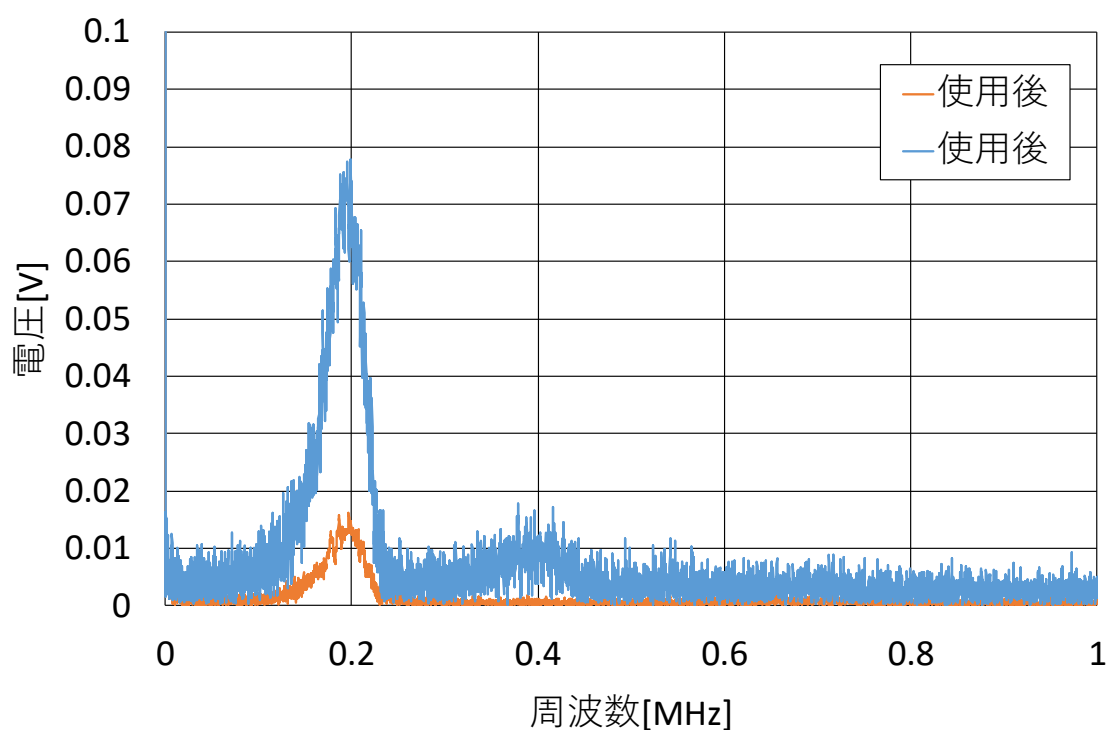


図 3-2 偏光コントローラによる光強度の変化

## 5. 光減衰器

干渉信号はフォトダイオードの受光感度を上回った。よって、可変光ファイバ減衰器を使用して実験を行った。以下に本実験で用いた光ファイバ減衰器の原理、特徴等について述べる。

本研究では、マルチパスセル内の光路長計測が目的である。ガス計測にはさまざまな帯域の光が使用されるため、THORLABS社の広帯域用シングルモード可変光ファイバ減衰器を用いた。図3-3に可変光減衰器の内部構造を示す。これは、デバイスを透過し信号光の減衰量を手で調整することができる。そして、光減衰器内には、入射ファイバ光をコリメートするレンズがついている。調節ネジを回すことによりウィンドウが回転し、それにより生じる光路の並進ズレによって光が減衰する仕組みになっている。<sup>[7]</sup>

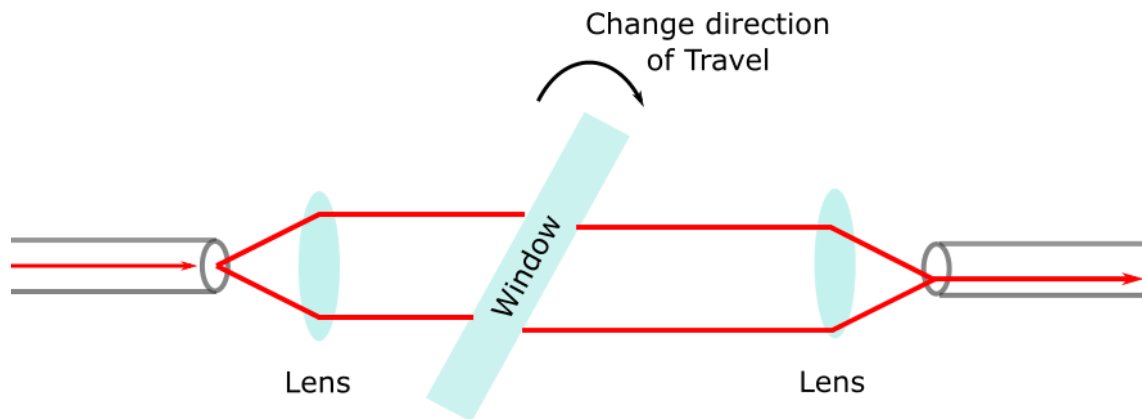


図 3-3 光減衰器の内部構造

実際に光減衰器を用いる前と後のビートをそれぞれ図3-4、図3-5に示す。図3-4(光減衰器追加前)はフォトダイオードの検出限界を超えて、飽和した状態が見て取れる。そのため、ビートが検出できない。しかし、光減衰器追加後はビートの概形を確認することができた。今回用いた光減衰器は減衰範囲が1.5~50dBで、約8dBに調整し実験を行った。

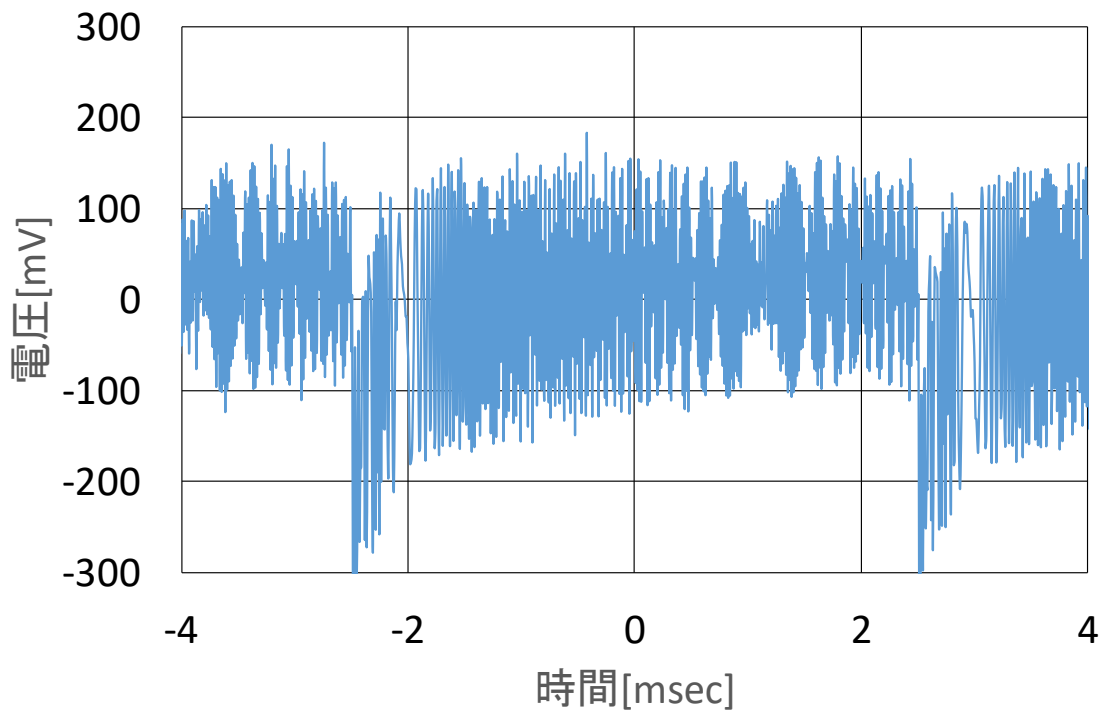


図 3-4 光減衰器追加前のビート

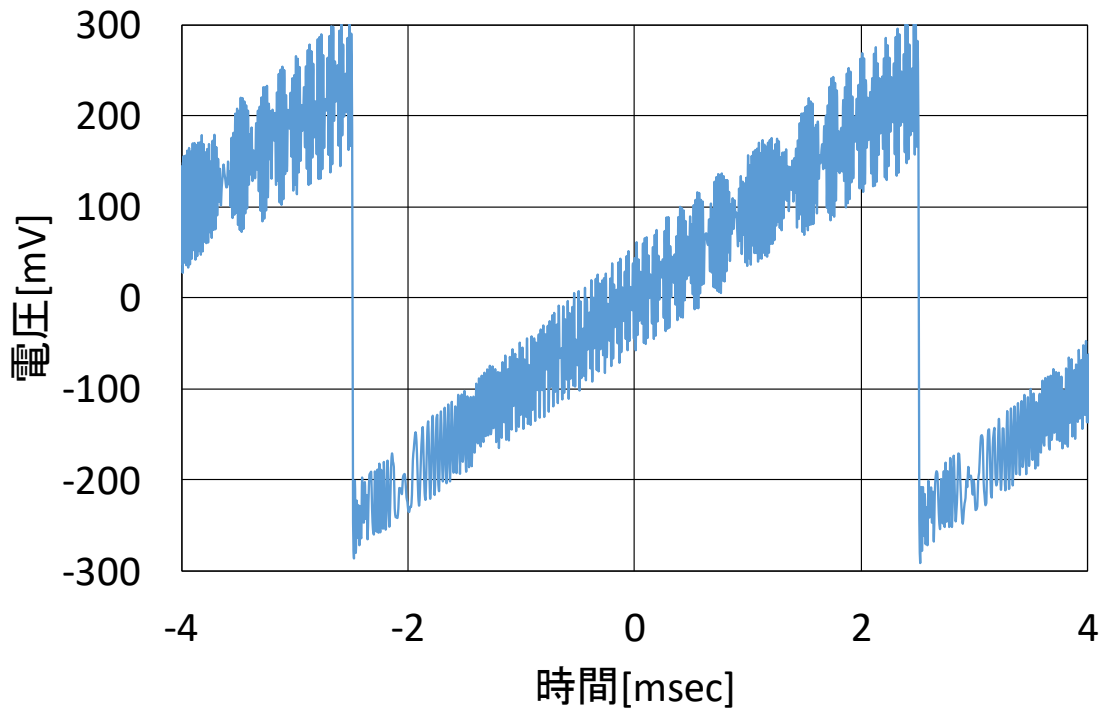


図 3-5 光減衰器追加後のビート

## 6. ビームスプリッター

ビームスプリッターは入射光を所定の分割比で2つの光に分割する工学部品である。また可逆的に、2つの光を重ね合わせることも応用できる。ビームスプリッターの代表的な形状にはキューブ型とプレート型が挙げられる。本実験では、分けた光を再び干渉させるため、キューブ型ビームスプリッターが適している。

## 7. レーザスペクトラムアナライザ

使用したレーザスペクトラムアナライザ(EXFO社)はファブリ・ペロー干渉計、干渉計マウント、ランプ発信機、増幅器から成り立っている。本節ではファブリ・ペロー干渉計について説明する。その上で、重要となるファブリ・ペロー共振器、ピエゾ素子に関し説明する。

### 7.1. ファブリ・ペロー共振器

多くのレーザにおいて光の増幅を担うレーザ媒質を光の共振器の中に配置して、光がその中を何度も往復する構造をとっている。それをレーザ共振器といい、代表的な構造としてファブリ・ペロー共振器が挙げられる。

ファブリ・ペロー共振器は平行に対面した1対の反射鏡からなる。共振器の鏡で挟まれた部分をキャビティと呼び、鏡の間隔をキャビティ長という。



光が媒質中を進んだとき、光の進んだ距離 $z$ 、増幅率 $\gamma$ と減衰率 $\alpha$ の差 $(\gamma - \alpha)$ が正ならば光は増幅され、逆に負ならば減衰する。その変化率は式(3.6)で表せられる。

$$\exp\{(\gamma - \alpha)z\} \quad (3.6)$$

反射鏡の反射率を $R_1, R_2$ 、反射鏡間の距離を $L$ とすると、光の反射鏡間を1往復する間の増幅率は式(3.7)で表される。

$$\exp\{2(\gamma - \alpha)L\}R_1R_2 \quad (3.7)$$

ここで式(3.7)の値が1になれば、光は減衰することなく定常的にキャビティ内にそんざいすることになる。

$$\exp\{2(\gamma - \alpha)L\}R_1R_2 = 1 \quad (3.8)$$

これがレーザ動作の条件となる。これに加え、光がキャビティを1往復して戻ったときに、もとの波と同位相で重なり合う必要がある。この条件は、共振器長を $L$ 、光の媒質中の波長を $\lambda$ とすると式(3.9)で表される。<sup>[9]</sup>

$$2L = m\lambda \quad (3.9)$$

$m$ を整数とする。これを角周波数とすると、式(3.10)で表される。

$$\omega = ck = \frac{m\pi c}{L} \quad (3.10)$$

各共振器モードの角周波数の間隔は式(3.11)で表される。

$$\Delta\omega = \omega_m - \omega_{m-1} = \frac{\pi c}{L} \quad (3.11)$$

図 3-6 にファブリ・ペロー共振器の共振器モードを示す。このように一定間隔の角周波数

を持った電磁波のみが共振器内に存在できる。

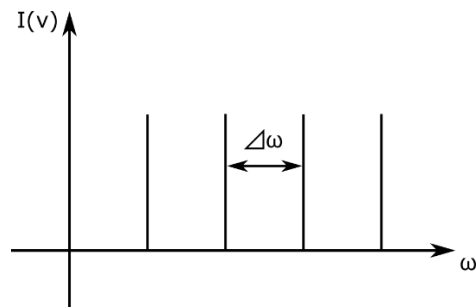


図 3-6 ファブリ・ペロー共振器の共振器モード

## 7.2. 圧電素子

物質に圧力を与えると電圧が発生する、もしくは電圧を印加すると物質自体が変形する現象を圧電効果という。それを備えた物質、すなわち圧電体を利用した電子デバイスを圧電素子(ピエゾ素子)と呼ぶ。圧電素子をファブリ・ペロー共振器に用いることで、ファブリ・ペロー共振器の反射鏡の間隔を変化させる。キャビティ長を変化させることで、各共振器モードの角周波数の間隔 $\Delta\omega$ が変化する。

## 7.3. ファブリ・ペロー干渉計

ファブリ・ペロー干渉計はファブリ・ペロー共振器にピエゾ素子を用いることで、ミラー間の距離を調整する。そして、与えられた波長に対して反射、透過率を制御することが可能となる。本研究では、変調周期と発振振幅における光周波数掃引幅を検討する際にこの器具を用いた。この器具を用いることでDFB-LDから出射された光の周波数掃引幅を調べ

ることができる。

## 第 4 章 理論

### 1. 変調・復調

無線で情報の伝達のためにはまず、その情報を電気信号に変換する必要がある。その電気信号、電波に変換するために変調を行う。変調とは、信号を伝えるための波、搬送波(キャリア波)を変化させることを指す。変調には、周波数変調と振幅変調、位相変調等挙げられる。それらは、FM(Frequency Modulation), AM(Amplitude Modulation), PM(Phase Modulation)と呼ばれる。逆に電気信号、電波を受け取り、情報に変換する操作を復調という。

本研究では、周波数変調を用いた連続波を入力として与え測距を行った。この波を周波数変調連続波(FMCW: Frequency Modulated Continuous Waves)といい、これを用いる方法を FMCW 法という。

### 2. 波の干渉

波の干渉には、水面波の干渉や音波の干渉等が挙げられる。この干渉に関して、1805 年にトーマス・ヤングが光源からの光を平行な 2 つのスリットを通しスクリーンに照射すると、光波と光波が強め合った部分と弱め合った部分が縞模様になって現れる。これを干渉

縞という。

本研究では、周波数の近い光波の干渉によって発生するビートを観測する。ここで2つの光の電場をとしたとき、 $E_1, E_2$ とし、それぞれ式(4.1)、式(4.2)で定義する。

$$E_1(x, t) = u_1(x)\exp\{i[2\pi f_1(x)t + \phi_1(x)]\} \quad (4.1)$$

$$E_2(x, t) = u_2(x)\exp\{i[2\pi f_2(x)t + \phi_2(x)]\} \quad (4.2)$$

この2つの光を重ね合わせると検出される光は式(4.3)のようになる。

$$I(x, t) = \frac{u_1^2(x)}{2} + \frac{u_2^2(x)}{2} + u_1(x)u_2(x)\cos\{2\pi[f_1(x) - f_2(x)]t + [\phi_1(x) - \phi_2(x)]\} \quad (4.3)$$

ここで $f_1(x) - f_2(x)$ はビート周波数 $f_B$ という。

以上より、FFT解析によって、 $f_1(x) - f_2(x)$ が観測できる。ここで、図4-1に実際に観測できたビートの概形を示す。

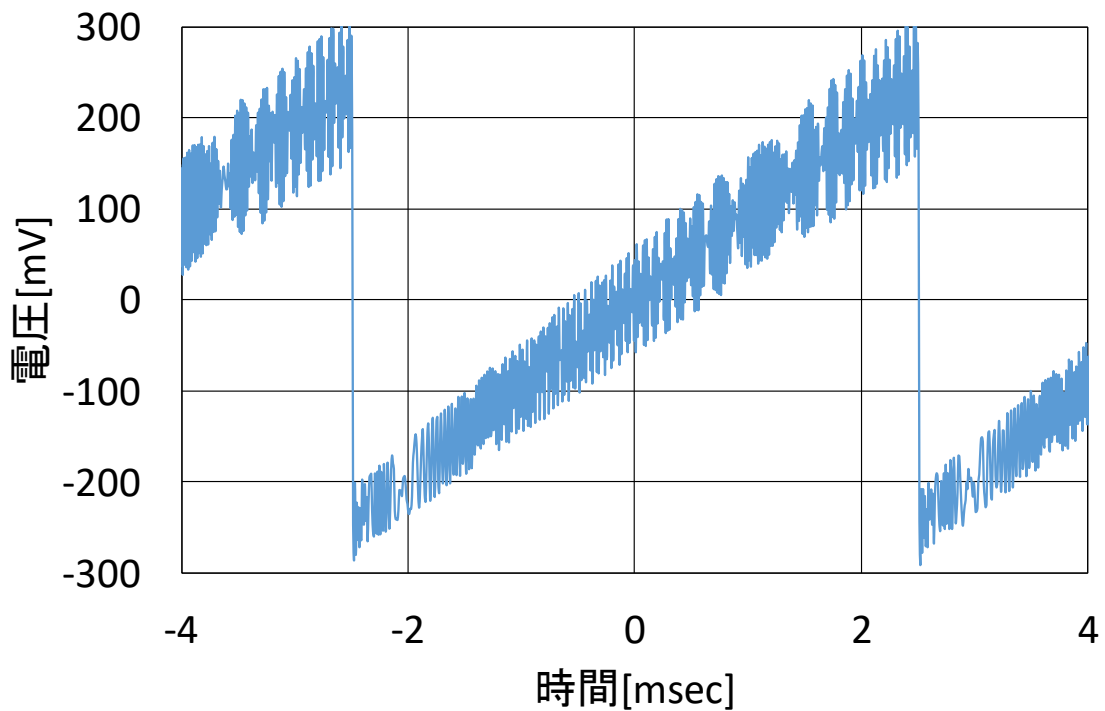


図 4-1 ビートの概形

### 3. 理論式の導出

実験構成図を図 4-2 に示す. 図 4-2 で光路 1 と光路 2 を定義する. 光路 1 と光路 2 では光路長差がある. レーザから出射された光はファイバカップラ 1 によって光路 1 と光路 2 に 1:1 に分けられる. そして光路 1 と光路 2 を通る光はファイバカップラ 2 によって干渉する. 2 つの波の干渉によりビートが発生する. ビートの持つ周波数  $f_B$  とする. ビートはフォトダイオードにより電気信号に換わる.

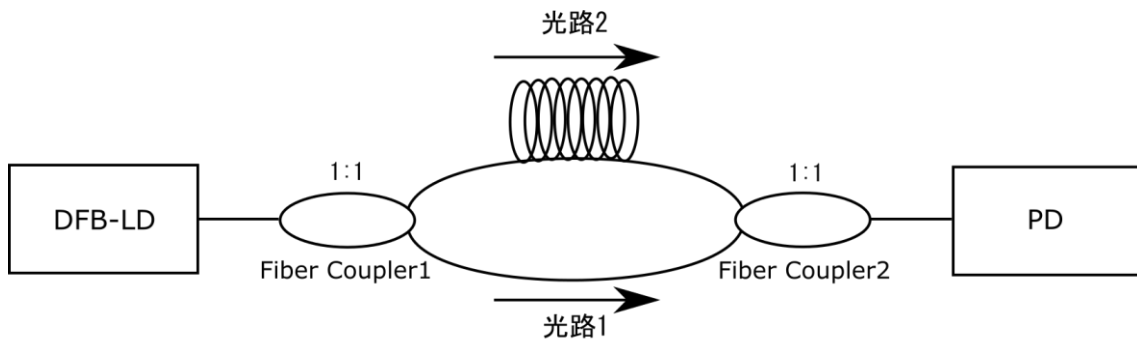


図 4-2 実験系

ここで光路 1 と光路 2 を通る光は縦軸周波数, 横軸時間で表すと図 4-3 のようになる.

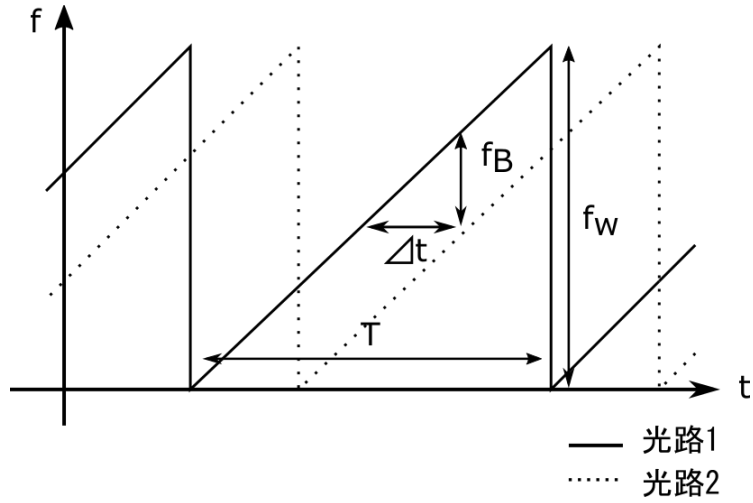


図 4-3 光路 1 と光路 2 を通る光

光路 1 と光路 2 を通る光にはファイバケーブル 2 に到達するまでに時間差 $\Delta t$ が生じる。そして、図 4-3 では、三角形の合同条件が成り立つので、 $\Delta t$ を式(4.4)で表すことができる。

$$\Delta t = \frac{f_B T}{f_w} \quad (4.4)$$

光も波動の一種なので屈折の法則(スネルの法則)が成り立っている。ここで、屈折率 $n_a$ の物体中での光速 $v_a$ は式(4.5)で表すことができる。

$$v_a = \frac{c}{n_a} \quad (4.5)$$

以上より、光路 1 と光路 2 の光路長差を $D$ 、光の速さを $c$ 、光ファイバのコアの屈折率を $n$ 、入力波形の周期を $T$ 、周波数掃引幅を $f_w$ とし、理論式(4.6)を導く。

$$D = \frac{f_B c T}{n f_w} \quad (4.6)$$

## 第 5 章 ビート周波数と光路長差の関係

本研究では、FMCW 法を用いたマルチパス内の光路長計測を行うシステムを構築するこ

とが目的である。そこで、ビート周波数と光路長差の関係を調べるために、光ファイバでマッハ・ツェンダ干渉計を構築した。以下で 使用機器, 実験内容, 実験結果について示す。

## 1. 使用機器

使用した機器を表 2 に示す。

表 2 使用機器

品名	メーカー	型番	規格	数量
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振線幅:12MHz	1
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 $\mu$ -100MHz 高周波歪み:0.2%	1
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V $\pm$ 5% 帯域幅:0-250kHz	1
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解能:1 $\Omega$ 温度安定性:0.002度以下	1
フォトダイオード	THORLABS	PDA20S-EC	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14mm <sup>2</sup>	1
光ファイバ	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:2m,5m 屈折率:1.4682	4
光ファイバカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50	2
3パドル型偏光コントローラ	THORLABS	FPC561	波長:1260-1625nm 長さ:5m	1
可変光ファイバ減衰器	THORLABS	VOA50-APC	波長:1310-1550nm 減衰範囲:1.5-50dB	1
USBオシロスコープ	Pico Technology	Picoscope 4223		1

## 2. 実験構成図

図 5-1 に実験構成図を示す。今回光源には 1520nm 帯の分布帰還型半導体レーザ (DFB-LD) を用いた。電流として 40mA~80mA, 周期 5msec のノコギリ波を印加し, DFB-LD から波長 1520.29~1520.70nm の光を出射した。出射された光をファイバカプラ 1 で 1:1 に

分けた。その後光路1と光路2を通った光をファイバカップラ2で干渉させ、その干渉信号はフォトダイオード(PD)を介して、FFT解析した。

光路1と光路2の光路長差を2m, 5m, 7mとしそれぞれ実験を行った。ここでの光路1と光路2の光路差はマルチパスセルの光路長となる。コアの屈折率が1.468の光ファイバを用いて実験を行った。

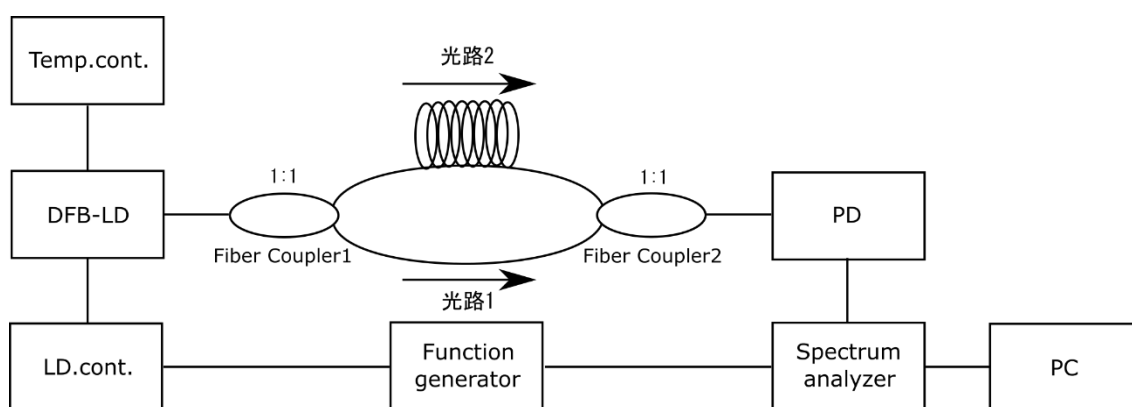


図 5-1 実験構成図

### 3. 実験結果

図 5-1 に光路1と光路2の光路長差2m, 5m, 7mでの測定結果を示す。



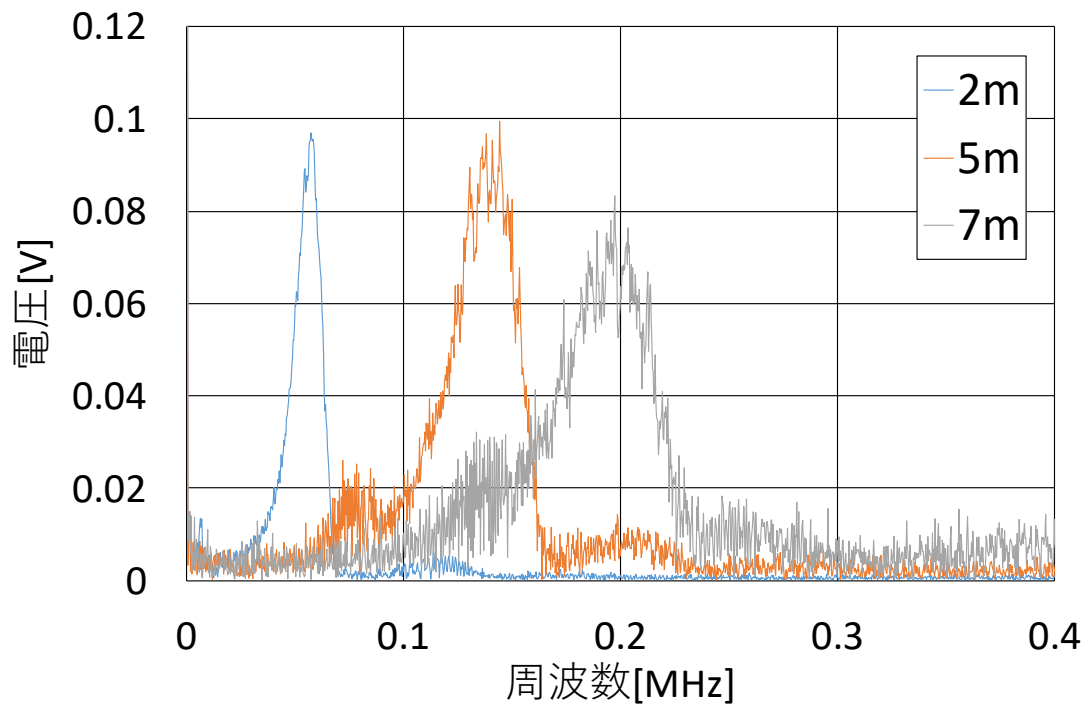


図 5-2 測定結果

一方の光路を切断し、もう一方の光路のみの光をフォトダイオードに照射した。測定結

果を図 5-3 に示す。

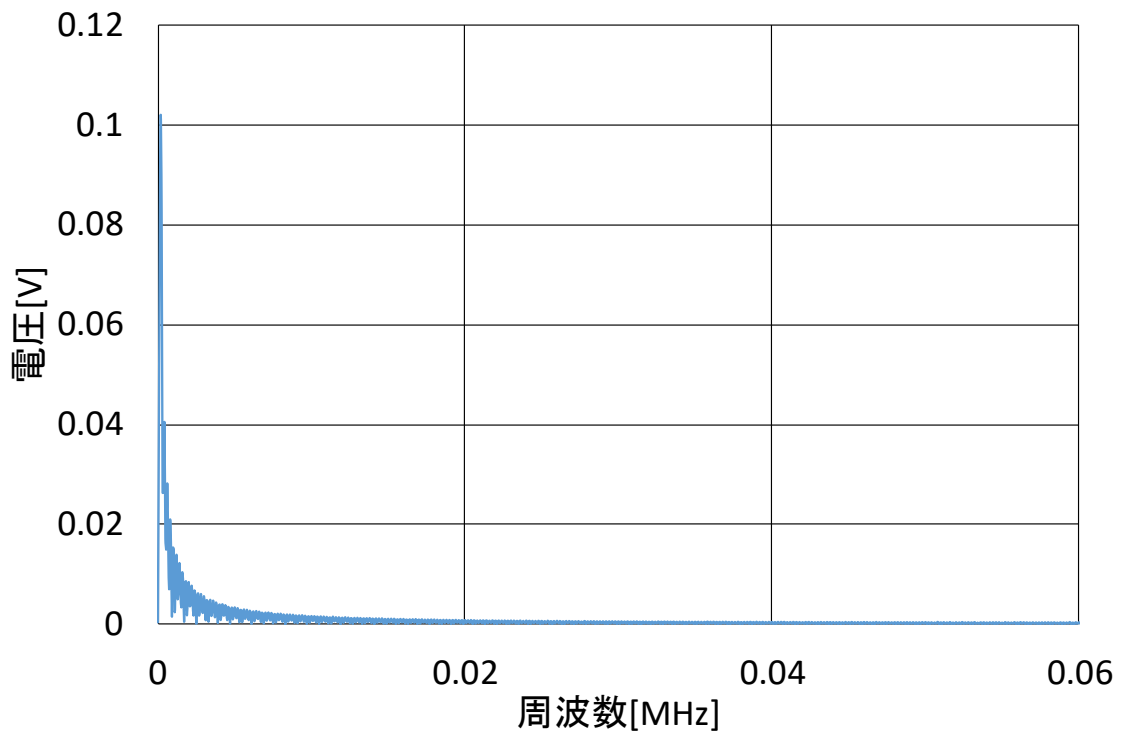


図 5-3 一方の光のみを照射したときの測定結果

これより, 0Hz 付近での信号は干渉信号スペクトルではないことがわかる.

そして, 信号干渉スペクトルのピークの位置での周波数を測定結果とした. ビート周波

数と光路長差の関係を図 5-4 に示す. 近似式には 1 次近似式を用いた.

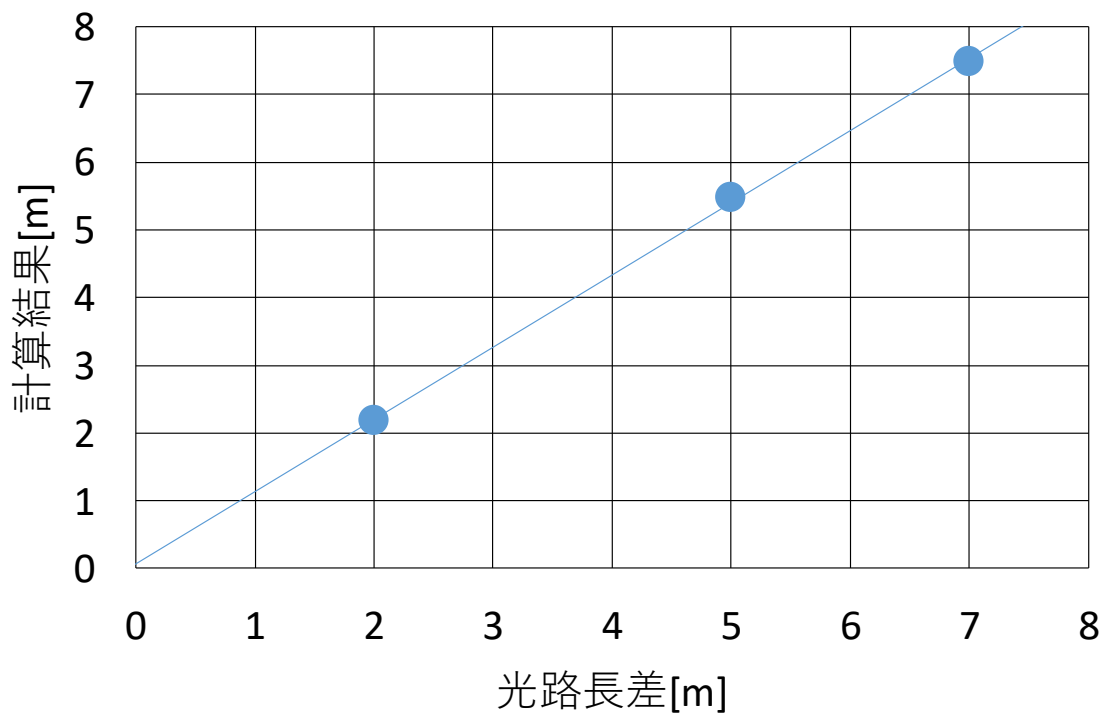


図 5-4 ビート周波数と光路長差の関係

ここからビート周波数と光路長差は比例の関係にあることがわかる。

図 5-2 からは、干渉信号スペクトルは広がりを持っていることもわかる。それをスペクトル線幅といい、それぞれの光路長差と半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)の関係を図 5-5 に示す。

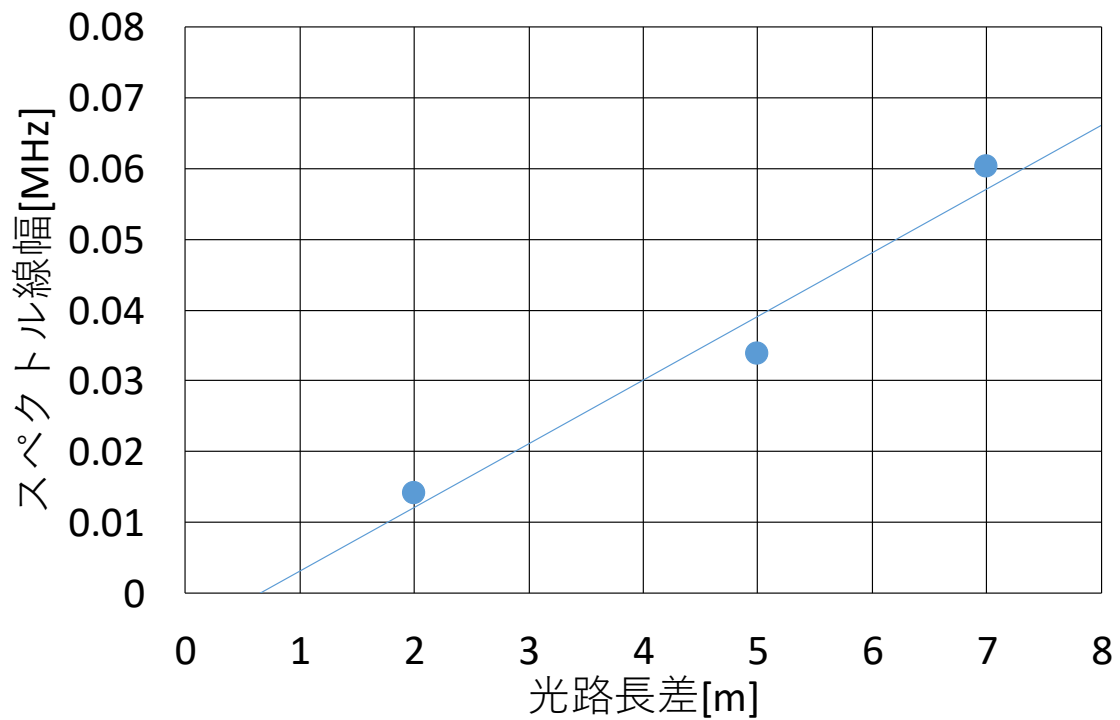


図 5-5 スペクトル線幅の変化

周波数分解能は 305Hz であった。これらより、干渉信号スペクトルはスペクトル線幅を持ち、それは光路長差に伴い大きくなるのがわかる。

## 第 6 章 空間伝搬が測定に及ぼす影響の検証

第 5 章では光ファイバ内を伝搬させて実験を行った。本研究での目的はマルチパスセル内の光路長計測システムの構築である。そのため、光が空間中を伝搬させる必要がある。本章では、空間伝搬が測定に及ぼす影響について検討を行う。以下に使用機器、実験構成図、実験結果を示す。

## 1. 使用機器

使用した機器を表 3 に示す。

表 3 使用機器

品名	メーカー	型番	規格	数量
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振線幅:12MHz	1
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 $\mu$ -100MHz 高周波歪み:0.2%	1
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V $\pm$ 5% 帯域幅:0-250kHz	1
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解能:1 $\Omega$ 温度安定性:0.002度以下	1
フォトダイオード	THORLABS	PDA20S-EC	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14mm <sup>2</sup>	1
光ファイバ	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:2m,5m 屈折率:1.4682	3
光ファイバカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50	1
3パドル型偏光コントローラ	THORLABS	FPC561	波長:1260-1625nm 長さ:5m	1
可変光ファイバ減衰器	THORLABS	VOA50-APC	波長:1310-1550nm 減衰範囲:1.5-50dB	1
USBオシロスコープ	Pico Technology	Picoscope 4223		1
ビームスプリッター	THORLABS	BS012	波長:1100-1600nm 分岐比:50:50	1

## 2. 実験構成図

図 6-1 に実験構成図を示す。DFB-LD に与えるバイアス電流を実験 1 と同条件とし、比較、検討を行う。DFB-LD から出射された光はファイバカプラによって 1:1 に分けられる。レンズによって空間に出射された光はビームスプリッターに入射する。この時双方の光はビームスプリッターを通り抜ける。そして一方の光が鏡に反射し、再び入射し、もう一方の光と

干渉する。ここで、ビートが発生する。ビートを FFT 解析することで、ビート周波数を得る。

光路長差 $D$ はビームスプリッターから鏡までの往復光路長に相当し、1m, 2m, 3m で実験を行った。

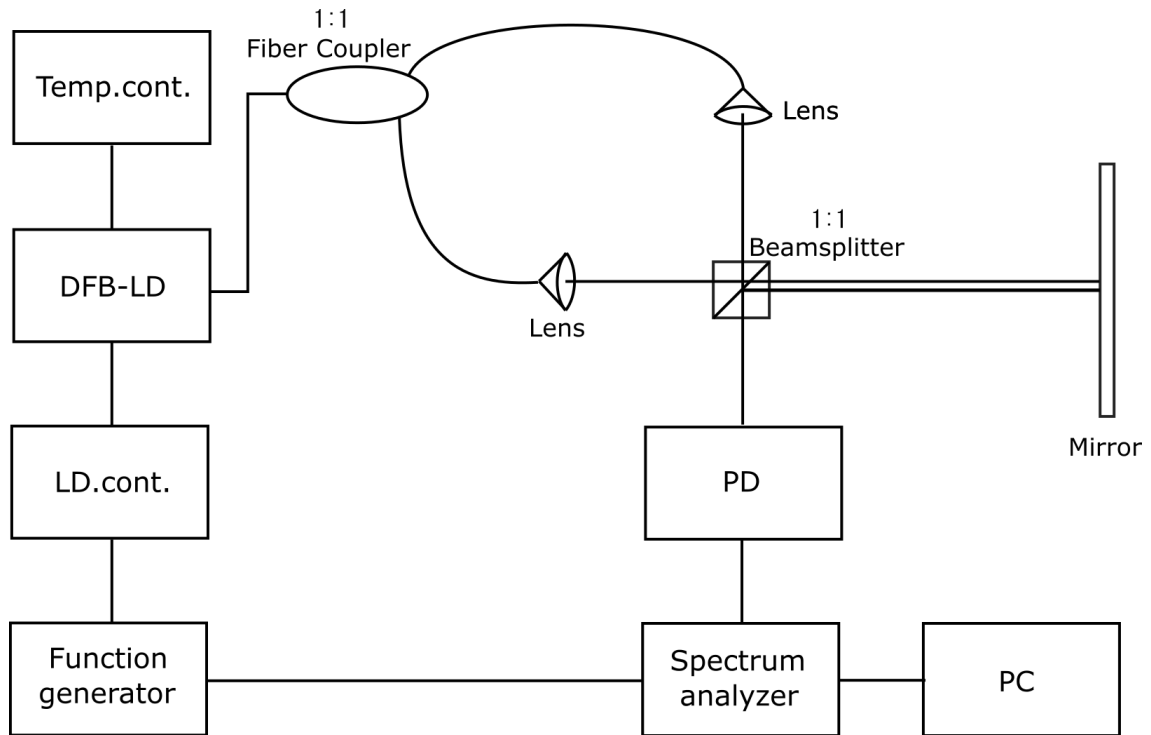


図 6-1 実験構成図

### 3. 実験結果

ビームスプリッターから鏡までの往復光路長 1m, 2m, 3m のそれぞれの実験で得られた。

干渉信号スペクトルを図 5-2 に示す。

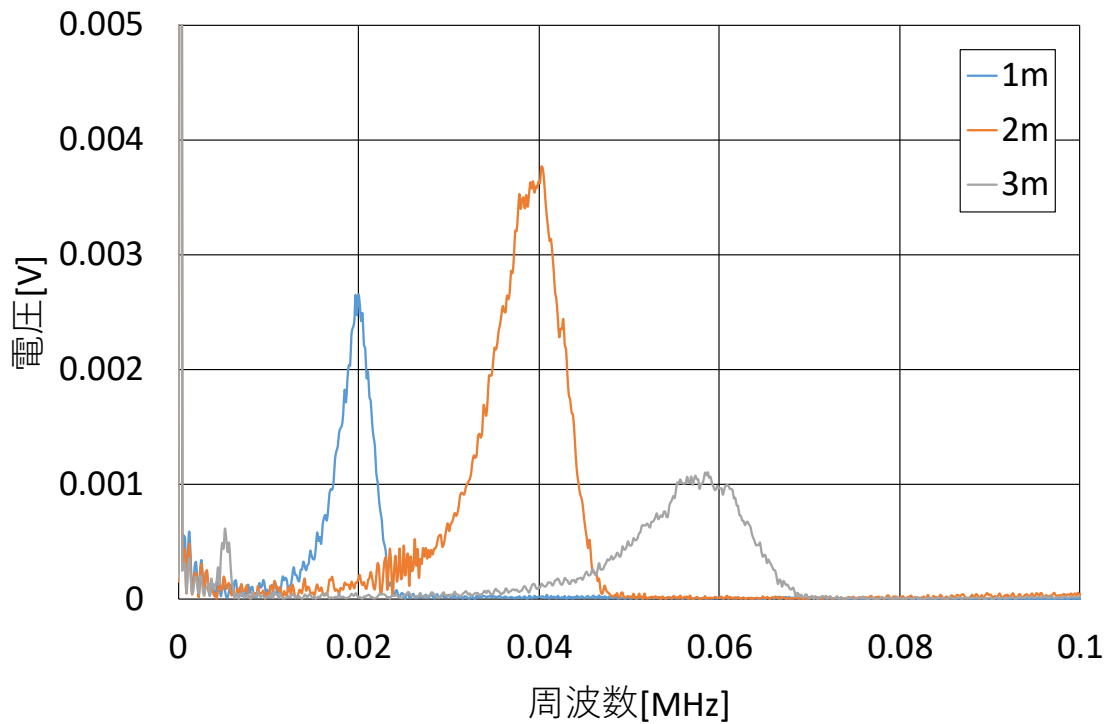


図 6-2 測定結果

第 5 章の測定結果と同様にスペクトル線幅は光路長差に伴い大きくなるのがわかる。

しかし、強度が大幅に減少している。強度が大幅に減少している原因は主に 2 つ挙げられる。1 つ目は空間伝搬中に光は広がりをもつことだ。広がりによって、干渉信号の強度が減少すると考えられる。2 つ目としてビームスプリッターによる分岐が挙げられる。本研究では分岐比 1:1 のビームスプリッターを用いた。ミラーに反射する光は 2 回ビームスプリッターに入射するため強度が減少したと考えられる。

次に測定結果をもとに理論式(4.6)を用いて光路長差を求めた。第 5 章の計算結果と比較すると、図 6-3 のようになる。

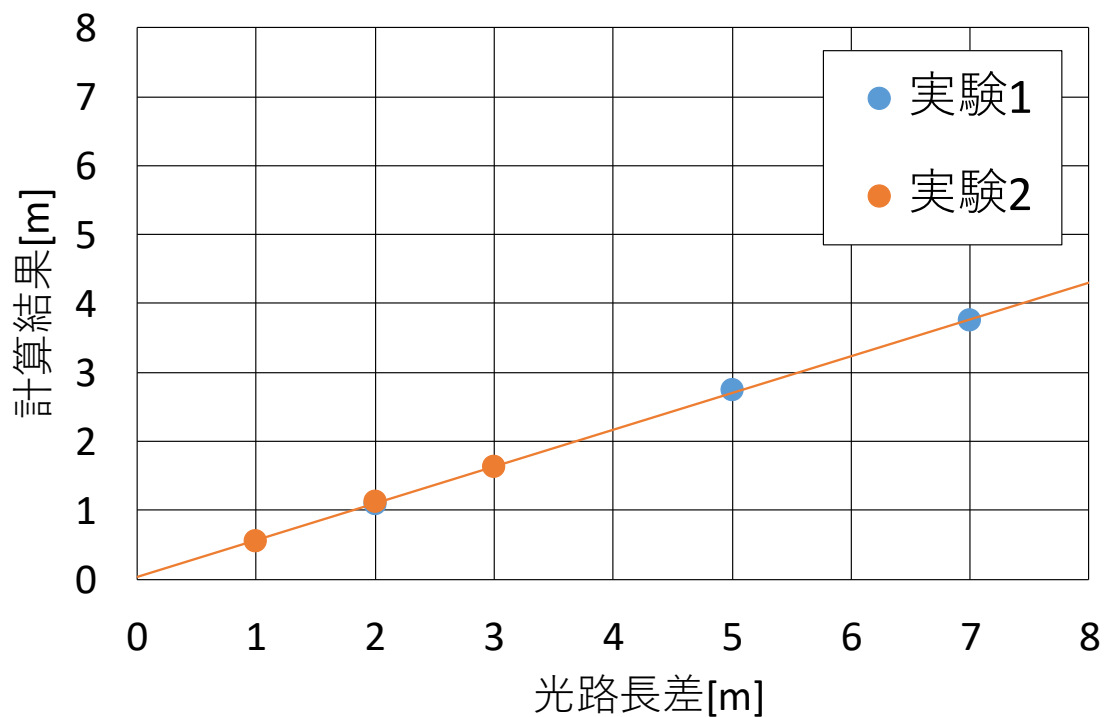


図 6-3 計算結果の比較

計算結果からビート周波数と光路長差は比例の関係にあるといえる。そして、強度の変化は測定への影響がないといえる。しかし、計算結果は実際の光路長差と大きく異なることがわかった。

## 第 7 章 変調周期と発振振幅における光周波数掃引幅への影響

第 6 章では、理論式(4.6)で計算した結果、大幅に光路長差 $D$ が異なることがわかる。第 6 章では図 7-1 を参考に周波数掃引幅を導出している。



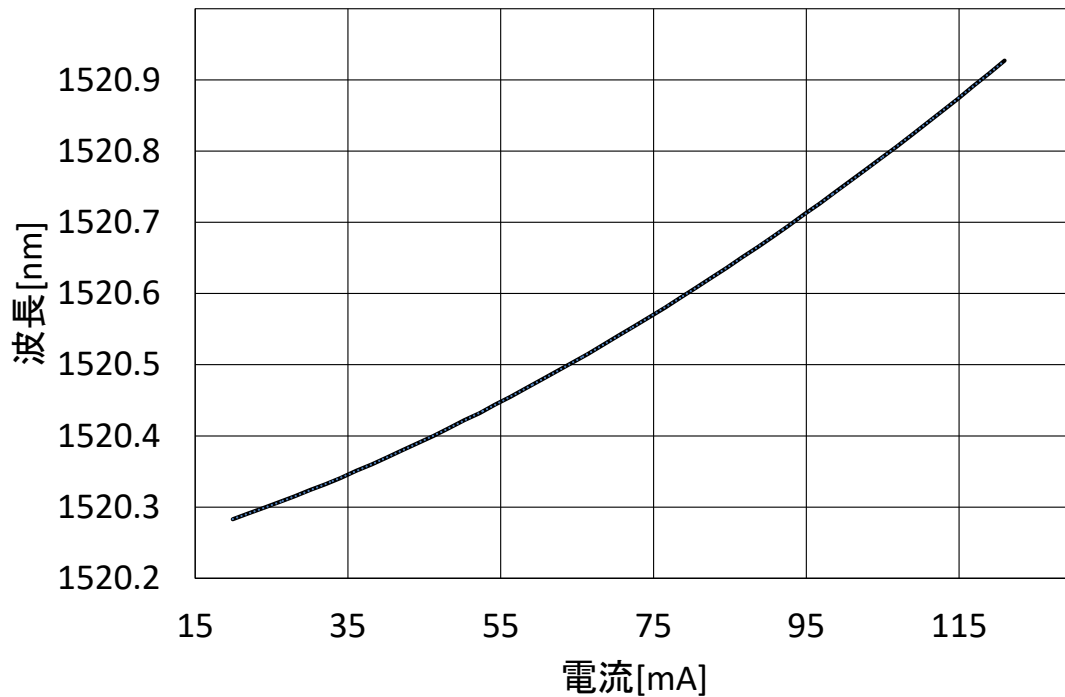


図 7-1 DFB-LD の電流と波長の関係

しかし、図 7-1 は DFB-LD のバイアス電流を変調せず計測を行っている。よってバイアス電流を変調したとき、電流と波長の関係に影響を及ぼす可能性がある。そのため、第 7 章では変調周期と発振振幅における光周波数掃引幅への影響を調べる。そして、実験結果をもとに、DFB-LD に与えるバイアス電流を検討する。以下に使用機器、実験構成図、実験結果を示す。

#### 1. 使用機器

使用した機器を表 7-1 に示す。

表 7-1

品名	メーカー	型番	規格	数量
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振線幅:12MHz	1
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 $\mu$ -100MHz 高周波歪み:0.2%	1
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V $\pm$ 5% 帯域幅:0-250kHz	1
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解能:1 $\Omega$ 温度安定性:0.002度以下	1
レーザスペクトルアナライザ	EXFO	SA Plus	自由スペクトル領域:8GHz 分解能:27MHz 波長:450nm-1.8mm	1
オシロスコープ	Agilent Technologies	MOS6034A		1

## 2. 実験構成図

実験構成図を図 7-1 に示す. 任意信号発生器が与える電流として 5~50mApp, 周波数 100~1000Hz のノコギリ波を印加し, 光を出射した. レーザスペクトルアナライザを利用して光周波数掃引幅をオシロスコープで確認する.

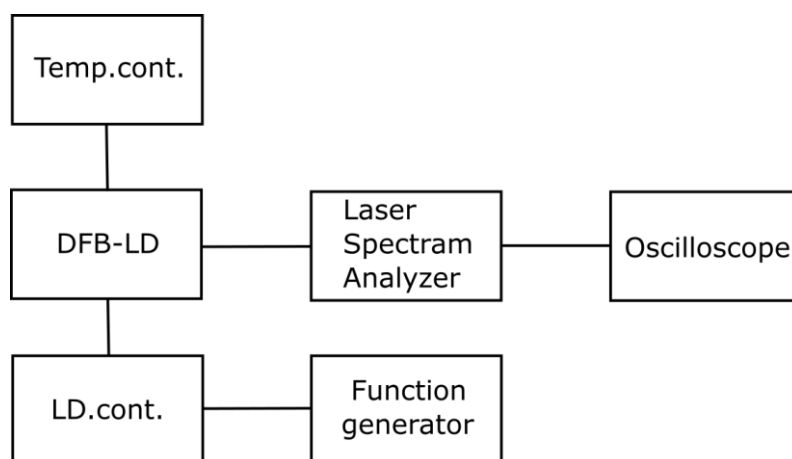


図 7-1 実験構成図

## 3. 実験結果

実験結果を図 7-2 に示す.

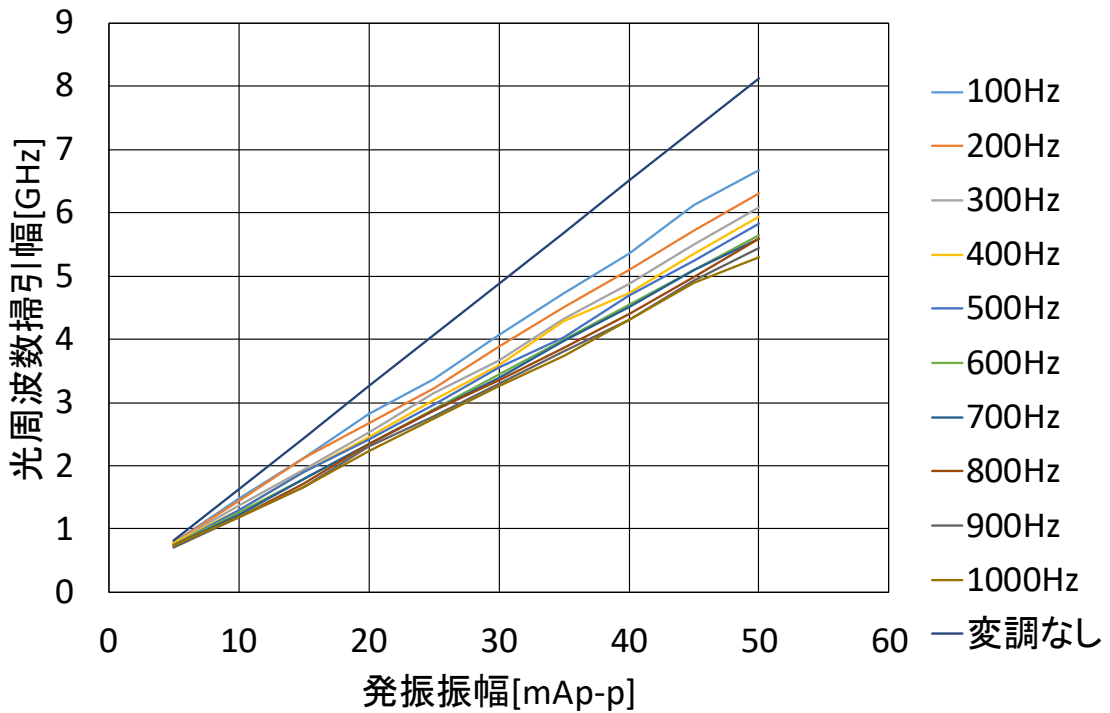


図 7-2 実験結果

この実験結果から、光周波数掃引幅は発振振幅と比例の関係にあり、周波数を大きくするほど傾きは緩やかになることがわかる。第 5 章、第 6 章の条件で DFB-LD を制御すると光周波数掃引幅を計測することができないこともわかった。しかしこの結果から、変調なしの光周波数掃引幅と実際の光周波数掃引幅は大きく異なると推測される。

## 第 8 章 第 7 章の実験結果を考慮した上での計測

本章では、第 7 章で得た結果をもとに、再度実験を行い、システムの評価を行う。以下に使用機器、実験構成図、実験結果を示す。

### 1. 使用機器

表 8-1 に使用した機器を示す。

表 8-1 使用機器

品名	メーカー	型番	規格	数量
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振線幅:12MHz	1
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 $\mu$ -100MHz 高周波歪み:0.2%	1
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V $\pm$ 5% 帯域幅:0-250kHz	1
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解能:1 $\Omega$ 温度安定性:0.002度以下	1
フォトダイオード	THORLABS	PDA20S-EC	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14mm <sup>2</sup>	1
光ファイバ	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:2m,5m 屈折率:1.4682	4
光ファイバカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50	2
3パドル型偏光コントローラ	THORLABS	FPC561	波長:1260-1625nm 長さ:5m	1
可変光ファイバ減衰器	THORLABS	VOA50-APC	波長:1310-1550nm 減衰範囲:1.5-50dB	1
USBオシロスコープ	Pico Technology	Picoscope 4223		1

## 2. 実験構成図

実験構成図を図 8-1 に示す。第 5 章で行った実験構成図と同様のものを使用した。電流として 55mA~65mA, 周期 10msec のノコギリ波を印加し, DFB-LD の光周波数掃引幅は 6.679GHz であった。

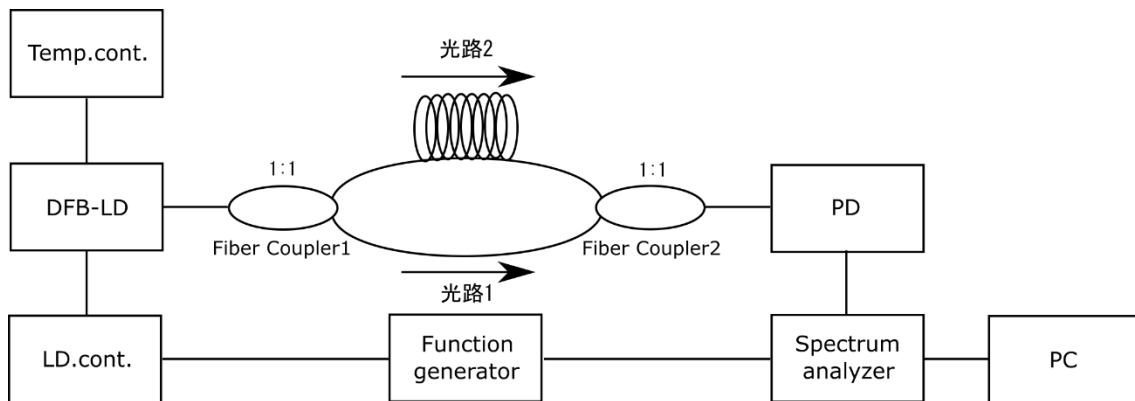


図 8-1 実験構成図

### 3. 実験結果

図 8-2 に測定結果を示す.

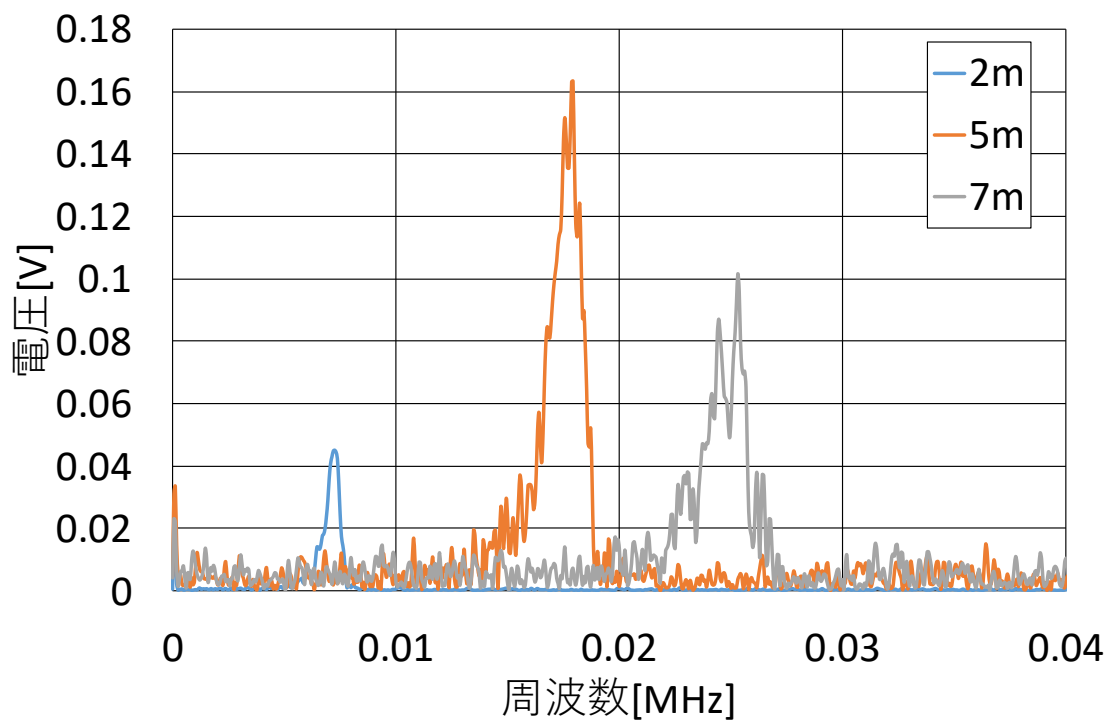


図 8-2 測定結果

バイアス電流を変化させても、ビートは発生し、スペクトル線幅は光路長差に伴い大き

くることがわかった。理論式(4.6)より光路長差を導出する。図 8-3 に光路長差と計算結果の関係を示す。

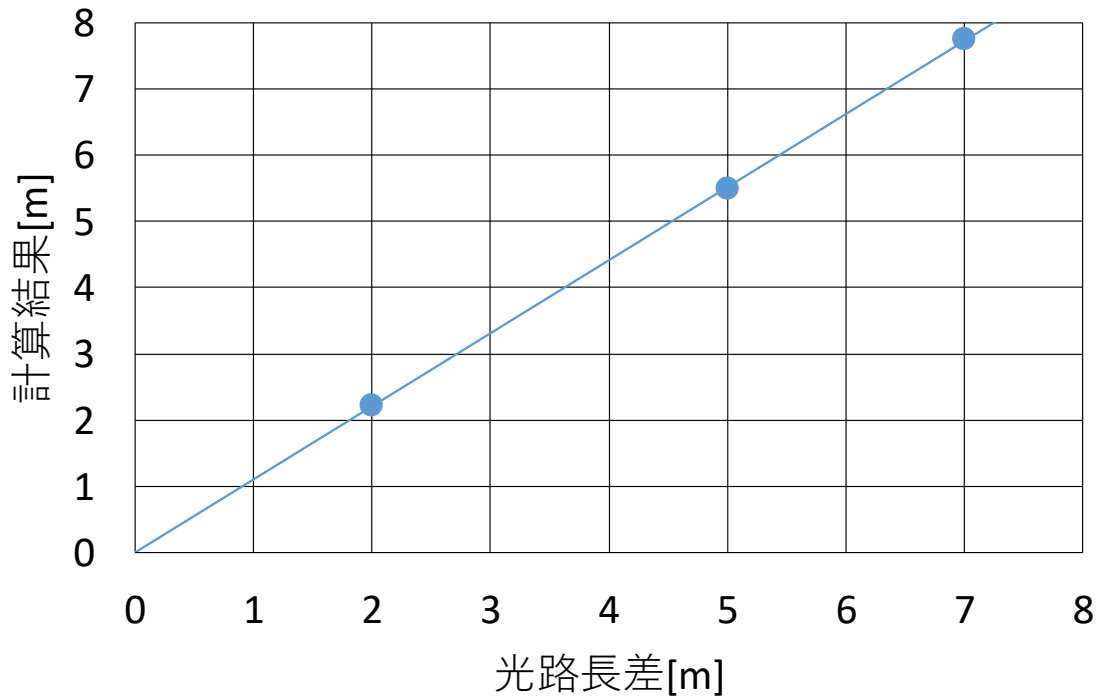


図 8-3 光路長差と計算結果

光路長差と計算結果が比例の関係にあることが読みとれる。そして、今までの計算結果と比較して、精度は上がったことが確認できる。

## 第 9 章 まとめ

### 1. まとめ及び考察

本研究ではマルチパスセル内の光路長計測を目的としたシステムの構築を行った。ビート周波数と光路長差は比例の関係にあり、強度の変化は測定に影響しないことが分かった。

理論的には長距離の測定が可能であるが、マルチパスセルから出射後、レンズによる集光が必要である。そして、光路長差に伴いスペクトル線幅も大きくなり空間分解能が劣化することがわかった。マルチパスセル内の光路長の計測には空間分解能の改善必要であることもわかった。

## 謝辞

本研究に際して、国立高等専門学校 由井四海准教授に多くのご指導をいただきました。心より深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1]: 谷川千絵, 半導体レーザーの第二高調波光による波長変調分光測定における残余強度変調に関する研究, 富山高等専門学校制御情報システム工学専攻, 2016 年
- [2]: (株)キーエンス, レーザ式レベルセンサ,  
<https://www.keyence.co.jp/ss/process/levelsensorjuku/type/laser/>
- [3]: 吉澤徹・瀬田勝男, 1994 年, 光ヘテロダイン術, (株)新技術コミュニケーションズ, 全 208 ページ
- [4]: 清水忠雄, 1992 年, レーザ入門, (株)森北出版, 全 302 ページ
- [5]: 平田照二, 2001 年, わかる 半導体レーザーの基礎と応用, 全 215 ページ

[6]: 飯島徹穂, 2004 年, レーザ光のおはなし, 財団法人日本規格協会, 全 148 ページ

[7]: ソーラボジャパン総合カタログ, Vol 21

[8](株)小野測距, FFT アナライザについて, <https://www.onosokki.co.jp/HP->

WK/c\_support/newreport/analyzer/

[9]: 藤本品, 2013 年, 基礎 光エレクトロニクス, (株)森北出版, 45 ページ

[10]: 鷺塚達也・飯山宏一, FMCW 光距離センサシステムの長距離測定化への検討, 電気

関係学会北陸支部連合大会, 2015 年, H-8