

# 中赤外分光を目的とした平面回折格子分光器の製作

武者研究室 石井知広

## 1 序論

我々の研究室では 1980nm を利得中心とする Thulium を利得媒体として Tm 添加 ZBLAN ファイバーレーザーの光源開発を行っている。また将来的には高強度レーザーを ZBLAN ファイバーに入射し、そのレーザーを非線形効果により中赤外へ波長帯域を広げる実験も視野に入れており、それらをスペクトル測定する機器が不可欠となる。そこで本研究では近赤外及び中赤外を分光し広い波長領域でスペクトル測定を行える分光器を製作する。1.5-4.0 $\mu\text{m}$  の広い波長領域でのスペクトル測定を優先するため、波長 3.0 $\mu\text{m}$  における波長分解能  $d/d\lambda$  は 3000 程度を目標に定める。

## 2 分光の原理

分光とは電磁波をプリズムや回折格子を用いてスペクトルに分解することである。分光測定を行うための機器は分光装置と総称され、分光器は spectroscope の語訳として対応付けられている。

分光器は分散型と干渉型の 2 種類に大別できる。FT-IR に代表される干渉型の分光器は製作に必要な技術の都合からこの製作は困難と判断し、本研究は分散型の分光器を製作することとした。また分散型には分散素子として回折格子あるいはプリズムが用いられる。プリズムを用いる場合、多くはその前後にコリメータレンズと集光レンズを使用する。これにより色収差が生じてしまうため広帯域のスペクトル測定を目的

とした本研究では平面回折格子を用いる。

回折格子分光器の概念図を Figure2.1 に示す。分光器は回折格子以外に、回折格子に平行光線を当てるためのコリメータミラー、平行光線を結像させるカメラミラーを使用する。また入射スリットはコリメータミラーの焦点距離で光源を点光源とし、出射スリットは空間フィルターとして回折格子によって波長情報が空間情報に変換された光の中から特定の空間情報を持つ光のみを透過する役割を果たしている。波長走査は回折格子を回転させることで行う。

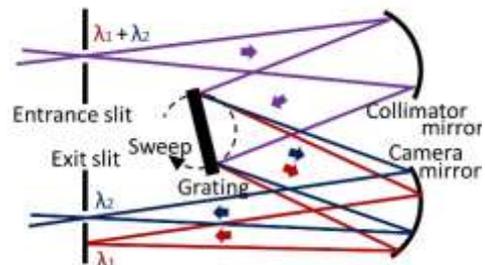


Figure2.1 Czerny-turner 型分光器

分光器に用いる凹面鏡やレンズの配置、角度構成などをマウンティングと呼ぶ。

Figure2.1 に示したマウンティングは Czerny-turner 型と呼ばれるもので回折格子分光器の中では最も一般的なものである。Czerny-Turner 型の特徴は球面鏡を対称に配置することでコマ収差を低減していること、球面鏡を 2 枚用いてコリメートと集光を個々に調節でき最適化を行い易いことである。これらの理由から本研究では Czerny-Turner 型分光器を製作した。

### 3 分光器の設計と製作

#### 3.1 設計

本研究で製作する分光器の光学系を Figure3.1 に示す。

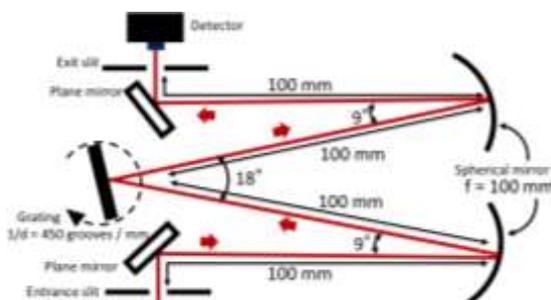


Figure3.1 分光器の光学系

光学系を設計する上でまず回折格子とカメラミラー、コリメータミラーの位置関係は光路が交差せず回折格子に対してカメラミラーとコリメータミラーを対称的な配置とした。

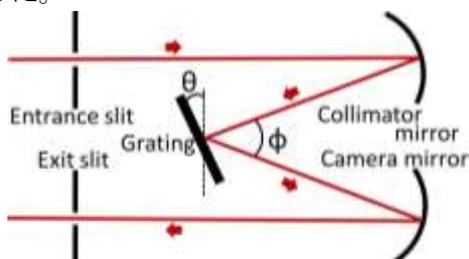


Figure3.2 凹面鏡が対称配置の分光器

Figure3.2 のように $\theta$ 、 $\varphi$ をおけば出射スリットを通過する光の波長 $\lambda$ は回折格子の式

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \cos \beta) \quad (3.1)$$

から

$$m\lambda = d \sin \theta \cos \frac{\varphi}{2} \quad (3.2)$$

を得る。

回折格子は(3.1)から波長  $4.0\mu\text{m}$  の光を回折させるには格子定数 $d$ が

$$\begin{aligned} 1/d &< \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{m\lambda} \\ &= 500 \text{ groove/mm} \end{aligned} \quad (3.3)$$

を満たす必要がある。また回折格子による理論分解能は

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{W}{d} \quad (3.4)$$

で与えられる。ここで $W$ は回折格子に照射された光線の幅である。したがって市販されている回折格子の内、 $1/d$ が

$500\text{groove/mm}$  未満の中で最大であった  $450\text{groove/mm}$  のものを使用した。

凹面鏡の焦点距離 $f$ は出射スリット上での隣接した波長との集光点間の距離である線分散を操作できる唯一の因子であり、 $f$ を大きくすることで線分散を増加させた。しかし $f$ を増加させると光路が長くなることや凹面鏡自体が大きくなることから分光器のサイズが大きくなる。また線分散が増加すると出射スリットを通過する光の光量が減少し S/N 比が低下する。以上の兼ね合いから $f = 100\text{mm}$  の球面鏡を使用することとした。これは直径 1 インチの球面鏡の中で最も $f$ が大きいものである。

$\varphi$ は(3.2)より小さいほど測定可能な波長領域が広がることがわかる。したがってこれを機械的限界の  $16^\circ$  に対して最適化の際の利便性も考慮して  $18^\circ$  とした。

凹面鏡上の偏角は小さくするほど球面収差やコマ収差が減少することから機械的制限  $8^\circ$  よりも少々大きい  $9^\circ$  とした。

以上の設計から線分散 $D$ に $\lambda = 3.0\mu\text{m}$ 、 $d\lambda = 1.0\text{nm}$ を代入することで  $1\text{nm}$  異なる波長の出射スリット上での分散による集光点間の距離 $fD$ は  $36.6\mu\text{m}$  となった。そこでスリット幅は回折格子の理論分解能も考

慮して  $20\mu\text{m}$  とした。このとき  $\lambda = 3.0\mu\text{m}$  における出射スリットによる線幅と回折格子による線幅は  $0.991\text{nm}$  となり目安として設定した分解能  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 3000$  を達成できる計算となる。

検出器は評価段階では可視から近赤外に感度がある Si PIN フォトダイオードを使用する。実用では近赤外から中赤外に感度がある InAs 光起電力素子を使用する。

回折格子の回転の動力源にはステップ角  $0.9^\circ$  のステッピングモータを使う。またこれを制御する 1/16 ステップ ステッピングモータドライバと回転軸を変換し且つステッピングモータの回転角を駆動軸に小さく伝導する減速機(減速比は 1:50)としても機能するウォームギアを使用する。これらの組み合わせで回折格子の駆動軸の最小ステップ角を  $0.001125^\circ$  とし、分光器の分解能に対して十分細かい角度で回折格子が回転できる設計となっている。

### 3.2 製作

設計通りの光学系を実現するためにはそれに最適な構成素子のホルダーやアルミ基板を自作する必要がある。そこで本研究では Figure4.1 のように 3次元 CAD ソフトウェアを使用して CNC 加工機で加工、CNC に不可能な加工は手動で加工した。

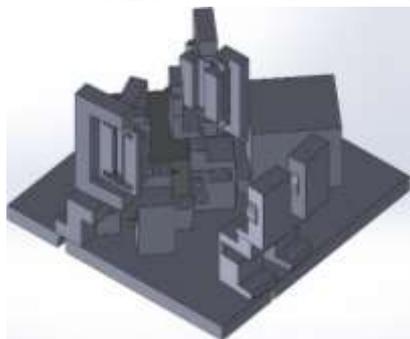


Figure4.1 CAD による分光器の設計

全ての構成素子が揃い、分光器が大まかに組みあがった段階で最適化を行った。最適化の手順は平面鏡、凹面鏡、回折格子、集光レンズ、スリット、検出器の順で行った。最適化の光源には He-Ne レーザーを用いた。

## 4 He-Ne レーザーによる較正と評価

### 4.1 較正

分光器の最適化に用いた He-Ne レーザーをそのまま利用して分光測定を行い、これを基準に分光器の較正を行った。縦軸を負荷抵抗の電圧  $V_p$ 、横軸を操作時間  $t$  に Figure4.1 のグラフが得られた。このとき回折格子の角速度  $\omega$  は  $0.2\text{deg/s}$  である。中央のスペクトル線が  $m = 0$  次回折光であり、左が +1 次、右が -1 次光である。

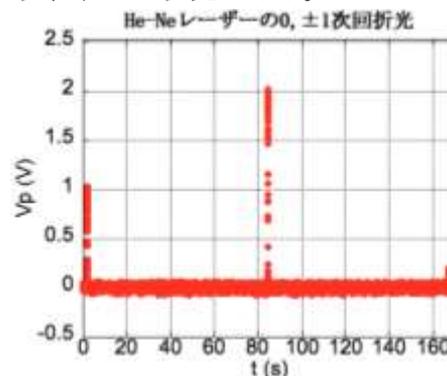


Figure4.1 較正前の He-Ne レーザーのスペクトル

本研究では He-Ne レーザーのみを用いて  $m=0, \pm 1$  のスペクトル線から較正を行う。この方法は  $m=0$  から  $m=\pm 1$  までの角度変化量  $\Delta\theta_{\pm}$ 、2つの変数の値を(4.1)の  $\Delta\theta$  に代入し連立方程式を解くことで 2つの未知数  $\theta_0$  と  $\varphi_a$  を求める。ここでの  $\theta_0$  は凹面鏡が対称的な配置でと仮定して導出した(3.1)に対してそうでなかった場合に現れる項である。

$$m\lambda = d \sin(\Delta\theta - \theta_0) \cos \varphi_a$$

(4.1)

また $\varphi_a$ は設計段階の偏角 $\varphi = 18^\circ$ に代わって、実際に製作したときの偏角を表わす項である。

この較正で得られた(4.1)は波長依存性のない0次光( $\Delta\theta = \theta_0$ )を基準にそこからの角度変化量 $\Delta\theta$ 、つまり時間間隔と角速度の積 $\Delta t\omega$ を代入することで $m\lambda$ を求めることができる。このような較正方法をとった理由は、製作した分光は測定ごとに回折格子の角度変化量を測定するための基準をおく必要があるからだ。この基準に0次光を利用すると任意の波長に対して $m\lambda = 0$ となって波長依存がないこと、0次光付近はX線など波長が短くこの分光器では分光不可能な領域であり0次光が常に線スペクトルとして観測されることの2点で都合が良い。

Figure4.1 から $\Delta\theta_+ = 8.2435^\circ$ 、 $\Delta\theta_- = 8.2632^\circ$ であり(3.8)から以下の式を導き出した。

$$\begin{aligned} m\lambda &= 2d \cos\left(\frac{14.645}{2} \text{deg}\right) \sin(\Delta\theta - 9.83 \times 10^{-3} \text{deg}) \\ &= 4.4082 \times 10^{-6} \\ &\quad \times \sin(\Delta\theta - 9.83 \times 10^{-3} \text{deg}) \quad (4.2) \end{aligned}$$

$\theta_0 = 9.83 \times 10^{-3}$ は0.1mm前後の相対的な凹面鏡のずれによって生じていると予想され、最適化の精度からして妥当な値だと言える。一方 $\varphi_a = 14.645^\circ$ は2枚の平面鏡の位置や向きが合わせて6mmや $3^\circ$ 程度設計からずれることで生じる値で最適化の粗さとの判断は妥当ではない。このずれの原因はステップモータを低速で回転させたことによる脱調が原因と考えている。

## 4.2 分解能

Figure4.1の横軸を波長 $\lambda$ 、縦軸 $P$ は出力に較正したときの $m = -1$ 次回折光のスペクトルをFigure4.2に示す。

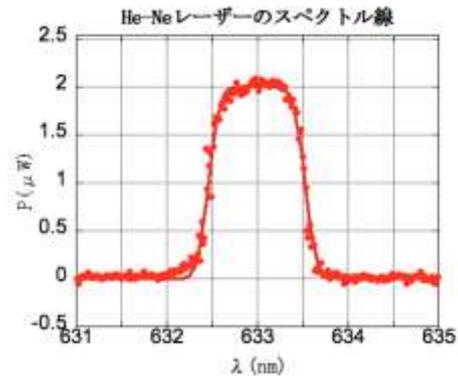


Figure4.2 He-Ne レーザーの線幅

このグラフのフィッティングは誤差関数 $P = A\{\text{erf}[B(x + C)] - \text{erf}[B(x - C)]\}$ (4.3)で行っている。ここでAはビームの強度、Bはスリット幅方向のビーム強度分布、Cは分散に対する相対的なスリット幅を表わす定数である。線幅は画像から1.1nmと判断できた。線分散と回折格子の分解能から予測される線幅が0.99nmであるため、概ね設計通りの分解能が得られている。線幅が大きくなる原因は収差によるビームの有限広がりや迷光と考えられそれらに波長依存性はないから、 $3.0\mu\text{m}$ 帯では分解能 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ が2700前後になると予想される。

## 5 まとめと課題

製作した分光器は、実測はしていないが設計によれば測定可能な波長領域は可視から $4.1\mu\text{m}$ で大きさは $148 \times 153\text{mm}$ (縦×横)である。また波長 $3.0\mu\text{m}$ に対して分解能は2700前後となると予想される。

今後中赤外光を分光するにあたって高次回折光をカットするロングパスフィルターを設置し、検出器をInAs光起電力素子に交換する必要がある。