

卒業論文

ヨウ素セルを用いた  
波長モニターシステムの開発

平成 14 年 2 月

高知工科大学 知能機械システム工学科

光物性工学研究室

安部正純

# 目次

第 1 章	序論.....	1
第 2 章	励起・吸収スペクトル.....	2
2.1	光の波長と波数と周波数と角周波数の関係式 .....	2
2.2	励起 .....	3
2.3	励起・吸収スペクトル .....	3
2.4	エタロン .....	4
2.5	ドップラー幅 .....	5
第 3 章	ヨウ素分子の吸収スペクトル測定の方法.....	7
3.1	機器の配置 .....	7
3.2	機器の説明 .....	9
第 4 章	測定の準備 .....	13
4.1	微弱光検出器の回路の製作.....	13
4.2	フォトダイオード .....	14
4.3	半導体レーザの最適化 .....	14
第 5 章	測定結果 .....	16
5.1	ヨウ素分子の吸収スペクトル.....	16
第 6 章	考察 .....	19
6.1	波長モニターシステムの構築.....	19
第 7 章	まとめ .....	20
謝辞	.....	21
参考文献	.....	22

# 第1章 序論

ヨウ素分子の吸収スペクトル線を利用した、波長可変レーザーの波長モニターシステムを開発した。

実験の目的は、測定に線幅の狭いレーザーを用いて高精度にレーザー波長を決定することと、波長可変半導体レーザーの波長モニターシステムを構築することである。

本実験にヨウ素分子のスペクトル線を利用した理由は、ヨウ素分子の吸収スペクトル線は可視領域に密にあり、それらの波長が正確に分かっていて波長モニターシステムの構築に向いているからである。

分子のエネルギー準位間の遷移に対応する波長の光を当てたとき、分子が光を吸収して励起される。励起された分子は、励起状態から基底状態に戻るときに蛍光を出す。励起波長を走査しながら、この蛍光を検出すれば吸収スペクトルが得られる。

本研究では、線幅の狭い波長可変半導体レーザーを用いて測定したヨウ素分子の吸収スペクトルと、文献にあるヨウ素分子の吸収スペクトル線を比較することによって、光波長計より精度がよく、比較的簡単な装置で波長モニターをおこなえるシステムを構築し、このようなシステムが充分実用になることを示した。

## 第2章 励起・吸収スペクトルの原理

### 2.1) 光の波長・波数・周波数の関係

光量子エネルギーを光の波長よりも波数、周波数で表す方が便利なのは、光量子エネルギーは波長には反比例し、波数、周波数には比例するため、エネルギー差などを計算するとき、波数、周波数で表す方が簡単になるからである。

ある2つのエネルギー状態  $E_1$ 、 $E_2$  を考える。このとき  $E_1$ 、 $E_2$  の光量子エネルギーは、波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、周波数  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  を使って、

$$E_1 = h\nu_1 = \frac{hc}{\lambda_1} \quad , \quad E_2 = h\nu_2 = \frac{hc}{\lambda_2} \quad (2.1)$$

と表すことができる。ここで  $h$  はプランク定数 ( $6.6 \times 10^{-34}$  J·s) である。波長でエネルギー差  $E_2 - E_1$  を表すと、

$$E_2 - E_1 = hc \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = hc \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2 \lambda_1} \right) \quad (2.2)$$

となり、周波数では、

$$E_2 - E_1 = h(\nu_2 - \nu_1) \quad (2.3)$$

となる。

(2.2) と (2.3) 式から波長より周波数で表す方が計算は簡単で便利になることがわかる。

ここで光の波長 (nm)  $\lambda$  と波数 ( $\text{cm}^{-1}$ )  $k$  と周波数 (Hz)  $\nu$  の関係式を次に示す。

波長と波数の関係は、

$$\lambda = \frac{10^7}{k} \quad (2.4)$$

となり、波数と周波数の関係は、

$$\nu = \frac{c}{2\pi} k \quad (2.5)$$

となる。ここで  $c$  は光速 ( $\text{cm/s}$ ) である。

## 2.2) 励起

基底状態にある量子力学系が、光の吸収や粒子の非弾性散乱によって、外部からのエネルギーを受け、より高いエネルギーを持つ他の定常状態（励起状態）に遷移することを励起という。この際に外部から受けたエネルギー、すなわち終わりの状態と始めの状態のエネルギー差を励起エネルギーという。

## 2.3) 励起・吸収スペクトル測定の実験原理

分子のエネルギー準位間の遷移に対応する波長の光を当てたとき、光を吸収して励起された分子が、励起状態から基底状態に戻るときに蛍光を出す。この蛍光を検出しながら励起波長を走査すれば、励起・吸収スペクトルが得られることになる。

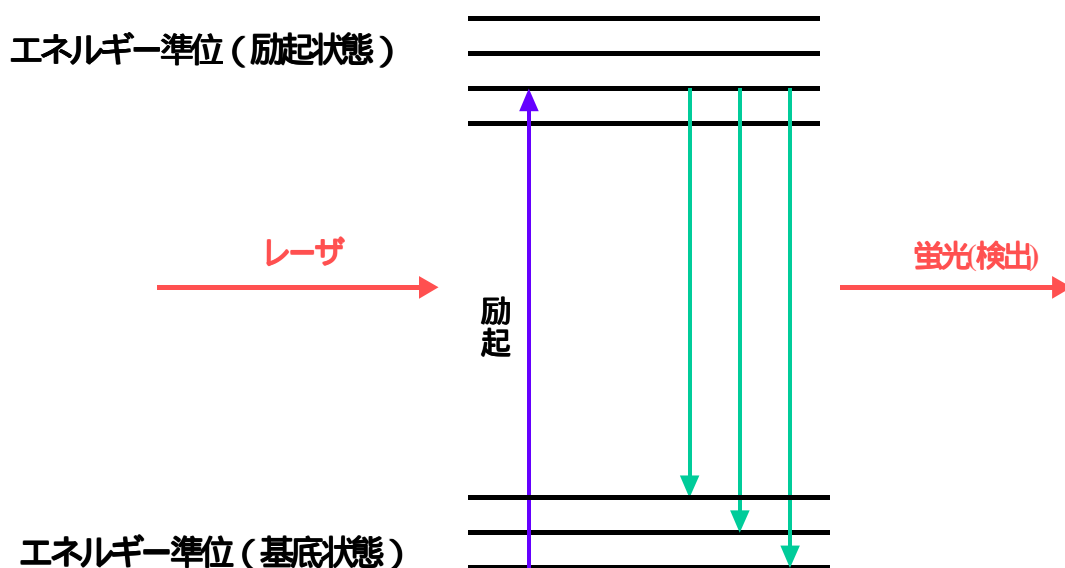


図1 励起スペクトルの原理図

## 2.4) エタロン

2枚の反射面の間にスペーサーを入れて、面間隔を固定したものをエタロンと呼ぶ。気体の屈折率の測定、長さの精密測定、また、干渉分光器として広く用いられている。面間隔が固定されているので、波長の掃引には入射角あるいは内部の気体の圧力を変化させる方法がとられる。2枚の球面反射鏡を用い、それらの曲率中心が互いの鏡面の中心になるように配置したものは球面エタロンと呼ばれる。これは、平面エタロンより調整がはるかに容易であり、非常に高い分解能が得られ、気体レーザーの共振器としても用いられる<sup>1)</sup>。ここでエタロンの共鳴条件を次に示す。

エタロンの共鳴条件は、

$$L = N \frac{\lambda}{2n} \quad (2.6)$$

で表すことができる。ここで $N$ はフリンジの次数、 $n$ は屈折率である。 $L$ は2枚の反射面間の値、 $\lambda$ は共鳴波長である。(2.6)を満たす波長の光を透過したとき、透過強度のピークは、波数や周波数の関数の等間隔で現れる。図2は、FSR(フリースペクトラルレンジ)を示している。これは、隣接する透過ピークの周波数間隔のことを言う。FSR( $\delta\nu$ )は次のように表すことができる。

$$\delta\nu = \frac{c}{2nL} \quad (2.7)$$

ここで $n$ は周波数に依存しないと考えた。

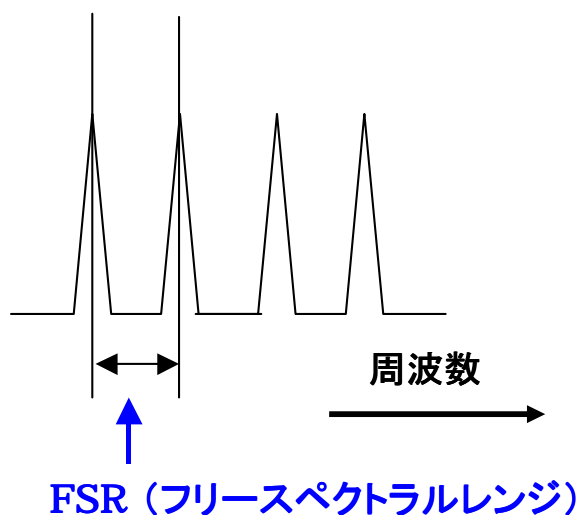


図2 FSR

## 2.5) ドップラー幅

レーザではスペクトル幅として普通  $10^3 \sim 10^6$  Hz のものが得られるのに対して、気体のスペクトル幅はそれよりもずっと広く十分に低圧にしても  $10^8 \sim 10^9$  Hz 程度もある。気体のスペクトル幅を決める要素のひとつとしてドップラー広がり挙げられる。

図 3 のように、いくつかの分子が飛んでいるヨウ素セルを考える。速度分布は温度と分子量によって決まる。ヨウ素セルに共鳴する波長のレーザを照射し、ヨウ素の吸収スペクトルを測定すると、速度がまちまちなので、ドップラー効果により、測定されたスペクトルは図 4 のような広がりを持つことになる。

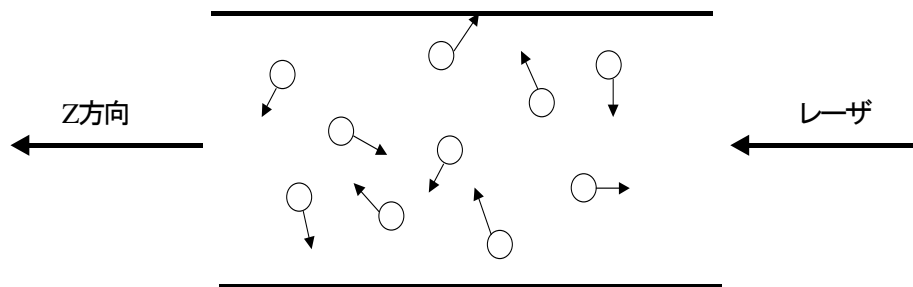


図 3 ヨウ素セル内の分子の動き

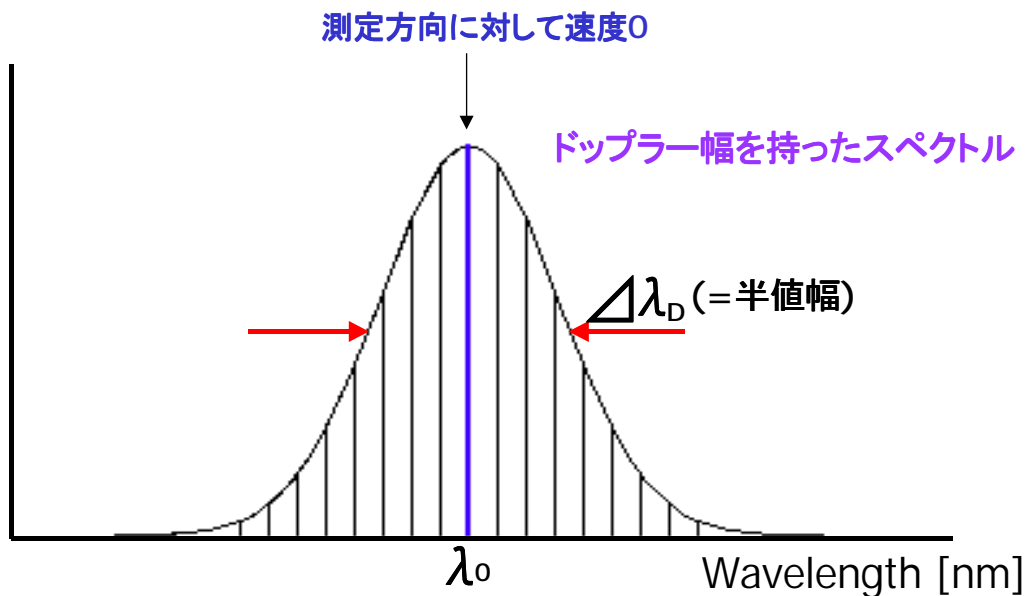


図 4 ドップラー広がりを持ったスペクトル

ドップラー広がりには温度に依存しているので、得られたスペクトルの半値幅から分子の温度を決定することができる<sup>2)</sup>。

このようなドップラー広がりを次のように説明することができる。速度  $v$  で飛んでいる分子のレーザを照射している方向 ( $Z$  軸方向) の成分を  $v_z$  とすると、 $v_z \sim (v_z + dv_z)$  の間に分布している分子の数は次の式で表される。

$$n(v_z)dv_z = \frac{N_i}{v_p \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{v_z}{v_p}\right)^2\right] dv_z \quad (2.8)$$

ただし、 $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$  とする。ここで  $m$  は分子の質量、 $k$  は Boltzman 定数で  $T$  はガス温度である。

一方、

$$v_z = \frac{c}{\omega_0}(\omega - \omega_0) \quad , \quad dv_z = \frac{c}{\omega_0} d\omega \quad (2.9)$$

の関係がある。ここで  $\omega_0$  は静止分子による共鳴周波数、 $\omega$  はドップラーシフトした周波数である。

(2.8) 式に (2.9) 式を代入すると

$$n(v_z)dv_z = \frac{cN_i}{\omega_0 v_p \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{c(\omega - \omega_0)}{\omega_0 v_p}\right)^2\right] d\omega \quad (2.10)$$

となる。よって強度  $I(\omega)$  は

$$I(\omega) = I_0 \exp\left[-\left(\frac{c(\omega - \omega_0)}{\omega_0 v_p}\right)^2\right] \quad (2.11)$$

となる。これがドップラー広がりを表す式であり、その半値幅  $\delta\omega_D$  は、

$$\delta\omega_D = 2\sqrt{\ln 2} \omega_0 \frac{v_p}{c} = \left(\frac{\omega_0}{c}\right) \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{m}} \quad (2.12)$$

となる。

分子量を  $M = m N_A$  ( $N_A$  はアボガドロ定数) として (2.12) 式を波長の半値幅の式に変換すると、

$$\delta\lambda_D = 7.16 \cdot 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (2.13)$$

となる。(2.13) 式から、得られたスペクトルの半値幅より分子の温度を決定することができる。



## 第3章 ヨウ素分子の吸収スペクトル測定方法

### 3.1) 機器の配置

吸収スペクトルを得るために用いた半導体レーザ(赤色)により励起されたヨウ素分子からの蛍光は、赤外領域の波長を持っていて、目に見えない。そこで、最適なスペクトルを得るために、緑色(532 nm)の YAG レーザを使って、光軸合わせを行なった。532 nm で励起されたヨウ素分子の蛍光は可視領域の波長を持っている。YAG レーザから出射した光は、アパーチャ 1、ヨウ素セル、アパーチャ 2 の順で通過する(図 5)。ヨウ素セルから出る蛍光をレンズで集めて、一番シグナルの強い所にフォトダイオードの受光面をあわした。ここで、励起光源を YAG レーザから半導体レーザに取り替える。半導体レーザ光を図 5 の 2 つのアパーチャに通すことにより、半導体レーザの光軸と YAG レーザの光軸を同軸にすることができる。2 つのレーザの光軸が一致していることから、半導体レーザにより励起されたヨウ素分子の蛍光を微弱光検出器で検出することができる。このようにして、微弱光検出器の配置場所を決定し、吸収スペクトルを次のような方法で得た。

半導体レーザから出た光をハーフミラーで 2 つに分け、一方を光波長計に入力するための光ファイバーに照射した。もう一方の光は、チョッパを通過した後、アパーチャ 1、ヨウ素セル、アパーチャ 2 の順に通過していく。ヨウ素セルからの蛍光をレンズで集め、フォトダイオードの受光面にあてる。チョッパからの参照信号と同期したシグナルをロックインアンプで増幅した。このシグナルと光波長計の出力とを同時にパソコンに取り込んでヨウ素分子の吸収スペクトルを得た(図 6)。

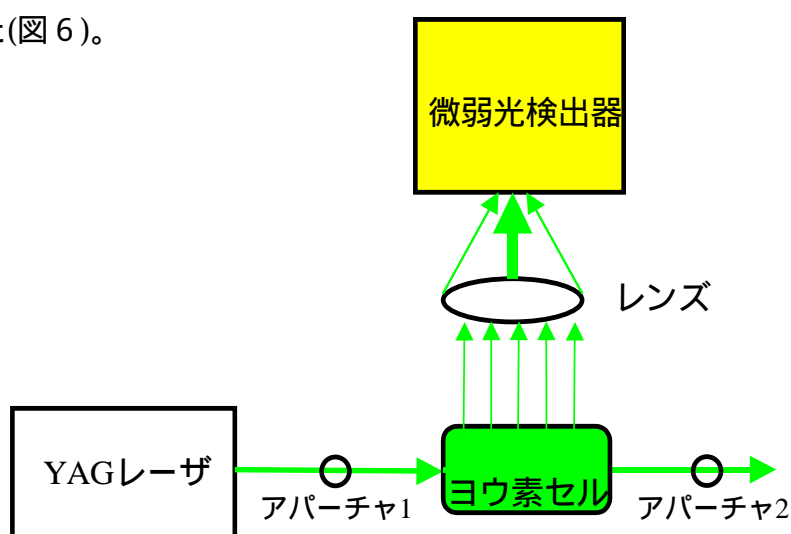


図 5 光軸合わせの配置図

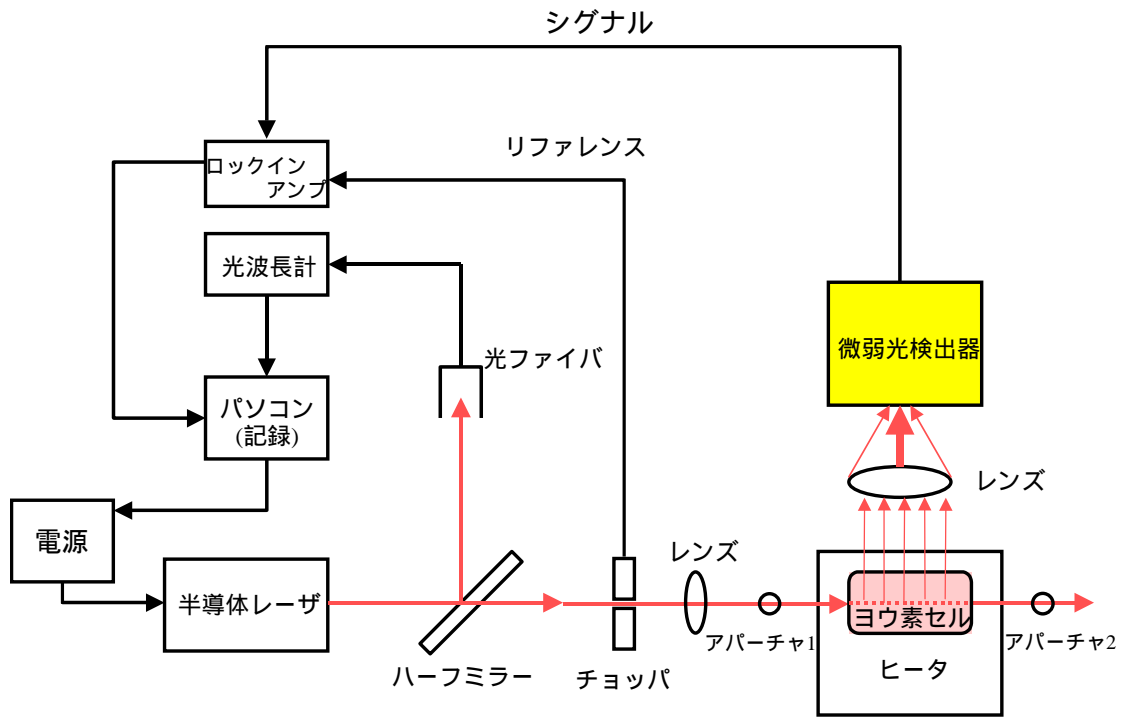


図 6 測定機器の配置図

## 3.2) 機器の説明

### 3.2.1 半導体レーザー

使用した半導体レーザーは Newport 社製の Model 2010 である(図 7)。レーザー線幅が 4 MHz の外部共振器を持った波長可変レーザーである。このレーザーの波長可変範囲は 662~678 nm である。

この半導体レーザーはマイクロメータを使って、グレーティングを回転させることにより、広範囲域の波長変化が可能である。さらにこの半導体レーザーは、Piezo 素子によりグレーティングの角度を変化させ、波長をより高精度で変化できるようにになっている。しかし、Piezo 素子の稼働範囲は小さく、広範囲の測定には有効ではない。Piezo 素子とは、電圧をかけることによって微少に伸縮する素子であり、その変化量は、加えた電圧にほぼ比例する。Piezo 素子に  $\pm 7$  V の電圧をかけることによって、レーザー波長が 670 nm の時に 150 GHz (=0.18 nm) の波長変化が可能になっている。

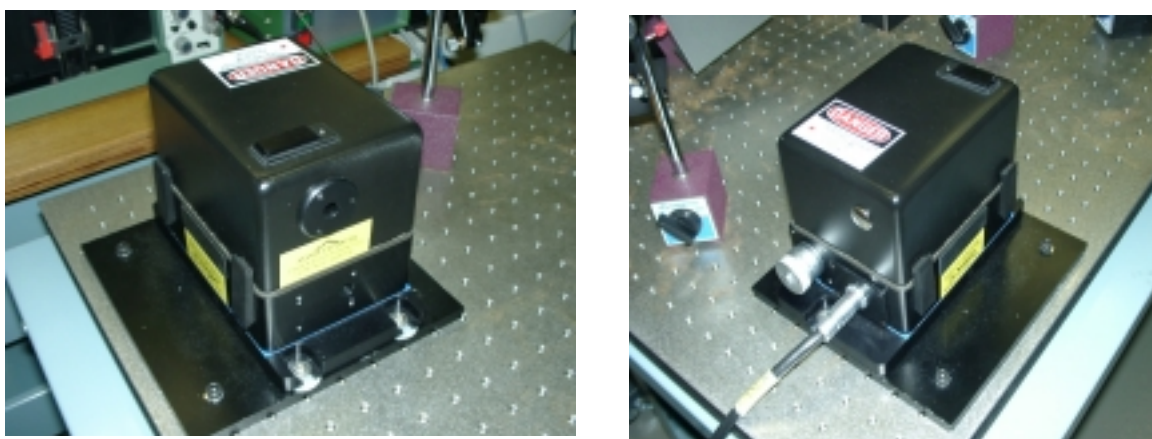


図 7 波長可変半導体レーザー

### 3.2.2 ヨウ素セル

ヨウ素セルとは、ガラスセルにヨウ素分子を封入したものである(図 8)。

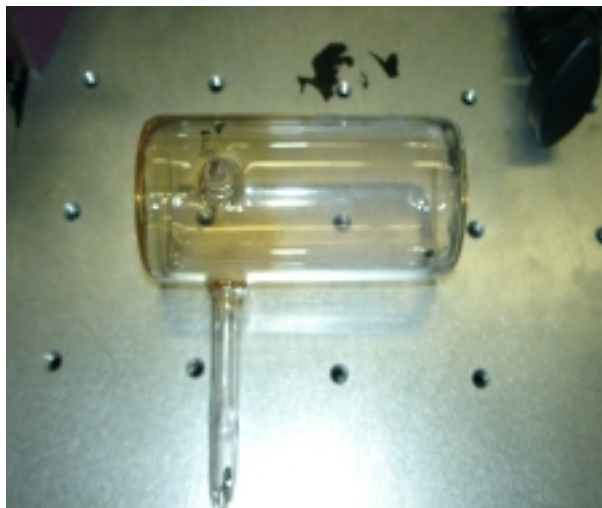


図 8 ヨウ素セル

### 3.2.3 ライトチョッパ

今回使用したライトチョッパは NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 社の 5584A ライトチョッパである(図 9)。ライトチョッパは、同じ間隔に穴の開いた円盤を回転させることにより、レーザからの光を連続的に ON/OFF することができる装置である。ライトチョッパ本体とコントローラに分かれており、コントローラ部分で自由にチョッピング周波数を変化させることができる。



図 9 ライトチョッパ

### 3.2.4 微弱光検出器

微弱光検出器は、ヨウ素セルからの蛍光を検出する装置である(図 10)。

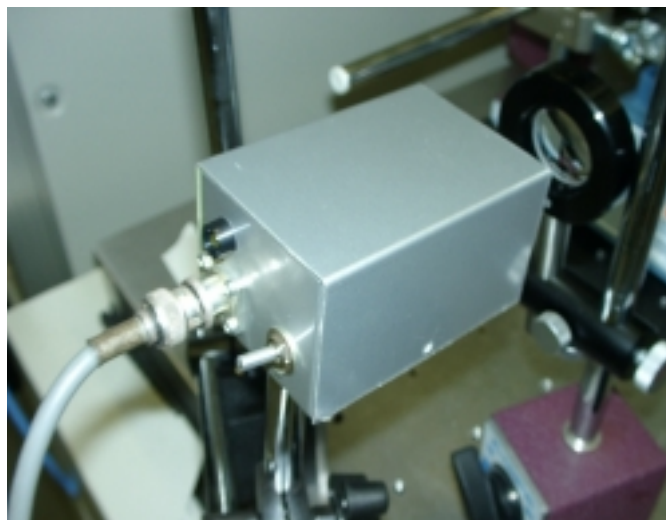


図 10 微弱光検出器

### 3.2.5 ロックインアンプ

ライトチョッパからの参照信号と同期したフォトダイオードからの弱いシグナルを増幅させるために使用した。今回使用したロックインアンプは、NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 社の LI-570A である。

原理を簡単に説明すると、次のようになる。図 11 にロックインアンプのブロックダイアグラムを示す。入力信号(INPUT SIG)は、AC アンプ (AMP) によって増幅され、PSD (Phase Sensitive Detector)に加えられる。一方、参照信号(REF SIG)は、波形整形、位相調整されて、検出したい信号と同相の方形波となり PSD に加えられる。PSD はロックインアンプの心臓部であり、2 つの信号の掛け算器と考えることができる。

PSD 出力の周波数スペクトルは信号と参照信号の周波数スペクトルのたたみ込みとなり、和と差のスペクトルにシフトすることになる。よって、2 つの信号の中で、同じ周波数で同位相成分は直流(DC)成分に、他の非同期成分(雑音)は交流(AC)成分に変換される。交流(AC)成分を次段のローパスフィルタ(LPF)で除去すれば、参照信号に同期した成分のみを検出することができる。雑音除去の能力を決める帯域幅は、LPF の帯域で決定される。LPF の帯域幅は安定度を損なうことなく狭くすることができるので、等価雑音帯域幅を極めて狭くでき、雑音除去の能力を無限にすることも可能になる<sup>3)</sup>。

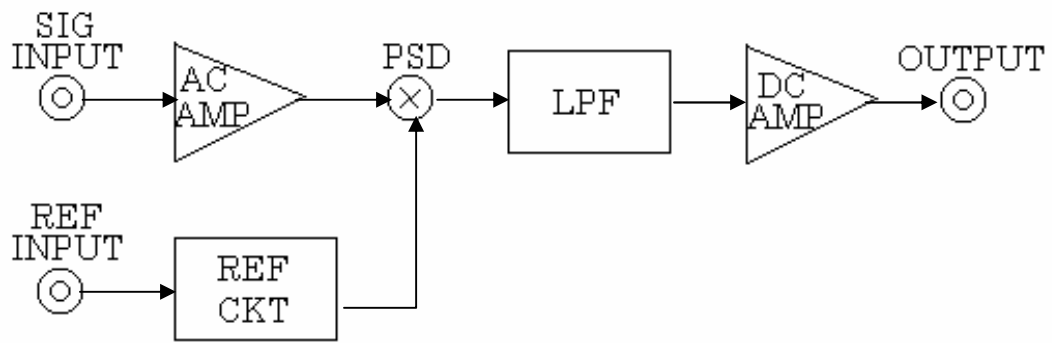


図 11 基本的なロックインアンプのブロックダイアグラム

### 3.2.6 その他使用機器

その他にオシロスコープ、パソコン、ヒータ、デジタルマルチメータ、光波長計、アパーチャなどを使用した。

## 第4章 測定の準備

### 4.1) 微弱光検出器の回路の製作

図12に、本実験のために製作した微弱光検出器の回路図を示す。使用したフォトダイオードはCentronic社製のOSD5-5Tで、これは、赤外線に対して感度がよく、受光感度がある波長範囲は400~1050nmである。オペアンプはナショナルセミコンダクター社製のLF356Nを使用した。

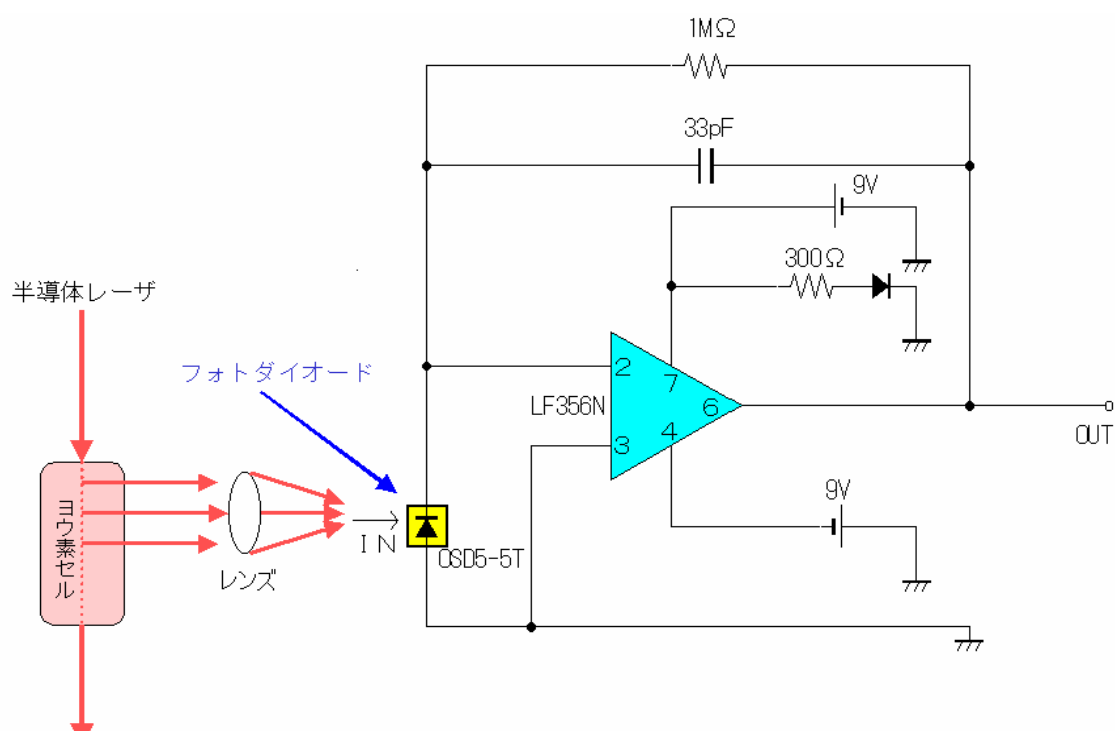


図12 微弱光検出器内の回路図

波長可変半導体レーザーをヨウ素セルに当て、ヨウ素セルからの蛍光をレンズで集めて図12のフォトダイオードの受光面から取り入れ、オペアンプでシグナルを増幅してOUTPUTからロックインアンプへシグナルを送る。

今回、フォトダイオードに入ってくる光が弱いことが予想されるため、オペアンプを回路に組み込んで、フォトダイオードからのシグナルを増幅して検出した。

## 4.2) フォトダイオード

フォトダイオードは、半導体の PN 接合部に光を照射すると電流や電圧を発生する受光素子である<sup>4)</sup>。広い意味では太陽電池も含むが、通常は光の強弱を検出するセンサを意味する。フォトダイオードの特長を次に示す。

- ) 入射光に対する直線性が優れている
- ) 雑音が小さい
- ) 感度波長範囲が広い
- ) 小型軽量
- ) 機械的強度が高い
- ) 長寿命

## 4.3) 半導体レーザーの最適化

外部共振器を持った波長可変の半導体レーザーを使うにあたって、グレーティング角度の最適化を次のような手順で行なった。また、出力の電流依存性と波長依存性の測定を行なった。

- ) ECU(Electronic Control Unit)のパワーを ON にして 45 分放置し動作を安定させておく。レーザーをオプティカルテーブルに乗せ、レーザーを ON にして最大許容量までレーザーの電流を上げていく。その最大電流はダイオードモジュールの限界抵抗によって決定される。
- ) ECU のパネルから波長を読み取り、ダイオードモジュールのチューニングレンジの真ん中になるようにレーザーを調整する。
- ) ファンクションジェネレータから  $\pm 1$  V、100 Hz のトライアングル波を出力しオシロスコープに接続する。
- ) ECU の後面パネルにある「DETECTOR OUT」からのシグナルをオシロスコープに接続し、「volts/div」を調整する。
- ) レーザ共振器用のミラーの仰角をアレンレンチで調節し、出力に対する電流曲線が最大の傾きになるようにする。



最適化後、レーザ電流が 60 mA のとき、レーザの出力は 3.3 mW になった。マニュアルに添付されていた出力の電流依存性を見ると、レーザ電流 60 mA の時の出力は約 3 mW であったので、レーザの最適化は成功したといえる。図 13 は半導体レーザの出力の波長依存性、電流依存性を示している。

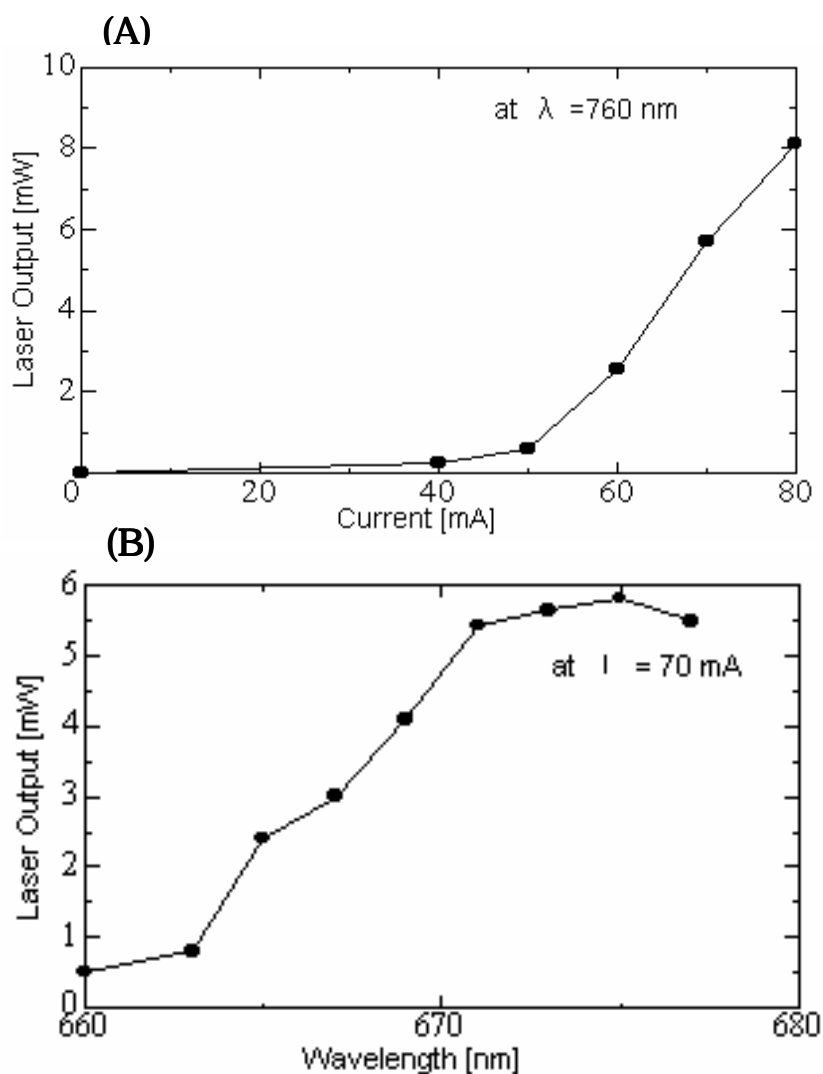


図 13 半導体レーザの出力

- (A) レーザ出力の電流依存性。レーザのスレッシュホールド電流は約 50 mA であることがわかる。
- (B) レーザ出力の波長依存性。外部共振器による波長可変の範囲は 10 nm 以上であることがわかる。

## 第5章 測定結果

### 5.1) ヨウ素分子の吸収スペクトル

前章で述べたような測定手順でヨウ素分子の吸収スペクトルを測定した。得られた吸収スペクトルを図 14 に示す。

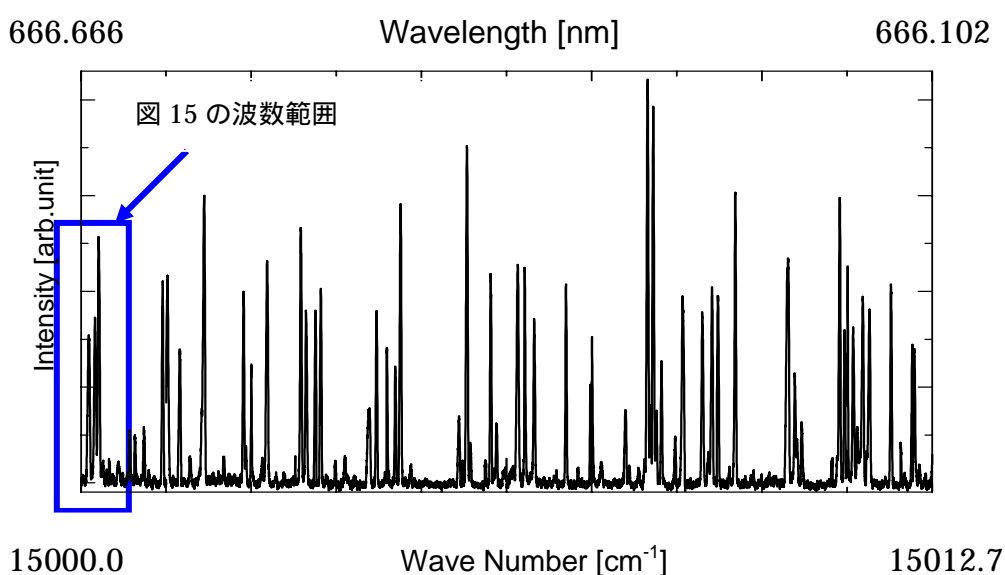


図 14 ヨウ素分子の吸収スペクトル

波長を、Piezo 素子に電圧をかけることによりグレーティングの角度を変化させ、走査した。図 14 の測定範囲は、波長では 666.666~666.102 nm、波数では 15000.0~15012.7 cm<sup>-1</sup> で、ヨウ素分子の吸収スペクトル線は可視領域に非常に密にあることが分かる。

ブルーの長方形で囲んだ波長領域を走査した結果を図 15 に示す。

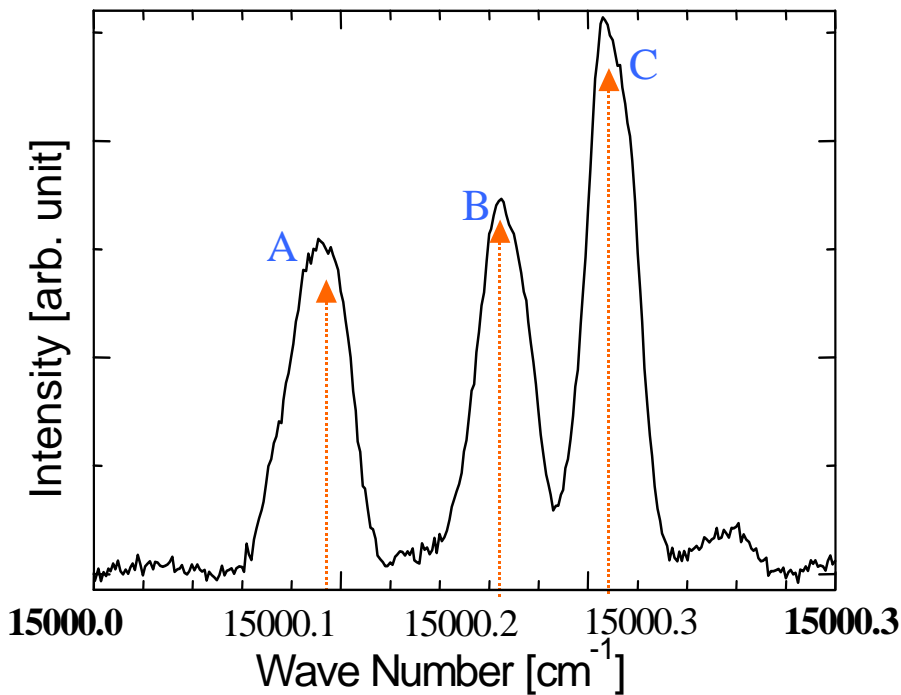


図 15 波数範囲 15000.0 ~ 15000.3  $\text{cm}^{-1}$  のヨウ素分子の吸収スペクトル

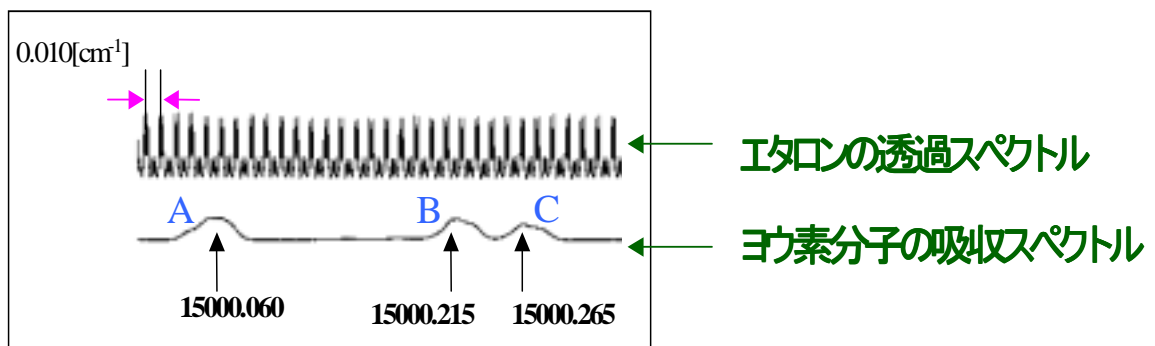


図 16 Doppler-free High Resolution Spectral Atlas of Iodine Molecule<sup>2)</sup> 15000.005 ~ 15000.300  $\text{cm}^{-1}$  の波数範囲の(上)エタロンの透過スペクトル、(下)ヨウ素分子の吸収スペクトル

図 15 は、波数範囲 15000.0 ~ 15000.3  $\text{cm}^{-1}$  のヨウ素分子の吸収スペクトルである。この範囲では 3 つの大きなシグナルが測定できた。図 15 の A・B・C の波数の値は、光波長計により得られた。

図 16 は参考文献 Doppler-free High Resolution Spectral Atlas of Iodine Molecule<sup>5)</sup> から引用した。図 16 の上のスペクトルは、エタロンの透過強度を表

して、矢印で示した部分の間隔(FSR)は、30 MHz で、波数に直すと  $0.010 \text{ cm}^{-1}$  となっている。下のスペクトルは、我々が測定したデータと同様のヨウ素分子の吸収スペクトルである。図 16 の A・B・C の波数は、参考文献データのエタロンの透過スペクトルを用い、エタロンの縦モードの次数と FSR の値とから計算して決定することができる。

## 第6章 考察

### 6.1) 波長モニターシステムの構築

今回得られたヨウ素分子の吸収スペクトルと参考データとを比較すると、吸収スペクトル線はほぼ同様の位置にあることが分かる。

本実験で使用した光波長計からは、図 15 の A・B・C それぞれの位置で波数を 6 桁までしか求めることができなかったが、図 16 の参考文献データを使うとそれぞれの位置で 8 桁まで求めることができる。図 17 は今回の実験結果と文献データを比較した表である。したがって、比較的簡単な装置で分光器を使わずに高精度な分光測定ができることがわかった。

	波長計	文献データ
A	15000.1	15000.060
B	15000.2	15000.215
C	15000.3	15000.265

図 17 実験結果と文献データの比較

また、Piezo 素子に 1 V 電圧をかけると波数、周波数がどれくらい変化するのが計算できる。その結果、波数変化は  $0.26 \text{ cm}^{-1}/\text{V}$ 、周波数変化は  $1.24 \text{ GHz}/\text{V}$  となった。

これらのことから今回測定したヨウ素分子の吸収スペクトル線を用いて、波長モニターシステムを構築することができた。

## 第7章 まとめ

本実験ではヨウ素分子の吸収スペクトルを用いた波長モニターシステムを開発した。そのための準備として、微弱光検出器を製作し、光学系を組み立てた。光源として、外部共振器を持った線幅の狭い波長可変半導体レーザを用いた。全体を暖めたヨウ素セルにレーザを照射し、ヨウ素セルからの蛍光を微弱光検出器で受光した。チョッパからの参照信号と同期した微弱光検出器からの弱いシグナルをロックインアンプで増幅し、ヨウ素分子の吸収スペクトルを得た。得られたヨウ素分子の吸収スペクトル線を文献のデータとを比較することにより、8桁の精度でスペクトル線の波数を決定した。

以上の結果から、本研究の目的である「ヨウ素セルを用いた波長モニターシステムの開発」は達せられた。

今後は、本実験で構築した波長モニターシステムを用いて、別の波長領域での測定をし、波長校正に役立てていきたい。

## 謝辞

終わりにのぞみ、終始懇篤な御指導を賜り論文校閲の労をとられた木村正廣先生（現高知工科大学知能機械システム工学科教授）に心から感謝致します。また、戸名正英氏（現高知工科大学知能機械システム工学科実験講師）、同研究室大学院生に貴重な助言とご指導をいただき深く感謝します。

## 参考文献

- 1) 物理学辞典編集委員会： 物理学辞典 (培風館、1992).
- 2) Sune Svanberg: Atomic and Molecular Spectroscopy , (Springer , 1990).
- 3) 日本化学会： 実験科学講座、第 9 卷 (丸善株式会社、1991).
- 4) フォトダイオード(カタログ)： 浜松ホトニクス株式会社、(2000).
- 5) Hajime KATO (project leader): Doppler-Free High Resolution Spectral Atlas of Iodine Molecule, (Japan Society for the Promotion of Science, 2000).