分光学のための基礎技術

第1講 モノクロメータ

嶋村 輝郎

日本光学工業精機事業部 東京都千代田区丸の内3の2の3(富士ビル) (〒100)

(1977年2月4日受理)

Fundamental Techniques for Spectroscopy

Teruo SHIMAMURA

Nippon Kogaku Kogyo K.K. 3-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100

(Received February 4, 1977)

1. 緒 言

分光学は一口でいうと、われわれの周囲にあるさまざまな物質と、いろいろな波長の光とがどういう関係にあるかを研究する学問であり、光を使って物質について研究する学問である。したがって物質の性質即ち物性論や物質の構造即ち構造化学に関心をもつ物理・化学・農学・医学・薬学の分野の人達の研究対象分野となり、自然科学及びその応用分野に多大なる貢献をして来た。この分光学に欠かせないものが分光器であったことは今更言うまでもない。殊に最近の分光学の進歩によってその応用面が広く開拓されて、分光器が種々の分野に用いられるようになった。特に機器分析の分野が著しい進歩をとげ、紫外・可視・赤外分光々度計、旋光々度計、蛍光々度計、炎光々度計、原子吸光々度計、発光分光分析機の中に用いられるようになり、基礎研究者、応用研究者はもちろん工業での開発研究者、生産管理業務担当者も直接・間接的に分光器を使用することとなった。筆者らが分光器の設計・製造・販売に携わるものとして最近とみにお付合いの増えた分野として光素子(発光ダイオード、光電変換素子)の開発を行っている電子工業に従事する人々、生化学を研究する医学分野の人々があげられ

るが、このことは、光情報機器及びライフサイエンスの発展が70年代の重点開発テーマであることと大いに関係があるかと思われる。このように非常に広い分野に亘って分光器の活用が普及している。現代の文明は物質文明とも言われており、物質への探究が続く限り、分光器は利用されつづけられよう。(現に次のエネルギー物質の探究は急速にすすめられている。)このことは科学技術とつながりのある仕事をしている人々はもちろんこれから関係するであろう若い人々が、いつかどこかで必ず1度は分光器とかかわり合いをもつであろうことを予想させる。本講座では、これから分光器を活用したい人、活用せねばならぬ人を対象に、モノクロメータ(単色計)の製作課程をモデルとして、分光器がいかに出来上っているかをやさしく解説したいと思う。この拙稿が分光器への入門書となりえれば、更に分光器の購入選定時の参考書に、分光器を自製する際のガイドになりえれば筆者の幸甚とするところ です。尚筆者らがよく問合せをうけるものとして、分光器の出力の問題がある。本稿の最後につけ加えておいたので参考にして欲しい。

2. 分光器の構成と原理

分光器の基本的な構成は、入射スリット、コリメータ

鏡, 分散素子, カメラ鏡, 出射スリットあるいは写真乾板取枠, 波長走査機構, 波長素子計, 暗箱より成り立っている. 分散素子としては波長による屈折率の差を用いるプリズムと波長による回折の大きさの違いを用いる回折格子とに大別され, それぞれ長短合わせもっているが, 今日回折格子の刻線技術及びレプリカ作製技術が大変進歩し, 容易に入手できることと相まって, 分光器の大半のものはほとんどいいほど回折格子を用いたものになっている. 従ってここで取扱われる分光器は回折格子分光器に限定される. 出射スリットを用いたものと, 写真乾板取枠を用いたものとは, 一般的には各々モノクロメータ (単色計), 分光写真器と呼ばれて区別されている. 市販品の中には両方兼用²⁾のものもあるが, ここで取扱われる分光器はモノクロメータに限定される. これらの構成要素のうちで入射スリット, コリメータ鏡, 回折格子, カメラ鏡, 出射スリットがどのように配置さ

れるかによってマウンティングの区別がある. これらは結像収差を小さく, コンパクトであること, 光学素子の数を少なくするなどの観点から検討を加えられて決められたもので, 開発した人の名前をつけて呼ばれているものが多い. Fig. 1 (a) (b) (c) にその代表的なものを示してある. (a) は Nikon モノクロメータ G-250 の配置図であるが, これは Czerny-Turner 型である. (b) は Littrow 型であり, (c) は Ebert 型である. その他にこれらをもとにした種々のタイプもある. これらのマウンティングの長所・短所に関しては数多くの解説書³⁾があるのでここでは説明を省きます. これらのうちで現在最も普及していると思われるのは Fig. 1 (a) の Czerny-Turner 型と思われるのでここでの話しはこのタイプに限定される. Fig. 1 (a) に於いて入射スリット S1 を通過した光源からの光は平面鏡 M1 によって光路を曲げられ, コリメータ鏡 C1 を照射し, 平行光束となって平面回折格子 G にあたる. この時コリメータ鏡 C1 の焦点距離の位置に, 入射スリット S1 が置かれていることが条件である. G にあたる光は回折を受け各波長ごとに異なる方向に分散された平行光束となる. この平行光束のうち, ある波長 λ_0 の光はカメラ鏡 C2 により反射され, 平面鏡 M2 をへて出口スリット S2 の上に波長 λ_0 の色をした入射スリット S1 の像として結像され, S2 を通して波長 λ_0 の光が取出される. この時他の波長の光は λ_0 と傾きが異なるから S2 の近傍の別な所に結像されているが S2 の位置と一致しないので S2 からは出てこない. 取り出される波長 (走査波長) λ_0 は次の条件式によって決められている.

$$\lambda_0 = 2d \cdot m \cdot \sin(\gamma + \beta) \cdot \cos \gamma$$

ここで d ; 格子定数, m ; 回折次数, β ; 回折角, 2γ ; 入射光束と出射光束のなす角で定数, 回折格子 G を回転すると β が変わり, 走査波長 λ_0 が変化することになる.

3. モノクロメータの仕様の見方

いかなる装置も設計・製作しようとする時あるいは選択購入しようとする時, 希望している仕様をはっきりさせねばならないが, モノクロメータについても当然同じである. この仕様が要求される光学素子の品質, 機械系の工作加工精度等は大に関係するからである. 以下にモノクロメータの主要仕様とそれが要求する検討事項を記すことにする.

3.1 光学型式

これは先に述べたマウンティングを意味します. (例; Czerny-Turner 型) 各マウンティングの持つ長所・短所を理解しておく必要

Fig. 1 (a)

Fig. 1 (b)

Fig. 1 (c)

がある。

3.2 焦点距離 f^*

口径比や逆線分散との関係が検討されねばならない。尚この大きさに応じてモノクロメータのサイズがほぼ決まると考えて良い。焦点距離が大きい程、口径比は大きくなり、暗いモノクロメータになり、かつ逆線分散が小さくなる。このことは後にでてくる式の上でみることができる。

焦点距離を大きくして、口径比を同じにしようとしても、必要なサイズの回折格子に限度があるし、鏡が大きくなり製作精度がきびしくなるということを頭にいらておきたい。

3.3 口径比 F

焦点距離 f を口径 ϕ で割った値である。 F が小さい程明るいモノクロメータとなる。さらに口径 ϕ が大きい程明るくなるがそれに相反して収差が大きくなって、分解能が劣化していくのでどこかで妥協点がみつけれねばならない。従ってこの値は分解能と同時に評価されねばならない。尚、口径は回折格子の寸法で決まることが多く、回折格子面は矩形状のことが多いのでその時 ϕ は次式で求めることが出来る。幅が w でルーリングの長さが l の回折格子の場合には、

$$\phi = 2\sqrt{wl}/\pi$$

となる。

3.4 逆線分散度 D (nm/mm)

回折格子の角分散は

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}$$

で示される。ここで m : 次数, d : 格子定数, β : 回折角, これから出口スリット上での分散が導かれ、これは線分散と呼ばれ、

$$\frac{dL}{d\lambda} = f \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mf}{d \cos \beta}$$

で示される。

逆線分散度はこの逆数であり、

$$D = \frac{d\lambda}{dL} = \frac{d \cos \beta}{mf}$$

で示される。この値は出射スリット面上で1

mm はなれた所の波長差は Dnm であることを意味している。特に分光写真器の場合重要な値となる。

3.5 回折格子

3.5.1 溝本数 N (本/mm)

これは逆線分散, 走査波長域と関係がある。格子定数 d は $1/N$ で示されるので先の逆線分散度の式に代入すると $D = \cos \beta / (N \cdot mf)$ となり、この式から、例えば N が2倍になると D は $1/2$ になることが判る。更に $d = 1/N$ を回折の式

$$\lambda = \frac{d}{m} (\sin \alpha + \sin \beta)$$

に代入すると

$$\lambda = \frac{1}{mN} (\sin \alpha + \sin \beta)$$

となり、この式から、例えば N が2倍になると走査波長が $(1/2)\lambda$ になるので走査波長域が $1/2$ にせまることが判る。

3.5.2 刻線面積 (幅 w mm × 長さ l mm)

一般には、非点収差をへらすため長さ方向の寸法 l を制限し、分解能をうるため幅 w を広くとるので矩型の場合が多い。口径比 F とのつながりについては先に説明してある。刻線幅 w の大きさが分解能に関係あることは後に述べる。

3.5.3 ブレーズ波長 λ_b

回折格子の回折効率の最大値における波長はブレーズ波長と呼ばれる。(Fig. 2 (a)参照) 従って自分の欲しい波長域を考えて、適したブレーズ波長の回折格子を選択せねばならない。カタログに記してあるブレーズ波長 λ_b は、溝の斜面に対し、垂直入射し元の方に回折される場合の波長をいっており斜面と格子全体の平面とのなす角 θ_b (ブレーズ角, Fig. 2 (b)参照) と、入射角 α 及び回折角 β が等しくなるから、カタログブレーズ波長は $\lambda_b = 2d \sin \theta_b$ となる。一般の場合には入射光と回折光が 2γ をなすような使い方をするのでカタログ値からずれることを認識していただきたい。この場合は入射光と回折光が斜面に対し正反射の条件を満たす場合であり、実効ブレーズ波長 λ_b' は

$$\lambda_b' = \lambda_b \cdot \cos \gamma$$

* 通常はコリメータ鏡、カメラ鏡で同じ値にされる。

Fig. 2 (a)

Fig. 2 (b)

Fig. 2 (c)

で表わされカタログブレイズ波長 λ_b より短波長へシフトすることが判かる。このことを考慮して回折格子を選択して欲しい。

尚1次のブレイズ波長が λ_b のとき、回折効率が0.5以上の波長範囲は次の不等式で概略求められる。

$$\left(\frac{2}{2m+1}\right)\lambda_b < \lambda < \left(\frac{2}{2m-1}\right)\lambda_b$$

ここで m は回折の次数である。Fig. 2 (c)は次数によるブレイズ波長の変化を示してあるが、回折効率カーブがなくても上の不等式からカーブを近似的につくることができるのでこの式を記憶すると便利であろう。

3.6 分解能

回折格子分光器の分解能として

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = mN'$$

(m : 次数, N' : 回折格子の総本数)を考えている人が以外と多い。こういう人は $N' = w/d$ (w : 回折格子幅, d : 格子定数)であるから回折格子幅の大きいものを用いれば用いる程分解能が高いと考えている。しかしこれはスリットの幅が無限に狭く、かつ光学系に収差のない理想的の場合であり理論分解能と呼ぶべきものである。実際にはスリット幅は有限であり、その上幾何光学的収差はさげられないから実効分解能はこのようにならず、むしろ悪くなる。以下に筆者の分解能に対する筆者なりの理解の仕方をあげておく。Fig. 3 (a)は理論分解能の場合で無限小幅のスリットの2つの回折像の強度分布から、分離しうる波長差を決めている。Fig. 3 (b)は、それに収差が加わった場合で、回折強度分布が広がるの

Fig. 3

で分離しうる波長差が大きくなり、分解能が悪くなることを示している。ここで有限スリット幅の時のスペクトル線幅は幾何光学的像の幅と回折による幅 $2\varepsilon'$ との和になると考え³⁾、Fig. 3 (c)* に示すように、相隣れる2つのスペクトルは $\sigma + \varepsilon'$ だけ隔った時分解可能と考える。この時波長差を $\Delta\lambda$ とすると、

$$\Delta\lambda = \left(1 + k + \frac{Sw}{f\lambda}\right) d\lambda$$

ここに s : スリット幅

w : 口径

f : カメラ鏡の焦点距離

λ : スペクトル線の波長

$d\lambda$: スリットが無限に狭い場合の分離しうる最小波長差

k : 収差がある時の波長差の拡大係数

このように考えると、無収差回折幅、有限収差回折幅、有限スリット幾何光学像幅を計算してそれらの大きさを比較することによって分解能がどの項によって決められているかわかる。例えばスリット幅が大きい時は第3項のみを考えればよいであろう。分解能は上に述べた因子の他に、スリットの良否、光学系の調整誤差、光学系の研磨精度などによっても、左右されるので、モノクロメータの分解能を見る時には実測データを示してあるものが、出来ばえそのもの示してあるので大変望ましい。実測データでは分離できる最小波長差で示したいのだが、これは2つの相隣れるスペクトル線の相対的強度にも影響され、波長差間隔が適当で、等強度の2つの相隣れるスペクトルがなかなかないので Fig. 3 (c)にみるように半値幅表示で代用することが多い。その場合、波長とスリットの幅、長さを付記してあることが条件である。

これは波長によって回折幅も収差も異なるからである。一番無責任な表示は先に述べた理論分解能をもって分解能としているものである。なので注意を喚起したい。Fig. 3 (d) はスリットの長さ変化に対する分解能の変化の例である。先にのべたようにスリット長さも明記すべきであることが判る。

3.7. 使用波長域

この場合、機械的走査可能波長域と光学的波長域と区別しておく方がよい。一般的にはこの両者は短波長側の差としてでてくる。前者は零次光からとっておくと調整などに大変便利になる。後者の場合は光学的に精度や性能（波長正確度、波長再現性、分解能、迷光等）を保証できる領域として記される。特に短波長側は 1900 Å 以下に酸素の吸収がはじまり、モノクロメータとして取出される光量が小さくなるのでこのあたりに短波長側の限界をもってくることが多い。少し高級なものになると窒素パージング用のポートを筐体にもうけて 1700 Å あたりにしているものも数多くある。この値より短波長を取出すモノクロメータは真空分光器の使用となろう。

今、機械的走査波長域が（0 次光より～）、光学的走査波長域が（1700 Å より～）という場合、0 次光と 1700 Å の間については、極端な場合この間では、光学的な収差も、走査機構の精度も悪いこともありえる。そういう意味でもこの2つの表現方法を区別しておくことが望ましい。前者の場合は走査機構の駆動軸の長さ等に効いてくるが、後者の場合、仕様上かかわりのあるのは、鏡や、回折格子の反射率や回折効率の問題等多くなるので充分な検討が必要である。起りうるトラブルは使用波長域をそのまま信用している場合でこれは、光源や検知器の強度、感度が大いに関係していることを忘れている場合である。厳密に言えば、光源や検知器の効果を除去したモノクロメータ自身の透過分光効率を示した上で云々されるべきである。

3.8 迷光

迷光というのは、自分が欲しい波長以外の光として解釈される。これは一般には測定のみまたげとなるので、小さい方が当然望ましい。特に微弱光の測定の場合、信号に対するノイズとして大いに問題になる。このことはラマン分光や蛍光分光用のモノクロメータが迷光に関する仕様をやかましく言われていることで理解できる。

迷光の原因としては2つある。1つは多重回折によるものである。これに関する詳しい説明は文献^{4,5)}を参照していただきたい。こ

* Fig. 3 (c) は正確ではありません。

これは光学設計的にある程度はさけられるものであるが、収差を良くすること即ち分解能をあげることと多少相反する問題*があり、完全除去はむずかしいようである。今1つはモノクロメータの光学素子(スリットも含む)の不完全さに起因する。例えば、スリットの刃厚が大きいことによる散乱、平面、球面反射鏡、回折格子表面のゴミやよごれやキズによる乱反射、これらの支持棒や筐体壁面での散乱反射等である。走査波長以外の光は筐体内のどこかにあるのがモノクロメータであるからして、それらの光のふるまいを追いかけて適当な所にトラップやついたてを設けて散乱反射をできるだけ除去することが望ましい。従ってこのあたりにどの位の注意が払われているかは良いモノクロメータかどうかの判定材料でもある。その他に Wood のアノマリと称してスペクトルの中に異常な現象が表われることが多い、(Fig. 4 参照)モノクロメータを使用しているうちにこれに気づいて問合せをしてくるユーザの方が以外と多い。これを除くにはどうしたらよいのだろうかという素直な疑問が多い。筆者などもやさしい解説の出現を望む一人である。迷光の表示方法もいかげんなものが大変多い。今欲しい波長の光強度を I_λ 、その時の迷光強度を I_n とす

ると、 $(I_n/I_\lambda) \times 100\%$ で迷光は表わされる。ところがこの値は、光源の分光分布特性、検出器の波長感度特性にも依存してしまうので、光源及び検知器を明記した全測光システムとしての迷光とされねばならぬ。さもなくば分光分布特性の判っている光源や熱電対検知器等を用いてキャリブレーションした値で欲しい。いずれにしる取出す波長によって変化する値であるので迷光を言う時には(走査波長 $\sim \text{\AA}$ の時、 $\sim \%$)という表示法をとっているものが信頼できる。

迷光を除去する方法としては、2つのモノクロメータをシリーズにして用いたり、色ガラスフィルタ、干渉フィルタ、液体フィルタを使用したり、例えば solarblind フォトマルのように限定された波長感度特性をもつ検知器を用いたりする方法がある。

3.9 波長正確度及び波長再現性

波長正確度は波長表示計の値と取出されている真の波長値との合致の程度を示す。波長再現性はその合致の程度のパラツキである。今出射スリットよりとりだされる真値を λ_R とし、その波長を n 回(n は大きい値)くり返し出射スリットより取り出したとする。その時のカウンタ値を $\lambda_{cm}(m=1,2,\dots,n)$ とすると、

波長正確度は、カウンタ値の平均値

$$\lambda_a = \sum_{m=1}^n \lambda_{cm} / n$$

を用いて $|\lambda_R - \lambda_a|$ で表わされる。波長再現性は $|\lambda_a - \lambda_{cm}|$ の最大値で表わされる。

波長走査機構の精度は走査波長によって異なってくるので、これらの値も使用波長域中の2~3ヶ所の値として与えられるのが丁寧である。

4. スリット

スペクトル線は入射スリットの像であるから、スリットの間隔は平行であって、かつ尖鋭なスペクトルを得るためにはエッジは鋭く仕上げられ、且つ、正しく向い合っていないければならない。スリットのエッジが傷つくとスペクトル上に波長に無関係に横縞が現われるので、傷つけないようにすることが必要です。Fig. 5はスリット刃の形状を示してあり、使い方としてはAの側が正しい使

Fig. 4

* Fig. 1 (a) に於いて γ を小さくしたいがあまり小さくすると2重回折が起る。

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 7

い方である。Bの使い方をすると、図にあるようなふるまいをする光線があり迷光の原因となります。スリット部の構造としては Fig. 6 にあるようにフォーカス方向と面内回転に関して微調機構をとりいれるとベターである。これは一度調整すると度々いじるものではないのでプリミティブな方法でよいであろう。Fig. 7 はその1例である。この例では、モノクロメータ筐体についている筒MTに内筒ユニットSTがはめ合いではいつている。STにはピンPが取付けてありネジSCの押し引きで前後動できるようになっている。Fig. 7 では明らかでないがネ

ジSCは東西南北の方向についている。スリットユニットSUは内筒STにとりつけられるので前後動及び面内回転ができる。スリット幅の開閉方式は下記のように分類できる。

{ 固定幅スリット
 { 片開きスリット
 { 両開きスリット
 { 可変幅スリット

モノクロメータのスリットとして望ましいのは両開きスリットである。この場合どんなスリット幅でも、常にスリット中心に表示波長が位置するからである。固定幅スリットの場合波長域によっては、ガラス表面に、蒸着エッチングして作る方法も採用される。

スリットの総合的な性能はスリットの刃の精度と開閉機構の精度でできる。スリットの刃では真直度(凹凸度)と刃先の厚さ及び2つの刃の段差が問題になる。スリットの刃先は、肉厚部分から装置内への散乱光をできるだけ少なくすべく、可能な限り薄い方がよい。フラット側の面を外側へ向けて用いることは先に述べた。

刃の材料は寸法や手に入る工作機械によって決められる。小さなサイズの刃にはニッケル・シルバー(洋白)が非常に適している。これは安定で耐蝕性が良く、機械加工がしやすく、仕上がり面が良い。しかし欠点はやわいなので、スリットをとじた時、刃の間につまっているゴミで容易に刃先がいたんでしまう。大きなスリット刃は普通、スティールで作られる。ステンレススティールが耐蝕性の良さから、当然考えられる。しかし、機械加工がやりづらく、研削によって良い仕上げ面を得にくい。従ってステンレスを使ったスリットは一般に高くつくであろう。筆者らの場合、SUS 7 (p) を用いたものが多い。市販のスリットは dove-tail 型の案内のスライドとスリット幅調整のためのスクリュ機構からなっていることが多い、しかしコンパクトで巧妙なこのタイプの設計は、非常に高度な加工、組立技術を要求し、しばしば身近にある金物工場の能力を超えることが多い。もっと簡単なスリット機構も紹介されているが、ここでは Dovetail 型を示す。Fig. 8 のような刃の形状を例にしてみる。フライスで仕上代を考えた寸法で Fig. 8 にあるような

Fig. 8

形状にした後、鈍しを行う。a面、b面加工ではクランプによる歪み等をさけるため履へロウ張りして良質面のグラインダーにかける。c面、d面の角度出し寸法出しの加工も履でやる方法が良いであろう。c面の角度出し、b面による刃厚寸法出しの最後のつめはガラス研磨を行うのが良いと考える。研磨材は酸化アルミナ #3000位が良い。a面はエッジ仕上げの時の真直度に効くので鏡面仕上げが良い。メタポリ #500 を用いて充分であろう。エッジ仕上げは先ず履とロウ埋めして鉄皿と砂との磨きで刃厚を 50μ 位とった後 #2000 ないしは #4000 のダイヤモンド砥石で手みがきでやる。20mm 長のスリットの場合、刃厚 20μ 以下、真直度 $\pm 2\mu$ 以下に押えたと最高級のものとなろう。これはルーペや高倍の投影機で調べながら仕上る。一般には、刃先をうすくすると真直度がむずかしくなるが、注意して製作すれば真直度 $0.5\sim 1\mu/10\text{mm}$ 程度に製作できる。次に Dove-tail 型の開閉機構について簡単に記す。両開きの場合、一つの動作で両方のスリット刃を等しい量だけ移動させなければならずむずかしいところである。基本的には Fig. 9 に示すようにスリット刃の固定台 F を移動用の案内 G (例えば、V レース、ボールレース等) に沿って動かす方式ですが、その移動量の制御精度をあげるため、楔状の軸 W をマイクロメータ M で動かし、スリット刃の固定台 F を押し開く様にして幅をかえてゆく。ここで P は固定台 F にとりつけられたピンであり、これを介して W の動きが F に伝わる。マイクロメータは市販のものの中から選べる。このような方式ですと、最小幅 $1\sim 2\mu$ 、長さ $10\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 程度が期待できる。ひと口に 1μ 、 2μ と云っても、実際問題は非常にむずかしいもので、例えば 100 倍の投影器等で拡大しても、やっと $0.1\text{mm}\sim 0.2\text{mm}$ にしか見えない。ましてや平行度、真直度等をチェックするのは至難の技になる。更に出来るだけコンパクトにしようとするので製作精度としては容易ではない。従ってミクロ

Fig. 9

ンオーダーのスリットは非常にむずかしいと云える。

スリットの長さは光量調整のために変えられるものが多いがその場合の方式にはつぎのようなものがある。

①固定幅マスク交換式

②ステップ・マスク切換方式(クリックストップ)

③楔状マスク移動方式

④両開きスリット方式

②④ではマスク板に長さを示すインデックスを刻字すると良く、③では安価なマイクロメータを利用すると良い。

尚スリットの設計の際に留意すべきことは幅読取のためのマイクロメータ目盛がみやすい位置にあるようにするというのである。

5. 反射鏡(コリメータ鏡及びカメラ鏡)

5.1 反射鏡の材料について

コリメータ鏡はその焦点にスリットを置くと、ここから入った光を平行光線にして回折格子に投射する。平行光線でないとすると、回折格子で大きく収差がでてしまうので一般的には平行光線にする。

反射鏡材の種類として①ソーダガラス②ホウケイ酸系クラウンガラス③超低膨張ガラスの3種に大別される。ソーダガラスは別名青板ガラスとよばれ通常青い色がついている。このガラスの厚板製品より切り取った鏡材が一番よく用いられている。国産品の厚みは 15mm くらい、輸入で 20mm 厚位であると思われる。熱膨張係数は 90×10^{-7} 程度であり、脈理や歪が残存していても鏡作に悪い効果はない。

ホウケイ酸ガラスの代表はバイレックス(米国、コーニング)であり、反射鏡材には通常鋳込み成形の丸材を用いるがアニールを良くやってあるので、ガラス質の安定が良い。色は通常淡い黄色で、質は大変硬く強いのであるが脆くて尖った先などかけやすい。熱膨張係数はソーダガラスの $1/3$ と小さく、硬いので美しい研磨面が得られ化学的に安定している。国産では小原光学ガラス製造所の反射鏡材 E 6 がこれに相当しよう。

超低膨張ガラスは膨張係数がホウケイ酸ガラスより1桁小さいガラス群を総称して言う。代表的なものに①コーニング社の熔融石英ガラス、②オウエンス・イリノイ社のセルビット、③保谷ガラスのクリストロン・ゼロがあり熱膨張係数は 2×10^{-7} と少ない。セルビット及びクリストロン・ゼロは褐色をしている。普通ガラスの約3倍の硬度であるので荒ずり、仕上げずりには時間がかかる。

分光器の反射鏡材として①のソーダガラスが一般的で

ある。太陽光をうけた分光器とか、熱線域の赤外線を分光する時など以外は①でまず問題ない。②③のものは天体望遠鏡などで昨今ひんぱんにつかわれだしている。

材径と鏡材厚の関係は1/6位が望ましく1/8が実用上の限界であろう。薄いと研磨の際の圧力でガラスが曲り偏心したり、セル中でのわずかの圧迫でガラスがひずむ。ここで注意したいのは鏡材径は角オトシで2~3 mm、セルの押さえ枠で2~3 mm 縮小されるので有効口径と鏡材径の大きさには気をつけることが望ましい。

5.2 反射鏡の蒸着と仕様の与え方

通常反射鏡には高い反射率を有する金属の薄膜が用いられ、基板に膜を形成する方法として真空蒸着法・化学メッキ法などがあるが、前者が広く利用されている方法である。Fig. 10 にみるように Al の蒸着膜は紫外から赤外にわたって平坦で且つ高い反射率を示し、基板面への付着も強く、膜の表面は酸素と化合して酸化膜 (Al_2O_3) となり耐候性もかなりよいので、コリメータ鏡、カメラ鏡には都合が良い。悪い真空中で蒸着すると反射率が低下するが、真空度を 10^{-5} Torr 位にすれば反射率90%程度になり、日数の経過とともに空気にさらされて85%内外に低下する。Table I は膜厚と透過率の関係であるが、蛍光灯がすかして見えなくなる位まで蒸着すればほぼ良いと思う。Al 膜がまれに浮いて来ることがあるが、これは④下地の汚れ②蒸着時のオイルバック③真空度の悪さのどれかに原因することが多い。特に下地の洗剤は、しっかりしたメーカでは自動洗条機（アルカリ洗剤、水洗い、イソプロピルアルコールを用いたもの）でやっているので問題ないが、アルコールやエーテルを用いて布手ふきの場合にはふき残りに特に注意がいる。事実これによるトラブルが一番多いようである。

Fig. 10

Table I

膜厚 m μ	$\lambda=500$ nm	
	反射率%	透過率%
50	11	70
75	25	45
100	55	25
125	74	12
150	78	8
200	84.5	4
250	88	2
300	89.5	—
350	90	—
400	90	0

Al 表面鏡の Al 膜が Al_2O_3 になり、耐久性が良くなることは先に述べたが、汚れをふいたりすると多少弱くうまくふけない。即ち機械的にはあまり強くない。耐久性をさらに良くしたり、機械的に強くするために透明な保護膜を蒸着することが多い。よく用いるのは SiO 膜である。この膜は機械的に強く、容易にふけるし、耐食性に富み可視短波長から赤外域に亘って透明なため Al の保護膜として多く用いられる。膜厚は $nd=\lambda/2$ になるように干渉色の観察で制御する。蒸着速度が $10\text{\AA}/\text{sec}$ 程度以上になると 500 nm 以下の波長で吸収が増加し反射率を低下さすので高真空で遅い蒸着が好ましい。Mg F_2 のフラッシュスパッタは紫外域での反射率の向上になるのでモノクロメータとしては蒸着したいものであるが、電子ビームフラッシュで2~3秒、低温蒸着等むずかしい面が多く、蒸着の専門家にまかせた方がよい。ここでこの MgF_2 のコートは機械的に決して強くなく、保護膜としてよりむしろ反射率向上用のコートと言った方が良さそうである。従って MgF_2 コートの鏡をもつモノクロメータは取扱いを丁寧にしたい。

Al の蒸着作業では、一般にヒータによる基板加熱は、膜にクラックが入って反射率が低下したり、基板で再蒸発して付着しなかったりするので行われない。その代わりにイオンボンバード（低真空中でのグロー放電）を行ないガラスの表面をクリーニングし、膜の性能を高める。イオンボンバードは電極の配列に仕方や、印加する電圧電流及び真空度によりその効果が異なるので適正な条件はあらかじめ決めておく必要がある。Al の蒸発源はフィラメント型でW線のフィラメントに Al 線をU字形に曲げて吊り下げて蒸発させる。

鏡単体の仕様としては、焦点距離 f の許容誤差として1

% $\sim 0.1\%$, 面程度とし $\lambda \sim \lambda/8$, 偏心* は $10'$ 位に与えると上クラスのモノクロメータに対応できる. 硝子図の出図に際しては, 鏡の角オトシは必ず行うことを指示し, それに伴う鏡ホルダとの寸法関係の検討を必ず行うことを忘れてはならない. 尚鏡の側面は乱反射を防ぐ意味で黒すみ塗りを行うことが望ましい.

鏡の寸法を決めるのには, 回折格子を光束制限絞りと考えて, 実際に光束光路図を作図して決めるのが良い. 波長走査に応じて回折格子が回転し, 入射光束幅が最大になる所, 出射光束幅が最大になる所があるのでその波長位置でコリメータ鏡の横寸法, カメラ鏡の横寸法を決める. 縦寸法は, スリットの上下端から回折格子の縦寸法一杯に出る光束がケラレのないように決めると良い. 一般的にはカメラ鏡の縦寸法は, コリメータ鏡のそれより大である. このようにして決めた横と縦の寸法を考え, 更に収差を良くするために Fig. 1 (a) の角度 2γ を出来るだけ小さくすることを考えると反射鏡の形状は矩形型になる. それ故にガラスのカケ**等を防ぐ意味で先述したような角オトシの重要性がうなずけるであろう.

5.3 反射鏡の出来ばえテスト

鏡面テストの方法は, フーコーテスト, ロンキエテスト, 焦線テスト, リッチーテスト, マイケルソン・トワイマンの干渉計等種々ある. その中でフーコーテストは一番簡易な構造のテストのわりには精密かつ鋭敏なテスト法であるのでここではこれについて説明する. Fig. 11 にあるようにピンホール S から出た光を被検反射鏡 M で取れんさせ, 取れん点 F' の後方近くに目 E を置き, 鏡面が一様に明るく見えるようにしておき, かみそりの刃 N (ナイフエッジ) を F' のところで光軸に直角に動かし, 切りこんで行く. 刃が光軸に近づくに従い, 鏡面からくる

Fig. 11

* レンズの外径に対する中心軸と光軸とに横ずれがある時, 偏心があるといい, そのずれ量を偏心量という. ドイツでは横ずれ量 e そのものを mm 単位であらわし偏心何 mm といっているが筆者らは焦点距離 f で割った値即ち角度で表わしている.

** 球面鏡を矩形状に切り出すと四つ角が尖ってしまう.

Fig. 12

光がナイフエッジ N に遮られるので, 反射面の一部は影となり暗くなる. その影の模様から反射鏡の良否を判定する. ナイフエッジ N は支持台の上に載せてネジで前後, 左右に微動できるようにしておく, その場合 Fig. 11 のように光源及びピンホール S, ハーフミラー H を同一支持台にのせておくオートコリメーション法となり便利である. 尚この方法は曲率半径を求めるのに用いることもできる. Fig. 12 は面が完全にできて収差のない場合のナイフ位置によるパタンの形を示している. もしナイフエッジが焦点面にあれば鏡面はエッジが焦点に接した瞬間, 全面が一斉に暗くなる. 面が不完全な時及収差のある時のパターンの解折は多少むずかしい. 光学の専門書⁹⁾を参照していただきたい.

5.4 反射鏡のマウント

200 mm ϕ 以下の鏡だとゴム系糊でアルミニウム板につけることによって充分保持できる. エポキシ系樹脂は鏡ガラスとアルミ板の膨張係数のちがいのため, 耐久性に乏しいために用いない方がよい. これ以上大きい鏡は通常セル内にいれられる. セルは円筒状のカップにし, 前面には押え環がネジ込みでとりつけられ, 鏡の前面の端を 3 点にある 1 ~ 1.5 mm 厚位のキルクを通して軽く押し, 一方セル後面はやはり 1 ~ 1.5 mm 厚くらいのキルクを通して 3 点で鏡の背面をささえているように鏡を入れるのが, 通常採用されている方法である. セルの内径は, 鏡の外径に 1 ~ 1.5 mm 厚のキルクやナイロンのバンドをまいて丁度位に決めると良い. さてこのように鏡を保持したアルミニウム板やセルは, 通常 L 型の金物にとりつけられる.

この場合鏡が 100 mm ϕ 位までは, キネマチックマウ

Fig. 13

Fig. 14

ントの Cone, Slot, Flat システムを用いて支持し、それ以上の鏡のサイズのときは、3組の押し引きネジで支持するのが良いと思われる。Fig. 13 は前者の例であり、Fig. 14 は後者の例を示している。Fig. 13 においては、スプリングの引張りとし、端が球状になっている3つのネジのつっぱりとによって鏡のはった平板や鏡の入ったセルが保持される。このキネマチックマウントの採用でアライメントのための2軸廻りの回転と、フォーカシングのための前後動の調整機構をもった鏡のマウントとなっている。尚キネマチックマウントに関しては後に頁をさいてあるので参考にして欲しい。Fig. 14 においては押し引きネジの調整でアライメント2軸調整、フォーカシング前後動を行うことになる。Fig. 13, Fig. 14 のいずれの場合もフォーカシングの前後動の粗調整はL型金物台座のネジ取り付けのバカ穴で行うのが良い。回転調整のネジは微旋条にこしたことがないが、5 mmφ、ピッチ 0.5 mm のもので間に合うであろう。これらの金物の材料は軽合金で良い。

6. 波長走査機構

出射スリットから取出す波長を変えるには回折格子の

Fig. 15

回転が必要であり、このための機構が波長走査機構である。この走査機構は今日では、波長にリニア、あるいは波数にリニアなものが採用されることが多い。波長リニアを達成する方法はモノクロメータのサイズと要求される精度に依る。比較的小さな回折格子モノクロメータでは、Fig. 15 のような簡単なドライブ機構を用いることが多い。回折格子ホルダーの背面あるいは回転台からバーがでており、バーの先端には硬い鉄球（例：ボールベアリング）がはめこまれている。この硬球はネジの先端にとりつけられている平盤の上をなぞる。平盤そのものも焼入れしたものであり、平面度が数フリンジ位までに研磨されたものである。更にネジの軸に対して20～30秒の垂直度でとりつける必要がある、これを行うのにはオートコリメータの使用が良い。平盤に対してオートコリメータをセットし、ネジを回転させて行き十字線の出ぎをみると良い。ネジは市販のマイクロメーター

Fig. 16

ネジを用いる。この機構ではマイクロメータの動きは、回折格子の回転の $\sin$ に比例、即ち波長に比例する。大きなモノクロメータでは、マイクロメータの代わりに、より大きな精密ネジとそれに沿って回転なしにすすむナットが用いられる。Fig. 16 はこのようなサインバー機構の一般原理図である。

θ : 回折格子の光軸に対し、正反射(0次スペクトル)を与える位置からの回転角

α : 入射角

β : 回折角

ϕ : 入射・回折両光軸のはさみ角の半分

s : サインバー 0 次的位置からのナットの移動量

δ : 回折格子回転中心からリードネジ中心軸へ下した垂線とサインバー 0 次との角(簡単化のために $\delta=0$ にとることが多い)

d : 回折格子定数

回折格子の方程式より

$$m\lambda/d = \sin \alpha + \sin \beta = 2 \cos \phi \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Fig. 16 の幾何学的関係より

$$l \sin \theta = S \cos \delta \quad (2)$$

(1)と(2)より

$$\lambda = 2d \cos \phi \cdot \cos \delta / ml \times S = CS \quad (3)$$

但し

$$C = 2d \cos \phi \cdot \cos \delta / ml$$

ここで d, ϕ, m, l は装置的に定数であるので C は比例定数となり、波長 λ はナットの移動量 S に比例する。いいかえれば連続送りモータで波長走査した場合、波長表示目盛が $\sin$ 目盛でなく等間隔のものになり、波長表示精度そのものも向上する。Fig. 17 はサインカム例であり、比例関係が成立するが、カムが非常に高精度にな

り、実用上不利である。与えられたカムの回転に対して必要なカムの高さの計算は比較的容易であるがカムフォロワーを考えると複雑になって来る。カムフォロワーは通常ボールかローラでありスプリングの力のもとでカムのエッジに触れている。Fig. 17 にみるようにカムの回転中心 O と接触点 C を結ぶ線と、フォロワーの中心と接触点 C を結ぶ線とはかならずしも一致する必要はない。与えられたカムの回転角に対して、その高さが計算されるのはフォロワーのセンターの軌跡に対してである。だからこの高さとカムの形状の関係は複雑になる。先に戻って(1)式と(2)式にて、すべての文字 $\phi, \theta, s, l, \delta$ を変数として、 λ の関係を各々偏微分し、 λ の全微分 $d\lambda$ を考えると、(1)式より

$$d\lambda = -\lambda \tan \phi + \lambda d\theta / \tan \theta \quad (4)$$

(2)より

$$d\lambda = \lambda \cdot ds/s - \lambda \cdot dl/l - \lambda \tan \delta \cdot d\delta - \lambda \tan \phi \cdot d\phi \quad (5)$$

が導かれる。

ここで $d\phi$: 回折格子回転台のセッティング誤差

$d\theta$: 回折格子の回転角誤差

ds : リードネジのナット送り量誤差

dl : サインバーの長さ誤差

$d\delta$: リードネジ軸のセッティング誤差

とする。上記の各変数の誤差量を装置的に決定された各々ある一定量と考えると、 λ の誤差 $d\lambda$ への影響は各々の変数の誤差量の係数の大きさにより、およそ知ることができる。この解析で何が大きく誤差として効くか、どの精度を押えるべきかの検討ができる。Fig. 18 は出射スリットから取出される波長 λ に対して、 $d\lambda$ がどのような傾向にあるかを示している。 $|d\lambda|$ が大きい程、走査波長に大きい誤差を与える。更に $d\lambda$ は λ によって変化するものであるから、波長誤差を言う時は使用波長域

Fig. 17

Fig. 18

での最大値で表示するか、さもなくば2ヶ所位の波長での値を明記してある方が望ましい。ここで、波長走査の場合、リードネジの送り量誤差 ds の係数が λ に関し、一定であるのもサインバー機構の効果である。Nikon モノクロメータ G-500 の場合⑤、⑥式は次のようになる(λ は 750 nm に固定して考える)

$$d\lambda = -0.0007 d\phi + 0.007 d\theta \quad \text{⑤}$$

$$d\lambda = 0.01 ds - 0.0046 dL - 0.0024 d\delta - 0.0007 d\phi \quad \text{⑥}$$

(ここで、 ds, dL は μm 単位、 $d\theta, d\delta, d\phi$ は角度の秒単位を用いて算出している。) ⑥式において $dL, d\delta, d\phi$ を零とすると、 $d\lambda = 0.01 ds$ となる。例えば波長再現性の仕様を 0.05 nm とすると(実際この値だが)、リードネジの送り量誤差は、

$$ds = 0.05 / 0.01 = 5 \mu\text{m}$$

となる。

実際には、波長再現性には先の式で判明したように他の誤差ファクタが加算されるので、これも可能な限り小さくしておく方が良いので、ネジの精度はもっと高い必要がある。例えば Nikon モノクロメータ G-500 ではリードネジとナットは単一ピッチ誤差にて、2~3 μm 以下、累積ピッチ誤差にて数 μm 以下のものを使用し、波長正確度及び波長再現性の確保がなされている。次にリードネジの走査機構と回折格子の回転軸について具体例を若干述べてみる。Fig. 19 は基本的な走査機構のリ

Fig. 19

ードネジ・ナット部の図である。リードネジを回転させることにより、ナットが定盤上を移動しながらバーを運び回折格子回転台を回転させている。なお、ナットの回転止めはナット底面と定盤との接触にて行っている。リードスクリューとナット間にはピッチ誤差の他にガタがある。また、ナットのすべり面においてもナットの底面、定盤面が良い面精度でできていてもナットはリードネジ軸と完全に平行な動きをすることはできない。また、定盤面(ナットのすべり面)にホコリが付き易くその影響によりナットの動きも悪くなりやすい。上記要因により、ナットは下左右にフレながら定盤上を移動することになる (Fig. 19 参照)。今ナットがA点からB点まで移動したとする。そしてその移動量 s に対する回転台の正しい回転量を θ とする。ナットは上下左右にフレながら移動し、B点において二点鎖線の位置で静止したとすると Fig. 19 から分るように回転台回転量は $\theta + \Delta\theta$ となる。この $\Delta\theta$ が大きい場合は波長精度、波長再現性に悪影響をおよぼす。つまりこの機構ではナットの動きがそのまま回転台の回転に影響してしまうわけである。従って高い波長精度、波長再現性を要する装置には、この点を改良する必要がある。深海* らはその点を改良するために

Fig. 20

* 深海, 田村: 日本光学光機事業部光機第3設計課

Fig. 21

Fig. 22

G-500 で Fig. 20 のような改良を行っている。ナットの回転止めは、ボールベアリングと定盤との接触により行っている。特に正方向（波長が短波長から長波長へ変わる方向、リードネジの回転が図の矢印の方向）走査の時について説明する。逆方向についても基本的には同じである。ナットに固定されている2個のAベアリングは広いスパンで常に定盤面に接し、ナットの水平方向のフレを極力少なくしている。スパンは出来るだけ広くとることが望ましい。かつBベアリングは圧縮コイルバネにより定盤D面に常に接しており、垂直方向のフレも殆んどなくナットは定盤C、D面両面をガイドとして移動する。つまりナットの走り、精度は Fig. 15 の機構に比べ数段良くなっている。また筐体と定盤は精度的に異種金属である必要性から環境の温度変化により、バイメタル的効果を起しがちで、波長走査に悪影響があるので定盤の形状をL字形にし、断面係数を大きくし、精度保持に務めている。Fig. 21 はリードネジ軸とナットとの組合せ単体精度の検査データの一例である。リードネジの材質はS45C や SK2B といった炭素鋼系のもの、ナットは BC3 や FC20 といった青銅や鉄の鋳造品が考えられる。リードネジの表面処理は Jg(艶ジュアール) のようなものが良い。Fig. 22 は波数リニア機構即ちコセカントバー機構の原理図である。これは赤外用モノクロメータの時に用いられることが多い。長さ g が不変で斜辺長 l が変化する。これによって波数 ν は $\text{cosec } \theta_i$ に比例するようになる。

次に面ブレ及び回転台の回転であるが、これらは回折格子の動きに帰着させると Fig. 23 にある3つの呼び名

Fig. 23

Fig. 24

Fig. 25

の量に分類される。これらの3つの量と回転ガタ分はどんなに大きくても波長分解能以下になるように設計仕様は決められねばならないし、検査されねばならない、なお

面ブレは Fig. 24 のように回転軸を広いスパンで支えることによって少なく押えることができる。Fig. 25 は軸が Horizontal の場合である。

7. 回折格子ホルダ

先の波長走査機構のところでは回折格子の動きの分類を行なったが、この3つの軸廻りの回転は回折格子の調整には欠くことの出来ない調整となる。従って回折格子のホルダーは回折格子を保持するのみならず、これらの調整機構を合せもつことが望ましい。もちろん優秀な加工技術がある場合は機械的精度で出して調整機構をはぶくことも多いが、一般的にはもっている方が良いと思う。

Rotation はサインバーに対する回折格子の位相角出しに、Rolling は回折格子の溝線が回折格子の回転軸即ち先の回転台の軸に平行にするために、Pitting はオジキの調整で水平面出しに必要な調整となる。Fig. 26 はこれらを行うための代表的な例である。ネジ1はコーンにはまっており Pitting を行うためにある。球3とネジ2はスロットにはまっており、球3はスプリングで押されている。これは Rolling を行わせる機構である。2つの球4と5はコーンにはまっており Rotation が行える。Rotation 軸、Pitting 軸は回折格子の表面内にあるようにするのが一番良い。更に Rotation 軸は波長走査用回転盤の回転軸と合致させるべきであるが、そのためには回転盤上の取付けをバカ穴でやったり、X-Y の移動機構を持ったりする。もちろん高級なものは後者である。Fig. 27 と Fig. 28 は真空分光器での凹面格子のホルダーの例であるが参考になるのであておく。Fig. 27 では先の3軸回転の3軸が各々独立しており、軸がはっきりする点で参考になるし、Fig. 28 では Rotation と

Fig. 27

Fig. 28

Pitting 軸は独立した調整にはならないが、X-Y 移動のある点で参考になろう。独立した3軸調整機構をもつのが一番良いが、高価になるので市販の分光器ではあまり採用されてない。

8. キネマチックマウント

光学装置の設計に、大変利用され重要なものとしてキネマチックマウンティングがある。このマウントの目的は鏡やベースを次の4通りのようにマウントすることである。

- (1) 1つの平衡位置を持つように
- (2) 小さな変位があっても、すぐ元へ戻るように
- (3) 取りはずしても、もとの位置にもどせるように
- (4) 方位が調整可能のように

今 Fig. 29 にあるように物体Aが面Bに関してマウントされる例を考えてみる。Bに円錐状の穴(コーン)をつくり、球1がはまって固定される。球は Fig. 30 のようにコーン壁に円状にタッチしている。このままでは球とAは回転するので、球2をコーンにはめても良いがコーン

Fig. 26

Fig. 29

Fig. 30

の間の寸法と球の間の寸法が精度よく合致せねばならぬというむずかしい問題が生ずるので、代りにV型の溝をつくり球Bをはめる。V溝の方向はコーンの方向を向くがこれはあまりきびしくない。球3は一点でBに接する。その場合球3の近くのB面は研磨面である必要がある。

物体Aは球1あるいは球2をコーンやスロットの中で少し上へ持ちあげると少し変位するがコーンやスロット面そして球が硬い材料(例 鉄)で磨擦のないようスムーズにできていれば重力や復元用のスプリングによって球は押し戻され元に戻される。B面が軟い材料であったり、加工しにくい材料の時は、コーン、スロット、フラットを鉄材でつくりB面に張りつける方法がある。コーンやスロットの傾斜角は 45° 位にけわしいと充分な復元力のはたらく。更に物体Aを完全に持ち上げても、もとの位置へ完全に戻すことができる。今 Fig. 31 にあるようにAにネジ穴をあけ、そのネジ穴を通したネジの先に球をつけることによって方位を調整できる。ネジ3をまわす

Fig. 31

○ CONE

≡ SLOT

□ FLAT

Fig. 32

ことによって1と2を通る軸の廻りの回転が可能であり、ネジ1をまわすことによって2と3を通る軸のまわりの回転が可能である。更に全てのネジを同じ量だけまわすことによって全体を上下に移動できる。微調整が必要ときにはネジは細くなり、Aに切られたネジと良く合わねばならない。Aに精密なネジを切るのがむずかしい時はナットをうめこんだりすることも多い。球はネジの先端に機械加工されることが多いが、その場合球心がネジ軸にのっているのが一番良い。もしこの合致度があんまりうるさくない時は半球をネジの先端に張りつけたもので良い。その場合、鉄のボールベアリングとエポキシ樹脂が良い組合せとなる。今まで述べて来た型はキネマチックマウントの1形式であり Fig. 32 にあるように他に異った形式がある。Dのタイプは度々つかわれているが β 軸廻りの回転は1と2の両方の調整が行われねばならず比較的不便である。

9. モノクロメータの出力

Fig. 33 の場合の出力計算を試みる。この場合の計算に必要な情報は次のようなものである。

Fig. 33

光源L：走査波長 λ の，光源からの距離 l cm での Spectral Irradiance $S_i(\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$ が判っていること．発光部の横寸法 w ，縦寸法 h が判っていること．

バックミラーB：これの効率 R が判っていること

第1コンデンサレンズC1：口径 ϕ_1 ，焦点距離 f_1 透過効率 E_c が判っていること．

第2コンデンサレンズC2：口径 ϕ_2 ，焦点距離 f_2 透過効率 E_1 が判っていること．

モノクロメータM：走査波長 λ での分光効率 E_m ，入射スリットの幅 W_1 ，長さ L_1 ，出射スリットの幅 W_2 ，長さ L_2 及び逆線分散度 $D_{\text{nm/mm}}$ が判っていること．

フィルターF：走査波長 λ での効率 E_f が判っていること．

モノクロメータの出力 P_0 は次のように与えられる．

$$P_0 = P_c \cdot BW \cdot E_1 \cdot V_s \cdot E_m \cdot E_f \quad (1)$$

(1)式の中での P_c ， WB ， V_s の計算方法は次のようである．

P_c ：コリメータ光束の Power，まず距離 l cm のところで面積 1 cm^2 の有効 F ナンバー F_f を計算する．

$$F_f = l \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (2)$$

次に第1コンデンサレンズの F ナンバを計算する．

$$F_c = \frac{f_1}{\phi_1} \quad (3)$$

(2)，(3)と先に与えた条件より

$$P_c = (F_f/F_c)^2 \times E_c \times R \times S_i (\text{mw/nm}) \quad (4)$$

BW ：モノクロメータからでる波長幅(単色度)，かんたんのため入射スリット，出射スリットの関係は $W_1 = W_2$ ， $L_1 = L_2$ とすると，

$$BW = W_1 \times D (\text{nm}) \quad (5)$$

V_s ：入射スリットによる光源像のケラレの効率，

$$V_s = W_1/I_w \times L_1/I_H \quad (6)$$

ここで

$$I_w = w \times f_2/f_1 \quad (7)$$

$$I_H = h \times f_2/f_1 \quad (8)$$

(7)，(8)を(6)式に代入して

$$V_s = W_1/w \times L_2/h \times (f_1/f_2)^2 \quad (9)$$

式(4)，(5)，(9)を(1)式に代入すると出力は

$$P_0 = \left(\frac{F_f}{F_c}\right)^2 E_c \times R \times S_i \times W_1 \times D \times E_1 \times \frac{W_1}{w} \times \frac{L_1}{h} \times \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \times E_m \times E_f \quad (10)$$

で与えられる． P_0 の単位は mW である．

おわりに

分光器に関する雑学を記した稿となったことをおわびする次第です．尚本稿作成にあたって当社光機事業部深海義雄，田村菊雄，精機事業部森本二郎，梅田雄一の各氏の資料提供及び御協力のあったことを申し加えます．

文 献

- 1) Nikon モノクロメータ G-500 カタログ．
- 2) Welford, W.T.: Prog. in Opt. IV, (1965).
- 3) Schuster: Encycl. Brit. Art. Spectroscopy; Astroph. Journ. **21**, 197 (1905).
- 4) Mitteldorf, J.J. and D.O. Landon: Appl. Opt. **7**, 1431 (1968).
- 5) J.K. Pribram, and C.M. Penchina: Appl. Opt. **7**, 2005 (1968).
- 6) 久保田広：光学(岩波書店, 1964).