

光スペクトラムアナライザの基礎

— 回折格子を用いた分光器 —



目次

1. はじめに	3
2. 分光器の基本構成	3
3. 分光器を構成する光学部品	3
3.1 回折格子 (Gratings: グレーティング)	3
3.1.1 回折格子とは	3
3.1.2 回折格子の式	3
3.1.3 回折格子の性能	4
3.1.3.1 回折効率	4
3.1.3.2 ウッド・アノマリー (Wood Anomaly)	6
3.1.3.3 回折格子の溝本数 (刻線数) と理論分解能	6
3.2 コリメータ/カメラ鏡	7
3.3 スリット	7
3.4 分光器基板	8
4. 分光器のマウンティングの例	9
4.1 ツェルニターナー (Czerny-Turner) 型分光器	9
4.2 リットロー (Littrow) 型分光器	10
4.3 リットマン (Littman-Metcalf) 型分光器	10
4.4 リットロー (Littrow) 型ダブルパス分光器	11
4.5 リットマン (Littman-Metcalf) 型クワッドパス分光器	11
5. 分光器の性能	12
5.1 波長分解能	12
5.1.1 角分散	12
5.1.2 線分散	13
5.1.3 逆線分散	13
5.1.4 シングルパス方式 (リットロー/ツェルニターナー) の分光器の波長分解能の算出	13
5.1.5 加分散型ダブルパス方式の波長分解能の算出	15
5.2 迷光	17
5.3 分光器の開口数 (NA: Numerical Aperture)	17
5.4 分光器の偏光依存損失 (PDL: Polarization Dependent Loss)	17
5.5 分光器の偽線	18

1. はじめに

分光器は、光部品・光半導体、分析・測定、医薬品・バイオ、化学などのさまざまな分野において、光通信用部品の評価、成分分析、水分測定、膜厚測定などの用途に用いられている。なかでも、回折格子分光は、近赤外の広波長域に渡って分光することができるため、いまや分光機器に欠かせない方式である。特に、光通信用機器や光学部品の評価の分野では、1.2μm～1.7μm帯において、高分解能かつ高効率である分光器が要求され、それらの性能を満足できる回折格子分光は、極めて重要な存在となっている。

本稿では、回折格子を用いた分光器について、その構成、分光原理、分光方式、分光器の性能などについて説明する。

2. 分光器の基本構成

分光器は、入射スリット、コリメータ（コリメート鏡、コリメートレンズ）、回折格子、集光器（カメラ鏡、集光レンズ）、出射スリットから構成され、波長掃引機構によって出射スリットを通過する光の波長を可変し、また出射スリット幅を可変することによって出射する光の波長分解能を可変する。

また、波長掃引機構を持たず、回折格子で波長が分散する方向にフォトダイオードアレーを並べて、各フォトダイオードの光を受光する方法もある。

上記の入射スリット、コリメータ、回折格子、集光器、出射スリットの配置によって、ツェルニターナー（Czerny-Turner）型、リトロウ（Littrow）型、リットマン（Littman-Metcalf）型などのさまざまなマウンティングが考案されている。

3. 分光器を構成する光学部品

分光器の基本構成でも述べた、分光器を構成する入射スリット、コリメータ、回折格子、集光器（カメラ鏡）、出射スリットなどの光学部品について説明する。

3.1 回折格子（Gratings：グレーティング）

回折格子の回折の原理および留意すべき性能について示す。

3.1.1 回折格子とは

回折格子は、微細な溝が平行に刻まれている板状の素子で、光の回折現象を利用して波長ごとに分離するための分散光学素子である。回折格子に光を入射すると、回折現象によって波長ごとに異なる方向に強められた回折光が発生する。

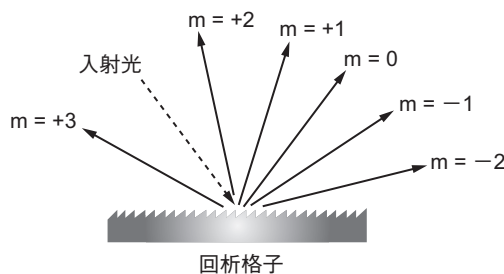
回折格子には、基板の形状の違いで平面回折格子と凹面回折格子、また用途によって透過型回折格子と反射型回折格子がある。格子の形状の違いでも、ブレイズ角をもった鋸歯状溝のエシェレット回折格子やブレイズドホログラフィック回折格子、正弦波状溝のホログラフィック回折格子、矩形状溝のラミナー回折格子とさまざまである。

3.1.2 回折格子の式

回折格子に任意の波長を入力したときの入射角と回折角の関係は、(1)式の回折格子の式で表わすことができる。

$$m \cdot \lambda = \cos(\delta) \cdot d(\sin\alpha + \sin\beta) \dots\dots\dots (1)$$

λ：波長、m：回折次数、δ：平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光の傾き、
d：格子定数（刻線の間隔）、α：入射角、β：回折角



回折次数の説明図

3.1.3 回折格子の性能

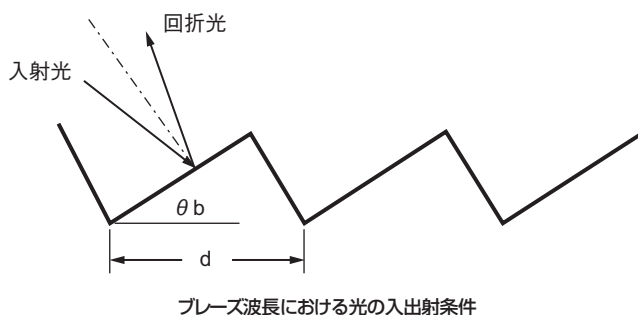
3.1.3.1 回折効率

回折効率は、回折格子への入射光強度に対する回折光強度の比を示し、回折格子の重要な性能の1つである。この回折効率は、主に回折格子の溝形状によって決まり、溝形状を変えることにより回折効率の波長特性を変えることができる。

回折格子として、最も代表的なエシェレット型平面回折格子やブレードホログラフィック回折格子は、鋸歯状溝の傾き、すなわちブレード角 (θb) をもった回折格子である。

この溝の斜面に対して入射光と回折次数 m 次の回折光が鏡面反射の関係にあるとき、回折次数 m 次の回折光にエネルギーの大部分が集中し、この波長 (ブレード波長という) で回折効率が最大となる。

このように、溝形状 (ブレード角など) を変えることによって回折効率の波長特性を変えることができる。



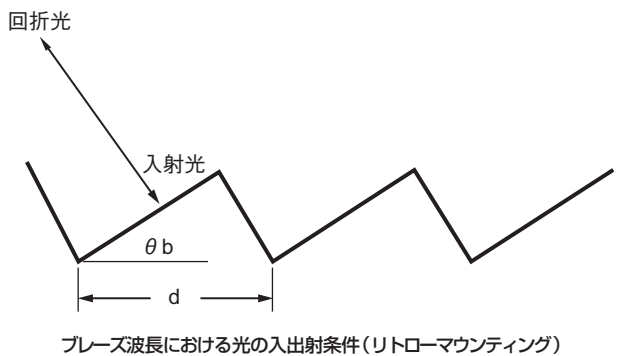
メーカーのカタログに記載されているブレード波長 (λb) は、溝の斜面に対して垂直入射をし、垂直逆方向に回折される場合の波長で記載されている。

この場合のブレード波長 (λb) は、回折格子への入射角と回折角を等しくした場合であり、(1) 式の回折格子の式における入射角と回折角を等しくおけば、ブレード波長は (2) 式で表される。

ここでは、平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光に傾きはないものとした ($\cos(\delta) = 1$)。

$$\lambda b = 2d \cdot \sin(\theta b) \dots\dots\dots (2)$$

λb : ブレード波長、 d : 格子定数、 θb : ブレード角



(2) 式からもわかるように、ブレード波長は、ブレード角を変えることによって波長を変えることができ、任意の波長の回折効率を高くすることが可能である。

実際に分光器を設計する際には、回折格子への光の入射角と回折角が等しくない光学系の方が多く、このような場合には製作した分光器の最も高い回折効率の波長がメーカーのカタログに記載されたブレード波長値に一致しなくなるため、注意する必要がある。

回折格子への光の入射角と回折角が等しくない光学系のブレイズ波長について、もう少し説明を加える。
 回折格子への光の入射角と回折角が $2a$ の角度をなし、ブレイズ波長を(以下、実効ブレイズ波長) λ_{bact} とする。
 この場合、入射角(α)と回折角(β)が回折格子の斜面に対して反射条件となるから、入射光と回折光の2等分線角と回折格子の法線のなす角はブレイズ角(θ_b)に等しくなる。 $\dots (\alpha + \beta)/2 = \theta_b$
 従って、1次回折光($m = 1$)とすると、(1)式の回折格子の式は、(3)式で表される。
 ここでは、平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光に傾きはないものとした($\cos(\delta) = 1$)。

$$\lambda_{\text{bact}} = d(\sin\alpha + \sin\beta) = 2d \cdot \cos\{(\beta - \alpha)/2\} \sin\{(\alpha + \beta)/2\} \dots \dots \dots (3)$$

λ : 波長、 m : 回折次数、 δ : 平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光の傾き、
 d : 格子定数(刻線の間隔)、 α : 入射角、 β : 回折角

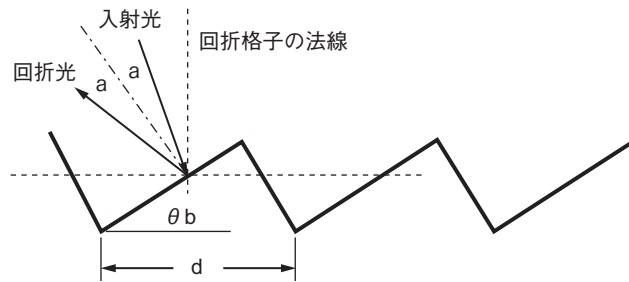
(3)式に、 $(\beta - \alpha)/2 = a$ 、および $(\alpha + \beta)/2 = \theta_b$ を代入すると、実効ブレイズ波長(λ_{bact})は、(4)式で表される。

$$\lambda_{\text{bact}} = 2d \cdot \cos(a) \cdot \sin(\theta_b) \dots \dots \dots (4)$$

(4)式に、(2)式のブレイズ波長: $\lambda_b = 2d \cdot \sin(\theta_b)$ を代入すると、(5)式となる。

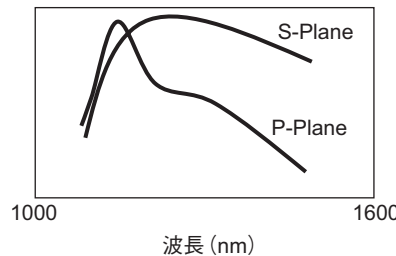
$$\lambda_{\text{bact}} = \lambda_b \cdot \sin(a) \dots \dots \dots (5)$$

従って、回折格子への光の入射角と回折角が $2a$ の角度をなす光学系の実効ブレイズ波長(λ_{bact})は、メーカーのカタログに記載されたブレイズ波長(λ_b)に $\sin(a)$ を掛ければ求めることができる。



実効ブレイズ波長の説明図

回折効率において注意すべき点に、入射光の偏光状態によって回折効率が大きく異なることがある。
 これは、回折格子の溝方向と電場ベクトルの振動方向が垂直なS偏光(TM波)と、回折格子の溝方向と電場ベクトルの振動方向が平行なP偏光(TE波)とで、回折効率が異なることに起因する。
 回折格子のS偏光とP偏光の回折効率の違いは、特に長波長領域で顕著となる。
 レーザー光のような偏光特性を有する光を測定する場合には、この特性に注意が必要である。
 また、メーカーのカタログに記載された回折格子の特性は、一般的にリトロマウンティングの場合の回折効率が記載されており、異なるマウンティングで使用する場合にはこの点も考慮しておく必要がある。
 例えばツェルニ・ターナーマウンティングの場合には、リトロマウンティングに比べて僅かに短波長へシフトする。



偏光によるグレーティングの回折効率の例

3.1.3.2 ウッド・アノマリー (Wood Anomaly)

回折格子には、回折効率が急激に変化してしまう波長が存在する。

これはウッド・アノマリー (回折異常) と呼ばれ、回折次数 m の回折光が回折格子表面と平行になる場合、すなわち回折角 $\beta = \pm 90^\circ$ になる場合に発生する。

この現象は、他の回折次数にエネルギーが伝搬する現象で、回折格子の溝方向と電場ベクトルの振動方向が垂直なS偏光(TM波)において顕著に現れる。

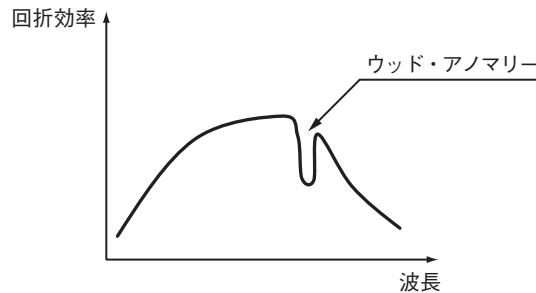
アノマリーが発生する波長は、(6)式で表わすことができる。

$$\lambda = d \{ \sin(\alpha) + \sin(\pm 90^\circ) \} / m \quad \dots \dots \dots (6)$$

d : 格子定数 (刻線の間隔、 $d = 1/N$ 、 N は刻線数)、 m : 回折次数、 α : 入射角

ウッド・アノマリーは(6)式から、入射角と格子定数によって決まることがわかる。

従って、測定したい波長付近にウッド・アノマリーが発生しないように、分光器のマウンティング (入射角) や回折格子の格子定数 (溝本数) を選定することが必要である。



ウッド・アノマリーによる回折効率の変化

3.1.3.3 回折格子の溝本数(刻線数)と理論分解能

回折格子の溝本数(刻線数)は、分光器の波長分解能を左右する重要な要素である。

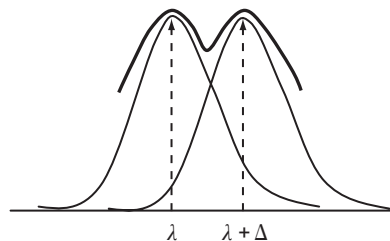
回折格子の回折光には有限幅の回折限界があり、レーリーの基準では、波長 λ のスペクトルにおける第1極小値の波長位置が、波長 $\lambda + \Delta\lambda$ のスペクトルの最大値となる場合を波長分解の限界と定義している。

この分解能 $\lambda / \Delta\lambda$ を理論分解能 ($R_s = \lambda / \Delta\lambda$) といい、波長 $\lambda + \Delta\lambda$ の2つの近接したスペクトル区別できる能力としている。ここで注意すべきは、理論分解能はスリット幅が無限小、かつ光学部品の収差などがない場合の分解能を表しており、あくまで回折格子単体の分解能を示す値であり分光器の分解能を示すものではないことである。

理論分解能 ($R_s = \lambda / \Delta\lambda$) を(7)式で示す。

$$R_s = \lambda / \Delta\lambda = m \cdot N \cdot W \quad \dots \dots \dots (7)$$

W : 回折格子の有効幅、 $N \cdot W$: 総刻線数 (N : 刻線数[本/mm]、 $N = 1/d$ 、 d は格子定数)



分解能の説明図

(7)式からもわかるように、光ビームがあたる回折格子の総刻線数が多ければ多いほど、高い分解能の分光器を実現することができる。

ただし、刻線数を多くすると、回折効率が低下して、波長帯域が制限される場合があるため注意が必要である。

なお、実際の分光器では、回折格子以外にも入射スリットや出射スリットやコリメータなどが用いられており、入射スリットや出射スリットが有限なスリット幅をもつことやコリメータなどの光学収差などにより、(7)式で求まる理論分解能は得られず、実際にはスペクトル線はさらに広がり分解能は悪くなる。

3.2 コリメータ/カメラ鏡

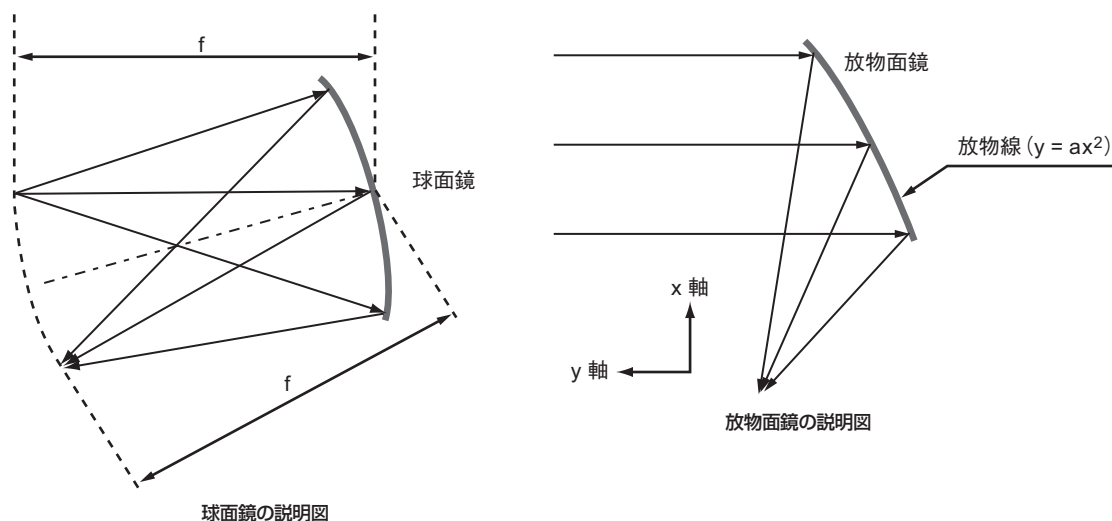
コリメータやカメラ鏡としては、球面鏡や軸外し放物面鏡が用いられ、コリメータでは球面波を平面波に、カメラ鏡では平面波を球面波に変換する。

球面鏡は、球面形状のミラーで、分光器のような軸外しの使用法では球面収差や非点収差が存在する。

放物面鏡は、放物線の回転により得られる放物面形状のミラーで、焦点から出た点光源を無収差で平行光に変換し、また逆に平行光を無収差で焦点に集光させることができる非球面鏡である。

上記の理由から、高分解能を必要とする分光器では、放物面鏡が用いられる。

なお、高分解能の分光器を実現する場合、光を入射する位置に配置する入射スリットとコリメータの焦点距離、および光を出射する位置に配置する出射スリットとカメラ鏡の焦点距離が一致するように正確に位置合わせをすることが極めて重要である。



3.3 スリット

出射スリットのスリット幅は、測定したい波長分解能に適したスリット幅を設定する。

波長分解能を Res 、逆線分散値を $D (= d\lambda/dL)$ とすれば、波長分解能に相当する概略のスリット幅 (W_{slit}) は、(8)式でも求まる。(逆線分散については、5.1 波長分解能の項で説明する。)

$$W_{slit} = Res/D \dots\dots\dots (8)$$

Res : 波長分解能、 D : 逆線分散

波長分解能相当の回折像幅 (Δx) をもつ矩形形状の回折像を波長分解能に相当する出射スリット幅 (Δx) で取り出した場合について考えてみると、出射スリットから取り出される光強度は2等辺三角形のスペクトルとなり、その半値全幅 (FWHM: Full Width at Half Maximum) は波長分解能に相当する。

また、波長分解能よりも小さい回折像幅をもつ矩形形状の回折像を波長分解能に相当する出射スリット幅 (Δx) で取り出した場合には、出射スリットから取り出される光強度は、台形のスペクトルとなり、この場合の半値全幅も同様に波長分解能に相当する。

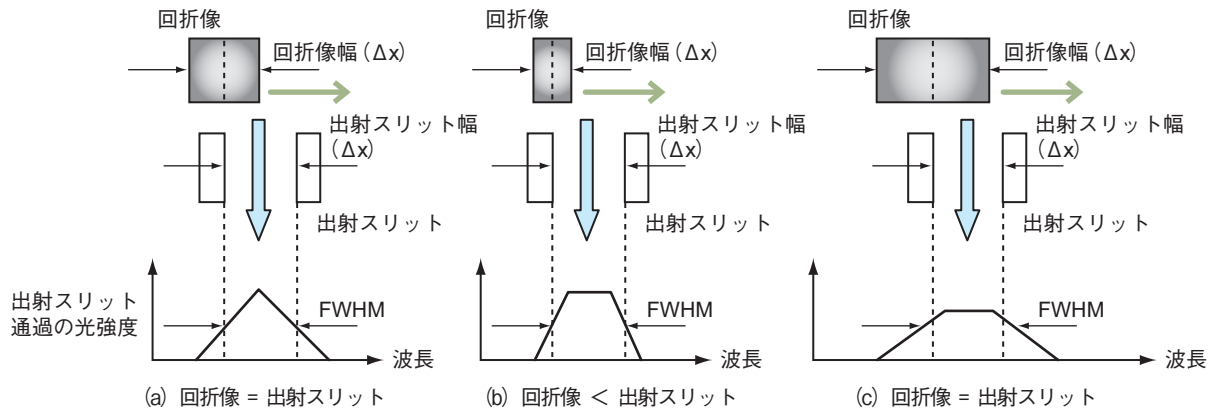
しかし、出射スリット幅に対して回折像幅が大きい場合には、出射スリットから取り出される光強度 (スペクトル) は広がってしまい、波長分解能相当のスペクトル半値全幅は得られず、また光レベルも低下してしまう。

これらから、分光器の性能が悪い (回折像幅が大きい) 場合には、出射スリット幅をいくら狭くしても波長分解能は良くならないことが分かる。

従って、高分解能の分光器を実現したい場合には、分光器の逆線分散を良くし、出射スリット上の回折像が波長分解能に相当する回折像幅よりも小さくなるように分光器を設計することが必要である。

光通信用光部品の評価で用いられる光スペクトラムアナライザの場合、光ファイバによって分光器に光入力される場合が多いが、このように光ファイバ入力する場合には、光ファイバが入射スリットの役目を果たすため入射スリットは不要である。

この場合、光ファイバの端面の位置を入射スリット位置、またファイバのコア径の半値幅を入射スリット幅と考えれば良い。ただし、出射スリット上の回折像幅は入射する光ファイバのコア径に依存するため、例えばGIファイバ (コア径 $50 \mu m$) のファイバで入力した場合には、出射スリットをいくら狭くしても、シングルモードファイバ (コア径 $10 \mu m$) 入力時と同等の波長分解能は得られない。

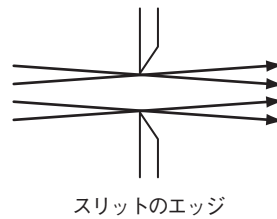


回折像と出射スリットと波長分解能の関係

スリットとしては、分光器内部への散乱光を抑えるために、できる限り薄いスリットが好ましく、厚い場合には光の入射側に鋭いエッジを施すと良い。スリットのエッジが傷つくと、迷光の原因となるので注意が必要である。

可動式のスリットの場合、波長が分散する方向にスリットが移動すると、分光器から出力される波長がずれてしまうため、スリット中心は常に同じ位置を保つようにしなければならない。

従って、開閉式のスリットであれば片開きスリットよりも両開きスリットの方が好ましく、また複数の固定スリット幅を選択して設定するタイプであれば、各スリットの中心が同じ位置に設定されるような工夫が必要である。



スリットのエッジ

3.4 分光器基板

温度変化に伴う熱膨張によって、コリメータやカメラ鏡の焦点距離や基板に取り付けた部品の配置は変化する。

コリメータやカメラ鏡は、一般的にパイレックスガラス（ホウケイ酸系ガラス、線膨張率： $3.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）や石英ガラス（線膨張率： $0.56 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、ソーダガラス（線膨張率： $8.5 \sim 9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）などで作られている。

温度変化の影響を受け難い分光器にするためには、分光器基板の材質の線膨張率をコリメータやカメラ鏡の材質の線膨張率と同等にすることが望ましい。コリメータやカメラ鏡の材質に合わせて、例えば、インバー（線膨張率： $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、スーパーインバー（線膨張率： $\pm 0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、ステンレス（線膨張率： $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、鉄（線膨張率： $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）などから線膨張率の近い材質から選択すればよい。

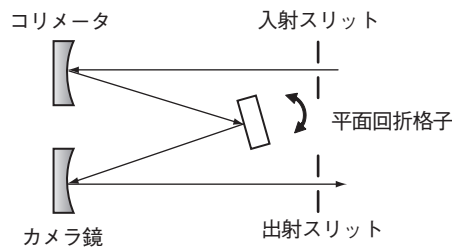
ちなみに、アルミニウムの線膨張率は $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と、コリメータやカメラ鏡の材質の線膨張率と差が大きいため、安価ではあるがあまり好ましくない。

4. 分光器のマウンティングの例

以下に、代表的なマウンティングの例として、ツェルニターナー (Czerny-Turner) 型、リットロー (Littrow) 型、リットマン (Littman-Metcalf) 型マウンティングについて簡単に説明する。

4.1 ツェルニターナー (Czerny-Turner)型分光器

コリメータの焦点距離の位置に置かれた入射スリットを通過した光は、コリメータで平行光とされて平面回折格子に入射される。平面回折格子によって回折された光は、波長ごとに異なる方向に分散された平行光となりカメラ鏡に入射される。任意の波長の光はカメラ鏡で集光されて、カメラ鏡の焦点距離の位置に配置した出射スリットを通して取り出される。波長の選択は、平面回折格子を回転させることによって行う。このマウンティングは最も一般的なマウンティングで、入射スリットとコリメータ、および出射スリットとカメラ鏡のそれぞれの位置調整が比較的容易である。



ツェルニターナー型マウンティングの例

出射スリットから取り出される波長は、回折格子の式： $m \cdot \lambda = \cos(\delta) \cdot d (\sin\alpha + \sin\beta)$ を満足する条件で選択される。回折格子の式は、(9)式のように書き換えることができる。

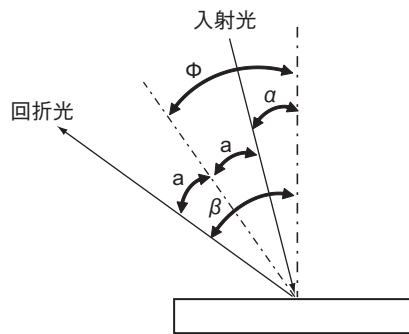
$$\lambda = \cos(\delta) \cdot d (\sin\alpha + \sin\beta) / m \dots\dots\dots (9)$$

$$= 2 \cos(\delta) \cdot d \cdot \cos\{(\beta - \alpha) / 2\} \times \sin\{(\beta + \alpha) / 2\} / m$$

λ : 波長、 m : 回折次数、 δ : 平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光の傾き
 d : 格子定数 (刻線の間隔)、 α : 入射角、 β : 回折角

(5)式を $(\beta - \alpha) = 2a$ とおくと、(10)式となる。

$$\lambda = \{2d \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(a) / m\} \sin(a + \beta) \dots\dots\dots (10)$$



回折格子の入射角と回折角の関係

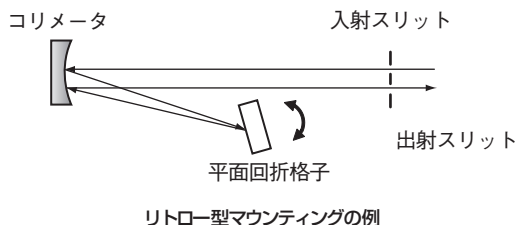
さらに、 $A = 2d \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(a) / m$ 、 $\Phi = (a + \beta)$ とおくと、(10)式は(11)式で表される。

$$\lambda = A \cdot \sin\Phi \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 Φ は入射光と回折光の二等分線と回折格子の法線がなす角を示し、 A および a は分光器のマウンティングで決定される光学系固有の定数である。従って、入射光と回折光の二等分線と回折格子の法線がなす角 (Φ) が \sin 関数を満足するように平面回折格子の回転角を制御することで、波長を決定することができる。

4.2 リトロー (Littrow)型分光器

リトロー型は、ツェルニターナー型におけるコリメータとカメラ鏡を共用した構成である。コリメータの焦点距離の位置付近に配置した入射スリットを通過した光は、コリメータで平行光とされて平面回折格子に入射される。平面回折格子によって回折された光は、波長ごとに異なる方向に分散された平行光となりカメラ鏡 (コリメータ) に入射され、そのうち任意の波長の光のみがカメラ鏡 (コリメータ) で集光されて、カメラ鏡 (コリメータ) の焦点距離の位置付近に配置した出射スリットを通して取り出される。波長の選択は、平面回折格子を回転させることによって行う。このマウンティングは、コリメータとカメラ鏡を1つのミラーで共用しているため光学収差に気を付ける必要があるが、ツェルニターナー型に比べて分光器を構成する光学部品が少ないため小型化、低価格化が可能である。



リトロー型もツェルニターナー型と同様に、出射スリットから取り出される波長は、回折格子の式を満足する条件で選択される。

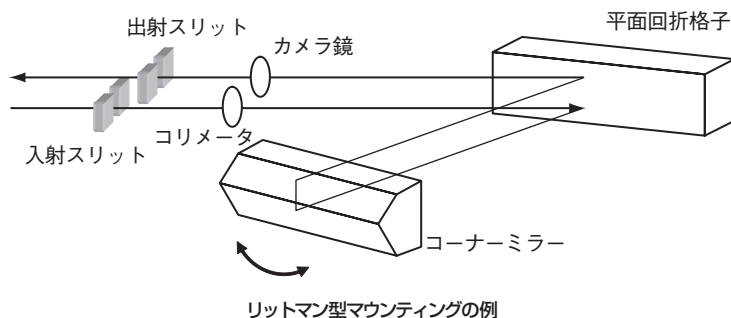
$$\lambda = A \cdot \sin \Phi \dots\dots\dots (12)$$

$$(\beta - \alpha) = 2a, A = 2d \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(a) / m, \Phi = (a + \beta)$$

λ : 波長、 m : 回折次数、 δ : 平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光の傾き
 d : 格子定数 (刻線の間隔)、 α : 入射角、 β : 回折角

4.3 リットマン (Littman-Metcalf)型分光器

入射スリットを通過した光は、コリメータで平行光とされて平面回折格子に入射される。平面回折格子によって回折された1回目の回折光は、波長ごとに異なる方向に分散された平行光となり、コーナーミラーへ入射する。コーナーミラーに入射した1回目の回折光はコーナーミラーで反射され、1回目の回折光と等しい入射角で再び平面回折格子に入射され、再び回折されて波長ごとに異なる方向に分散された平行光が出射される。平面回折格子で再度回折された2回目の回折光は集光器で集光されて、出射スリットを通して取り出される。波長の選択は、コーナーミラーを回転させることによって行う。このマウンティングは、コーナーミラーで反射できる範囲に限りがあるため波長範囲が制限されるものの、平面回折格子への入射角を大きくすることができ、さらに平面回折格子で2回の回折 (加分散) が行われるため、高分解能で小型な分光器を実現することができる。



4.4 リトロー (Littrow)型ダブルパス分光器

コリメータの焦点距離の位置付近に配置した入射スリットを通過した光は、コリメータで平行光とされて平面回折格子に入射される。平面回折格子によって回折された1回目の回折光は、波長ごとに異なる方向に分散された平行光となりカメラ鏡(コリメータ)に入射され、そのうち任意の波長の光のみがカメラ鏡(コリメータ)で集光される。

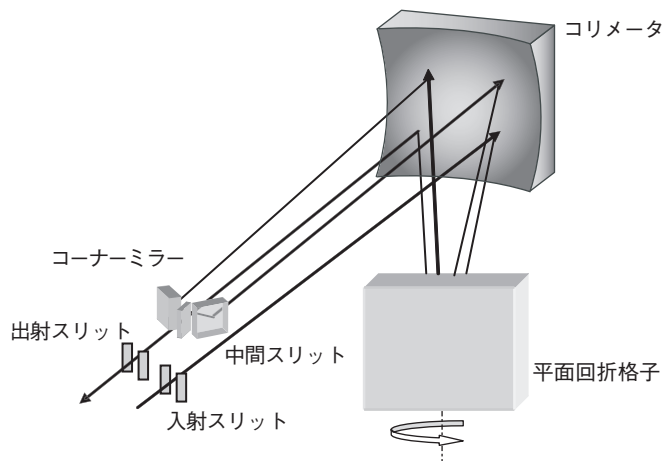
カメラ鏡(コリメータ)で集光された光は、コーナーミラーで折り返されてカメラ鏡(コリメータ)の焦点距離の位置付近に配置した中間スリットを通過する。

中間スリットを通過した光は、入射スリットから中間スリットまでの経路とは逆の経路(中間スリット → コリメータ → 回折格子 → コリメータ)で進み、2回目の回折光は出射スリットを通して取り出される。

波長の選択は、平面回折格子を回転させることによって行う。

コーナーミラーの折り返す方向を回折格子の刻線方向に折り返すと差分散配列となり、刻線に垂直な方向に折り返すと加分散配列の分光器が実現できる。

このマウンティングは、小型でありながら、高分解能かつ広ダイナミックレンジのスペクトルが得られる。



リトロー型ダブルパスの例

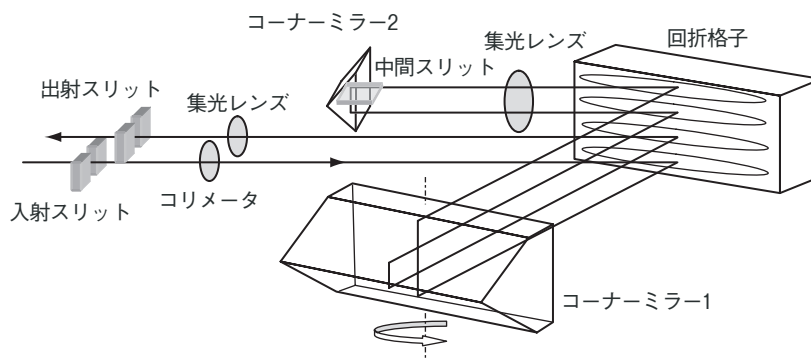
4.5 リットマン(Littman-Metcalf)型クワッドパス分光器

入射スリットを通過した光は、コリメータで平行光とされて平面回折格子に入射される。

平面回折格子によって回折された1回目の回折光は、波長ごとに異なる方向に分散された平行光となり、コーナーミラー1に入射する。コーナーミラー1に入射した1回目の回折光は、コーナーミラー1で反射され、再び平面回折格子に入射されて2回目の回折光が出射される。平面回折格子で再度回折された2回目の回折光は、集光器で集光されコーナーミラー2で折り返されて中間スリットを通過する。中間スリットを通過した光は、入射スリットから中間スリットまでの経路とは逆の経路(中間スリット → 集光器 → 回折格子 → コーナーミラー1 → 回折格子 → 集光器)で進み、3回目および4回目の回折光となり出射スリットを通して取り出される。

波長の選択は、コーナーミラー1を回転させることによって行う。

このマウンティングは、コーナーミラーで反射できる範囲に限りがあるため波長範囲が制限されるものの、平面回折格子への入射角を大きくすることができ、さらに平面回折格子で4回の回折(加分散)が行われるため、小型でありながら、高分解能かつ広ダイナミックレンジのスペクトルが得られる。



リットマン型クワッドパスの例

5. 分光器の性能

分光器の性能として重要な波長分解能、迷光、および分光器を使用する上で注意すべき開口数、偏光依存損失、偽線について説明する。

5.1 波長分解能

5.1.1 角分散

角分散 ($d\beta/d\lambda$) とは、回折格子が波長変化 ($d\lambda$) に対してどのくらい回折角が変化 ($d\beta$) するかを示す値である。

回折格子による1回の回折 (シングルパス) の角分散 ($d\beta/d\lambda$) について示す。

入射角 (α) を一定として、回折格子の式: $\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)/m$ の両辺を λ で微分すると、角分散 (13) 式が求まる。ここでは、平面回折格子の刻線に垂直な面と入射光に傾きは無いものとした ($\cos(\delta) = 1$)。

$$d\beta/d\lambda = m / \{d \cdot \cos(\beta)\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 β : 回折角

次に、加分散配列のダブルパス (回折格子による2回の回折) の角分散 ($d\beta/d\lambda$) について示す。

1回目の回折を (14) 式に、2回目の回折を (15) 式に示す。

$$\text{Gr1} \quad m\lambda = d(\sin\alpha_1 + \sin\beta_1) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{Gr2} \quad m\lambda = d(\sin\alpha_2 + \sin\beta_2) \quad \dots\dots\dots (15)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 α_1 : 1回目入射の入射角、 β_1 : 1回目入射の回折角
 α_2 : 2回目入射の入射角、 β_2 : 2回目入射の回折角

波長を λ から $\lambda + \Delta\lambda$ に変化した場合の回折角の変化量は、入射角 (α_1) を一定として、(14) 式と (15) 式の両辺を微分することで (16) 式と (17) 式が求まる。

$$(14) \text{式を}\lambda\text{で微分} \quad m = d \cdot \cos(\beta_1) \cdot d\beta_1/d\lambda \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$(15) \text{式を}\lambda\text{で微分} \quad m = d \{ \cos(\alpha_2) \cdot d\alpha_2/d\lambda + \cos(\beta_2) \cdot d\beta_2/d\lambda \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16) 式から、1回目入射時の角分散は (18) 式となる。

$$d\beta_1/d\lambda = m / \{d \cdot \cos(\beta_1)\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

加分散配列であるため、 $d\alpha_2/d\lambda = -d\beta_1/d\lambda$ とおくと、(17) 式は以下のように展開され、(19) 式が求まる。

$$\begin{aligned} m &= d \{ \cos(\alpha_2) \cdot d\alpha_2/d\lambda + \cos(\beta_2) \cdot d\beta_2/d\lambda \} \\ m &= d \{ -\cos(\alpha_2) \cdot d\beta_1/d\lambda + \cos(\beta_2) \cdot d\beta_2/d\lambda \} \\ m/d + \cos(\alpha_2) \cdot d\beta_1/\Delta\lambda &= \cos(\beta_2) \cdot d\beta_2/d\lambda \\ d\beta_2/d\lambda &= m / \{d \cdot \cos(\beta_2)\} + \{ \cos(\alpha_2) / \cos(\beta_2) \} \cdot d\beta_1/d\lambda \end{aligned}$$

(16) 式: $d\beta_1/d\lambda = m / \{d \cdot \cos(\beta_1)\}$ を代入すると、

$$\begin{aligned} d\beta_2/d\lambda &= m / \{d \cdot \cos(\beta_2)\} + \cos(\alpha_2) \cdot m / \{d \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)\} \\ d\beta_2/d\lambda &= (m/d) [1 / \{ \cos(\beta_2) + \cos(\alpha_2) \} / \{ \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) \}] \\ d\beta_2/d\lambda &= (m/d) [\{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} / \{ \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) \}] \\ d\beta_2/d\lambda &= m / \{d \cdot \cos(\beta_1)\} \cdot \{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} / \cos(\beta_2) \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

5.1.2 線分散

線分散 ($dL/d\lambda$) とは、波長 λ の変化 ($d\lambda$) に対する分光器の出射スリット上における位置の変化量 (dL) で、角分散にカメラ鏡の焦点距離を掛けることによって導くことができる。

回折格子による1回の回折 (シングルパス) の線分散 ($dL/d\lambda$) は、(20) 式で表される。

$$dL/d\lambda = f \cdot (d \beta / d\lambda) = m \cdot f / \{d \cdot \cos(\beta)\} \dots\dots\dots (20)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 β : 回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

また、回折格子による2回の回折 (加分散配列ダブルパス) の線分散 ($dL/d\lambda$) は、(21) 式で表される。

$$dL/d\lambda = \{m \cdot f / (d \cdot \cos \beta 1)\} \cdot \{\cos(\beta 1) + \cos(\alpha 2)\} / \cos(\beta 2) \dots\dots\dots (21)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 $\alpha 1$: 1回目入射の入射角、 $\beta 1$: 1回目入射の回折角
 $\alpha 2$: 2回目入射の入射角、 $\beta 2$: 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

5.1.3 逆線分散

逆線分散 ($D = d\lambda/dL$) は、線分散 ($dL/d\lambda$) の逆数であり、出射スリット上において単位長さ [1 mm] 離れた位置の波長差 [nm] を示す。この逆線分散 (D) に出射スリット幅を掛けると、出射スリット幅あたりの波長差が求まり、分光器の分解能を大まかに知ることができる。

回折格子による1回の回折 (シングルパス) の逆線分散 ($d\lambda/dL$) は、(22) 式で表される。

$$D = d\lambda/dL = d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f) \dots\dots\dots (22)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 β : 回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

また、回折格子による2回の回折 (加分散配列ダブルパス) の逆線分散 ($d\lambda/dL$) は、(23) 式で表される。

$$D = d\lambda/dL = d \cdot \cos(\beta 1) \cdot \cos(\beta 2) / \{m \cdot f \{\cos(\beta 1) + \cos(\alpha 2)\}\} \dots\dots\dots (23)$$

m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 $\alpha 1$: 1回目入射の入射角、 $\beta 1$: 1回目入射の回折角
 $\alpha 2$: 2回目入射の入射角、 $\beta 2$: 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

5.1.4 シングルパス方式 (リトロ-ツェルニターナー) の分光器の波長分解能の算出

リトロ-ツェルニターナー型分光器は、シングルパス (回折格子による1回の回折方式) の分光器である。スペクトル測定は、出射スリット上の回折像を有限幅の出射スリットで取り出すことによって得られる。すなわち、入射スリット幅が無限小である理論分解能の波長幅 ($\Delta\lambda_{s0}$) が、有限入射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$) や、光学部品による有限取差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$) や、分光器の光路を光線追跡して得られる幾何光学取差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$) によって広がった回折像分布の光 ($\Delta\lambda_s$) を有限幅の出射スリットで取り出すことになる。出射スリット上での回折像分布の拡がり、その各要因の波長幅を加算すれば良い。従って、分光器の分解能 ($\Delta\lambda_x$) は、回折像分布を拡げる各要因の波長幅と有限出射スリット幅に相当する波長幅を加算することで求める。

(a) 理論分解能の波長幅 ($\Delta\lambda_{s0}$)

理論分解能 ($R_s = \lambda / \Delta\lambda$) の波長幅 ($\Delta\lambda_{s0}$) は、(7) 式を展開すると (24) 式で表される。

$$\Delta\lambda_{s0} = \lambda / R_s = \lambda / (m \cdot N \cdot W) \dots\dots\dots (24)$$

W : 回折格子の有効幅、 $N \cdot W$: 総刻線数 (N : 刻線数 [本/mm]、 $N = 1/d$ 、 d は格子定数)

分光器は、波長によって回折格子を回転させる場合がある。この場合、回折格子への入射角が変化するため、回折格子の有効幅、すなわち実際に回折格子に入射光があたる幅は変化する。

回折格子に入射角が α 、ビーム径が Φb の光が入射した場合を考える。

(24) 式に、 $N = 1/d$ 、および $W = \Phi b / \cos(\alpha)$ を代入すると、理論分解能 (R_s) の波長幅 ($\Delta\lambda_{s0}$) は (25) 式となる。

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{s0} &= \lambda / R_s = \lambda / (m \cdot N \cdot W) \\ &= \lambda \cdot d / m \cdot W \\ &= \lambda \cdot d \cdot \cos(\alpha) / (m \cdot \Phi b) \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

λ : 波長、 d : 格子定数、 α : 入射角、 m : 回折次数、 Φb : 回折格子への入射ビーム径

(b)有限入射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$)

入射スリット幅 (K_{s1})に相当する波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$)は、入射スリット幅 (K_{s1})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(26)式で求まる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s1} &= K_{s1} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s1} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \dots\dots\dots (26)\end{aligned}$$

K_{s1} : 入射スリット幅
 d : 格子定数、 β : 回折角、 m : 回折次数、 f : カメラ鏡の焦点距離

光ファイバで入射する場合には、入射スリット幅 (K_{s1})を光ファイバの出力強度分布の半値幅とすれば良い。

(c)有限収差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$)

光学部品による有限収差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$)は、光学部品の収差 (K_{s2})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(27)式で求まる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s2} &= K_{s2} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s2} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \dots\dots\dots (27)\end{aligned}$$

K_{s2} : 光学部品の収差 (強度分布の半値幅とすれば良い)
 d : 格子定数、 β : 回折角、 m : 回折次数、 f : カメラ鏡の焦点距離

(d)幾何光学収差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$)

幾何光学収差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$)も同様に、光学収差 (K_{s3})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(28)式で求まる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s3} &= K_{s3} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s3} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \dots\dots\dots (28)\end{aligned}$$

K_{s3} : 幾何光学収差 (強度分布の半値幅とすれば良い)
 d : 格子定数、 β : 回折角、 m : 回折次数、 f : カメラ鏡の焦点距離

上記(a)の理論分解能の波長幅 ($\Delta\lambda_{s0}$)は、(b)の有限入射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$)、(c)の有限収差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$)、(d)の幾何光学収差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$)によって、出射スリット上で拡がった回折像分布 ($\Delta\lambda_s$)を(29)式に示す。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_s &= \Delta\lambda_{s0} + \Delta\lambda_{s1} + \Delta\lambda_{s2} + \Delta\lambda_{s3} \dots\dots\dots (29) \\ \Delta\lambda_{s0} &= \lambda \cdot d \cdot \cos(\alpha) / (m \cdot \Phi b) \\ \Delta\lambda_{s1} &= K_{s1} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s2} &= K_{s2} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s3} &= K_{s3} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\}\end{aligned}$$

λ : 波長、 d : 格子定数、 α : 入射角、 m : 回折次数、 Φb : 回折格子への入射ビーム径、 β : 回折角
 K_{s1} : 入射スリット幅、 K_{s2} : 光学部品の収差、 K_{s3} : 幾何光学収差

出射スリット上で拡がった回折像分布 ($\Delta\lambda_s$)をスリット幅が無現小の出射スリットで取り出す場合には、回折像分布 ($\Delta\lambda_s$)のまま取り出されるが、有限幅の出射スリットで取り出す場合には、有限幅の出射スリットであるが故にさらに分解能は悪化する。

ここで、(e)有限出射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s4}$)は、出射スリット幅に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けた(30)式で表される。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s4} &= K_{s4} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s4} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \dots\dots\dots (30)\end{aligned}$$

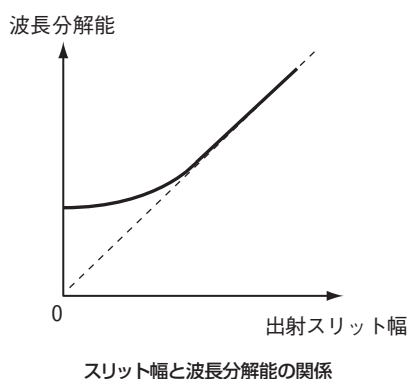
K_{s4} : 出射スリット幅

従って、シングルパス方式の分光器（リトロ型、ツェルニターナー型）の波長分解能（ $\Delta\lambda_x$ ）は、(31)式となる。

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_x &= \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_{s4} \dots\dots\dots (31) \\ \Delta\lambda_s &= \Delta\lambda_{s0} + \Delta\lambda_{s1} + \Delta\lambda_{s2} + \Delta\lambda_{s3} \\ \Delta\lambda_{s0} &= \lambda \cdot d \cdot \cos(\alpha) / (m \cdot \Phi b) \\ \Delta\lambda_{s1} &= K_{s1} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s2} &= K_{s2} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s3} &= K_{s3} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s4} &= K_{s4} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \end{aligned}$$

λ : 波長、 d : 格子定数、 α : 入射角、 m : 回折次数、 Φb : 回折格子への入射ビーム径、 β : 回折角
 K_{s1} : 入射スリット幅、 K_{s2} : 光学部品の収差、 K_{s3} : 幾何光学収差、 K_{s4} : 出射スリット幅

下図に示すように、出射スリット幅が出射スリット上の回折像分布に比べて大きい領域では、出射スリット幅で波長分解能は決定されるが、出射スリット幅が出射スリット上の回折像分布に比べて同等以下の領域では、出射スリット幅を小さくしても波長分解能は良くならない。



5.1.5 加分散型ダブルパス方式の波長分解能の算出

加分散型ダブルパス方式の分光器には、ダブルパス・リトロ分光器、ダブルパス・ツェルニターナー分光器、リットマン型分光器などがある。

加分散型をしたダブルパス・リトロ分光器やダブルパス・ツェルニターナー分光器は、シングルパスの出射スリットを通過した光を分散がさらに大きくなるように折り返され、逆光路で回折格子に射する。

また、リットマン型分光器も、回折格子で回折した光は、コーナーミラーで分散がさらに大きくなるように折り返され、逆光路で回折格子に射する。

以下に、これらの波長分解能（ $\Delta\lambda_x$ ）について説明する。

(a) 理論分解能の波長幅（ $\Delta\lambda_{s0}$ ）

回折格子に入射角が α 、ビーム径が Φb の光が入射した場合の理論分解能（ $R_s = \lambda / \Delta\lambda$ ）の波長幅（ $\Delta\lambda_{s0}$ ）について考える。 $N = 1/d$ 、および $W = \Phi b / \cos(\alpha)$ であるから、理論分解能（ R_s ）の波長幅（ $\Delta\lambda_{s0}$ ）は、(32)式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{s0} &= \lambda / R_s = \lambda / (m \cdot N \cdot W) \\ &= \lambda \cdot d / m \cdot W \\ &= \lambda \cdot d \cdot \cos(\alpha) / (m \cdot \Phi b) \dots\dots\dots (32) \end{aligned}$$

W : 回折格子の有効幅、 $N \cdot W$: 総刻線数（ N : 刻線数[本/mm]、 $N = 1/d$ 、 d は格子定数）
 λ : 波長、 d : 格子定数、 α : 入射角、 m : 回折次数、 Φb : 回折格子への入射ビーム径

(b)有限入射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$)

入射スリット幅 (K_{s1})に相当する波長幅 ($\Delta\lambda_{s1}$)は、入射スリット幅 (K_{s1})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(33)式から求まる。光ファイバで入射する場合には、入射スリット幅 (K_{s1})を光ファイバの出力強度分布の半値幅とすれば良い。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s1} &= K_{s1} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s1} \cdot d \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) / \{m \cdot f \{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} \} \dots\dots\dots (33)\end{aligned}$$

K_{s1} : 入射スリット幅
 m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 α_1 : 1回目入射の入射角、 β_1 : 1回目入射の回折角
 α_2 : 2回目入射の入射角、 β_2 : 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

(c)有限収差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$)

光学部品による有限収差回折像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s2}$)は、光学部品の収差 (K_{s2})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(34)式から求まる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s2} &= K_{s2} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s2} \cdot d \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) / m \cdot f \{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} \dots\dots\dots (34)\end{aligned}$$

K_{s2} : 光学部品の収差 (強度分布の半値幅とすれば良い)
 m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 α_1 : 1回目入射の入射角、 β_1 : 1回目入射の回折角
 α_2 : 2回目入射の入射角、 β_2 : 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

(d)幾何光学収差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$)

幾何光学収差の波長幅 ($\Delta\lambda_{s3}$)も同様に、光学収差 (K_{s3})に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けることにより、(35)式で求まる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s3} &= K_{s3} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s3} \cdot d \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) / m \cdot f \{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} \dots\dots\dots (35)\end{aligned}$$

K_{s3} : 幾何光学収差 (強度分布の半値幅とすれば良い)
 m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 α_1 : 1回目入射の入射角、 β_1 : 1回目入射の回折角
 α_2 : 2回目入射の入射角、 β_2 : 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

(e)有限出射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s4}$)

有限出射スリット幅の幾何光学像の波長幅 ($\Delta\lambda_{s4}$)も同様に、出射スリット幅に逆線分散 ($d\lambda/dL$)を掛けた(36)式で表される。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{s4} &= K_{s4} \cdot (d\lambda/dL) \\ &= K_{s4} \cdot d \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) / m \cdot f \{ \cos(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \} \dots\dots\dots (36)\end{aligned}$$

K_{s4} : 出射スリット幅
 m : 回折次数、 d : 格子定数、 λ : 波長、 α_1 : 1回目入射の入射角、 β_1 : 1回目入射の回折角
 α_2 : 2回目入射の入射角、 β_2 : 2回目入射の回折角、 f : カメラ鏡の焦点距離

従って、加分散配列ダブルパス方式の分光器 (ダブルパス・リトロー分光器、ダブルパス・ツェルニターナー分光器、リットマン型分光器)の波長分解能 ($\Delta\lambda_x$)は、(37)式となる。

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_x &= \Delta\lambda_{s0} + \Delta\lambda_{s1} + \Delta\lambda_{s2} + \Delta\lambda_{s3} + \Delta\lambda_{s4} \dots\dots\dots (37) \\ \Delta\lambda_{s0} &= \lambda \cdot d \cdot \cos(\alpha) / (m \cdot \Phi b) \\ \Delta\lambda_{s1} &= K_{s1} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s2} &= K_{s2} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s3} &= K_{s3} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\} \\ \Delta\lambda_{s4} &= K_{s4} \cdot \{d \cdot \cos(\beta) / (m \cdot f)\}\end{aligned}$$

λ : 波長、 d : 格子定数、 α : 入射角、 m : 回折次数、 Φb : 回折格子への入射ビーム径、 β : 回折角
 K_{s1} : 入射スリット幅、 K_{s2} : 光学部品の収差、 K_{s3} : 幾何光学収差、 K_{s4} : 出射スリット幅

5.2 迷光

迷光とは、出射スリットから(1)式の回折格子の式を満足する波長以外の光が出力されるものを言う。

迷光には2つの原因があり、1つ目は多重回折に起因するもの、2つ目はスリット含む分光器の光学素子の不完全さに起因するものが挙げられる。

前者の多重回折とは、回折格子の回折光がコリメータやカメラ鏡などで反射後の光が、再び回折格子で回折され出射スリットを通過するような場合である。これらの対策としては、分光器の配置を検討するか、遮光板などを用いて多重回折を除去する。

後者の光学素子の不完全さに起因するものとしては、スリットの刃の厚さに起因する散乱、ミラーや回折格子のキズや汚れによる乱反射、分光器の内部反射などがある。これらの対策としては、筐体内部の適切な所に遮光板や反射防板(植毛紙)などを配置して散乱・反射を除去する。

また、光が集光する位置では迷光が発生し易く、例えば出射スリットは出射スリットで蹴られた反射が戻らないように出射スリットと傾けるなどの工夫が必要である。

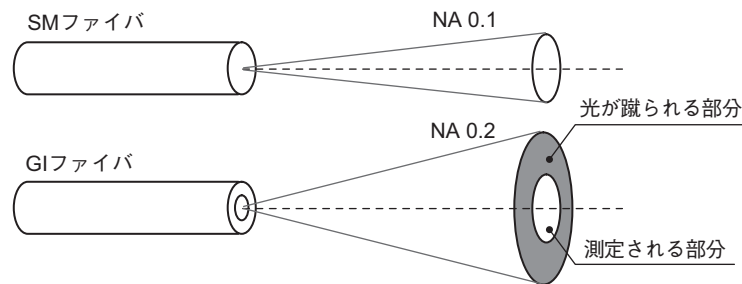
その他に、回折格子の溝間隔が周期的に不整な回折格子を用いると、真のスペクトル線の左右対称で等間隔な位置に複数本のゴースト(偽線)が現われる。このゴーストは、ルーリングエンジンによって機械的に溝を作ったルールド回折格子(Ruled Grating)に発生しやすく、これが気になる場合にはレーザー干渉縞を利用して溝を作ったホログラフィック・グレーティング(Holographic Grating)を使用する。ホログラフィック・グレーティングは、ルールド回折格子に比べ、通常一桁以上迷光が小さい。

迷光が特に気になる測定の場合には、分光器を2段、3段と重ねた構成の分光器を用いることが最適である。

5.3 分光器の開口数(NA: Numerical Aperture)

分光器の大きさ上の制約から、分光器内部のコリメータやカメラ鏡や回折格子で被測定光が蹴られずに測定できる開口数にも制限がある。

光ファイバ通信の計測では、SM(Single-mode)ファイバやGI(Graded-Index)ファイバを用いて分光器に光が入力される。SMファイバのNAは0.1程度であるが、GIファイバのNAは0.2と大きく、GIファイバ入力時には分光器内部の光学素子で被測定光が蹴られてしまうことが多く、この場合には測定レベルに誤差を生じてしまう。



光ファイバからの出射光の放射分布

5.4 分光器の偏光依存損失(PDL: Polarization Dependent Loss)

回折格子のS偏光とP偏光の回折効率が異なるため、分光器に入力する光の偏波状態によって、出射スリットから出力する光強度は異なる。

入力光に対する分光器の偏光無依存化の方法としては、入力光を直交偏波に分離して各偏光成分の光を回折格子の1つの偏光(S偏光とP偏光のいずれか一方)に入射させる方法、入力光を直交偏波に分離して各偏光成分の光を回折格子のS偏光またはP偏光に対し45°の方向にする方法などがある。

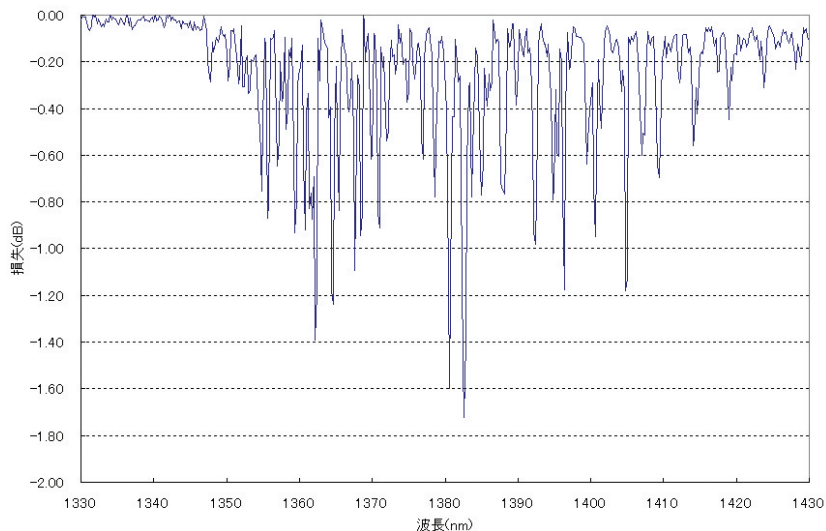
上記のような偏波依存損失に対する対策が施されていない分光器については、入力光の偏波を変化させないようにして測定を行う必要がある。

5.5 分光器の偽線

水蒸気の吸収スペクトルの影響や他の回折次数の回折光による影響によって、実際には存在しない偽線スペクトルが観測される場合がある。

前者については、空気中に存在する水蒸気(OH基)が1350nm～1450nm付近に複数の吸収スペクトルを持つため、分光器内部に存在する水蒸気の吸収スペクトル(吸収リップル)が観測されるために発生する。

この吸収リップルの大きさは、湿度によって変化し、湿度が高いほど、大きなリップルが観測される。従って、水蒸気の吸収スペクトルが影響するような測定では、乾燥した空气中で測定する必要がある。



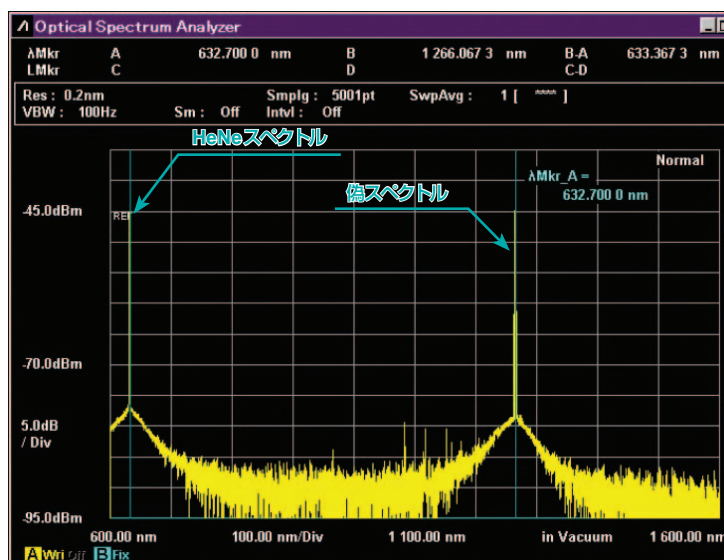
水蒸気の吸収スペクトル

後者については、測定波長とは異なる波長および異なる回折次数の回折光を測定してしまうことにより発生する。

(1)式の回折格子の式： $m \cdot \lambda = \cos(\delta) \cdot d(\sin\alpha + \sin\beta)$ からわかるように、 $m \cdot \lambda$ が等しくなる場合には回折格子の回折条件が等しくなる。

従って、波長 λ の光を入射すると、波長 λ (1次回折光)以外に、波長 λ の2倍の波長位置に2次回折光が出力し、実際には存在しない波長 λ の2倍の光があるように観測されてしまう。

例えば、波長632.8nmのヘリウム-ネオン(He-Ne)レーザーの光を測定すると、2倍の波長の1265nm付近にスペクトルが観測されてしまう。



波長632.8nmの光を入力した場合のスペクトル



お見積り、ご注文、修理などは、下記までお問い合わせください。記載事項は、おことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

<http://www.anritsu.com>

本社	〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1	TEL 046-223-1111
厚木	〒243-0016 神奈川県厚木市田村町 8-5	
	計測器営業本部	TEL 046-296-1202 FAX 046-296-1239
	計測器営業本部 営業推進部	TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248
	〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1	
	ネットワークス営業本部	TEL 046-296-1205 FAX 046-225-8357
新宿	〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-14-1	新宿グリーンタワービル
	計測器営業本部	TEL 03-5320-3560 FAX 03-5320-3561
	ネットワークス営業本部	TEL 03-5320-3552 FAX 03-5320-3570
	東京支店(官公庁担当)	TEL 03-5320-3559 FAX 03-5320-3562
仙台	〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央 4-6-1	住友生命仙台中央ビル
	計測器営業本部	TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529
	ネットワークス営業本部東北支店	TEL 022-266-6132 FAX 022-266-1529
大宮	〒330-0081 埼玉県さいたま市中央区新都心 4-1	FSKビル
	計測器営業本部	TEL 048-600-5651 FAX 048-601-3620
名古屋	〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅 3-20-1	サンシャイン名駅ビル
	計測器営業本部	TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485
大阪	〒564-0063 大阪府吹田市江坂町 1-23-101	大同生命江坂ビル
	計測器営業本部	TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118
	ネットワークス営業本部関西支店	TEL 06-6338-2900 FAX 06-6338-3711
広島	〒732-0052 広島県広島市東区光町 1-10-19	日本生命光町ビル
	ネットワークス営業本部中国支店	TEL 082-263-8501 FAX 082-263-7306
福岡	〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田 1-8-28	ツインスクエア
	計測器営業本部	TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699
	ネットワークス営業本部九州支店	TEL 092-471-7655 FAX 092-471-7699

再生紙を使用しています。

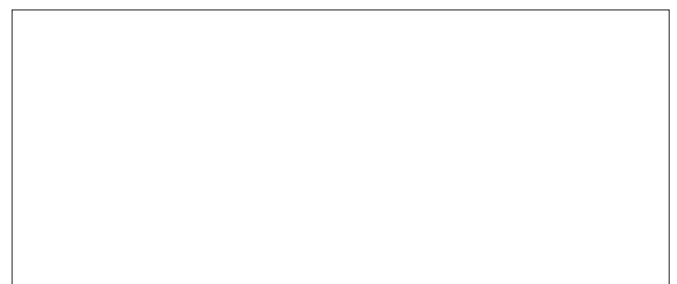
計測器の使用法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221、FAX: 0120-542-425
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

● ご使用前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

1207



■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

■このカタログの記載内容は2013年3月5日現在のもので、

No. MS9740A-J-R-1-(1.00) [\[告知\]](#)

dcdm/CDT