

平成 27 年度 修士論文  
非接触・透過型テラヘルツ波式  
温度・圧力センサーの開発

Development of terahertz non-contact and transmission type  
sensor for temperature and pressure measurement

首都大学東京大学院  
システムデザイン研究科 システムデザイン専攻  
情報通信システム学域

学修番号：14890509 駒井翔伍  
担当教授：柴田泰邦 准教授

【修論目次】

第1章 はじめに

第2章 テラヘルツ波

第3章 吸収スペクトル

第4章 テラヘルツ波式温度・気圧センサー

4.1 テラヘルツ波を用いた温度気圧センサーの強み

4.2 温度および気圧の原理

4.3 温度・圧力測定に要求される周波数分解能

4.4 テラヘルツ波発生装置

第5章 エタロンフィルタを用いた周波数精密制御法の提案

5.1 エタロンフィルタ

5.2 エタロン透過ピークを利用したテラヘルツ周波数制御法と問題点

5.3 エタロン透過の傾きを利用したテラヘルツ周波数制御法

第6章 エタロンフィルタを用いた周波数制御法の評価

6.1 エタロンの設計

6.2 エタロンの性能評価

6.3 LD 周波数の揺らぎ評価

第7章 まとめ・今後の課題

謝辞

参考文献

付録① エタロン透過率シミュレーションプログラム

付録② 温調付き LD 駆動装置制御用 AD 変換器制御プログラム

## 第1章 はじめに

近年、様々な分野でテラヘルツ波が注目されている。テラヘルツ波は光のもつ直進性と電波のもつ透過性を兼ね備えた電磁波であり、様々な物質が固有に有している透過率分布(固有スペクトル)がテラヘルツ帯に多く存在している。透過できるものの例として、プラスチック、セラミック、シリコン、木材などがあり、電波やX線を用いて出来なかった化学分析、非破壊検査などに応用が期待されている。テラヘルツ波は簡単に扱える発生源や検出器の開発が遅れていたこともあり未開の帯域となっていたが、近年その応用の広がり、品質管理、危険物の検知など多岐にわたっている。

空気中の温度や圧力を測定するセンサーとして近赤外線のレーザ光を用いて水蒸気吸収スペクトルの温度依存性を利用する方法があるが、テラヘルツ波を利用することで、光が使えない不透明容器内の温度や圧力を測定する新たな非接触温度・気圧センサーの実現が期待できる。水蒸気の吸収スペクトルは0.5~1.0THzに複数存在し、その分布は温度と圧力に依存することが知られている。そこで、先行研究においてテラヘルツ帯水蒸気スペクトルを利用した非接触計温度・気圧センサーの実現性について検討した。光の領域で分子スペクトルの吸収分布計算に用いられるVoigt関数がある。このVoigt関数がテラヘルツ帯の水蒸気吸収スペクトルに適用可能と仮定し、吸収強度が気圧変化に鈍感な周波数(気圧不動点)と非吸収周波数のテラヘルツ波の吸収量の差から温度を、この温度と吸収ピーク及び非吸収周波数のテラヘルツ波の吸収量の差から気圧を求めることが可能であることを明らかにした。

本研究では先行研究の成果を実現するため、テラヘルツ帯水蒸気スペクトルを利用した非接触計温度・気圧センサーの開発を行なった。

第2章 テラヘルツ波

2.1.テラヘルツ波とは

テラヘルツ波とは電波と光の境界領域付近に位置する電磁波である。電磁波は波長の短いほう、つまり周波数の大きい方からγ線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、ミリ波、マイクロ波というように並んでいる。これらの性質の違いは波長の長さの違いからくる。テラヘルツ波の厳密な定義はないが、およそ0.1~10THzの周波数の電磁波のことを指すことが多い。このテラヘルツ領域の電磁波の研究は、テラヘルツ波の発生・検出が容易でなかったことなどから開発が遅れており未開拓の電磁波と呼ばれてきた。しかし最近になって発生・検出の研究開発が急速に進展し、テラヘルツ波を用いて物理、化学、生物などの基礎化学分野への応用はもとより、産業分野への応用も見えてきている。

表 1. 波長、周波数領域の分類

領域	分類	波長	周波数(Hz)	周波数( $\text{cm}^{-1}$ )
赤外	近赤外	$0.75\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$	400~120 THz	$13,333\sim 4,000\text{ cm}^{-1}$
	中赤外	$2.5\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$	120~12 THz	$4,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$
	遠赤外 (サブミリ波)	$25\mu\text{m}\sim 1\text{ mm}$ ( $0.1\sim 1\text{ mm}$ )	12~0.3 THz (3~0.3 THz)	$400\sim 10\text{ cm}^{-1}$ ( $100\sim 10\text{ cm}^{-1}$ )
マイクロ波	ミリ波	1~10 mm	300~30 GHz	$100\sim 10\text{ cm}^{-1}$

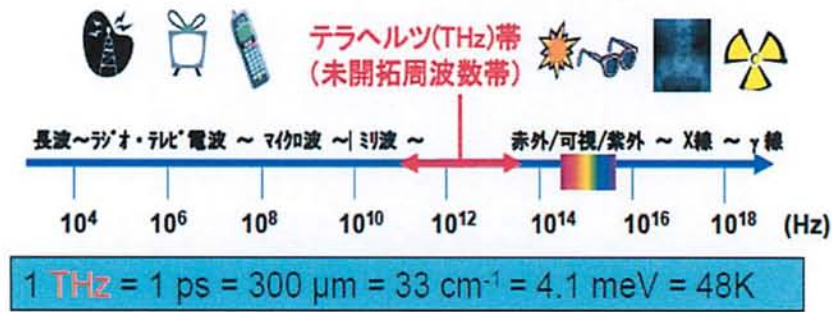


図 1.1 電磁波の周波数スケールにおけるテラヘルツ帯および関連する単位[1]





## 2.2. テラヘルツ波の強み

テラヘルツ波は光と電波の境界領域の電磁波なので、以下のような特徴がある。

- 光のもつ直進性
- 電波のもつ透過性
- X線よりエネルギーが小さく、人体に安全
- 多くの物質がテラヘルツ領域に固有スペクトルを有している

これまでの研究から、テラヘルツ波は金属以外のいろいろな物質に対して比較的透過しやすいことがわかってきている。例をあげるとプラスチック、セラミック、シリコン(ケイ素:Si)、衣類、木材、紙、タイルなどは透過することが確認されている。

また、テラヘルツ領域には、多くの物質が固有の吸収線、いわゆる指紋スペクトルが存在しており、赤外分光のような物質の検出に応用できる。

このテラヘルツ波の透過性や物質の検出ができるということを利用すると、電波やX線を用いてできなかった化学分析や非破壊検査などに応用できる。具体例をあげると、半導体の電気特性の非接触評価、ポリマーやナノコンポジットの誘電率の評価、医薬品の品質評価、美術品・文化財の調査、製造ラインにおける品質管理、建築物の診断、危険物の検知、災害現場での危険ガスの検知、生体分子分光、バイオセンシング、がんの判別などである。

## 第3章 吸収スペクトル

光や電波が物質を透過する際、ある周波数領域で吸収される。この領域は物質によって固有である。そのため、連続的な波長で物質に光を当て、通過量を計測することで透過率分布を得ると、それらは物質によって固有のスペクトルを描く。吸収スペクトルとは物質固有の透過率分布のことである。

吸収スペクトルは物質固有の形状なため、物質の特定に応用できる。

物質の透過率は吸収断面積  $\sigma$  を用いて以下の式に変形することができる。

$$\tau = \exp(-\sigma[m^2] \times n_{H_2O}[\text{個}/m^3] \times x[m]) \quad (3.1)$$

ここで、 $x$ は経路長、である。 $n_{H_2O}$ は  $1m^3$ 中の水分子の個数

吸収断面積とは、気体分子による吸収の強度を表す量である。吸収断面積は光の波長や気体分子の状態によって変化する。ここでは、吸収断面積を求めるための計算式を示す。

大気中では気体分子の吸収線がスペクトル広がりを生じる。その要因として分子同士の衝突の圧力によるスペクトル広がりやドップラー効果によるスペクトル広がりが挙げられる。したがって、吸収断面積を計算するにあたり、この吸収線のスペクトル広がりを考えなければならない。吸収断面積の値は、吸収線の強度および吸収線のスペクトル広がりから決定される。

ここから、吸収断面積の導出に入る。中心波数  $\nu_0[cm^{-1}]$  とすると、この吸収線のスペクトル広がり、は、気温と気圧によって変化する。この吸収線のスペクトル広がりによる波数  $\nu[cm^{-1}]$ での吸収断面積は次の式で表せる。

$$\sigma = S \times F \quad (3.2)$$

ここで、 $\sigma[cm^2]$ は吸収断面積、 $S[cm^{-1}/(\text{molecule} \cdot cm^{-2})]$ は吸収線の強度、 $F[cm]$ は吸収線のスペクトル広がりである。

### 第3章 吸収スペクトルと気圧不動点

波数は波長の逆数によって定義される量である。波数を $\nu[\text{cm}^{-1}]$ 、波長を $\lambda[\text{nm}]$ とすれば、次の関係が成り立つ。

$$\nu[\text{cm}^{-1}] = \frac{10^7}{\lambda[\text{nm}]} \quad (3.3)$$

吸収線の強度 $S[\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})]$ は以下の式で表せる。

$$S = S_{\nu_0} \left[ \frac{T_0}{T(R)} \right]^j \exp \left\{ -\frac{\epsilon}{k} \left[ \frac{1}{T(R)} - \frac{1}{T_0} \right] \right\} \quad (3.4)$$

ここで、

$T_0$  : 基準気温[K]

$S_{\nu_0}$  :  $T_0$ における吸収線強度 $[\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})]$

$\epsilon$  : 吸収に伴うエネルギー遷移の下位順位エネルギー

$T(R)$  : 高度  $R$  における気温[K]

$k$  : ボルツマン定数[J/K]

である。

吸収線の広がり  $F$  は、Voigt 関数を用いて以下の式で表せる。

$$F = \frac{y}{\beta\pi\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(t^2)}{(x-y)^2 + y^2} dt \quad (3.5)$$

ここで、

$$t = \frac{\nu^* - \nu_0}{\beta}$$

$$x = \frac{\nu - \nu_0}{\beta}$$

$$y = \frac{\gamma}{\beta}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2kT(R)\nu_0^2}{mc^2}}$$

である。



先行研究では, 0.5~1.0THz に存在する水蒸気吸収スペクトルの吸収断面積を計算した. テラヘルツ帯の水蒸気スペクトルを計算するための各パラメータは未知のものが多いが, テラヘルツ帯の吸収スペクトルとして Voigt 関数が適応できると仮定し, 参考文献[2]をもとに計算に必要な各パラメータを推定した. Fig.3.1 に文献記載の水蒸気の吸収スペクトルと、推定したパラメータを用いて再現した水蒸気の吸収スペクトルを示す. また, 推定値を Table3.1 に示す.

Table 3.1. テラヘルツ帯水蒸気吸収スペクトルのパラメータ推定値

中心周波数(THz)	$S_0[\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})]$	$\gamma_{air}[\text{cm}^{-1}/\text{atm}]$	$E''[\text{cm}^{-1}]$	$n_{air}$
0.56 (537.63 $\mu\text{m}$ )	4.5E-20	0.15	100	0.72
0.75 (397.87 $\mu\text{m}$ )	5E-20	0.1	100	0.72
0.98 (303.35 $\mu\text{m}$ )	2.7E-20	0.15	100	0.72

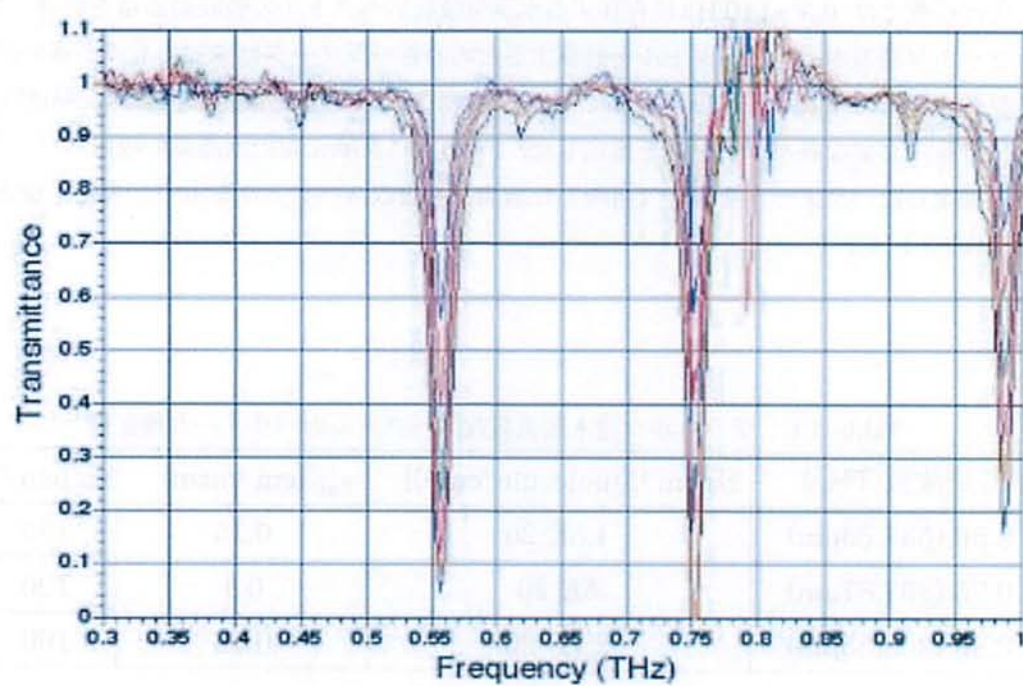


Fig.3.1 湿度ごとのテラヘルツ帯水蒸気スペクトル[2]

## 第4章 テラヘルツ波式温度・気圧センサー

### 4.1. テラヘルツ波を用いた温度・気圧センサーの強み

温度センサーおよび気圧センサーの種類と測定原理をまとめた表を table4.1, table4.2 にそれぞれ示す。

温度センサーで代表的なものを挙げると赤外線を利用したサーモグラフィがある。サーモグラフィは観測物から放射される赤外線量を測定し、温度を算出するというものである。主に観測物の表面温度分布を測定する際に用いられる。表面温度分布ではなく、サーモグラフィ同様に、1点の温度を測定する放射温度計というものもある。主に溶接部分の計測などで用いられている。これらは赤外線を用いた温度計である。なので、赤外線が使用できない場面では機能しない温度計である。

気圧センサーでは、工業用圧力計や気圧計があるが、どちらも測定原理としては、計測器自体にかかる圧力を測定するものである。つまり接触型の測定である。

ここで、テラヘルツ波を用いた温度および気圧センサーについて考えてみる。テラヘルツ波を用いた温度および気圧の測定原理としては、テラヘルツ帯水蒸気スペクトルの温度および気圧依存性を用いる。つまりテラヘルツ波を用いる。なので、テラヘルツ波の特徴である透過性を活かし、観測物付近に遮蔽物が存在しても透過することができる。これは赤外線が使用できない場面でもテラヘルツ波を用いれば温度測定可能ということである。気圧センサーについては、テラヘルツ気圧センサーでは、水蒸気スペクトルの気圧依存性を用いるので、非接触測定が可能である。

以上のことより、テラヘルツ温度・気圧センサーは非接触透過型の温度気圧センサーという新たな付加価値をもった温度・気圧センサーになる。

Table.4.1 温度センサーの種類と測定方法

	放射温度計	サーモグラフィ(熱画像装置)	テラヘルツ温度センサー
測定原理	観測物から放射される赤外線量から算出	観測物から放射される赤外線量から算出	テラヘルツ帯の水蒸気透過率分布の温度依存性から算出
測定する場所	観測点の温度(1次元)	観測物の表面温度分布(2次元)	観測物の表面および内部の温度分布(3次元)

Table.4.2 気圧センサーの種類と測定方法

	工業用圧力計(弾性圧力計)	気圧計(液柱圧力計)	テラヘルツ温度センサー
測定原理	弾性体を媒体として、その弾性体を受ける圧力を媒体の弾性変形の歪みに釣り合わせて測定	液体を媒体として、その液体を受ける圧力を液柱の重さに釣り合わせて測定	テラヘルツ帯の水蒸気透過率分布の気圧依存性から算出
測定する場所	弾性体を受ける圧力	液柱を受ける圧力	観測物の表面および内部の気圧分布(3次元)

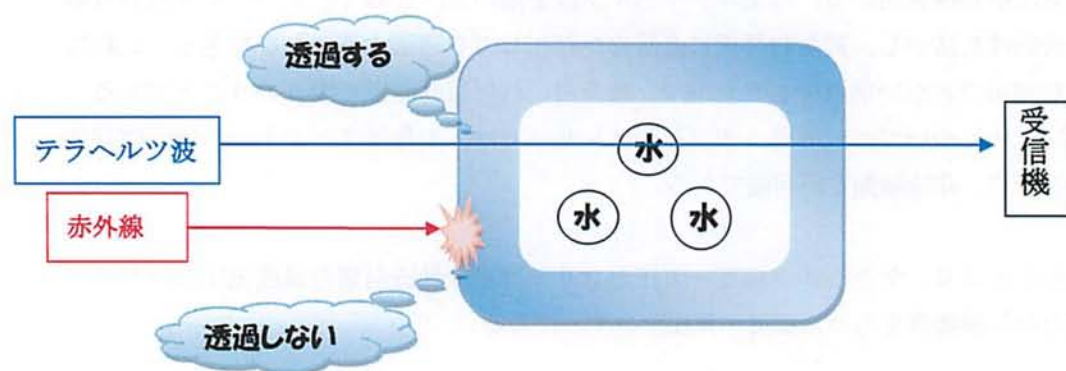


Fig.4.1.1 テラヘルツ波の透過イメージ



## 4.2. 温度および気圧の測定原理

テラヘルツ帯水蒸気透過率が, Voigt 関数適用可能と仮定して, 温度を 300K に固定し様々な気圧における水蒸気透過率分布を Fig.4.2.1 に, 気圧を 1.0atm に固定し様々な温度における水蒸気透過率分布を Fig.4.2.3 に示す.

Fig.4.2.1 において, 気圧変化に鈍感な周波数が存在することがわかる. 以降この周波数を, 気圧不動点と呼ぶことにする. Fig.4.2.3 において, 気圧不動点を見てみると, 温度によって透過率が変化していることがわかる. つまり, 気圧不動点の透過率を測定すれば, 温度を算出することができる. また, Fig.4.2.3 の透過率分布を見ると, 吸収のピーク部分では気圧によって透過率が変化していることがわかる. つまり, 温度が測定できれば吸収ピークと気圧不動点の透過率の比から気圧も算出することができる. 以上のことより, 気圧不動点の透過率分布を測定し温度を算出, 温度特定後に吸収ピークの透過率を測定し, 気圧を算出することで気圧および温度の測定が可能である. つまり, 気圧不動点と吸収ピークの透過率が測定できればいい.

本研究では, 気圧不動点を 0.751THz, 吸収ピークを 0.754THz と設定している.

気圧不動点についてだが, 気圧変化に鈍感な周波数というだけであって, 厳密には気圧変化の影響は受けている. なので, センサーとして使う場合には, 気圧不動点の決定方法も検討しなければならない.

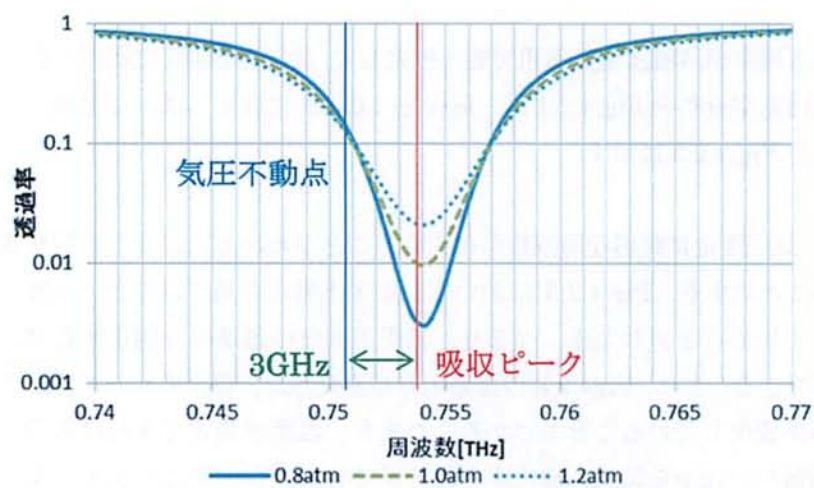


Fig.4.2.1 温度 300K に固定した様々な気圧の水蒸気スペクトル

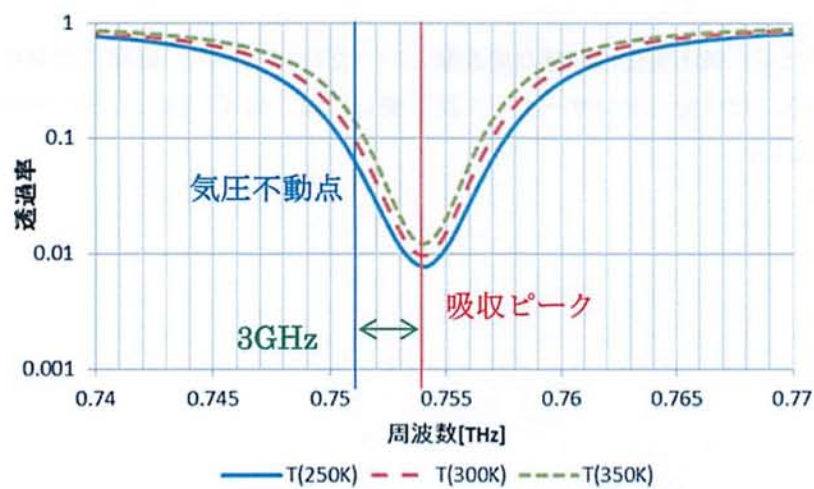


Fig.4.2.3 気圧 1.0atm に固定した様々な温度の水蒸気スペクトル

### 4.3. 温度・圧力測定に要求されるテラヘルツ周波数分解能

本研究では、水蒸気スペクトルの気圧不動点で温度を、吸収ピークで気圧を測定するので、テラヘルツ周波数分解能に対する水蒸気スペクトルの気圧不動点における温度誤差と吸収ピークにおける気圧誤差を求めたい。光路長に対するテラヘルツ帯水蒸気スペクトルの気圧不動点での温度依存性および吸収ピークでの気圧依存性 Fig.4.3.1, Fig.4.3.2 にそれぞれ示す。

本研究の透過率の計算では、湿度 20%、温度 300K のときの  $1\text{m}^3$ 中に存在する水蒸気量を  $n_{\text{H}_2\text{O}}$  としており、水蒸気量は常に  $n_{\text{H}_2\text{O}}$  で一定と仮定している。式(3.1)より、光路長の違いは水蒸気量の違いに相当する。

Fig.4.3.1 より、光路長によって水蒸気透過率の温度依存性が変化していることがわかる。つまり、温度依存性は水蒸気の量によっても変化することがわかる。

Fig.4.3.2 より、水蒸気透過率の気圧依存性についても、温度依存性同様に光路長によって変化している。

温度および気圧の測定において、光路長が変化しても温度依存性が見込めるので、その依存性を測定することができれば、温度測定は可能である。同様に Fig.4.3.2 から、気圧依存性が測定できるのであれば、気圧の測定は可能である。本研究では温度および気圧依存性が最も見込める光路長 0.4m を設定する。その時の水蒸気透過率の気圧不動点での温度依存性は 1.1%/K、水蒸気透過率の吸収ピークでの気圧依存性は 4%/atm であることがわかった。

以上のことを踏まえ、温度および圧力測定に必要な周波数分解能を求めるために、水蒸気スペクトルの周波数分解能に対する温度および気圧誤差を求める。Fig.4.3.3 に 0.74～0.77THz 付近の水蒸気スペクトルと周波数分解能  $\Delta f$  に対する透過率変化  $\Delta T$  を示す。また、Table4.3 に水蒸気スペクトルの周波数分解能  $\Delta f$  に対する温度および気圧誤差を示す。

Table4.3 より、周波数分解能が 0.025GHz の場合、0.1℃の温度誤差、0.76hPa の気圧誤差となることがわかる。市販の赤外温度センサーの温度分解能は 0.1℃なので、温度誤差については市販の赤外温度センサーと同等の精度が得られることがわかった。そこで本研究では、テラヘルツ温度・気圧センサーの性能の目標として、約 0.1℃の温度誤差、0.76hPa の気圧誤差を設定した。そのためにはテラヘルツ周波数を 0.025GHz(25MHz)の周波数分解能で制御する必要があることがわかった。

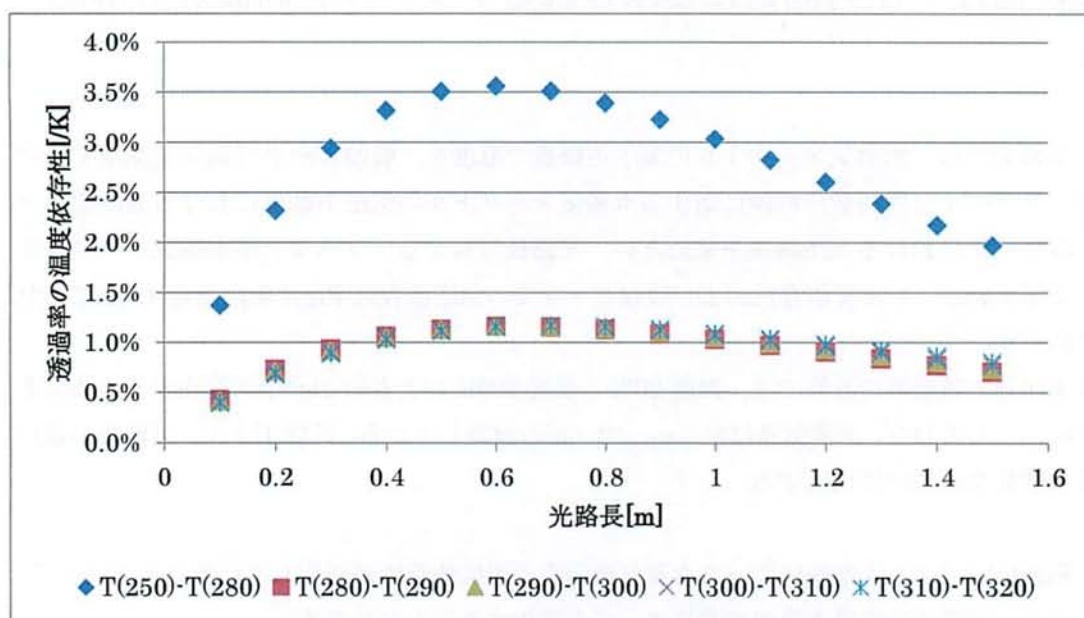


Fig.4.3.1 光路長に対する水蒸気透過率の温度依存性

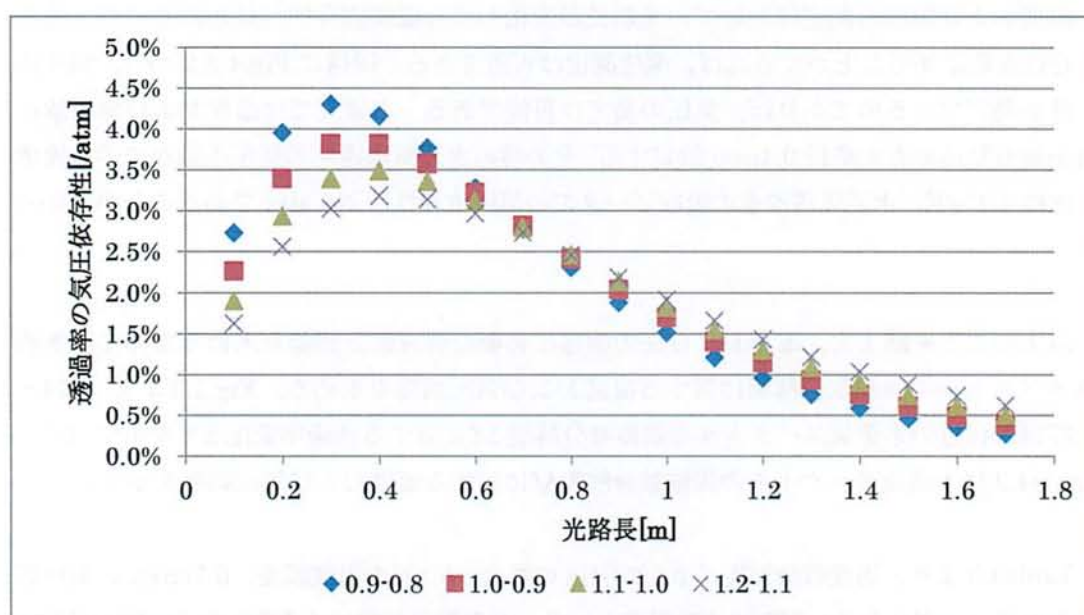


Fig.4.3.2 光路長に対する水蒸気透過率の気圧依存性



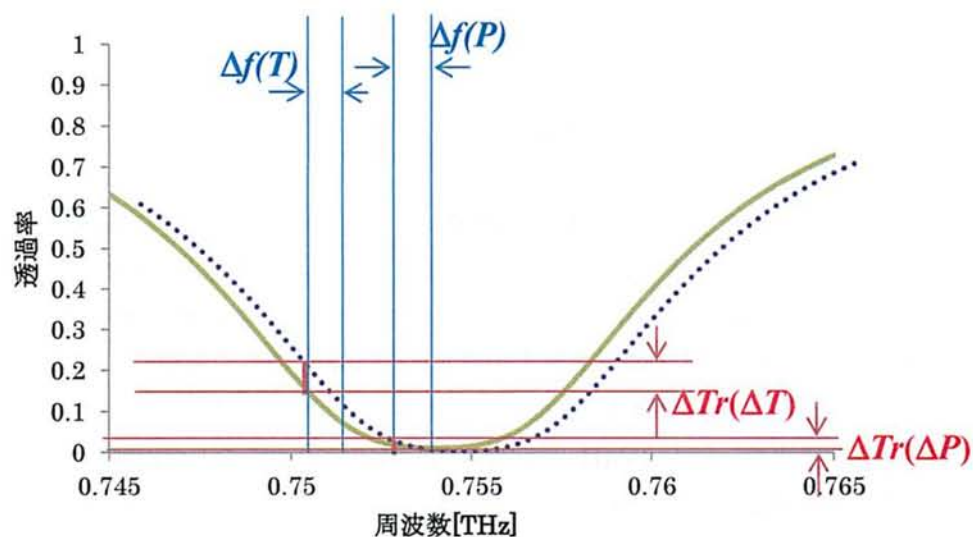


Fig. 4.3.3 0.74～0.77THz 付近の水蒸気スペクトルと  
周波数分解能  $\Delta f$  に対する透過率変化  $\Delta T$

Table 4.3 水蒸気吸収スペクトルの周波数分解能  $\Delta f$  に対する温度および気圧誤差

	気圧不動点	吸収ピーク
$\Delta f$ [GHz]	温度誤差[°C]	気圧誤差[hPa]
0.56	2.2	17.2
0.25	1	7.59
0.025	0.1	0.76

#### 4.4. テラヘルツ発生装置

テラヘルツ発生装置のブロック図を Fig.4 に示す。

テラヘルツ波の発生原理としては、2つの DFB レーザをミキシングし、差周波がテラヘルツアンテナであるフォトミキサからテラヘルツ波として発振するというものである。テラヘルツ送信アンテナからテラヘルツ受信アンテナまでの光路長は 0.41m(41cm)である。DFB レーザについては、波長 1550nm のものと波長 1546nm のものを用いる。DFB レーザは電流や温度によってレーザ周波数を安定させるが、テラヘルツセンサーの性能目標を満たすテラヘルツ周波数分解能 25MHz の精度で周波数安定させることが困難である。なので、新たな周波数制御法について検討する必要がある。

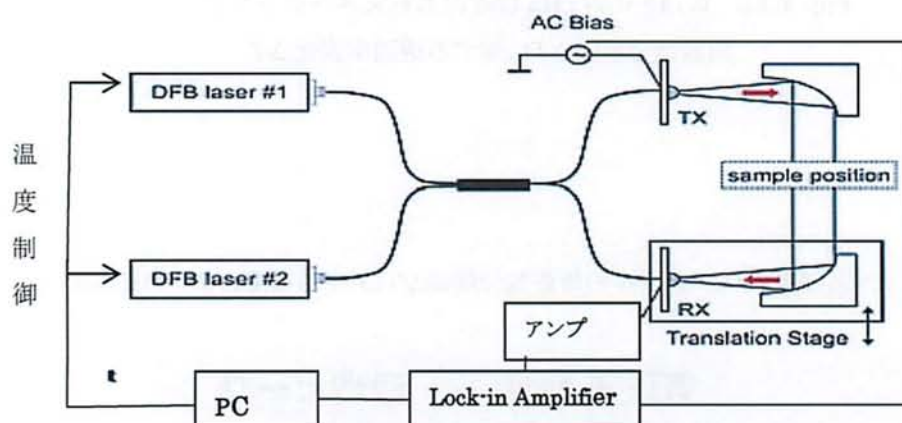


Fig. テラヘルツ発生装置

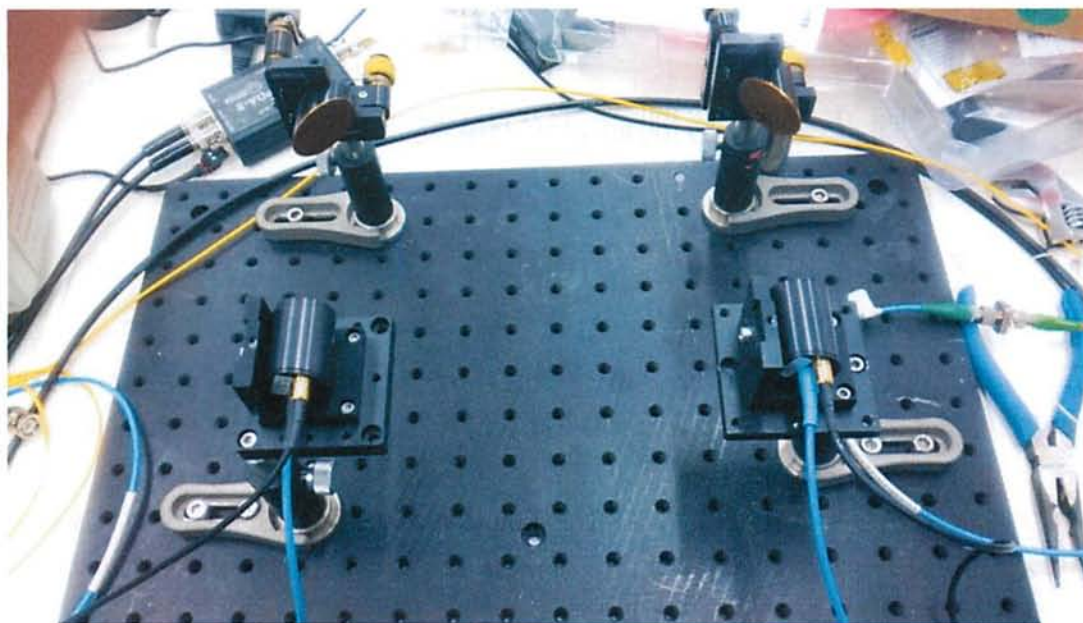


Fig. フォトミキサと集光ミラーの外観

## 第5章 エタロンフィルタを用いた 周波数精密制御法の提案

### 5.1. エタロンとは

エタロンフィルタとは、周期的な透過ピークをもった半値半幅の鋭い透過波形が得られる特徴があります。バンドパスフィルタの一種です。この特性を活かし、光通信用半導体レーザの波長モニターなどに用いられます。

エタロンの性能を表す指標として、FSR と Finess が 있습니다。FSR はエタロン透過波形における透過ピーク間の距離を表す指標、Finess はエタロン透過波形における透過ピークの鋭さを表す指標である。それぞれ以下の式で表すことができる。

- FSR (Free Spectral Range) — 共振器波数間隔  
ミラー間距離  $d$  に依存する

$$\text{FSR} = \frac{c}{2nd} \quad \dots \quad (5.1)$$

$n$ : 屈折率,  $c$ : 光速,  $d$ : ミラー間距離

- Finess (フィネス) — 通過帯域の鋭さ  
反射率  $R$  に依存する

$$\text{Finess} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad \dots \quad (5.2)$$

$R$ : 反射率

エタロンの透過率は以下の式で表されます。

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin\left(\frac{2\pi nd}{\lambda} \cos \theta\right)} \quad \dots \quad (5.3)$$

以上の式から、エタロンの性能はミラーの反射率とミラー間距離で決まることがわかる。



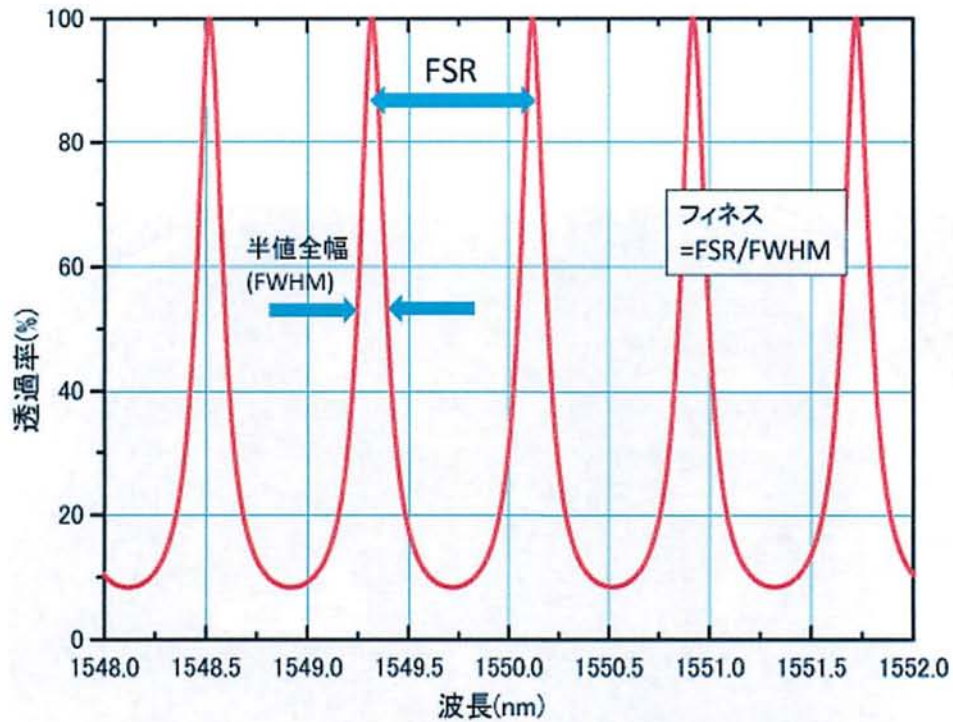


Fig.5.1 エタロンの透過波形[XX]

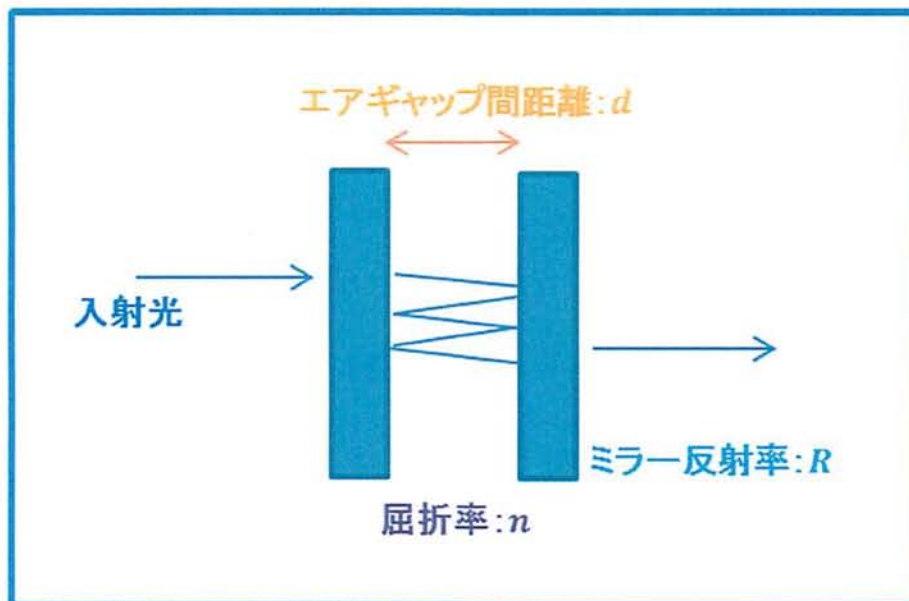


Fig.5.2 エタロンフィルタのミラーと入射光の関係

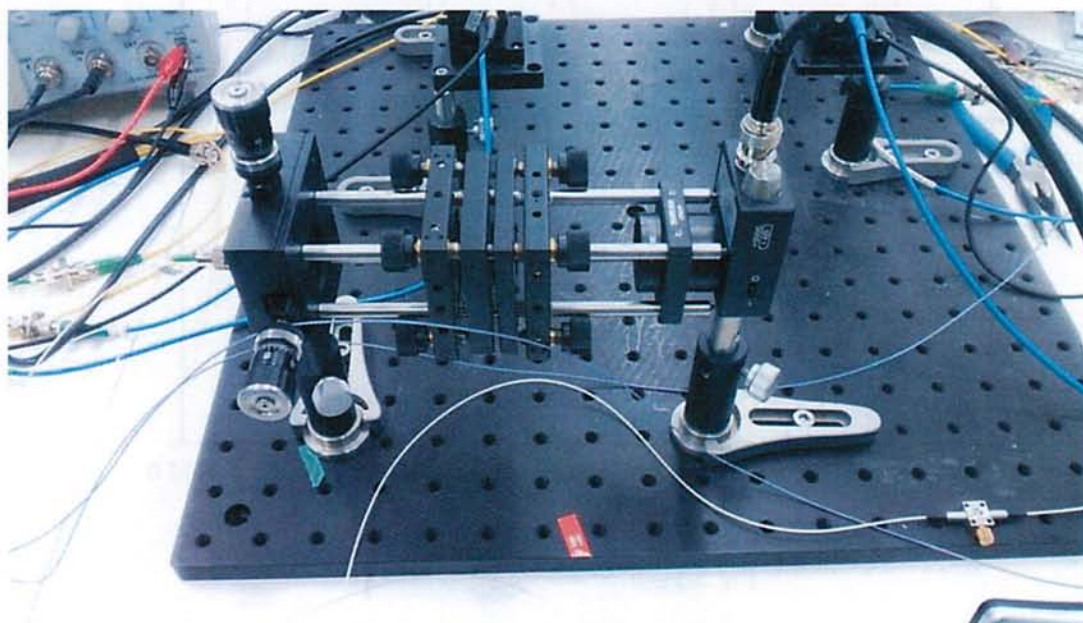


Fig.5. エタロンフィルタの外観

## 5.2. エタロン透過ピークを利用したテラヘルツ周波数制御と問題点

テラヘルツ周波数を 0.5 GHz 刻みで制御する手法が提案されている。Fig.5.2.1 にエタロン透過特性とテラヘルツ周波数の関係図、Fig.5.2.2 に 0.5GHz の周波数分解能で測定した水蒸気スペクトルを示す。この制御方法はエタロンの透過ピークに同調させた周波数を制御するものである。水蒸気スペクトルの形状がある程度測定できているが、本研究の目標性能を満たすためのテラヘルツ周波数分解能 25MHz を実現することができない[XX]。

そこで次章では、エタロンの透過ピークだけではなく、エタロン透過の傾き部分も利用することで連続的に絶対周波数でテラヘルツ波を制御する新たな方法を提案する。

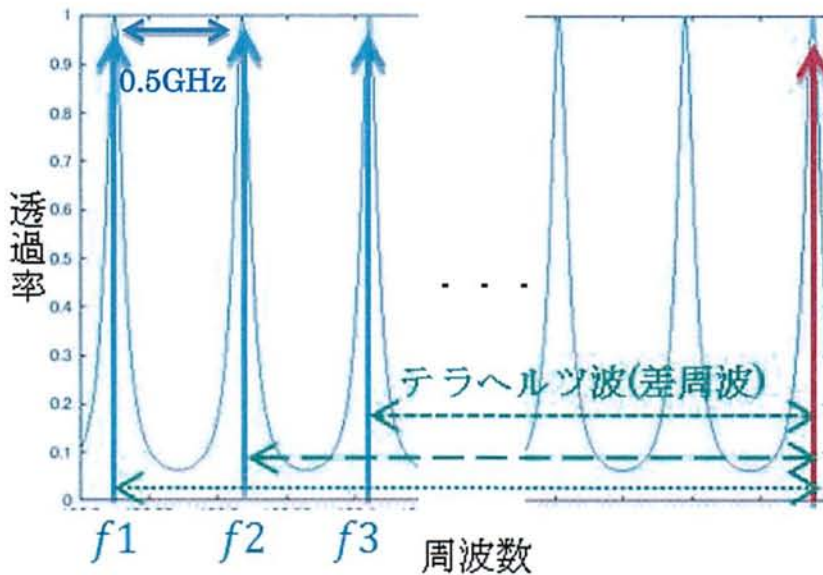


Fig.5.2.1 エタロンの透過ピークを用いたテラヘルツ周波数制御法におけるDFB レーザ周波数とエタロン透過特性の関係図

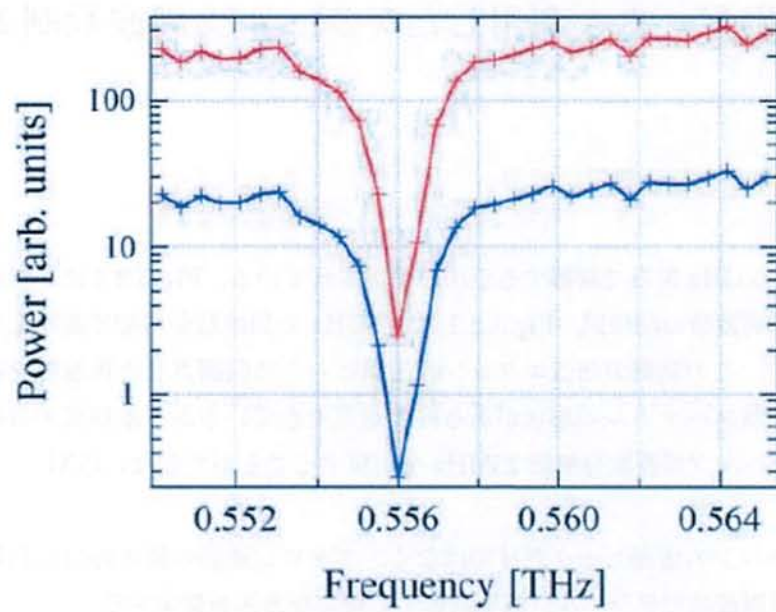


Fig.5.2.2 テラヘルツ周波数分解能 0.5GHz で得られた水蒸気透過率分布



### 5.3. エタロンの透過ピークおよび透過特性の傾き部分を利用したテラヘルツ周波数制御

テラヘルツ周波数制御装置のブロック図を Fig.5.3.1 に、2 つのレーザの差周波とエタロン透過率の関係を Fig.5.3.2 に示す。

本研究では、テラヘルツ波は 2 つの DFB レーザの差周波によって決定されるが、2 つの DFB レーザをそれぞれ独立に制御することは困難である。そこで 1 つのエタロンフィルタを用いて、2 つの DFB レーザにおいて一方の周波数をエタロンの透過ピークに、もう一方の DFB レーザ周波数をエタロンの傾き部分にそれぞれ同調する。エタロンの透過ピークに固定しているレーザ周波数は固定し、エタロン透過の傾き部分に同調させているレーザ周波数を制御する。エタロン透過の傾き部分の透過率がわかれば、その周期性から 2 つのレーザ周波数差を正確に求めることができる。

また、本研究での気圧不動点および吸収ピークの透過率を測定するためには、気圧不動点と吸収ピークをエタロン傾き部分に同調させる必要がある。

この提案手法では差周波がわかればいいため、DFB レーザ自身の発振周波数は未知でも構わないという利点がある。

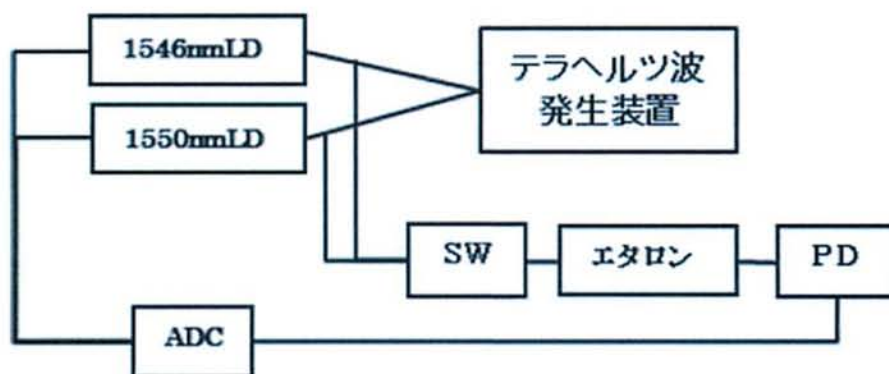


Fig.5.3.1 テラヘルツ周波数制御のブロック図

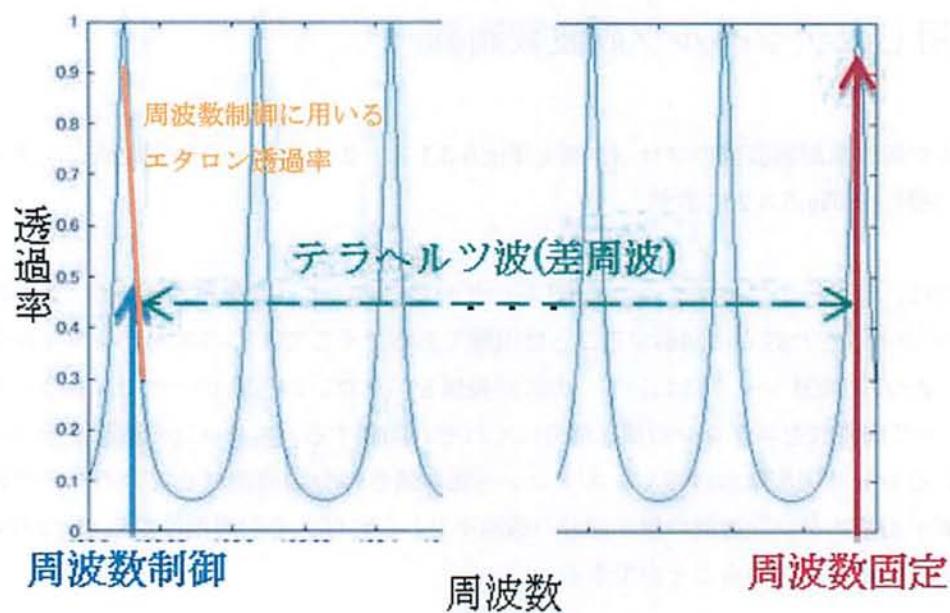
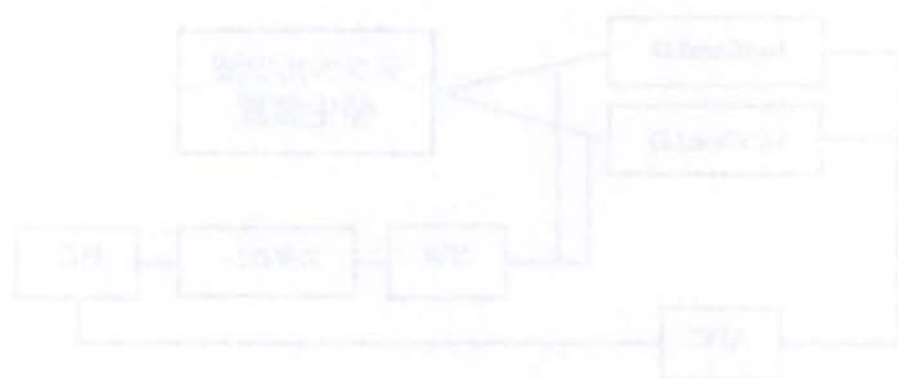


Fig.5.3.2 2つのレーザ周波数とエタロン透過特性の関係図



## 第6章 数値分析

### 6.1. 必要なエタロン性能の検討

エタロン透過率は式(5.3)からミラーの反射率，ミラー間距離，光の入射角度，屈折率に依存していることがわかっている．エタロン透過率変化は読み取りやすい透過波形の線形な部分が透過率 30～90%部分であるとし，水蒸気スペクトルの気圧不動点と吸収ピーク間がこの傾き部分に相当するようなエタロンの性能を計算により求めた．計算に用いたアルゴリズムは付録①に掲載している．

ミラー透過率 60%，エアギャップ間隔 5.0mm，入射角  $0^\circ$  としたエタロンの透過特性を計算した結果を Fig.6.1.1 に示す．

ギャップ間の温度変化（屈折率変化）による透過特性の変動が  $0.265\text{GHz}/^\circ\text{C}$  であることが分かった．ギャップ間の温度揺らぎ  $1.0^\circ\text{C}$  によるエタロン透過特性の  $0.265\text{GHz}$  の変動は，水蒸気スペクトルから求める温度誤差  $0.1^\circ\text{C}$  にするためのテラヘルツ周波数分解能  $25\text{MHz}$  に換算すると，

$$\frac{0.025[\text{GHz}]}{0.265[\text{GHz}/^\circ\text{C}]} \cong 0.094[^\circ\text{C}]$$

よって，テラヘルツ周波数分解能  $25\text{MHz}$  に対するエタロン透過特性の温度揺らぎ  $0.09^\circ\text{C}$  となる．よって，温度センサーとして  $0.1^\circ\text{C}$  分解能を実現するためには，ギャップ間温度を  $0.09^\circ\text{C}$  程度で制御する必要がある．

ここで，大気屈折率の温度，気圧，湿度依存性について文献[10]より以下のことがわかっている．

大気屈折率は大体 1.000270(真空は 1.0)として，

- 温度  $1^\circ\text{C}$  で約  $-1\text{ppm}$
  - 気圧  $1\text{hPa}$  で約  $0.3\text{ppm}$
  - 湿度 10% で約  $-0.1\text{ppm}$
- 変化することがわかっている．

温度 1℃の屈折率変化は、気圧に変換すると

$$\left| \frac{-1\text{ppm}}{0.3\text{ppm}} \right| = 3.33 \dots$$

つまり、3.3hPa の気圧変化による屈折率変化が温度 1℃変化に対する屈折率変化に相当する。

エタロン透過特性のギャップ間温度変化を 0.09℃に抑える必要があることから、

$$0.09 \times 3.3 = 0.297[\text{hPa}]$$

同様にして、湿度 10%変化に対する屈折率変化と温度 1℃に対する屈折率変化の関係を調べると、湿度 100%変化による屈折率変化が、温度 1℃変化に対する屈折率変化に相当する。よって、

$$0.09 \times 100 = 9[\%]$$

以上のことから、温度を 0.09℃で制御することに加えて、気圧変化を 0.297hPa、湿度変化を 9%で抑える必要がある。室内での気圧変化の原因にエアコンが挙げられるが、0.29hPa も変化することは考えにくい。一方、湿度変化に対してだが、エアコンや加湿器の影響を受けることが考えられる。なので、エタロン透過特性を利用する際は、湿度変化を 9%で抑えられるようにする必要がある。解決策の一つとして、エタロンを密閉容器で覆うという方法がある。これにより、気圧変化、湿度変化、さらには温度変化による影響はないものとすることができる。



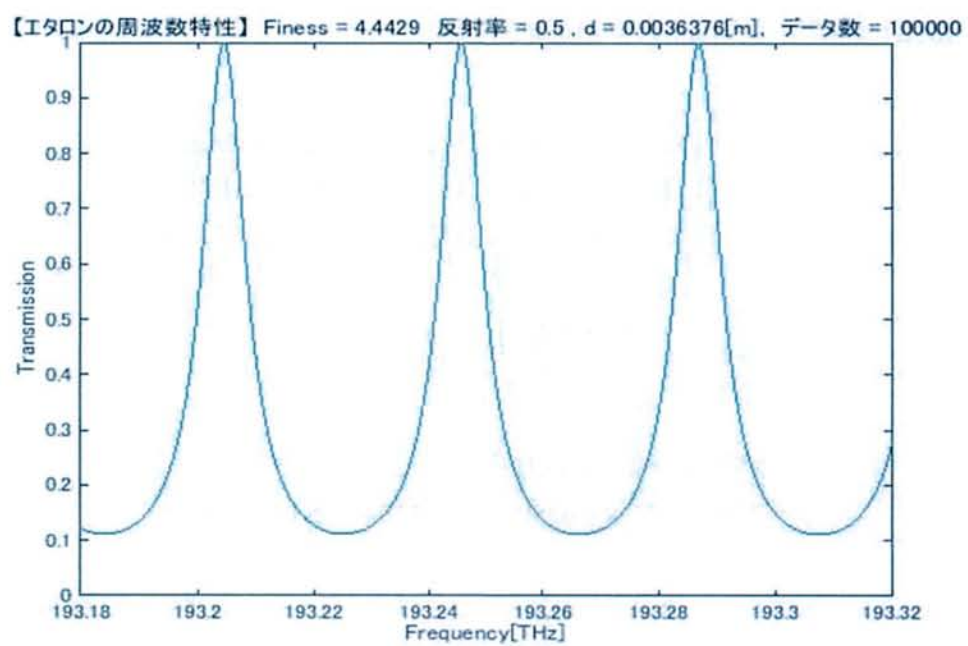


Fig.6.1.1 エタロン透過特性

## 6.2. 設計したエタロンの性能評価

実際に前述の仕様を参考にエタロンフィルタを製作し、波長 1550nm の DFB レーザを周波数掃引することでエタロン透過特性を測定した。結果を Fig.6.2.1 に示す。エタロン透過率 30～90%部分の傾き部分は 7.8GHz の周波数帯域がある。よって、1GHz あたりの透過率変化は、

$$\frac{|30 - 90|[\%]}{7.8[\text{GHz}]} = 7.7[\%/ \text{GHz}]$$

よって、テラヘルツ周波数分解能 25MHz を得るためには、

$$7.7[\%/ \text{GHz}] \times 0.025[\text{GHz}] = 0.194 \dots \cong 0.19[\%]$$

つまり、0.19%のエタロン透過変化が測定できれば、テラヘルツ周波数分解能 25MHz で制御可能であるという結果が得られた。0.19%の透過率変化は汎用の光検出器で十分測定可能である。例えば、エタロン透過率 100%が DFB レーザ出力 2V に相当する場合、

$$2[\text{V}] \times 0.19[\%] = 3.8[\text{mV}]$$

本研究でエタロン透過率測定に用いた 16bitAD 変換器の分解能は

$$\frac{2[\text{V}]}{2^{16}} = 0.00003[\text{V}] = 0.03[\text{mV}]$$

よって、エタロン透過率 0.19%を測定することは可能である。

以上のことより、この制作したエタロン透過率の傾き部分に同調させた周波数制御によって、気圧不動点と吸収ピークに同調したテラヘルツ周波数を 25MHz の分解能で制御することが可能であることを明らかにした。

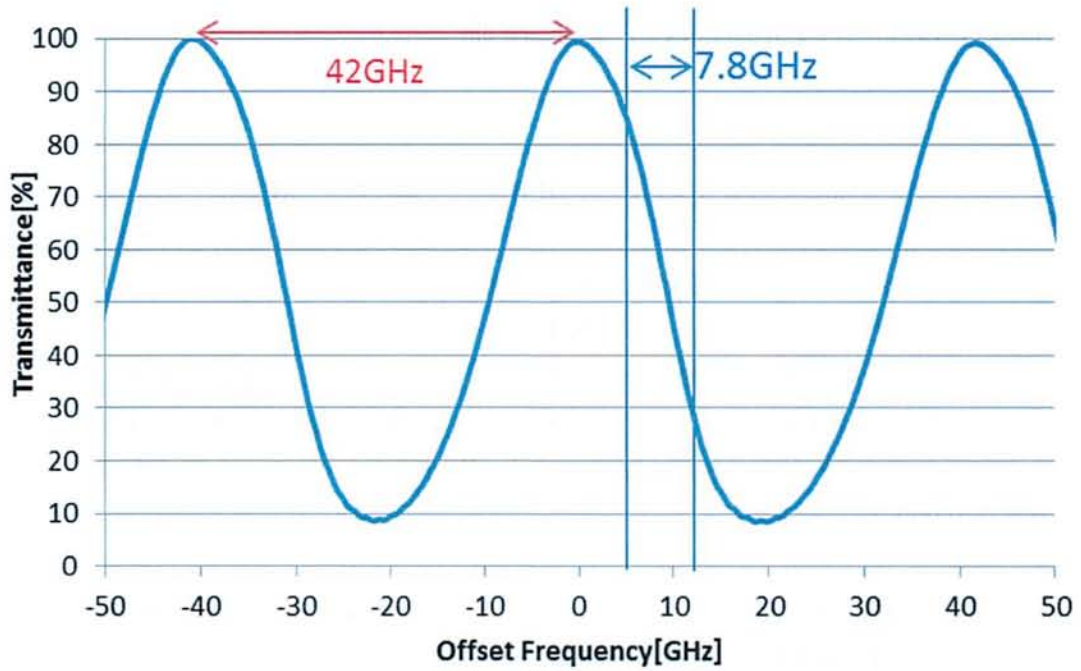


Fig.6.2.1 制作したエタロンの透過特性

### 6.3.DFB レーザ周波数の安定評価

エタロン透過率 50%に波長 1550nm の DFB レーザ周波数を LD 電流と LD 温度を長性して同調させ、フォトダイオードで受光したエタロン透過強度を 16bitAD 変換器で 300 秒間を取得した。計測の間、LD 電流と LD 温度は設定値のままで、計測のタイミングはレーザを約 30 秒出力させた後行っている。DFB レーザ発振直後は機器の温度条件等安定させるための時間を十分確保するためである。AD 変換器のアナログ入力範囲は 0.0~2.0V (分解能 0.03mV) で、0.0V がエタロン透過率 0.0%に、1.85V が透過率 100%に相当する。取得したフォトダイオード出力を Fig.6.3.1 に示す。Fig.6.3.1 より、フォトダイオード出力の平均値は 0.9997V であった。

0.9997V を周波数誤差 0 として、測定したエタロン透過強度からレーザ周波数変動分に変換した結果を Fig.6.3.2 に示す。

Fig.6.3.2 より、周波数変動分の揺らぎは約 $\pm 2\text{MHz}$ であった。これは、設計したエタロン透過率の揺らぎ $\pm 0.015\%$ に相当する。よって、要求精度  $0.025\text{GHz}(25\text{MHz})$ を下回る精度で周波数測定できた。

DFB レーザの発振周波数は長時間発振すると、機器の温度条件などが変わるため、時間とともに周波数がずれてしまうが、フィードバック制御による温度、電流制御によって周波数を安定させることができる。なので、フィードバック機構についても制作する必要がある。



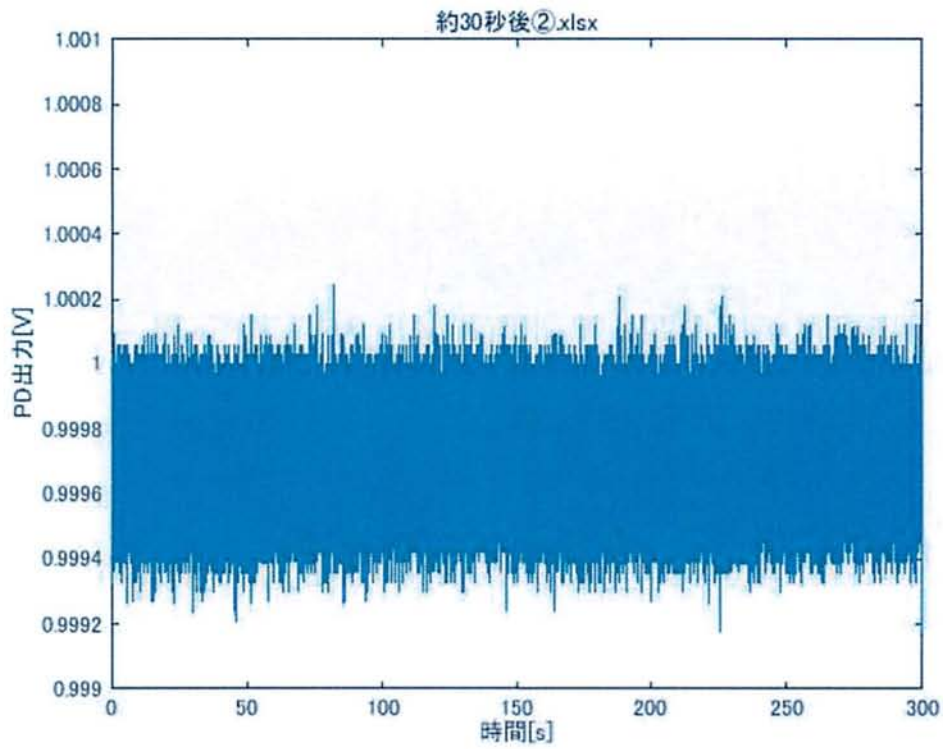


Fig.6.3.1 エタロン透過 300s の PD 出力

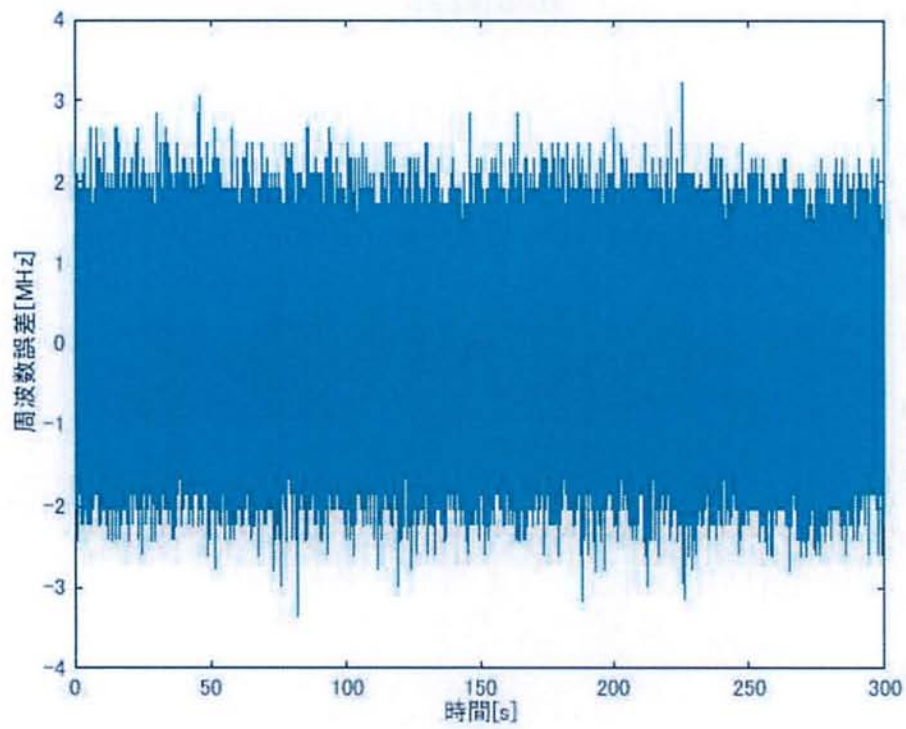


Fig.6.3.2 1550nmLD の周波数誤差

## 第7章 まとめ・今後の課題

本研究の目的は、非接触・透過型テラヘルツ波式温度・圧力センサーの開発である。そして湿度 20% では光路長 0.4m の時が温度依存性 1.1%/K, 気圧依存性 4%/hPa となり, 0.1°C および 0.76hPa の測定を実現するために, テラヘルツ波の周波数分解能は 0.25MHz が要求されることがわかった。

テラヘルツ波は、波長の異なる 2 つの DFB レーザの差周波から生成される。そこで、1 つのエタロンを透過する 2 つの DFB レーザの透過強度の関係から差周波数、つまりテラヘルツ周波数の絶対値を決定する新たな機構を開発した。その結果、要求制度を上回る精度でテラヘルツ波周波数を制御する目処がついた。また、光路長 0.4~1m までは温度依存性はほぼ変わらない。なので、光路長については 1m まで測定可能である。

今後、センサーとしての温度・気圧測定方法として実現するには、以下の項目について議論することが必要である。

- 開発したテラヘルツ波周波数制御機構を用いた水蒸気透過率の温度・気圧依存性について

テラヘルツ周波数精密制御法によってテラヘルツ帯水蒸気スペクトルの温度および気圧依存性を測定し、温度および気圧の算出が可能であるか評価をする必要がある。本研究では、DFB レーザ周波数制御の機構に注目したが、テラヘルツアンテナやアンプの制御についても検討する必要がある可能性がある。

- DFB レーザ周波数を長時間安定させるためのフィードバック機構

本研究のテラヘルツ周波数制御法では、一方の DFB レーザ周波数は固定する。しかし、DFB レーザを長時間発振すると、DFB レーザの温度条件等が変化し周波数が安定しない。周波数をより安定させるためにはフィードバック機構による制御が必要である。

- 様々な条件下に対する吸収スペクトルの温度依存性

水蒸気透過率は式(3.1)より、1m<sup>3</sup>中に存在する水蒸気量によって影響する。本研究の透過率の計算では、湿度 20% での水蒸気量[個/m<sup>3</sup>]と仮定して透過率を計算したが、光路長によって温度依存性が変化していることから、湿度に対する影響もあると考えられる。湿度は以下の式で表すことができる。

$$\text{湿度}[\%] = \frac{\text{水蒸気量}[g/m^3]}{\text{飽和水蒸気量}[g/m^3]}$$

飽和水蒸気量は温度に依存している。水蒸気量は湿度と飽和水蒸気量によって決まる。つまり、水蒸気量も温度に依存している。なので、湿度による影響も議論すべきである。また Fig.4.3.2 より、高温、低温の場合によって気圧依存性の変化に違いが見られたので、観測条件に合わせて温度気圧測定に用いるスペクトルを選ぶことも必要である。テラヘルツ温度気圧センサーでは、高温、低温、高压、低压など様々な条件下での測定が想定されるので、測定対象の条件に応じて、適切な吸収スペクトルの選定が今後の課題である。

研究の反省として、エタロン透過特性は式(5.3)より、エアギャップ間隔、反射率によって変化するので、設計したエタロン透過特性と制作したエタロン透過特性の誤差を少なくするために制作したエタロンの構成は正確に把握しておく必要があった。

研究の応用としては、テラヘルツ温度・気圧センサーに距離分解能を持たせることで、テラヘルツ波が透過できる観測物ならば、温度および圧力分布を 3 次元的に測定できるようになる。これは、光が使えない場合にある物体の内部温度分布や圧力分布を測定したい場面、例を挙げると、製造ラインなどでの活躍が期待できる。



## 謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員の柴田泰邦准教授から熱心なご指導を賜りました。  
ここに感謝の意を表します。

そして，柴田研究室の大学院生，学部生として共に研究に取り組んできた同輩，後輩に  
感謝します。

## 参考文献

- [1]. 谷正彦「テラヘルツ電磁波の発生・検出とその応用」
- [2]. 小川雄一「食品検査へのテラヘルツ波の応用」
- [3]. Andriy Danylov, “THz Laboratory Measurements of Atmospheric Absorption Between 6% and 52% Relative Humidity,” Submillimeter-Wave Technology Laboratory University of Massachusetts Lowell, 175 Cabot Street, Suite 130, Lowell, MA 01854, <http://stl.uml.edu>, September 2006
- [4]. 深澤良一, 分析・センシングのためのテラヘルツ波技術, 日刊工業新聞者, 2013
- [5]. 小宮山他日本機械学会論文集(B編)68巻666号(2002-2)
- [6]. 駒井, 柴田, 第62回応用物理学会春季学術講演会, No.11p-P3-12, 2015.
- [7]. 駒井, 柴田, 第33回レーザセンシングシンポジウム, p44・p45, 2015.
- [8]. 飯塚他, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 11p-P3-17, 2015.
- [9]. 株式会社第一計測器製作所, 圧力測定の基礎, 2. 圧力の測定方法  
[http://www.daiichikeiki.co.jp/pressure/pressure\\_p02.html](http://www.daiichikeiki.co.jp/pressure/pressure_p02.html)
- [10]. 寺田聡一, 産業技術総合研究所, 測距技術-2 波長干渉計による歪計測-  
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~telada/Chikyubuturi2005/DistanceMeasurements.pdf>

付録① エタロン透過率シミュレーションプログラム (MATLAB)

```
%初期値
%光速[m/s]
c = 2.99792458 * power(10,8);
%入射角[deg]
s = 0;
%屈折率
% n = 1.0003;
TEMP = 40;
n = 14.95 - 0.00093 * TEMP ;
%反射率
R = 0.5;
Finess = pi * power(R,1/2) / (1 - R);

%スタートWavelength[THz]
F = 193.1;

%FSR[GHz]
FSR = 41.195;

%ミラー間距離[m]
d = c/(2 * n *(FSR * power(10,9)));
%d = 0.000244
%データ数
data = 100000;
r = ones(data,1);
rr = ones(data,1);
f = ones(data,1);

GHz = 0.000005;

for ii = 1:1:data
    f(ii) = F + GHz*ii;          %[THz]
    r(ii) = (c/f(ii) * power(10,-3)); %[nm]
```

付録① エタロン透過率シミュレーションプログラム(MATLAB)

```
rr(ii) = r(ii) * power(10, -9); % [m]
end

%透過率
T = zeros(data, 1);
for ii = 1:1:data
    T(ii) = 1 / (1 + (4 * R * power((1 - R), -2) * power(sin(2 * pi * n * d * cos(s) /
rr(ii)), 2)));
end

T2 = diff(T);
T3 = [0:T2];

figure(2);
plot(f, T)
xlim([193.19 193.22])
ylim([0 1]);

xlabel('Frequency[THz]')
ylabel('Transmission')
title(['Finess = ', num2str(Finess), ' 反射率 = ', num2str(R), ' , d = ', num2str(d), ' [m],
データ数 = ', num2str(data), ' , 気温 = ', num2str(TEMP), ' °C']);

% figure(3);
% plot(f, T)
% title(['【エタロンの周波数特性】 Finess = ', num2str(Finess), ' 反射率 = ', num2str(R),
' , d = ', num2str(d), ' [m], データ数 = ', num2str(data)]);
%
```



付録② 温調付き LD 駆動装置制御用 AD 変換器制御プログラム (Visual Basic)

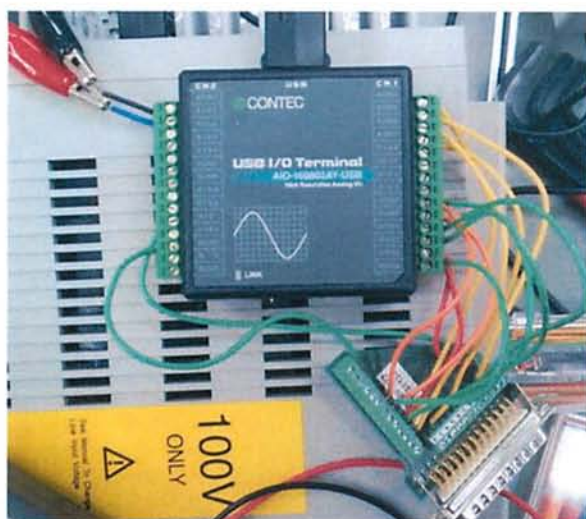


Fig. AD 変換器の外観(型番 XXX-XXX-XXX)

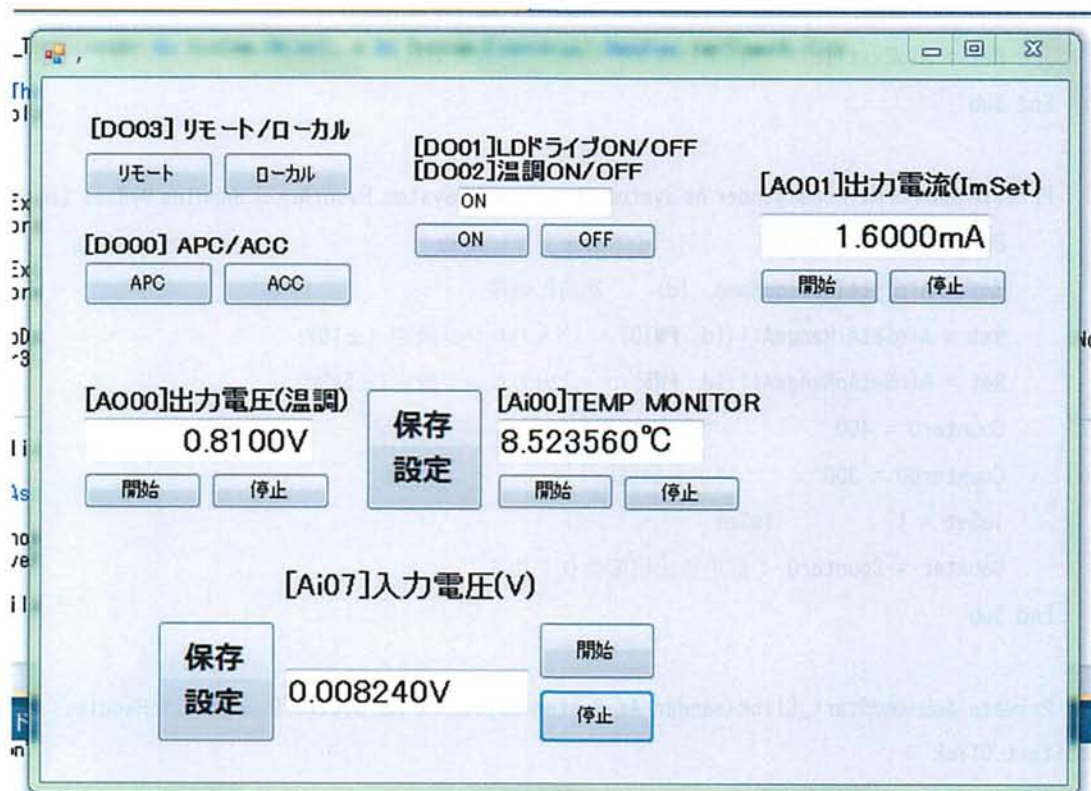


Fig. 温調付き LD 駆動装置制御用 AD 変換器制御機構の操作画面

Public Class Form1

```

Dim Ret As Integer ' 戻り値用変数
Dim DeviceName As String ' デバイス名設定用変
Dim Id As Integer ' デバイスID格納用変数
Dim AoData As Single ' 出力電圧値格納用変数
Dim AoData2 As Single ' ImSet用電圧格納用変数
Dim Counter As Integer ' カウンタ(サイン波形算出用)変数
Dim Counter0 As Integer ' スタートカウンタ
Dim Counter00 As Integer ' 終了カウンタ
Dim ImSet As Integer ' ImSet用変数
Dim AiData As Single ' 入力電圧値格納用変数
Dim AiData2 As Single
Dim AiData3 As Single ' Im MONITOR用
Dim AiData4 As Single ' IF MONITOR用

```

```

Private Sub Form1_FormClosed(sender As Object, e As
System.Windows.Forms.FormClosedEventArgs) Handles Me.FormClosed
    Ret = AioExit(Id) ' 終了処理(デバイスハンドル開放)
End Sub

```

```

Private Sub Form1_Load(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    DeviceName = "AI0000" ' デバイス名を変数に格納
    Ret = AioInit(DeviceName, Id) ' 初期化处理
    Ret = AioSetAiRangeAll(Id, PM10) ' 入力レンジ設定(±10V)
    Ret = AioSetAoRangeAll(Id, PM5) ' 出力レンジ設定(±5VDC)
    Counter0 = 400 ' スタート温調電圧
    Counter00 = 300 ' 終了温調電圧
    ImSet = 1 ' ImSet
    Counter = Counter0 ' 波形算出用変数0クリア
End Sub

```

```

Private Sub cmdStart_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
cmdStart.Click
    tmrTimer.Enabled = True ' タイマを起動します

```

End Sub

```
Private Sub Timer1_Tick(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
tmrTimer.Tick
    If Counter <= Counter00 Then 'カウンタが500になったら0クリア
        tmrTimer.Enabled = False
    End If
    AoData = Counter / 100 '線形波形データ算出
    Ret = AioSingleAoEx(Id, 0, AoData) 'データ出力(アナログ出力)
    lblData.Text = Format(AoData, "#0.0000V") '出力データ(電圧値)を表示
    Counter = Counter - 1 '1ずつ加算
End Sub
```

```
Private Sub cmdStop_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
cmdStop.Click
    tmrTimer.Enabled = False 'タイマを停止します
    AoData = Counter0 / 100
    Ret = AioSingleAoEx(Id, 0, AoData)
    lblData.Text = Format(AoData, "#0.0000V")
    Counter = Counter0
End Sub
```

```
Private Sub cmdStart2_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
cmdStart2.Click
    tmrTimer2.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub cmdStop2_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
cmdStop2.Click
    AoData2 = 0
End Sub
```

```
Private Sub tmrTimer3_Tick(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles
tmrTimer3.Tick
    Ret = AioOutputDoBit(Id, 3, 1)
End Sub
```

付録② 温調付き LD 駆動装置制御用 AD 変換器制御プログラム(Visual Basic)

```
Private Sub cmdStart3_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles  
cmdStart3.Click  
    tmrTimer3.Enabled = True  
End Sub
```

```
Private Sub cmdStop3_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles  
cmdStop3.Click  
    tmrTimer3.Enabled = False  
    Ret = AioOutputDoBit(Id, 3, 0)  
End Sub
```

```
Private Sub cmdStart4_Click(sender As System.Object, e As System.EventArgs) Handles  
cmdStart4.Click  
    tmrTimer4.Enabled = True  
End Sub
```