講座

分 光 装 置

第4講 分光器の調整と検査

中島 篤之助*・下村 丁一**

(昭和 45 年 7 月 7 日受理)

Spectroscopic Apparatus

(4) The Adjustment and Testing of Spectroscopic Instrument

Tokunosue NAKAJIMA* and Teiichi SHIMOMURA**

*Japan Atomic Energy Research Institute (Tokai-mura, Ibaraki-ken)

**Shimadzu Seisakusho, Ltd. (Nishinokyo-Kuwabaracho, Nakagyo-ku, Kyoto)

1. は し が き

最近の良い分光器がいろいろ市販されている。市販の分光器は商品である以上、良く調整されていて設計通りの性能が出ていなければならないはずである。したがって自分で分光器を組み立てたり調整したりすることは特別な人でなければやらないようになったので、(メーカーの技術者は別として)調整法について詳しく述べることはあまり意義がないかも知れない。しかし分光器の調整法について一通り知っておくことは分光器の特性を知る上で役に立つと考えられるので、以下にやさしい解説を試みることにしよう。

調整とは、ある目的のために使う道具がその目的に対して十分であるように、その固有の性能を 100% 発揮できるようにする操作のことであると考えておこう。

ところで性能といってもさまざまであって、それらは相互に矛盾することがある。たとえば分解能と明るさなど。また性能の極限はどこまでなのかが知られていないことが多いし、もし理論的性能の限界がわかっていたとしても、それを確かめるのは大変むずかしい場合が多い。また目的そのものが客観的・定量的に表現できない場合もある。

前講で波岡は“理想的な分光器”について述べている。実際の分光器は収差制限の分光器であり、その他に光学素子製作上の欠陥や、調整の不完全さなどが加わって、

性能は理想的な分光器のそれとは異なってくる。

それで本講では、分光器の実際の性能の極限を決めることになる光学素子が、どのようにして検査あるいは試験されるかについて先ず述べ、続いてなるべく基本的な光学調整法と調整の良し悪しを調べる実験法に限りて解説することにしよう。

一口に分光器といっても第1講で解説されたようにさまざまな形式のものがあ、また光を電気信号に変えて処理する分光光度計などの場合は、光学的調整と電氣的調整法を一体として考える必要がある。それで本来ならそれぞれの場合について良く考えて調整する必要があるのであるが、それはとても筆者の良くするところではないし、紙数にも限りがあるので、ごく初歩的なことに触れるだけに止めたいと考える。

2. 光学素子の検査法

2.1 ま え が き

分光器を構成する光学素子にはレンズ、ミラーなどの光導用素子あるいは結像用素子と回折格子やプリズムのような分散素子があり、また、特殊な場合に使用される平行平面素子がある。

これらの光学素子を使用するにあたっては収差のような本質的なものもあるが、素子の品位によって分光器の性能が影響されるものもあるため、その選択は非常に大切なものといえる。悪い品位の素子を分光器に使用した場合には、測光信号の歪や減少などの形で現われてくる。

* 日本原子力研究所 (茨城県東海村)

** 島津製作所 (京都市中京区西ノ京桑原町1)

しかしながら、完全な光学素子の製作は実際上きわめて困難であり、不可能とさえい得る。材質上あるいは加工上において必ず欠陥なり誤差をもっているものである。

このような理由から、これら光学素子を使用する場合には目的に応じた素子の選択が必要である。ここでは、分光器を構成する光学素子の主なるものとして、プリズム、回折格子、ミラーなどの検査をどのようにして行なうかについて概略述べてみることにする。

光学素子の検査としては、材料検査につづいて、加工工程中あるいは終了後に外観検査（キズ、ワレ、砂目、腐蝕、脈理など）つづいて性能検査（寸法——外径、厚さなど——面精度、偏心度、焦点距離など）が行なわれるのが普通である。

研磨品の外観検査（キズなど）は半暗室で疵見照明灯で被検部品を照射し肉眼で判定したり、標準品と比較して行なわれる。脈理検査には肉眼による判定法、シュリーレン法、投影法などがある。精密な測定機器を使用して外観検査を行なう場合には、暗視野顕微鏡、微分干涉顕微鏡、シュリーレン顕微鏡、位相差顕微鏡などが使用される。ここでは、すべてを紹介することができないので、必要ある方はそれぞれについての成書なり文献資料を一読するようお願いする。

2.2 プリズム

2.2.1 プリズム材料

プリズム材料としては、広い波長範囲にわたって良好な透過率を示すことが必要である。現在のところ、短波長域から長波長域まで満足すべき光学特性（透過率、 $d\mu/d\lambda$ ）を示す材料を得ることができないため、測定対象波長域に応じて材料の選択が必要である。

紫外領域用としては水晶が、可視領域用としてはガラスが使用される。水晶は紫外から近赤外領域に至るまでよい透過率を示すが $d\mu/d\lambda$ の点でガラスに劣るので可視域専用の分光器では一般に光学ガラスを使用する。極端紫外用としては弗化カルシウムや弗化リチウムが使用できるが、最近では回折格子が多く使われている。赤外領域では波長に応じて岩塩、臭化カリウム、弗化リチウム、臭化タリウムなどが使用される。この領域でも上記のものがほとんど潮解性をもつということもあるが、回折格子が代わりに使われている。

これらプリズム材料として使用されるものは、透過率の良いことの他に、材質上、光学的に均一であることが重要であり、また、内部に大きなキズやワレがあっては使用できない。

プリズム材料として古くから使用されてきた天然水晶

は上記の条件を満足するものが次第に品薄となってきたこと、熔融水晶の製作技術が確立されたことなどから近年では特殊なものを除いては熔融水晶製プリズムが数多く使用されている。Fig. 1 は厚さ 10mm の熔融水晶板の分光透過率を示すもので、Suprasil は $1900\text{\AA} \sim 2\mu$ までの広い波長範囲にわたり良い透過率を示すことがわかる。

Fig. 1. 熔融水晶の分光透過率

2.2.2 材質検査

通常、粗研磨を終えた段階で、材質の光学的均一性の検査が行なわれる。

この検査においては、被検プリズムは屈折率がそれに非常に近い液体（熔融パラフィンが使われる）のバスの中に浸され、干涉計による干涉縞を観測して行なわれる。Fig. 2 は Twyman Green 干涉計による測定系を示すものである。光源 S （水銀灯）から出た光はコリメーターレンズ L_1 によって平行光束となり、ハーフミラー M_1 によって参照光路と試料光路に分けられる。参照光は参照ミラー M_2 によって反射され、ハーフミラーを透過してテレメーターレンズ L_2 に入る。一方、試料光束は被検プリズム P_R （窓板 W によってバスを形成、浸液 A は熔融パラフィン）を通して平面ミラー M_3 に入射する。この反射光は元の光路を逆行し、ハーフミラーによって反射されてテレメーターレンズに入る。この両光束の干涉現象をカメラレンズ L_3 によって乾板またはフィルム F によって撮影観測するもので、 F はフィルターである。

Fig. 2 の場合の被検プリズムはリトロー形プリズムであり、Fig. 3 に示すものはこの装置によって得られた干涉縞の一例である。なお、縞に直交して見られるキズのように判定されるものは、プリズム材質によるものでなく、干涉計を構成する素子によるものゆえ一言付記しておきたい。光学的に不均一な材料により干涉縞の乱れが現われる。

2.2.3 研磨後の製品検査

精密な研磨工程を終えたプリズムについては、頂角の測定と頂角を形成する2面の平面精度の測定検査が行なわれる。

Fig. 2. プリズム材質の検査

Fig. 3. プリズム材質検査における干渉縞の一例

(イ) 頂角の測定

頂角を測定するには精密分光計が使用される。Fig. 4 に示すものはこの一例である。

被検プリズムをプリズム台におき、プリズム面が望遠鏡の光軸と直交するようにプリズム台を微動調整ネジによって調整する。望遠鏡を回転させて、オートコリメーション法による2面の測定を行なう。それぞれにおける望遠鏡の位置を回転角度読取り盛より求めれば、回転角はプリズム頂角の余角として求められる。このことは Fig. 5 を参照されれば容易に理解頂けると思う。

角度の読取精度については、ゴニオメーターの最小目盛が 10 分であり、対物レンズ像面に取り付けられている副尺を使用すれば最少目盛 1 秒まで得られる。目測を入れると 0.2~0.3 秒まで求められる。

Fig. 5. プリズムの頂角測定

Fig. 4. 精密分光計

3.1 分光計台	3.6 回転腕
3.2 コリメータ	3.7 望遠鏡
3.3 スリット機構	3.8 角度読みとり顕微鏡
3.4 プリズム台	3.9 接眼鏡
3.5 ガラス製目盛円板	3.10 光源取付部

ロ) 平面度の測定

プリズム面の平面度は Fig. 6 に示すような Twyman Green 干渉計によって測定することができる。図に示すものは被検プリズムはリトロ形プリズムであり、直角をはさむ1面に反射コーティングを施してあるから、光路中に反射鏡を設置する必要はないが、60°プリズムのような場合には被検プリズムの後に平面反射鏡を設置する。

Fig. 7 に示すものは上記の Twyman Green 干渉計によって熔融水晶プリズム（リトロ形）を測定した場合に得られる干渉縞であり、(a) に示すものは精度の悪いもので、このままでは光学機器に使用するプリズムとしては不合格となるものである。(b) に示すものは合格品である。

材質検査において良好な干渉縞を示すものであれば、平面精度検査において不合格となった場合には手研磨によって部分的修正を施すことによって優秀な性能をもつ分散用プリズムに仕上げることができる。

この場合、修正量 Δt は

$$\Delta t = \frac{\Delta n}{n-1} \cdot t$$

で表わされる。ここに、 t は厚さ、 n は材質の屈折率、 Δn は材質の部分的屈折率差である。

精密級あるいは大型のプリズムを製作する場合には、光学的に均一な材料が得難いことから、このような部分的修正研磨を施して仕上げるが多い。

2.3 ミラー

分光器に使用されるミラーとしては、平面鏡、球面鏡ならびに回転放物面鏡や回転楕円面鏡のような非球面鏡

がある。

Fig. 6. Twyman Green 干渉計によるプリズム平面度の測定

(a)

(b)

Fig. 7. プリズム面測定における干渉縞の例

(a) 精度の低いもの

(b) $1/4$ フリンジ以上 ($1/8\lambda$) のもの

これらのミラーはレンズとともに一次集光系や二次集光系のように光を導くための、いわゆる、光導素子として使用される場合と、コリメーターやテレメーターのような結像素子として使用される場合がある。

結像素子として使用されるものには球面鏡（凹面）と回転放物面鏡があるが、回折格子やプリズムに入射スリットを通った光を平行光束として入射させるには回転放物面鏡がよりすぐれている。リトロー形マウンティングにおいて、スリット高さを十分大きくとらない場合には、コリメーターに回転放物面鏡を使用すると球面鏡では得られないすぐれたスペクトル線像が得られる。

しかしながら、エバート形やツェルニー・ターナー形のマウンティングのように球面鏡をコリメーターとテレメーターに使用してきわめて良いスペクトル線像を得ることができることや機械的研摩ができることと研摩中に球面原器を使用して干渉縞を観測することによって研摩面精度を測定できる点などから分光器に球面鏡を使用する場合が非常に多い。また、有効径が大きいものでは所要の非球面を得るには繰り返した修正研摩を必要とし、でき上ったものは相当高価なものになる。

ミラーの材料として膨脹係数が $70 \times 10^{-7} (\text{mm}/^\circ\text{C})$ 程度の光学ガラスや普通ガラスが使用されるが、大口径、長焦点距離のものや温度変化の大きい場所で使われるものではさらに小さい膨脹係数のものが使用される。（温度変化の大きい場所では、分光器を構成する金属部分の膨脹収縮が大きく影響するが）。

焦点距離の測定は球面半径 r を光学的に直接測定し、 f (焦点距離) $= r/2$ より求めるのが簡単である。この場合、オート・コリメーション法が有効である。Fig. 8 にこの状況を示す。

Fig. 8. 球面鏡の焦点距離測定

研摩面の面精度測定にはニュートン縞による方法、Foucault 法、Ronchi 法などがある。これらについて概略を述べることにする。

2.3.1 ニュートン縞法

ニュートン縞は面が接触しておかれた場合に生ずる空気の薄層中を反射往復する光の干渉現象によって生ずる

縞（リングまたはフリンジ）であり，反射観測で行なうときには両面の間隔が $2m \cdot \lambda/2$ のときは暗縞が， $(2m+1) \cdot \lambda/2$ のときには明縞となる．すなわち，両面の間隔 $\lambda/2$ ごとに縞が現われることになる．水銀灯を光源とし， $\text{Hg } 4358\text{\AA}$ の紫光を使用した場合には1縞あたり 0.2μ ということになる．

この方法にはガラス製または熔融水晶製の平面または球面の曲率原器が必要であるが，判定が簡便かつ得られる精度も波長オーダー（ $\lambda/2 \sim \lambda/10$ ）と高く，接触する全面にわたっての測定ができる点ですぐれた方法である．さらに，研磨加工中において品物のチェックが簡単にできるので現場でよく使用されるものであり，被検面が平面，凹面，凸面であっても測定できる．

Fig. 9 にニュートン縞の原理，Fig. 10 にニュートン縞を示す．

Fig. 9. ニュートン縞の原理¹⁾

このほか，ハイディンガー干渉縞（等傾干渉縞）による方法もある．発見者の Haidinger はこの干渉縞をニュートン縞と区別するため“薄板の干渉縞”（Lamellar Fringes）と呼んだ．また，ハイディンガー干渉縞とよく似たものでフィゾーの干渉縞と呼ばれるものがある．これらの原理による平面度検査装置もあるがここでは省略する．必要な方法は成書²⁾を参照願いたい．

Fig. 10. ニュートン縞¹⁾

2.3.2 Foucault 法^{3,4)}

Foucault（フーコー）法は別名ナイフ・エッジ法とも呼ばれるもので，球面や非球面をもつ反射鏡の検査によく使われる方法である．この方法では， $\lambda/10 \sim \lambda/20$ 程度の面精度検査ができる．

完全な凹面鏡に平行光線を入射させるとその反射光は焦点に集中される．したがって，焦点の位置に眼をおいてたとえば遠い星からの光を凹面鏡によって集光し眺めた場合には鏡の全面は一樣に照らされている．いま焦点を横切って動くナイフ・エッジで光を切つてゆき，凹面鏡の照らされている様子をナイフ・エッジのすぐ後に眼をおいて眺めると，ナイフ・エッジが焦点を横切った瞬間に凹面鏡の照らされていた部分は消え去つて暗くなる．完全な凹面をもっていない球面鏡の場合には，反射光線のすべては焦点を通過せず，不完全凹面をもつ部分から反射される光は焦点からずれた位置を通る．したがって，ナイフ・エッジで光を切つてゆく場合，凹面鏡上での暗くなる状況がムラを呈して現われる．

実際には，Fig. 11 に示すように，凹面鏡の中心にできるだけ近いところに小さな鋼球（ $1\text{mm}\phi$ 以下）をおき，これに光源からの光をレンズによって集光させる．鋼球表面より反射された光を凹面鏡（被検物）に入射させ，その反射光を光軸に対して鋼球と対称関係をもつ点に集光させ，矢印の方向に動くナイフ・エッジで光線を切つて観測する．

Fig. 11. Foucault 法

Fig. 12 に示すものはこのようにして観測された Foucault パターンであり，(a) に示すものは一樣な暗さを呈し，ほぼ球面に近い凹面をもっていることがわかるが，(b) に示すものは凹面鏡上に明暗の斑点が観測され完全なる球面とはなっていないことがわかる．

ナイフ・エッジの位置が凹面鏡中心に対し凹面鏡側にある場合には，ナイフ・エッジの移動につれて生ずる凹面鏡上の暗い影は同じ側に現われてくるが，中心より外

- 1) 塩見：光学技術ハンドブック（朝倉書店，1968）
- 2) たとえばトウワイマン著．富岡・山田訳：プリズム及びレンズ工作法の研究（宗高書房，1956）
- 3) 増田：日本分光学会光源研究会「夏季セミナーテキスト」（1966）
- 4) 足立：大阪工業技術試験所報告 第314号（1960）

側にあるときには影は反対側に現われる。

非球面（回転放物面，回転楕円面など）を検査する場合には，輪帯マスクを被検体の直前におき，光源と鋼球およびナイフ・エッジを同時に光軸上に移動させて各輪帯ごとに Foucault パターンを観測する。これはゾーン・テストとも呼ばれるものである。

(a)

(b)

Fig. 12. Foucault パターン

球面鏡は結像状態において，有効口径内での波面収差が $1/4 \cdot \lambda$ 以内になるようであれば使用上支障はない。これに相当する像の錯乱半径 R は

$$R = \frac{\lambda r}{a}$$

a : 口径

r : 曲率半径

λ : 測定波長

で示されるが，ナイフ・エッジの移動量が $2R$ よりも小さければ波面収差が $1/4 \cdot \lambda$ 以内であることになる。

2.3.3 Ronchi 法^{3,4)}

この方法は Foucault 法におけるナイフ・エッジの代わりに 1mm につき数本～10本の線をもつ透過形回折格子状の Ronchi スクリーンを使用するものである。このスクリーンを通して凹面鏡を見た場合，スクリーンの位置と線の本数によって凹面鏡に現われる縞が決まる。この縞の乱れは凹面鏡の状況によって変わってくるからこれを解析することによって被検凹面の状況が検査できる。

Fig. 13 は Fig. 12 (b) における凹面鏡の Ronchi パターンを示すものである。Fig. 14 は第3次球面収差をもつ凹面鏡において Ronchi スクリーンを近軸光線焦点位置から凹面鏡の方向へ移動して観測された Ronchi パターンを示すものである。Fig. 15 に示すものは収差のない場合のパターンである。

2.4 回折格子

回折格子には透過形と反射形があるが，一般に使われているものは反射形である。これはさらに平面回折格子と凹面回折格子に分けられる。これらの個々あるいはこれらを使った分光器の光学的性質についてはそれぞれの

Fig. 13. Ronchi パターン

Fig. 15 無収差の場合の Ronchi パターン

Fig. 14. Ronchi スクリーンの移動により変化する Ronchi パターン（左図から右図の方向に）

文献を参照願うとし、ここでは光学部品の検査という観点から述べることにする。

2.4.1 表面状況

回折格子の表面状態は非常に重要な分光器の性能決定の要素である。平面回折格子では表面は平面である必要があり、凹面回折格子では凹面（球面）であるべきである。これらに関する欠陥はスペクトル線の結像特性に悪影響を及ぼすとともに光の集光状態に影響して測光信号の低下をきたす。

回折格子の表面状態の欠陥は回折光の波面収差をたとえば Twyman Green 干渉計により測定することによって観測できる。Fig. 16 にレイアウトを示す。この方法によって得られるものは表面状態の欠陥であり、ブラッグ表面の欠陥と表面コーティングのそれとの両者が含まれるが、溝の形状の良否についてもある程度判別できる。

溝の彫刻状況については、後述するようにゴースト (Gohst) にも関係しているものであるが、ここでは干渉縞の観測から得られるものに関係づけて概要について述べることにする。

溝の彫刻誤差についての詳細は然るべき文献⁵⁾を参照願うとして、大別すれば次の種類のものに分けられる。

Fig. 16. Twyman Green 干渉計による回折格子の測定

(a) 周期的彫刻誤差

ルーリングエンジンの機械的振動によるダイヤモンドカッターの上下およびジグザグ運動によるもので、この種の回折格子を使用した場合にはスペクトル線像は長さ方向に伸び、強度が低下する。また、ルーリングエンジ

5) たとえば K. Shimizu: Japan. J. Appl. Phys. Vol. 4, Supplement 1, 1415

ンのネジや歯車などの周期的誤差によっても発生し、ローランド・ゴースト (Rowland Gohst) が現われる。

(b) 鉤状彫刻誤差

ダイヤモンドカッターのルーリング速度あるいはブラッグの移動速度が不均一の場合に生ずるものであるが、スペクトル線像の強度分布には大きな影響は及ぼさない

(c) 扇状彫刻誤差

ルーリングエンジンにおけるブラッグ移動台の案内のゆるい彎曲に起因するものでスペクトル線強度の低下と線幅が広がる。

これに対しては、いずれも波面収差の最大値が $1/4 \lambda$ 以下であることが望ましい。

(a)

(b)

(c)

Fig. 17. 各種彫刻誤差を示す干渉縞

Fig. 17 に示すものは干渉計により観測された干渉縞であり、(a) は周期的彫刻誤差、(b) は鉤状彫刻誤差として (c) は扇状彫刻誤差を示すものである。

回折格子表面に付着したゴミ類は真空形掃除機などによって吸い取ることができるが、表面の汚れを取り去るには精製したトルエン（3回以上蒸溜精製したもの）を約1米の落差をつけ、細管によってサイフォン式に溝方向にトルエンを流して洗浄する方法がある。この方法では油性フィルム状の汚れを取り去ることはできるが、レプリカ表面に荒れを生ずることになるのでできるだけ避けることである。表面の蒸着面が腐蝕化しているものに対しては洗浄しても効果がない。Fig. 18 に示す干渉縞は表面に荒れを生じた回折格子のもので、このようなものを使用した場合には散乱光が増加するとともにスペク

Fig. 18 回折格子表面の荒れを示す干渉縞

(a) よこ縞

(b) たて縞

Fig. 19. 良好な回折格子による干渉縞

トル線強度が低下する。

また、Fig. 19 に示すものは良品の回折格子の干渉縞写真（いずれも約 $1/20\lambda$ で）あり (a) によこ縞、(b) にたて縞を示す。矢印で示す方向が溝の方向に相当する。

2.4.2 ゴースト (Gohst)

回折格子の製作における不完全さにより、測定しようとするスペクトル線の他に弱い偽線として現われるもので、ローランドゴースト (Rowland Gohst) とライマンゴースト (Lyman Gohst) がある。いずれも溝間隔における規則性に起因するものである。

最近では、ルーリング技術の進歩によって、ゴースト強度のきわめて弱い回折格子が製作されているため、特に微弱な分光測光を対象とする場合以外にはほとんど支障がないくらいである。

2.5 あとがき

分光器を構成する光学素子の主なるものについて、検査という観点から概要を述べたが、各項目についての詳細については参考文献、解説書および単行本などを参照願うことで割愛した。光学は古い歴史をもち、それだけに新旧種々の文献が数多く出されている。本稿ではレンズについては触れなかったが光学素子としては重要なものであることはいままでもない。OTF などを使った新しい解析手法も確定している現在発表された文献類も多い。興味ある方はこれらを参照されるようお願いする。

3. 分光器の調整

分光器を構成するものは、(1)スリット、(2)コリメーター、(3)プリズム、回折格子などの分散素子(4)カメラ（結像光学系）(5)以上を支える機械的機構と構造などである。部品についての検査については前章で述べた。ここでは最初に Fig. 20 のようなプリズム分光器を例にとって、光学素子には欠陥はないものとして調整の仕方を考えて見ることにしよう。

3.1 プリズム分光器の調整法

プリズム分光器が調整されているということは、次の

Fig. 20. プリズム分光写真器

4つの条件が満たされていることを意味する。

(i) コリメーターが指定の波長に対して調整されていること。すなわちスリットとコリメーターの距離を調整して、コリメーターを出た光束が、所定の波長に対し平行光束になっているようにすること。

(ii) スリットとプリズムのエッジが平行であること。

(iii) プリズムは指定の波長に対して最少偏角になっていること。

(iv) プリズムの主断面と光束が平行になっていること。

3.1.1 コリメーターの調整方法

可視光線に対してコリメーターとスリットの距離を調整するのは簡単である。いろいろな方法があるが、たとえば Fig. 21 (a) に示すようにコリメーターレンズの背後に鏡をおき、光線を逆行させる。スリットには細い糸を張っておき、この糸を接眼鏡でのぞく。もし正しく調整されていれば糸と糸の像とは合致する。この場合、もちろん調整すべき波長の単色光で糸およびコリメーターを照らすことになる。

あるいは Fig. 21 (b) に示すようにプリズム面の反射光を無限遠に合わせた望遠鏡で観測しても良い。

設計波長が紫外部にあるときには上述のように肉眼を使って調整することはできないことになる。それで普通は、そのコリメーターレンズの Na の D 線に対する焦点距離を測定しておき、計算により設計波長における焦

点距離を算出し、機械的に寸法を測定してコリメーターをほぼ所定の位置に置く。この場合レンズ材料の屈折率が知れていなければならない。最後にスリットを微動しつつ調整写真を撮影して最良のピントを与えた位置にスリットを固定するやり方がとられる。この方法は分光写真器の場合のように、設計上はある単色波長が選ばれているが、結局はかなり広い波長範囲にわたってなるべく良いスペクトルを得ようというような場合には実用上は十分であると思われる。しかしこの場合コリメーターが設計波長に対して正しく調整されているとは限られないのは当然である。調整写真ではプリズムを始めとする部品の精度、カメラレンズの収差、最少偏角からのズレ、乾板の光軸に対する傾きの誤差、乳剤のあらさ、スリットの影響等が重畳して観測されており、良いピントの位置といってもかなり主観的なものとなる。Sawyer も指摘しているように、コリメーターで平行光束を作って分散素子に入射させることが基本で、結像はカメラレンズを動かして行なうことが望ましいことには違いない。

このような場合に使える方法として G. Lippmann⁶⁾ が提案した古い方法がある。それは Fig. 22 に示すよう

Fig. 22. G. Lippmann の方法

に、調整すべきコリメーターレンズと、結像レンズの間に2枚の平行平面板を挿入する。二つの平行平面板は互いにほぼ直交しており、かつそれらの交線はスリットに平行になっている。それぞれの平面板はまた光束に対して約 45° に傾けられている。こうすると平行平面板の屈折作用のために、左右二つのスリット像が生じる。この像の間隔は平行平面板の厚さだけで定まる。さて調整が完全になると、二つの像の糸は無限遠に投影されることになり、消失することになる。この方法の長所はもしプリズムがコリメーターと結像レンズの間に入っていたとしても、邪魔にならないことである。それで結像レンズとして分光器のカメラレンズを使うことにすれば、写真法が適用できる。こうして可視光以外の線に対してコリメーターを調整できることになる。

3.1.2 スリットとプリズムエッジの平行および光束とプリズム主断面との平行

この調整 (ii) と (iv) の条件を満たすことは比較的簡単である。鉄アークのような多数のスペクトルを使

Fig. 21. コリメーターの調整

6) G. Lippmann: *Comp. Rend.*, **129** 569 (1899)

い、スリットの高さを1~2mm ぐらいに小さく制限して写真を撮影すれば良い。もしプリズムの水平が正しく出ており、光束も主断面に平行になっているなら、スペクトルもやはり水平方向に伸びることになる。またスリットがプリズムエッジに平行なら、スペクトル線はスペクトルの広がり方向に対して直交することになる。ただしこの場合スペクトル線の曲がり注意到注意して(第3講6参照)調整する必要がある。

3.1.3 最小偏角にすること

所定の波長に対する最小偏角は $\sin i = n \sin(\alpha/2)$ で計算できる。それで Fig. 4 に示すような精密分光計を使用すれば、もっと正確に最小偏角の位置にプリズムを置くことができる。

3.1.4 カメラと乾板の距離および乾板の傾きの調整

この調整は要するに普通のカメラのピント合わせと同じことであるが、分光器ごとに機構が異なっているの、それに従って行なうことになる。乾板は光軸に対してかなり傾斜しているが、もし乾板が焦点面内を通る軸を中心に回転できるようになっていれば、先ずこの点をピント合わせしたのち乾板を回転して全体をピント合わせする。

ピントを合わせるには、かならず一番シャープに結像する位置を間に挟んで、その前後ではボケたことを確認しなければならない。Fig. 23 からわかるように焦点の

Fig. 23. レンズ口径と焦点の鮮鋭さに及ぼす影響

鮮鋭さはレンズの開口比すなわち f -ナンバーに関係する。それで余り細かく動かすのは無意味で、乳剤のあらさにもよるが、1/10~1/20mm 広がればボケたことが判定できると考えれば、 f -ナンバー 10~20 の分光器では1/2~2mm のステップでカメラを動かしてやれば良いことになる。

3.1.5 調整写真の撮影

光源としては鉄アークがもっとも広く使われる。しかし 6000Å より長い領域では鉄のスペクトル線は少なくなるので、アルゴンやネオンの放電管が便利である。

光源をコリメーターの光学軸上に正しく置くためにはいくつかの方法がある。もっとも簡単なのは乾板取枠の背後からカメラレンズを見ることである。この時集光レ

ンズはすべてとりはずしておき、スリットは十分に広く開いておく。光学ベンチが付属している場合であれば、はじめ光源をスリットの近くに置き、光源の高さを調節してスペクトルがカメラの中央に見えるようにする。ついでベンチに沿って光源をスリットから離し、スペクトルがいつでも中央に見られるようなら良い。眼は結像面から 30cm ほど離れた位置に置く。乾板の代わりにガラス板を置き、その上に取枠のひらきの中央にスペクトルに平行した線を引いておいたものを使うとやり易い。

いくつかの集光レンズを正しく配置するには、(もちろん光源の配置にも使えるが) 上述の方法により “Reverse optics” とよばれる方法が便利である。

まず輝度のなるべく大きい点光源を用意する。暗室なら懐中電灯などの豆ランプで良いが、少し明るい部屋ならジルコン・アークランプを使うとずっと楽である。これを焦点面の可視部のスペクトルが出現する位置に、カメラを照らすように置く、スリットを十分開いて、スリットに対して分光器部分をのぞくように眼を置く。点光源の位置を調整して、分光器内を逆行してきた光束が丁度スリットの中央部をとおる、かつ最大の明るさになるようにする。(この方法はプリズム分光器に限られない。平面回折格子分光器の場合であれば、スリットをのぞきながら回折格子を回転させて、0 次の光がスリットに出てくるようにすれば良い)。名刺の裏やあるいはパラフィン紙のような紙片を使って、この逆行光線を案内に集光レンズ系を容易に調整できる。この場合まず光源の位置を定め、その位置に固定マークをしるしたのち、一つずつレンズを挿入し、そのたびに光源の位置に逆行光線が到達し、かつレンズの中央を通るようにすれば良い。この方法で円筒レンズを集光レンズに使っている場合のレンズ軸の傾きの良否を判定することができる。

点光源としてレーザーを使えば明るい部屋でも調整が行なえて便利であるが、レーザー光は広がらないので光源の調整は少し面倒である。また当然であるがスリットをのぞいてレーザー光を直視しないよう注意する必要がある。またスリットが十分に開けない構造になっている場合は、スリットの回折現象が著しいので注意して観察する必要がある。

以上のように注意して光源ならびに集光系が配置されたなら、実際に光源を点じてコリメーターがどのように照明されているかを調べる必要がある。集光系がもしスリット結像ならコリメーター全体が一様に明るくならないなければならない。コリメーター結像なら光源像が拡大されてコリメーター上に存在する。

以上のように光源の位置に注意し、コリメーターが光

で満たされていることを確かめておくのは二つの理由があるからである。一つはもちろん分光器を最大の明るさで使うためである。もう一つは、もし光学素子に不完全な部分があった時、光源の位置によってスペクトル線の像の位置が変わり得る。素子の全アパーチャを常に使うようになっていれば、以上の欠陥を避けられるからである。

3.2 分光器の試験法

試験は結局注意して撮影された写真を調べて、シャープなスペクトルが得られているかどうかを判定することに尽きる。スペクトル線の形に注意し、とくに線の両側に弱いサテライトが現われていないかどうかを調べる。スペクトル線を見て調整の良し悪しを決めることは、かなり経験を要することで、またそれぞれの分光器の光学系に特有な収差が現われてくるので、簡単には説明し難い。

ただし注意しなければならないのは、見掛け上シャープなスペクトルを得ようとして、高コントラスト乾板（たとえばコダックの SA-1 やプロセスハードなど）を使い、露出をしぼって撮影した乾板だけで調整の良否を判定するのは、はなはだ危険であるということである。メーカーから付いてくるテストプレートにはしばしばこのような乾板があるので、気をつけなければならない。

光学素子に欠陥がある場合には、もちろんシャープな写真は得られない。

光学素子に疑いが持たれた時には、最初にプリズムあるいは回折格子を調べるのが良い。

2章で述べたような検査は干渉計を必要とするので、普通にはできない。しかし干渉計による検査が済んでいる素子であっても、分光器内にセットする時のやり方が悪く欠陥を生ずる場合がある。筆者が経験したのは、回折格子を固定するネジのしめ過ぎのために、格子ブランクに応力による歪みが生じ、スペクトル線に沢山のサテライトが現われてしまった。こういう場合は、回折格子をとりはずし、2〜3日放置してから再調整することになる。プリズムも同様なことが生じ得るので、注意する必要がある。大きなプリズムではその一部を手でさわっただけで熱歪みのために、しばらくの間は後述するフーコーテストで歪みをはっきり検出できたことがあった。したがって分散素子に対する熱的攪乱が局部的にならないよう注意を払っておくことも必要である。

光学素子に対する試験法は2章で詳しく述べたので、ここではハルトマンテストとフーコーテストについて簡単に述べておこう。

3.2.1 ハルトマンテスト

Fig. 24. ハルトマン試験法の原理

ハルトマンテストの原理は Fig. 24 に示されている。すなわちある一つの波長のすべての光線はスリットおよび光学系を通過したのち一点に焦点を結ぶべきなのであるが、光学系に不完全部分があったり、あるいは収差が存在すると、系の異なった部分を通過する光線は異なる点に焦点を結んでしまう。焦点距離も変わることで乾板上の位置もずれてくるのである。

もし光学系のすべての部分がスペクトル線像のすべての部分に寄与しているなら、欠陥のある素子は乱れた線像を生ずることになる。また光学系の異なった部分からの光線で、スペクトル線の異なった部分が形成されるようにしてやれば、欠陥のある素子は曲った線を生ずることになる。それで光学系のそれぞれ一部を使って作ったスペクトルの位置とピントをならべて観察できるようにしたのがハルトマンテストである。

詳しいことはたとえば Sawyer の著書⁷⁾を参照されると良い。Fig. 25 は同書に示されている結果である。

3.2.2 フーコーテスト

2.3.2. に記述されているフーコー法をそのまま分光器のテストに使うことができる。焦点面でナイフエッジで切った時に、明るいまま残っている部分がもしあれば、それは不完全全部あるいは収差を示すことになる。ハルト

Fig. 25. ハルトマン試験の結果の一例

7) R. A. Sawyer: Experimental Spectroscopy. (Prentice-Hall Inc., 1956) p. 107~110.

マン・テストが光学系を全体として試験する方法であるのに対し、フーコー法は欠陥部を直接示す点で相補的であると言えるだろう。この方法により探し出された不完全部をマスクすることにより、結像特性を改善することができる。

3.3 回折格子分光器の調整

回折格子には平面回折格子と凹面回折格子がある。平面格子はプリズムと同様にコリメーターおよびカメラ光学系を必要とする。一方、Rowland の発明した凹面格子を使った分光器では、スリットと凹面格子と乾板（あるいは出口スリット）の僅か3つの素子があるに過ぎない。しかし Rowland 円を基礎として、この3つの素子のさまざまな配置法（マウンティング）が考案され実用されて来た。色収差を考慮する必要がなく、透過性のいい光学材料という制限のない凹面格子分光器は*、極端紫外部用の分光器として特に重要である。

一方平面格子は良くブレース（第3講参照）された格子が製作されるようになってから、特定の波長域にエネルギーを集中できるようになり、可視・紫外部あるいは赤外部用の分光器に広く利用されるようになった。平面格子を使ったマウンティングにも多くの種類がある。

これらのマウンティングにはそれぞれ特別の調整のやり方が必要である。Astigmatism の程度や、収差の現われ方はそれぞれのマウンティングに特有であるからである。したがってこれらのすべてについて触れることはもちろん不可能であるし、主なものについて述べるだけでも紙数が不足すると思われるので、ここではレーザー光を使って Fastie-Ebert 形のモノクロメーターを調整する簡単な方法を平面格子分光器の例として解説する。凹面格子分光器は、いずれにせよローランド円を基礎にしている、その調整は原理上は簡単である。すなわちスリット、格子、乾板の3つが正しくローランド円上に置かれれば良い。正しくというのは格子ブランクの中心に対する法線が、乾板ホルダーの中央を通る線に対して鉛直な面内にあること、また格子の溝はこの面に正確に直交していること、またスリットもその中心がこの面に位置し、スリットの長さ方向は格子の溝の方向と平行であること、乾板面はローランド円に密着し、かつ直交していれば良いといった条件を満足していれば良い。

原理上はそうであるが、実際の調整の場合には、これらの3つの素子は正しい位置付近で、小さい範囲で動き得る訳であるからかなり面倒なことになる。調整にあたってはそれぞれの素子の動きによって光学的にどのような変化が生ずるかを覚えておかなければならない。これ

* 透過格子のことは、ここでは考えない。

らの変化は比較的直観的に理解し易いものもあるが、またかなり複雑な場合も多い。しかしそれが調整に当たっての基礎をなす訳であるから、なるべく直観的かつ初步的な説明を試みることにし、それぞれのマウンティングについての調整法は省略することとする。

3.3.1 回折格子の小さい運動とその結果

Fig. 26 に示すように回折格子それ自体はピッチング

Fig. 26. 回折格子の X. W. L 軸

(W 軸のまわりの回転)、ローリング (X 軸のまわりの回転) および L 軸のまわりの回転が可能である。またローランド円の法線方向への全体の平行移動を考えねばならない。回折格子については以上4つの運動とその結果を考えれば良い。

(A) W 軸のまわりの回転

これはスリットに対してスペクトルを上下させることになる。角 σ だけ回転したとするとスペクトル線の移動量は法線方向で最大で $2r \tan \sigma$ となり*、入射角 α および回折角 β が大きくなるほど小さくなる。スリットを基準とする相対的な像の移動量は $2r \tan \sigma (\cos \alpha + \cos \beta)$ ……(1)となる。

(B) L 軸のまわりの回転

これは結局格子を中心としてローランド円を動かしていることになる。それで α も β も、また焦点面に対するスリットの相対位置も変わることになる。

さて回転角を τ とすれば、0 次のビームは 2τ だけ回転し、すべてのスペクトル線も一次近似では 2τ 回転する。正確には回折角の変化 χ は、回折方程式を解いて

$$\tau \text{ が小なる時**}; \sin \chi = -2 \cos \left(\alpha + \frac{\tau}{2} \right) \sin \frac{\tau}{2} / \cos \beta \quad (2)$$

$$\tau \text{ が大きい時}; \sin \chi = a \cos \beta \pm \sin \beta \sqrt{1 - a^2} \quad (3)$$

で与えられる。ここで $a = \sin(\beta + \chi)$ である。

* r はローランド円の半径

** $\cos \chi = 1$ とおける。

また回転により生ずる波長のシフト $\Delta\lambda$ は、

$$\Delta\lambda = -\frac{4d}{v} \sin \frac{r}{2} \cos \left(\alpha = \frac{r}{2} \right) \quad (4)$$

で表わされる。 τ および α が小さい時はこの式は、

$$\Delta\lambda = d/n \cdot 2\tau \quad (5)$$

のように簡単になる。かつ(5)式はかなり大きい角まで良い近似式として使える。

(C) X 軸のまわりの回転

X軸のまわりの回転で重要なのは、(1)小回転（これはスリットと格子の溝とを平行に保つのに利用できるが、このことについてはスリットとの傾きのところで触れることにする）と、180°回転とである。

格子を 180° 回転させる操作は凹面格子の調整に当たって欠くことのできない重要性を持っている。

この回転操作により、どちら側がある与えられた入射角あるいは希望する次数に対して明るいか（良い反射率を持っているか）を決めることができる。可視領域ならこのことは目で調べるだけでわかる。

凹面格子では 180° 回転によって、両方の場合の焦点面は全く変わらないはずであるから、これを利用して格子ブランクに対する法線を見出すことができる。それはローランド円上に置いた小さい光源でブランクを照らす。もしこの光源が法線上にあれば、その反射像は光源位置に逆行してくるはずだから、180° 回転操作によって法線が変わらないように格子を置けば良いことになる。

また格子の“error of run”をチェックすることができる。“error of run”というのは格子の溝の間隔や溝の形が規則的に変化している格子誤差で、これがあるとスペクトルの焦点面はローランド円から楕円に移り、その長軸は法線に対し傾くことになる。それで格子の法線上にスリットと水銀灯を置いてそのスペクトルを調べると、スペクトルにはローランド円の、たとえば外側になることになるであろう。格子を 180° 回せば今度はローランド円の内側にできるであろう。それでフーコーのナイフエッジテストにより、2 つの場合の変位を測れば、正しい焦点曲線の位置を知ることができることになる。

L 軸のまわりの回転をとめ、格子とローランド円との接触点がローランド円に沿って動くようにすることを、やはり“rolling”という。この操作と 180° 回転とを組み合わせると凹面格子を正しく配置するやり方については詳しくなり過ぎるので省略する。文献⁷⁾を参照されたい。

(D) ローランド円の法線方向での格子の平行移動

この動きはローランド円を法線方向で前後させることになる。格子の移動量を μ とし、スリットとの距離 $r' = r \cos \alpha$ が r_u に変わったとすると

$$r_u = (r + u) \cos \alpha \quad (6)$$

で近似できる。これはかなり厳密で u が $1/100 r$ より小さければ 45° まで 1/100% 内で正確である。

この動きは結局実際の焦点曲線の彎曲度を増減することになる。それである制限された回折角について error of run を部分的に補正するのに使える。

3.3.2 スリットの小移動とその結果

(A) 回折格子の方向での小さい運動

スリットがローランド円の近くにある限りでは、この運動の結果生ずる収差はごくわずかである。それで、かなりの程度までこの運動の結果生ずる focal curve の変化を利用して error of run の補正や、乾板ホルダーの曲がりのズレの補正を行なうことができる。（grazing incidence の場合は別として）格子スリット間の距離の増加分を S とすると、

$$r' = \frac{r \cos^2 \beta}{(S/r) + \cos \beta} \quad (7)$$

この式は $S \ll r \cos \alpha$ であることを仮定している。 S が + なら r' は小さくなる。反対に格子の方へ向かってスリットを動かせば (S は -) 焦点曲線はよりフラットになる。

(B) スリットの光線のまわりの回転

この運動の目的はスリットと格子の溝の平行を確保するために必要である。この調整の正確さは、スペクトル線の曲がりのために制限される。スペクトル線の曲がりについては第3講を参照されたい。ここでは簡単のために曲がりが無いものとする。もし溝とスリットが平行でなければ、Astigmatism のために Fig. 27 のようになるであろう。こういうトラブルを避けるためにスリットを回転する調整が必要になる。もちろん、溝とスリットの平行は格子のX軸のまわりの回転によっても調整できる訳である。しかし格子は光線のまわりで回転するのではなくて、法線のまわりを回転させることになるから、よりむずかしくなる。

Fig. 27. 格子の溝とスリットが平行でない時のスペクトル線像におけるアスティグマチズムの影響

十分長いスリットが使えるとすると、このスリット上の離れた点からの像の分離を顕微鏡で測ることにより、非常にわずかの傾きを ($30''$ 以内の) 検出できる。それでスリットの光線のまわりの回転機構はかなり精密に行なえるようになっている必要がある。

3.3.3 平面回折格子分光器

3.3.1 で述べた回折格子の4つの運動の自由度についての説明は、凹面格子を前提としていた。しかしそのうちのあるものは平面格子分光器における回折格子の調整においても、類推的に理解するのに役立つものと思う。平面格子分光器では、コリメーターやカメラが必要になるので、この意味では一面プリズム分光器の調整とも共通の点がある。そして収差の現われ方等は結局それぞれの形式 (mounting) によって異なることになるので、一概に説明することは困難となる。それで以下に述べるのは、レーザー光線を使って Fastie-Ebert 型のモノクロを調整する方法を紹介して参考に供することとする⁸⁾。

調整光源としては出力の小さい (1 mW 級の) He-Ne 6328 Å レーザーを使用する。Fig. 28 に示されているような Fastie-Ebert 型 (off-axis の) モノクロでは先ず主鏡の傾きの調整が必要となる。

鏡の中心がマスクされていなければ、これはきわめて簡単で、スペクトロメーターの軸と鏡との交点にしるしをつけ、レーザー光が入射スリット (鉛直方向の) の高さの中心と、この交点を通るようにレーザー光源を調整する。そして鏡の傾きを調整して反射光が出口スリットの丁度中央に出てくるようにすれば良い。

マスクがある時には次のようにする。先ずレーザー光が装置の水平面内にあるようにする。これは鏡のところでのビームの高さを測ってやれば良い。そしてコリメーターから出たビームスポットが、正しく二つのスリットの中心の高さになるよう鏡の傾き (水平軸のまわりの) を調整すれば良い。

鉛直軸のまわりの鏡の傾きを調整するには、格子ホルダーに平面鏡をおき、鏡の表面に装置の鉛直対称面を示す線を引いておく。あるいは回折格子がすでに装置してある場合には、中心線の部分だけを残してマスクを掛けてしまっても良い。そして格子を回転して0次の位置にしておく。レーザービームのスリットへの入射角を調整

して、コリメーターから反射したビームが鏡または格子の中心線に来るようにする。格子ホルダーを傾けて、反射光がカメラ鏡および出口スリットに来るようにする。この時カメラとコリメーターの部分にあるビームスポットが装置の中心軸 (鏡のマスクの中心) から等しい距離に来ていなくてはならない。そうなるように鏡の鉛直軸まわりの傾きを調整する (Fig. 28 参照)。

Fig. 28. レーザー光源により Fastie-Ebert マウンティングの鏡および格子の傾きを調整する方法。a 点は鏡の傾きを調整するための平面鏡の位置、b 点は格子の傾きを調整する時の位置を示す。

上述のようにして鏡の傾きが決められたならば、通常のようにフーコーのナイフエッジテストでビントを見る必要がある。(0次の像を使って) この調整操作の間で鏡を動かす (平行移動) が必要があれば、傾きの調整をやるネジを3つとも同じだけ動かして傾きが変わらないようにする。

回折格子の調整一すなわち格子への法線が水平面内にあり、その溝がこの面と直交するようにする一のためには次のようにする。まず W 軸のまわりの回転 (Fig. 26) を調整するには、レーザービームの0次の反射光を観測する。このビームは装置の水平面内に止まっていなければならない。ついで格子を回転し、反射光がコリメーターに戻り、そのビームスポットが入射光 (スリットからの) によるビームスポットとが一致するようにする。

この位置で格子を回転し (L 軸のまわりで) 一次、二次およびマイナス一次、二次等の反射を観測し、これが高さが変わるようなら、 X 軸のまわりの回転を調整して変わらないようにする。ただしレーザーの示す強い回折効果のために、この調整の正確さは制限されるので、一応の調整が終わったなら、普通光源を利用して微細な最終調整を行なった方が良い。

レーザーを使えば明るい部屋で、容易に迅速な調整を進めることができる。 (第4講終わり)

8) R.C. Ohlmann and A. Mego: *Rev. Sci. Instr.* 530