

平成 27 年度  
卒業研究報告

研究題目

波長変調分光法における  
干渉ノイズの空間特性

指導教員 由井四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

大井彩香

平成 28 年 2 月 24 日提出

## 目次

<b>第 1 章 序章</b> .....	3
<b>第 2 章 先行研究</b> .....	4
2.1 干渉.....	4
2.1.1 光の干渉.....	4
2.1.2 干渉ノイズ.....	5
2.2 実験内容.....	6
2.2.1 実験方法.....	6
2.2.2 実験構成図.....	7
2.3 実験結果.....	7
2.4 干渉ノイズの低減.....	8
<b>第 3 章 予備実験</b> .....	10
3.1 実験内容.....	10
3.1.1 実験構成図.....	10
3.1.2 実験構成機器.....	11
3.1.3 実験方法.....	11
3.2 実験結果.....	12
3.2.1 PPLN の温度変化による計測結果.....	12
3.2.2 LD の温度変化による計測結果.....	13
3.3 干渉ノイズの低減.....	14
3.3.1 PPLN の温度変化による干渉ノイズ.....	14
3.3.2 LD の温度変化による干渉ノイズ.....	16
<b>第 4 章 空間特性</b> .....	17
4.1 実験内容.....	17
4.1.1 実験構成図.....	17
4.1.1 実験構成機器.....	18

4.1.1 実験方法 .....	18
4.1 実験結果.....	20
4.1.1 干渉ノイズの周期.....	21
4.1.1 干渉ノイズの位相.....	22
<b>第5章 まとめ .....</b>	<b>26</b>
謝辞.....	27
参考文献 .....	27

## 第1章 序章

近年,地球温暖化現象が問題視され、温暖化の原因である大気中の二酸化炭素やメタンといった温室効果ガスの削減など、防止対策が国際的に取り組まれている。その対策の一つとして、燃焼技術の向上が挙げられる。最適な燃焼制御のために、ガスの現状を把握し、燃焼の効率化を図る必要がある。ガス濃度をリアルタイムで計測する方法として、波長変調分光法がある。波長変調分光法における計測では、レーザーを使うことで、光路中で光が干渉し、計測結果がその影響を受けてしまう[1]。計測の高感度化のために、干渉ノイズを減らす必要がある。

本研究では、計測の際に発生する干渉ノイズの原理やその特性を理解し、干渉ノイズを低減させる方法について研究を行う。

## 第2章 先行研究

昨年までの研究では、光路中に入れた窓板を傾けることで反射面間距離を変化させ、干渉ノイズの変化を確認した。その結果から干渉ノイズを低減させる方法を検討した。以下に、その実験内容と結果を述べる。

### 2.1 干渉

#### 2.1.1 光の干渉

光の干渉とは、光波が2つ以上存在しているときに、お互いの光の振幅を強めあったり弱めあったりすることをいう。光の干渉は、1つの光源でも、光学素子において反射が繰り返されることで、光波が増えることにより生じる。具体的に干渉が起こる場所は、素子と素子のつなぎ目や2つの異なる物質の境界面である。今回の計測の場合、空気とガラスの境界面で生じる。共振条件は、 $L=n \cdot \lambda / 2$  である ( $L$ : 反射点距離、 $n$ : 整数、 $\lambda$ : 波長)[2]。

光の干渉は、互いに同位相の光では、互いに強め合って干渉する(図1参照)。

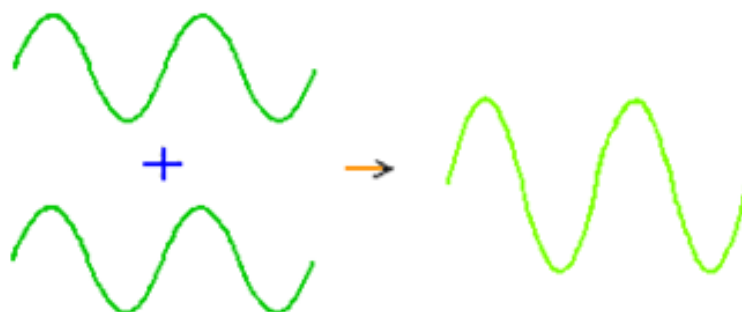


図 1 強め合って干渉した図

また、互いに逆位相の光では相殺的に干渉する(図2参照)。

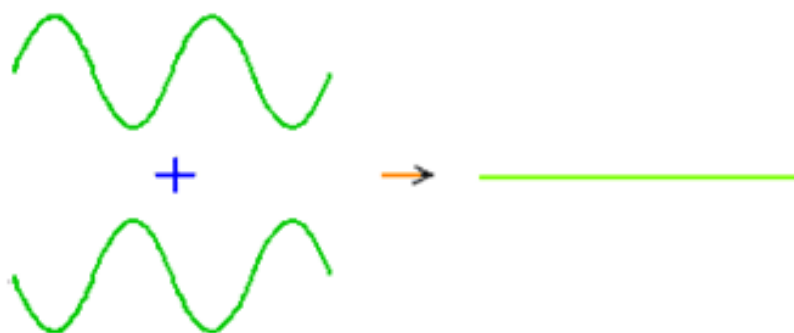


図2 相殺的に干渉した図

### 2.1.2 干渉ノイズ

光の干渉により発生するノイズを干渉ノイズという。干渉ノイズは、どこで発生しているか特定できず、無くすことはできないものである。また、周期が一定であることも知られている。

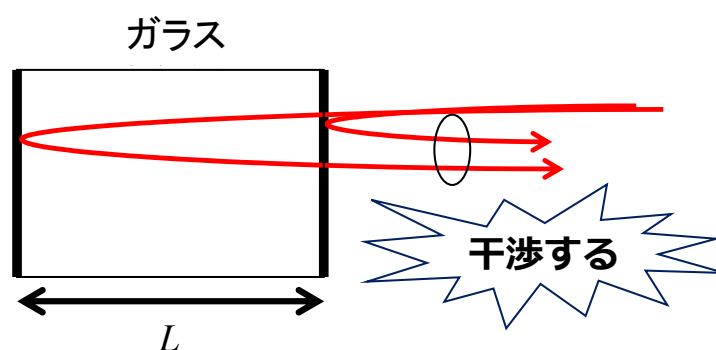


図3 干渉

レーザー光をガラスに通すことで、反射する光、屈折する光、通り抜ける光が存在する。

その光路差、周期が違う光が干渉することで、干渉ノイズが発生する(図3参照)。

本研究では、光の波長を変化させ、そのときの吸収スペクトルを調べる。その際に、光が

強め合ったり弱めあったりと、干渉ノイズの影響を受けて計測した光の強度が変わってしまう。

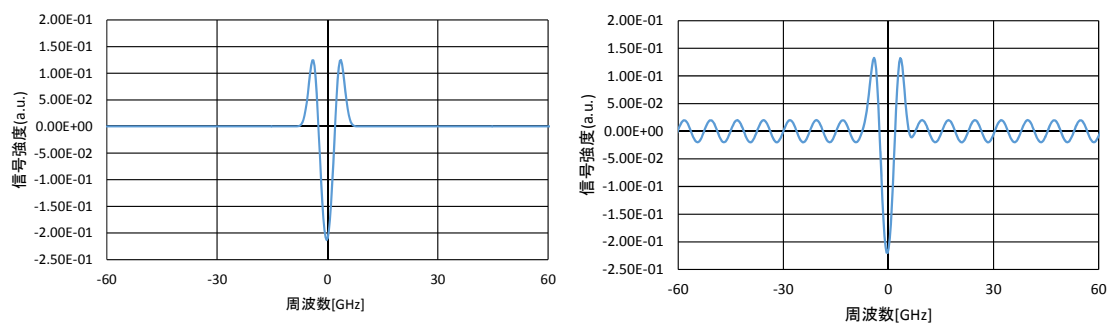


図 4 吸収スペクトル(左)と干渉ノイズがのってしまった吸収スペクトル(右)

## 2.2 実験内容

何らかの方法で、意図的に干渉ノイズを発生させる。その条件を変えることによって発生する干渉ノイズの変化を測定した。

### 2.2.1 実験方法

光路中に窓板を入れ、意図的に干渉ノイズを発生させる。窓板の角度を変えることにより、反射面間距離を変化させ、干渉ノイズの変化を測定した(図 5 参照)。

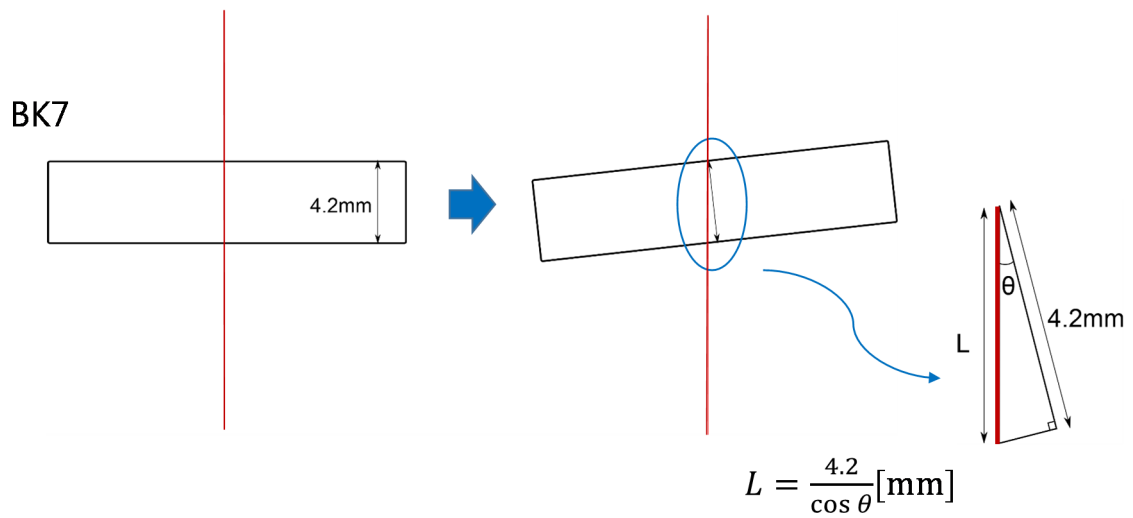


図 5 窓板を入れた計測

## 2.2.2 実験構成図

実験構成図を図 6 に示す。

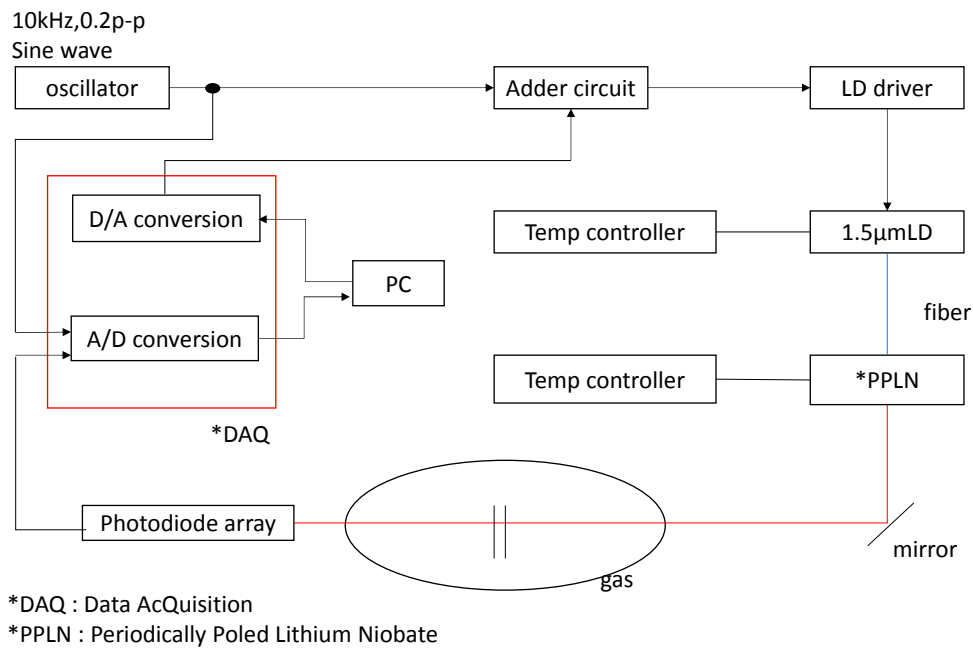


図 6 窓板を入れた計測での実験構成図



### 2.3 実験結果

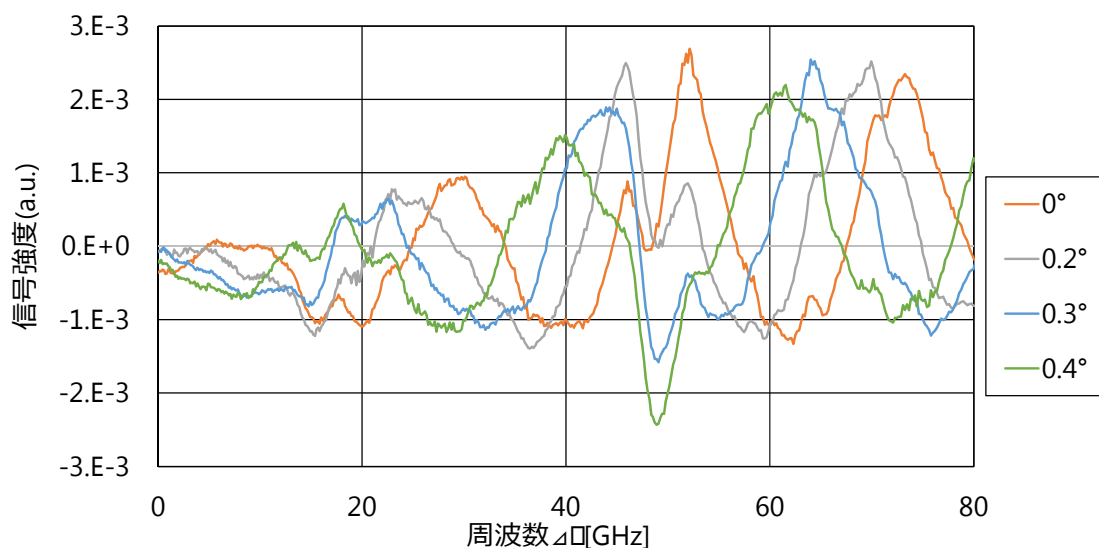


図 7 窓板を入れた計測結果

実験結果より、酸素の吸収は同じ場所で確認でき、角度を増やしていくことによって吸収の場所が左に移動していることが確認できた(図 7 参照)。また、 $0^\circ$  と  $0.4^\circ$  だけに注目すると逆相になっていることもわかる(図 8 参照)。

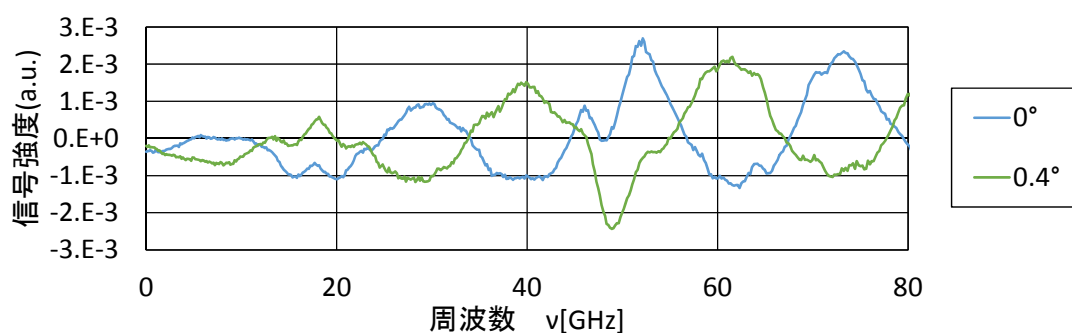


図 8 窓板の傾きが  $0^\circ$  と  $0.4^\circ$  の関係

### 2.4 干渉ノイズの低減

逆相の関係にあった  $0^\circ$  と  $0.4^\circ$  の吸収スペクトルを足し合わせることによって干渉ノイズは低減できると考えられる(図 9 参照)。

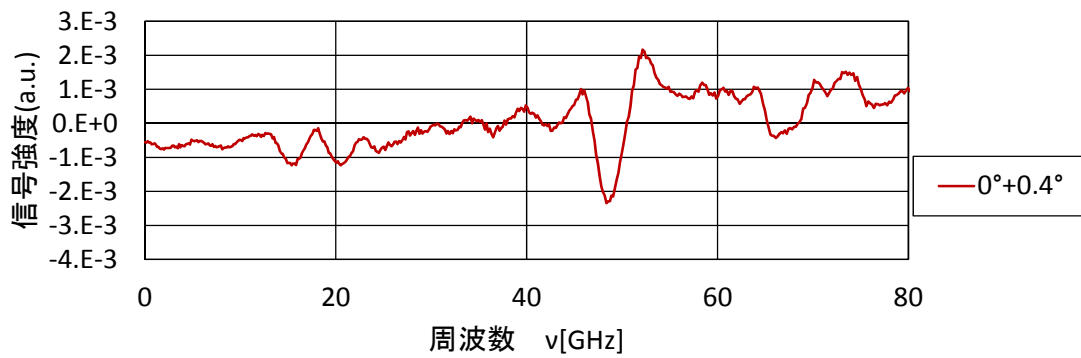


図 9 窓板の傾き( $0^\circ + 0.4^\circ$ )の吸収スペクトル

また、2つのスペクトルを足し合わせた吸収スペクトル(図 9 参照)と窓板を入れていない場合の吸収スペクトルを比較し(図 10 参照)、干渉ノイズの低減を確認することができた。

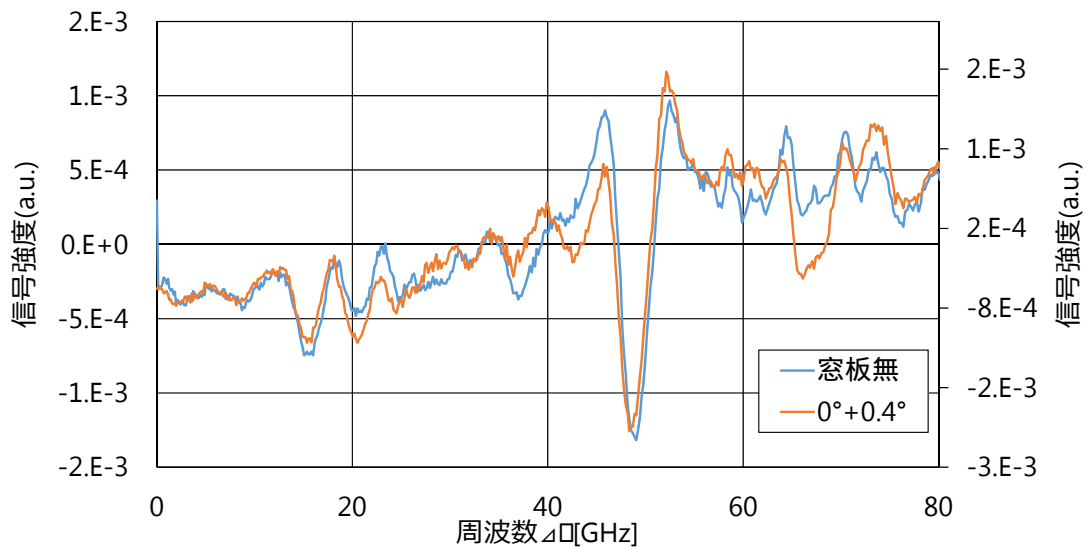


図 10 干渉ノイズ低減の確認

### 第3章 予備実験

昨年までの研究に続き、窓板を入れる方法以外で意図的に干渉ノイズを発生させる検証を行い、低減させる方法について研究を行った。

#### 3.1 実験内容

##### 3.1.1 実験構成図

実験構成図を図 11 に示す。発振器から 10kHz, 0.2Vp-p の正弦波電圧が出力される。この電圧に PC からの直流電圧が加算され、レーザーから波長 760.3271 ~ 760.4933nm の光が出力される。フォトダイオードによって光の強度が電圧に変換され、ソフトウェアロックインアンプでロックイン検波されて酸素の吸収スペクトルを計測する [3]。

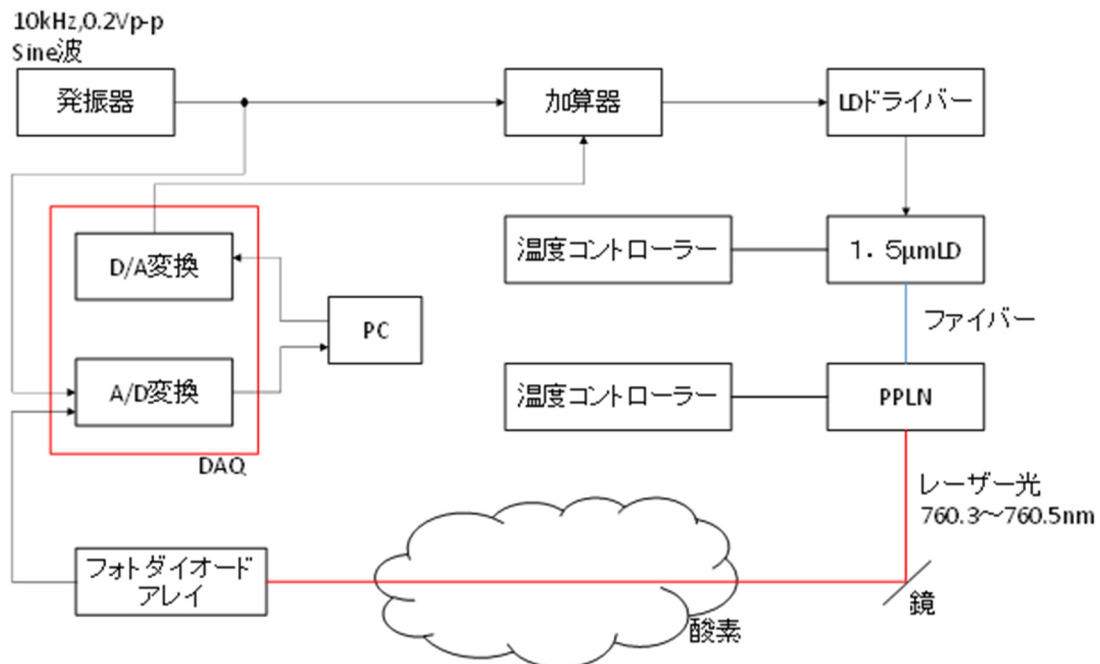


図 11 予備実験での実験構成図

### 3.1.2 実験構成機器

実験に用いた機器とその型番を表1に示す。

表 1 実験構成機器とその型番

機器	メーカー	型番
発振器	KENWOOD	FG-273
LD ドライバー	THORLABS	LDC202C
DAQ	日本ナショナルインス ルツルメンツ(株)	NI USB-6351X シリーズ DAQ 16AI 24DIO 2AO 781440-01
フォトダイオードアレイ	浜松ホトニクス	S4111-16Q

### 3.1.3 実験方法

今回の実験では、PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)の温度変化させた場合と、LD(Laser Diode)の温度変化させた場合の2つの方法で計測し、干渉ノイズの変化を検証した。PPLN とは、周期分極型ニオブ酸リチウムのことで、主に可視域での波長変換素子として用いられている。

PPLN の温度変化による計測では、44 ,46 ,48 ,50 ,53 の場合のスペクトルを計測した。LD の温度変化の計測では、31.5 ,32 ,32.5 の場合のスペクトルを計測し、干渉ノ

イズの特性を検証した。

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 PPLN の温度変化による計測結果

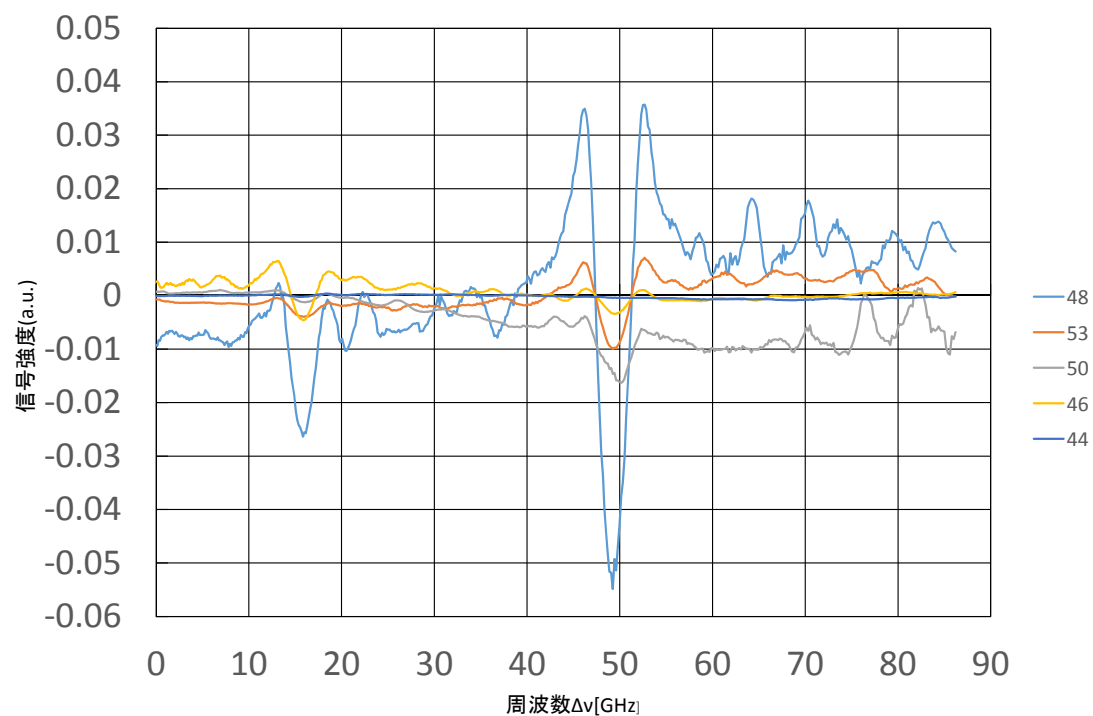


図 12 PPLN の温度変化による計測結果

図 12 は、PPLN を 44,46,48,50,53 と温度変化させて計測した結果である。全結果とも同じ場所で酸素の吸収が見られ、干渉ノイズだけずれていることがわかる。また、48 と 53 の波形に着目すると、2つのスペクトルを足し合わせることで、干渉ノイズが低減できると考えられる(図 12 参照)。

### 3.2.2 LDの温度変化による計測結果

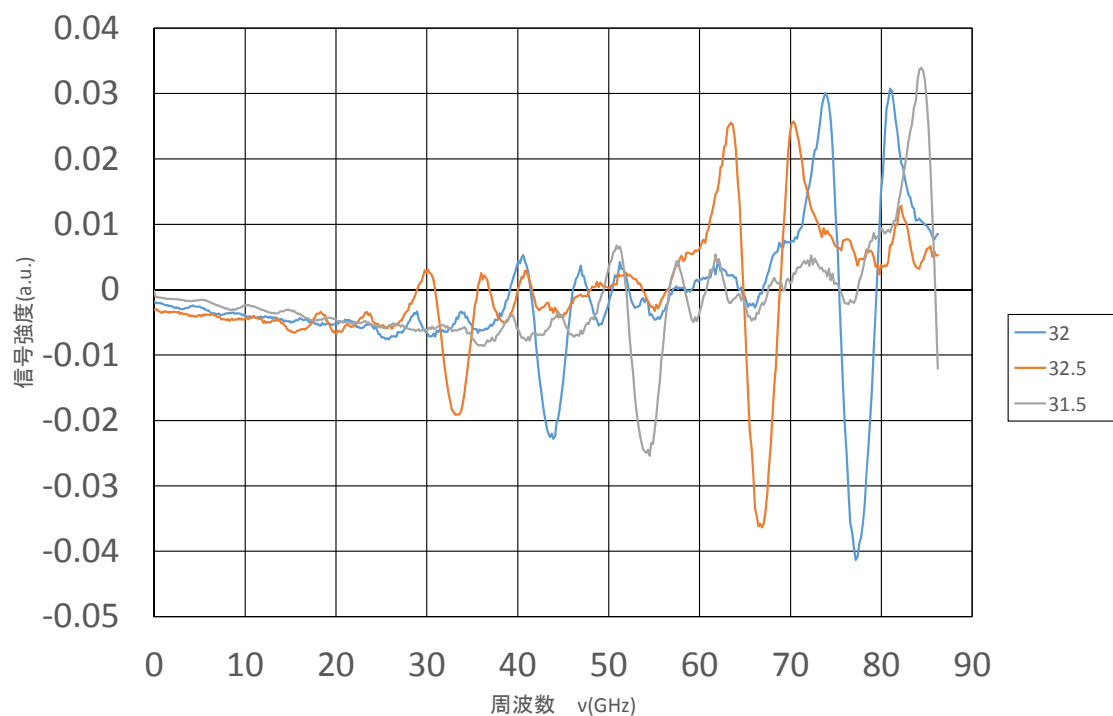


図 13 LDの温度変化による計測結果

図 13 は、LD の温度を  $32 \pm 0.5$  で測定した結果である。酸素の吸収場所がずれていくことから LD から見る吸収の場所が左右に移動して見えることがわかった(図 13 参照)。また、結果より、逆相の干渉ノイズを得ることはできなかった。

### 3.3 干渉ノイズの低減

#### 3.3.1 PPLN の温度変化による干渉ノイズ

PPLN の温度を変化させた計測結果から 48 と 53 で計測したときの吸収スペクトルを規格化し、図 14 に示す。これより、48 と 53 のスペクトルが逆相であることがわかり、足し合わせることによって干渉ノイズの低減が可能か検証した。

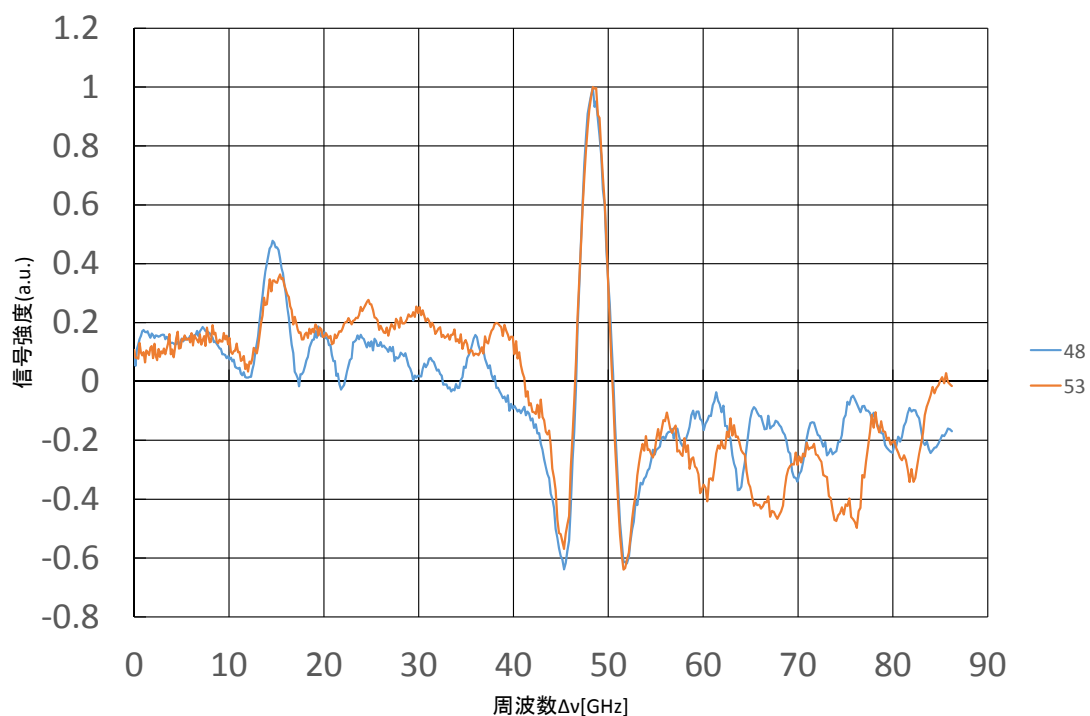


図 14 吸収スペクトルの規格化

2つの吸収スペクトル(48 と 53 で測定したときの吸収スペクトル)と、その2つのスペクトルを足し合わせたものを図 15 に示す。逆相の関係にある2つの吸収スペクトルを足し合わせることによって干渉ノイズを低減することができた。

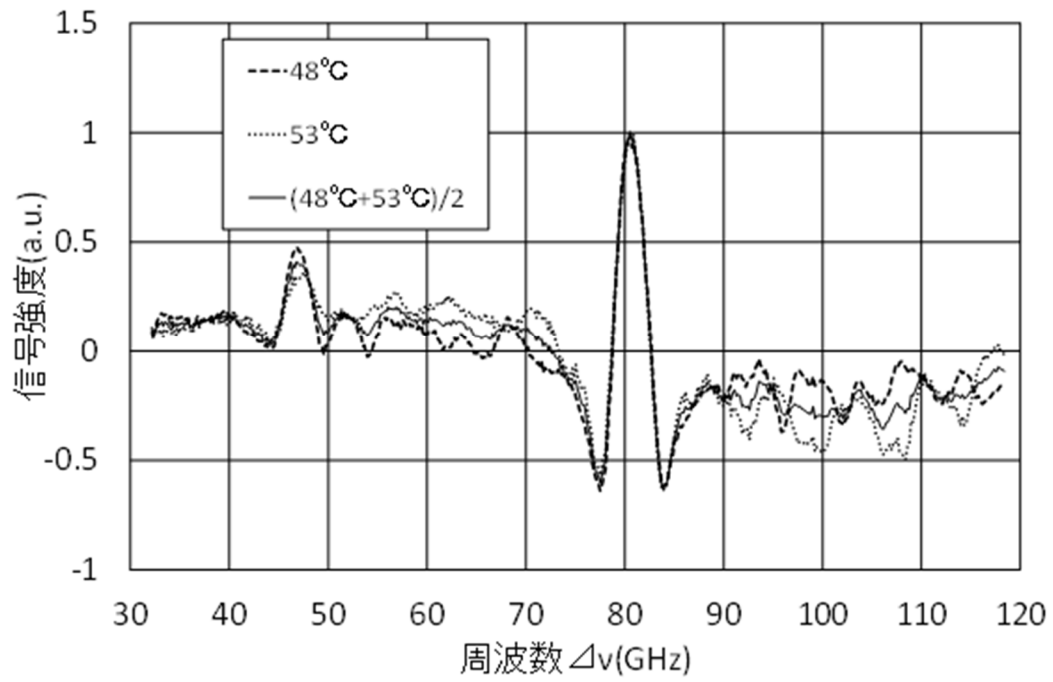


図 15 PPLN の温度変化における干渉ノイズの低減



### 3.3.2 LDの温度変化による干渉ノイズ

LDの温度変化による計測では、位相が変わるだけで干渉ノイズは変化しないことがわかった。これよりLDの温度変化によって干渉ノイズを低減させることはできなかった。

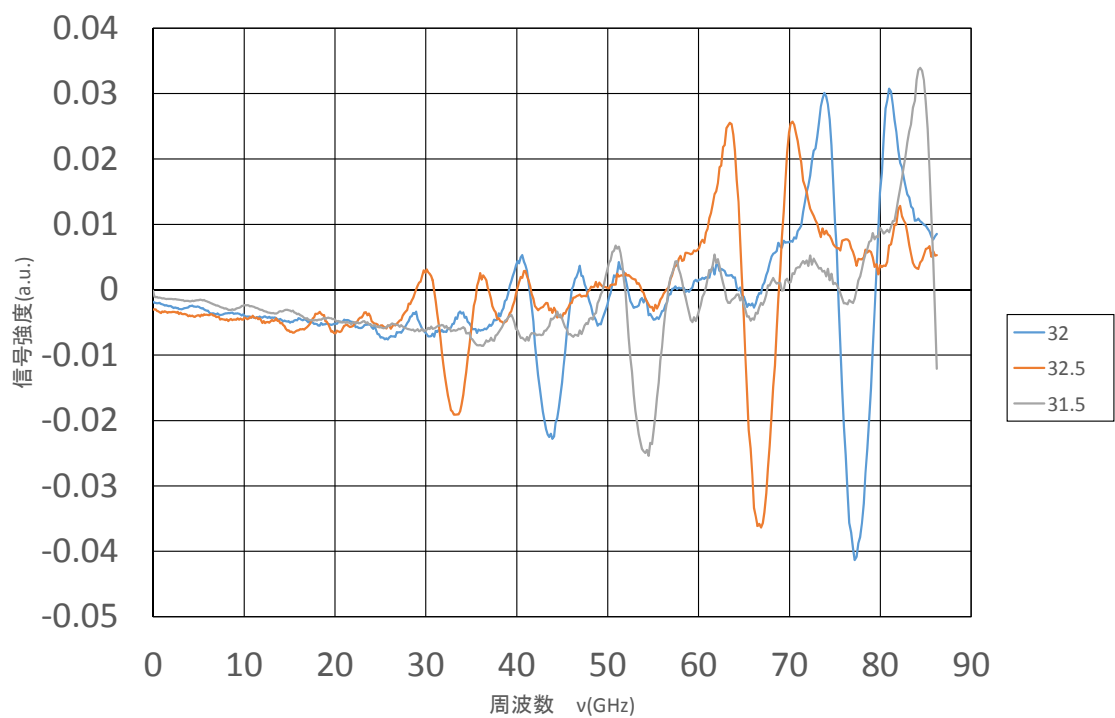


図 16 LDの温度変化における干渉ノイズの低減

## 第4章 空間特性

レーザー光の中で、光の位相に特性の違いがあるかを調べた。また、位相の異なる干渉ノイズが発生するか検証した。

### 4.1 実験内容

今回の実験では、空間的にずれた位置での光の計測を行った。その際に、干渉ノイズの周期や位相の変化を確認した。

#### 4.1.1 実験構成図

今回の実験の構成図を図 17 に示す。

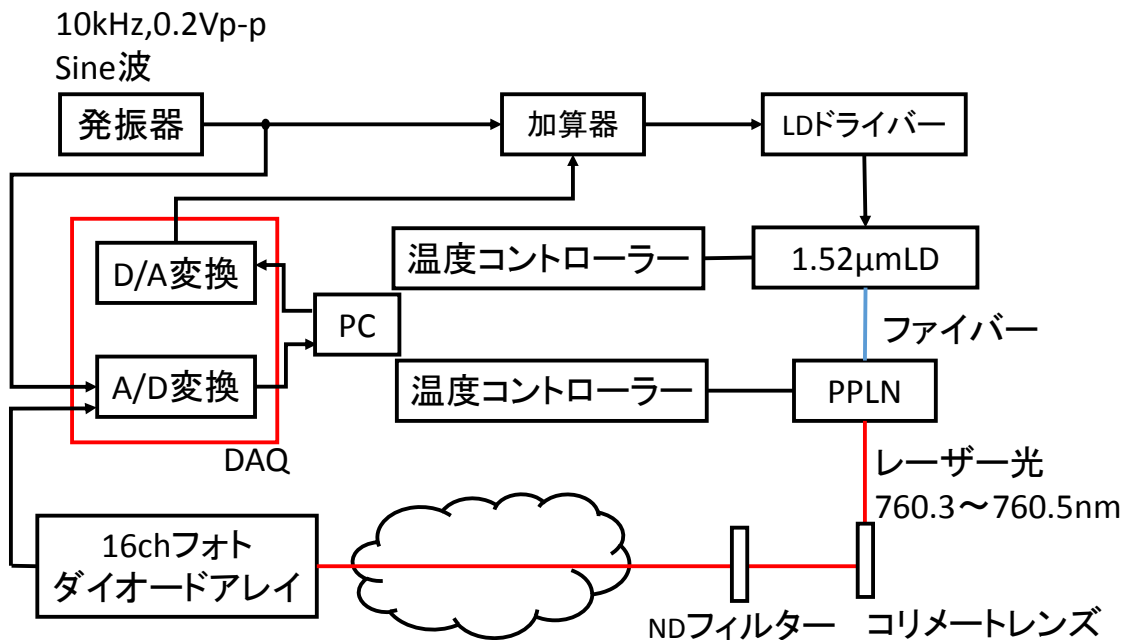


図 17 実験構成図

発振器から 10kHz、0.2Vp-p の正弦波電圧が出力される。この電圧に PC からの直流電圧が加算され、LD ドライバーによって電流に制御され、1.52  $\mu$ mLD から 1.52  $\mu$ m のレーザー光が出力される。PPLN(periodically poled lithium niobate:周期分極型ニオブ酸リチウム)で波長を半分にし、波長 760.3271 ~ 760.4933nm の光が出力される。コリメートレンズで拡がり角を調整し、ND(Neutral Density)フィルタを通して光量を 0.12 倍に調整した。フォトダイオードによって光の強度が電圧に変換され、ソフトウェアロックインアンプでロックイン検波されて酸素の吸収スペクトルを計測する。

#### 4.1.2 実験構成機器

実験構成機器については、3.1.2 に示す表 1 と同じものを使用した。

#### 4.1.3 実験方法

今回の実験では、16ch フォトダイオードに当たるレーザー光の拡がりを変えて行った(図 18 参照)。図 18(上)に示すように拡がり狭い状態から、図 18(下)に示すように拡がりを拡げていき、計測を行った。拡がりの調整は、光の拡がり角を変えることで行った。

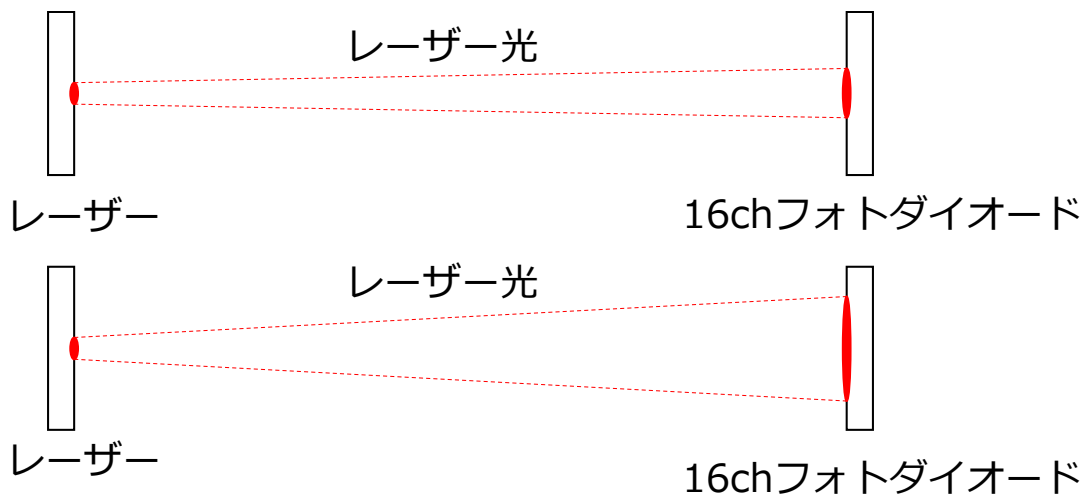


図 18 拡がり角を変えた計測

拡がり角は、ある 2 点で光の大きさ(直径)を測定し、相似の関係より、三角の隣辺(斜辺でない辺)を求め、拡がり角  $\theta$  を求める(図 19 参照)。

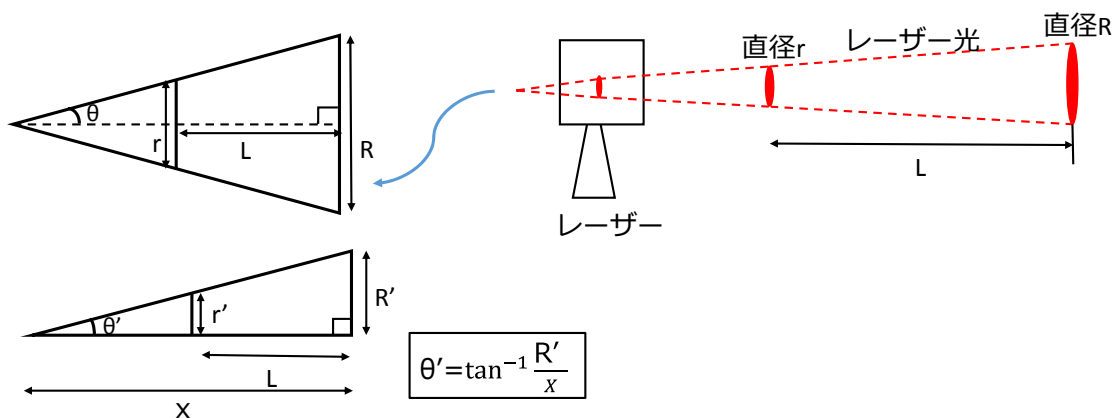


図 19 拡がり角の計算

また、16ch フォトダイオードを用いることで、空間的にずれた位置での測定を行い、位相が異なる干渉ノイズを発生させることができるか検証した。今回の計測では、ひろがり角を  $0.01^\circ$  ずつ変更した。

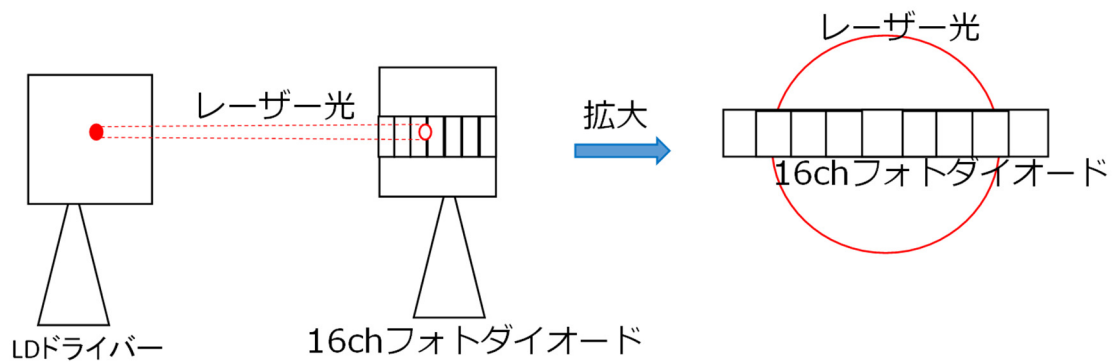


図 20 空間的にずれた位置での測定

16ch フォトダイオードのレーザ光をあてて計測を行う(図 20 参照)。その際は、いくつかのフォトダイオードにしかレーザ光は当たらない。あたっているフォトダイオードのうち、端と端など、空間的にずれた位置での計測を行った。

#### 4.2 実験結果

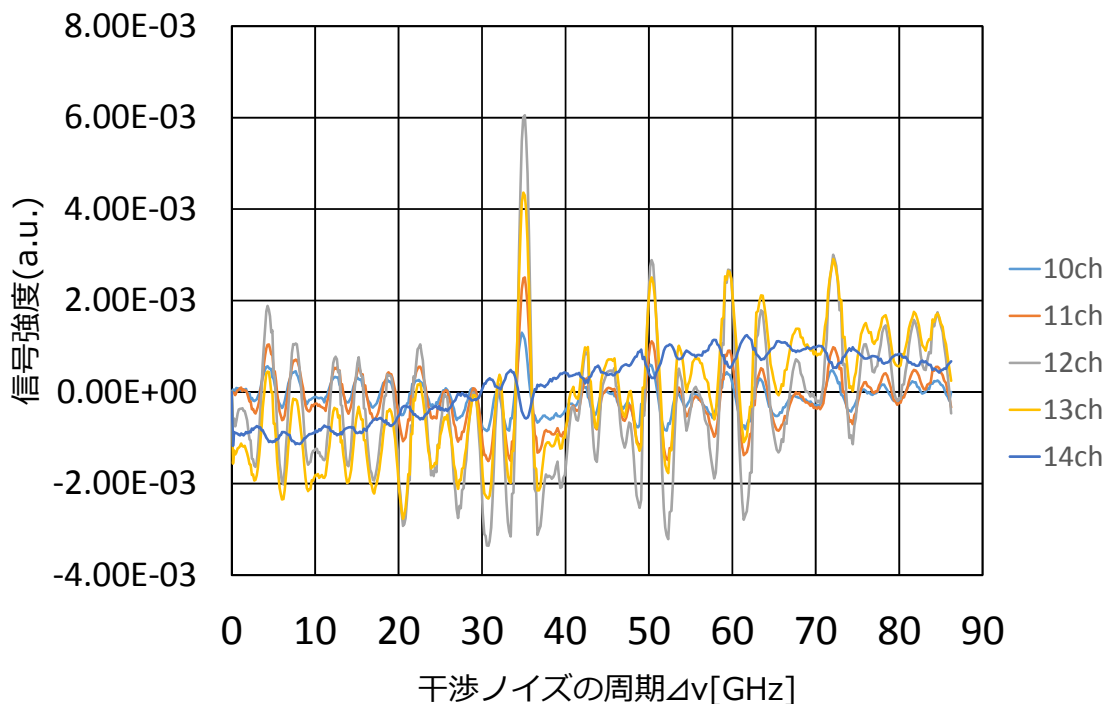


図 21 16ch フォトダイオードにおける計測結果

16ch フォトダイオードにおける計測結果を図 20 に示す。今回の計測では、16 個あるフ

フォトダイオードのうち、10～14ch にレーザー光があたっている。干渉ノイズの周期が 35GHz 程のところに着目すると、あたっている 5 つの ch すべてに、同じところで酸素の吸収が見られる。このことから、全体的に位相のずれがなく、干渉ノイズだけがずれていることが読み取れる。また、12ch の吸収スペクトルが 1 番大きいことから、レーザー光が 12ch 中心にあたっていると考えられる。

#### 4.2.1 干渉ノイズの周期

図 16 に示す計測結果をフーリエ変換し、干渉ノイズの周期の変化を確認した(図 22 参照)[4]。周期は、フーリエ変換した値の絶対値をとり、ピーク時(0.24GHz)のときを見た。

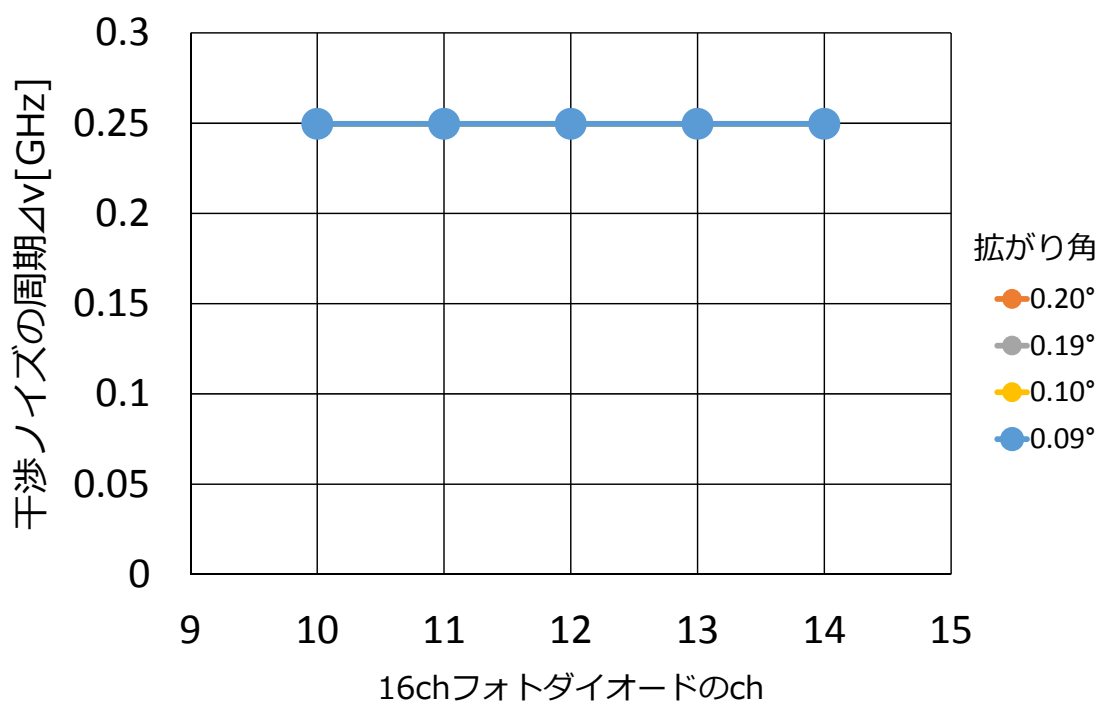


図 22 干渉ノイズの周期

図 22 は、拡がり角を変えた 4 つのグラフが重なっている図である。また、このときの分解能は、0.01GHz である。これより、干渉ノイズの周期はほぼ変わらないと判断した。

#### 4.2.2 干渉ノイズの位相

次に、干渉ノイズの位相を確認した(図 23 参照)。干渉ノイズの位相は、計測結果をフーリエ変換した値の実部と虚部の角度をとり、ピーク時(0.24GHz)のときを見た。

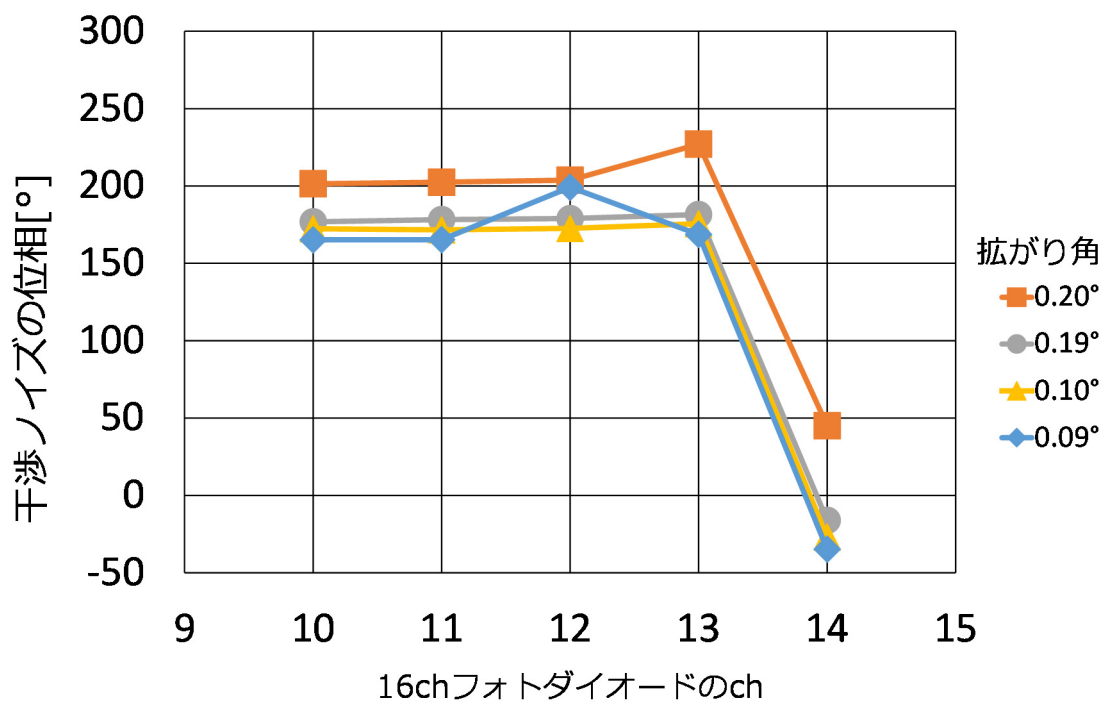


図 23 干渉ノイズの位相

図 22 より、干渉ノイズの位相は、両端の ch で異なることが読み取れる。そこで、0.20° と 0.09° のフーリエ変換前の計測結果を比較した。

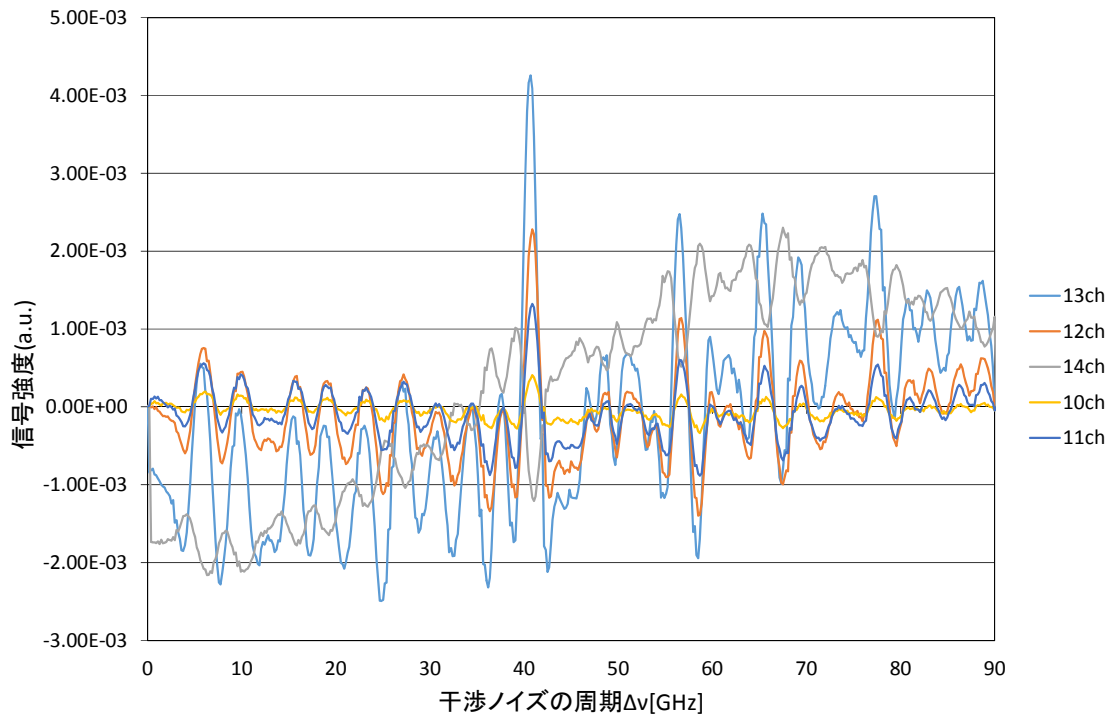


図 24 0.20° の計測結果

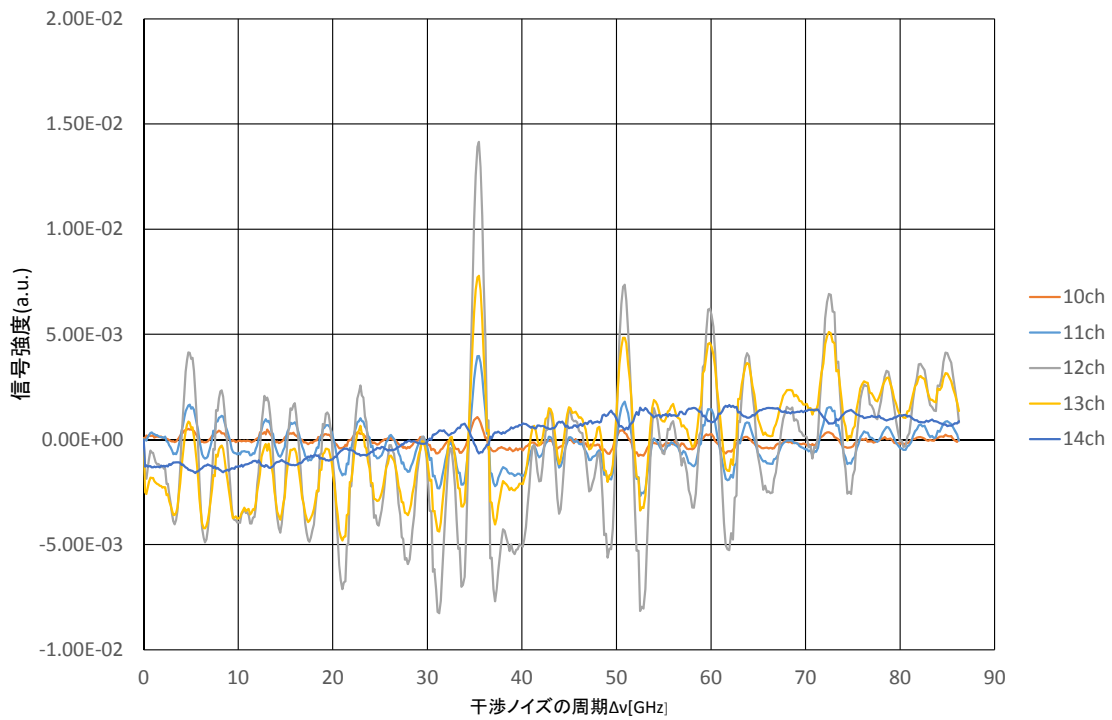


図 25 0.09° の計測結果



0.20°では、13chが1番大きいスペクトルになっている(図24参照)のに対し、0.09°では、12chが1番大きいスペクトルになっている(図25参照)ことが読み取れる。これより、拡がり角を拡げる際に、中心が12chから13chにずれてしまったと考えられる。

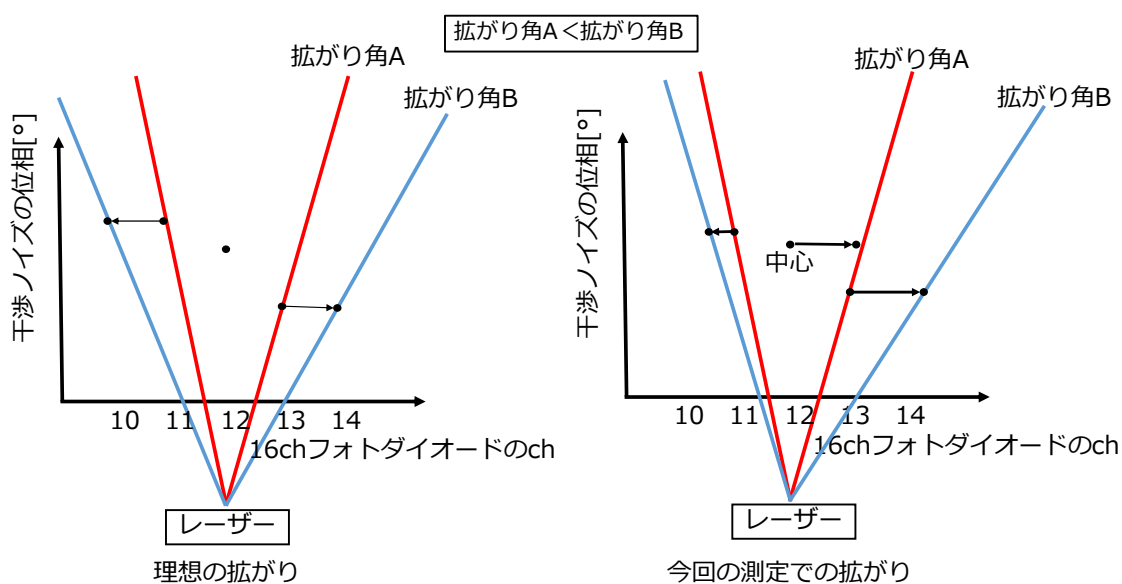


図 26 今回の計測における拡がり方

レーザー光の拡がり角を拡げる際に、図26(左)に示すように、中心がぶれずに左右対称に拡げ、測定したならば、計測結果は両端のchで位相の変化が同じであると考えられる。だが、今回の測定では12chを中心として左側は変化せず、右側が大きく変化していることが読み取れる。このことから、図26(右)に示すように、中心が右にずれ、右に大きく拡がってしまったと考えられる。この原因として、拡がり角を調節するコリメートレンズは手作業で行うため、その際にわずかに中心がずれ、拡がり方に影響したと考えられる。

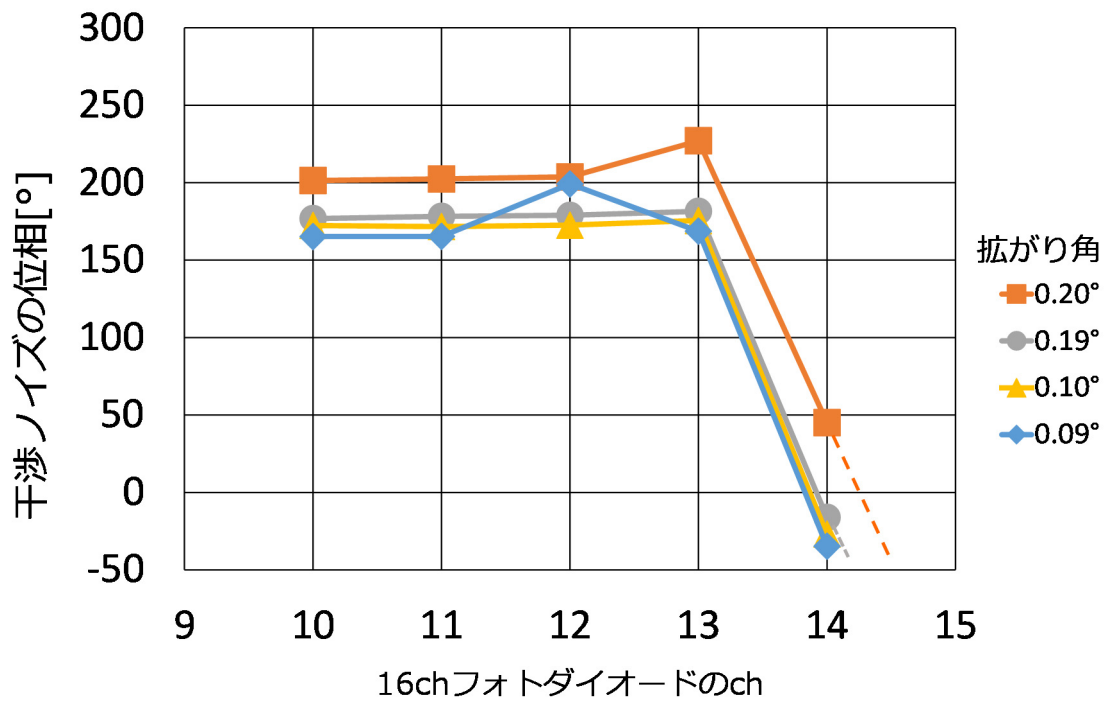


図 27 干渉ノイズの位相のずれ

そこで、今回の計測結果の中心と考えられる 12ch より右側の位相に着目した。今回の計測では、データはとれていないが、グラフの延長線上にデータがとれるならば、14ch の位相が 15ch 側に移動していると考えることができる。

## 第5章 まとめ

干渉ノイズの空間特性を調べるために拡がり角を変えて計測を行った結果、ch によって干渉ノイズの周期は変わらないことがわかった。また、干渉ノイズの位相は ch ごとに異なることがわかった。これより、同じレーザー光の中で特性に違いがあることがわかった。

同じレーザー光の中で特性に違いがあるのは、拡がり角によって 16ch フォトダイオードに当たる光路差が異なるため、周期もわずかに異なり、その積み重ねで位相も違って見えるのではないかと考える。

## 謝辞

本研究を通して 1 年間ご指導ならびに様々な経験をする機会を与えていただきました。

国立富山高等専門学校、由井四海准教授、由井研究室の専攻科生及び本科 5 年生に尽きせ

ぬ深謝の念を捧げます。

## 参考文献

[1]由井四海, 水本巖, 久世宏明, 光通信デバイスを利用した酸素ガス計測システムの開

発, 電気学会論文誌 C, Vol. 134 No. 11, 2014

[2]Amnon Yariv 光エレクトロニクス基礎編

[3] ロックインアンプ技術解説集

[4]<http://homepage1.nifty.com/gfk/fourier-transform.htm>