大型ガラス分光器について

中島 篤之助*・吉田 庄一郎**

(昭和40年3月17日受理)

Three-Prism Large Glass Spectrograph

Tokunosuke NAKAJIMA and Shoichiro YOSHIDA

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

(**Nippon Kogaku K.K., 6-3, 1-chome, Nishi-Ooi, Shinagawa-ku, Tokyo)

1. は し が き

わが国では良質の光学ガラスが製造され、それを用いた優秀な光学機械が製作されていることは周知のとおりである。光学ガラスを用いるのであるから当然使用できる波長領域は可視部に限定される。良質の回折格子が輸入できることを考えれば、十分な分散および分解能を有する大型ガラス分光器はむしろ高価である、しかし角分散を大きくすることによって比較的小型にまとめることができるし、回折格子のように各次数へのエネルギーの分配はないから明るくすることもできるであろう。また可視部に波長を限定することによって収差の除去が容易になるという利点もある。

発光分光分析の立場から考えてもアルカリ元素、アルカリ土類元素、希土類元素等の鋭敏な線が可視部にあることから応用の範囲は広いと考えられる。特に原子炉燃料・材料の分析で問題となるウラン、プルトニウム、希土類、リチウム、インジウム等の良いスペクトル線が可視部に存在することはこれらの分析のために専用の分光器を設備することを理屈づけるものである。

同種の分光器としては Carl Zeiss (Jena) 社で製作されているものおよびソ連の ИСП-51 А 等がある。これらの国では回折格子の製作が十分成功していなかったためであろうか、発光分光分析だけでなく、エタロンの前置モノクロメーターや螢光の測定等かなり広汎な応用がなされている¹⁾。

最初はプリズム6個を使用するシングルパスの方式を検討したが、経済的な理由からプリズム3ヶのダブルパス方式に変更した。レンズ、プリズム等に MgF のコーティングを行なうことにより、リトロー型の欠点である反射光にもとづく迷光 (Littrow fog) を減少できる見通しを得たことにもよる。

このような大きなプリズムを用いて分光器を製作するのは初めての経験であったために、幾つかの問題点が生じ技術的にも未解決のまま残された点があるが今後の問題が明確になった事は良い経験であり、多少の参考になるものと考えて装置の概要、性能ならびに 2, 3 の経験について報告する。

2. 光学系および構造

Fig. 1 に光学系を示しておく。Fig. 2 は全体を上から見た写真で、これから解るように (1) プリズムとコリメーターレンズを含む部分 (2) スリット、全反射プリズムおよび乾板ホルダーを含む部分、(3)、(1) と (2) をつなぐ暗箱、(4) 光学ベンチとから成り立っている。以上のような構造にしたのは機械的部品のコストを著しく低減することができ、また場合によっては異なるプリズム部などと連結する余地を残すためであった。しかしプリズム部とスリット・乾板部との連結方法には改良の余地があり、調整にも少し手間がかかる。

Fig. 1 から解るように $f=1300\text{ mm}$ のコリメーターレンズを長焦点カメラとして用いる時は3プリズムダブルパス方式であるが、コリメーションミラーを外して $f=250\text{ mm}$ の短焦点カメラを装着する場合には3プリズムのシングルパス方式となる。短焦点カメラとしては市販のニコン F カメラに 250 mm の望遠レンズを附属

* 日本原子力研究所 (茨城県那珂郡東海村)

** 日本光学工業(株) (東京都品川区西大井1の6の3)

1) A.N. Zaidel et al: "Emission Spectral Analysis of Atomic Material" (1960) Moscow, USSR.

Fig. 1. Optical system

Fig. 2. Top view of the three-prism glass spectrograph

Fig. 3

させて用いた。Fig. 3 はその状況を示している。ダブルパス方式の時光の通路はコリメーションミラーを中心に、光源側が高くスペクトル側が低くなっている。

3 ケのプリズムを定まった波長に対して最少偏角の位置に設定するのは、1 ケの波長走査カムによって定偏角プリズムを回転させ、その回転を 1:3 の比に作られた径のプーリーによって他の 2 ケのプリズムに伝達する方法をとった²⁾。プーリーの連結にはスチールベルトとスプ

2) G. Hansen: *Spectrochim. Acta*, **3**, 397 (1947~49).

リングを用いてある。コリメーターレンズは2枚玉でC線とF線に対して色消しされている。波長による焦点位置の修正はハートカムにより収差量が最少になるように(すなわち前後運動をするように)した。

以上の結果使用波長域での光軸に対する乾板面の傾きはほとんど直角であり, 3800 Å に対し 2°, 8000 Å に対し 1.5° 位直角からずれる程度に止めることができた。その他の概要の性能を Table 1 にまとめておく。

なおレンズ・プリズム面の反射迷光を減少させる目的で MgF のコーティング処理をすべての光学素子に施した。中心波長は $5000 \text{ \AA}$ を基準にしてある。このためにヨリ

Table 1

波 長 範 囲	3800—8000 Å
線分散度 (Å/mm)	2 (4000 Å), 5 (5000 Å), 9 (6000 Å), 16 (7000 Å) 以上長焦点カメラ使用の時.
理 論 分 解 能	50,000~60,000
分 散 素 子	60° プリズム 3個, 基長 112 mm, 高さ 60 mm
コリメーターレンズ	f=1300 mm, 口径比 1:20
長 焦 点 カ メ ラ	同 上
短 焦 点 カ メ ラ	f=250 mm, 口径比 1:4
乾 板 サ イ ズ	100×164 mm (キャビネ) (長焦点カメラ) 24×36 mm (短焦点カメラ)
ス リ ッ ト	巾 0~3.0 mm 可変両開き, 有効長 10 mm
外 部 集 光 系	中間結像方式-3 レンズ (第1 レンズはアクロマート)

凹面彎曲補正レンズ:

メーターレンズの中央をマスクする必要はなく、ただ第一面の反射光の結像点に小さいマスクを置いてだけである。

3. 像面彎曲補正レンズ

カメラレンズの球面収差を補正したとしても像面の彎曲はかなり大きくなってくる。Fig. 4 (b) に F 線 (4861 Å) を中心波長とした場合の像面の彎曲状況を示してある。この彎曲は中心波長が変わるにつれて僅かずつ変化する。対策としては乾板取枠を彎曲させ乳剤面を圧着させる方法でも実用上差し支えないかも知れないが、理論上は一波長領域に対してだけ有効なだけである、本分光器では像面の直前に平凹レンズを置いて像面を平坦化することを試みた。これは Zeiss の分光器でも試みられている。原理的にはシムミットレンズの一種である。

Fig. 4

このレンズの使用による像面平坦化の状況を示す図が Fig. 4 (a) である。このレンズを使用した結果、乾板取枠は平面で作ることができ、乾板の破損の心配もなく乾板取枠の製作も容易となった。

4. 試験結果

この分光器を用いて撮影した若干のスペクトル写真が Fig. 5~8 に示されている。Fig. 5 はナトリウムの D 線である。Fig. 6 は重水素-水素混合ガスの無電極放電

$\lambda = 5895.923$ — $\lambda = 5889.953$

Fig. 5. Na D 線

原板上の距離=0.73 mm

によるバルマー系列の β 線の同位体シフトを示している。これらの写真およびそのマイクロホトメーターの記録からそれぞれの波長における分数度および分解能が解る。これらは図の説明に書かれている。使用した乳剤は Fuji Process Panchro である、使用したマイクロホトメーターは理学電機 MP-3 型である。

Fig. 7 および Fig. 8 は分解能のテストに撮影したもので、Fig. 7 から少なくとも 30,000 以上の分解能が得られていることが解る。Fig. 8 は 20% 濃縮ウランの 4244 Å の線の同位体シフトが分離していることを示している。二酸化ウランが黒鉛と混合している試料を直流アークで励起して撮影したので線は十分細くなく、またバックグラウンドもかなり大きい、これから 40,000 以上の分解能が期待できることを示している。理論分解能を次式⁸⁾により計算すると約 670,000 となる。(d 線 ~ e 線) $\eta = 1.00$ として

$$\text{分解能} = \lambda / d\lambda = \eta C \, dn/d\lambda$$

Fig. 9 は長焦点カメラを使用した時の分散度曲線である。これは乾板の中心部にスペクトル線を結像させた場合で (最少偏角の条件) あって乾板の端部にシフトするに従って分散度は小さくなる。この曲線は次式⁹⁾で計算することができる。

3) K.D. Mielenz: *Chem. Zeit.*, **81**, 179 (1957).

$\lambda = 4861.327$
 $\lambda = 4860.0$

$\lambda = 3898.013 \text{ \AA}$
 $\lambda = 3897.895 \text{ \AA}$

Fig. 6. H_{β} — D_{β} 線

原板上の距離 = 0.3165 mm

$\Delta\lambda = 1.3 \text{ \AA}$

分散度 = 4.1 $\text{\AA}/\text{mm}$

Fig. 7. Fe のスペクトル線

$\Delta\lambda = 0.118 \text{ \AA}$
 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 31,000$

左側はマイクロホトメーターによるトレース。

Fig. 8. 20% 濃縮ウランのスペクトル

$$\Delta\lambda = 0.251 \text{ Å}$$

$$\text{分散度} = C/D \times \frac{dn}{d\lambda} \times \frac{f}{\cos \theta}$$

ここで C はプリズムの有効底辺長 (112×6 mm), D は光束の巾 (60 mm) f は焦点距離 (1300 mm), θ は乾板面と光軸とのなす角であるが, 本器では $\theta \approx 90^\circ$ であるので $\cos \theta = 1$ として計算して良い. $dn/d\lambda$ は部分分散の実測値と Hartman 補間式による各波長に対する屈折率が計算されている.

Fig. 9. 分散度曲線

短焦点カメラは Nikon-F を望遠レンズに装着するので, 光軸とフィルム面は直角である. 厳密には長波長および短波長域で tilt させる必要がある. そのため像がフィルム両端でやや悪くなるはずであるが実際には余り目立たない. 明るさを試験する適当な光源が思い当たらなかったもので, 鉄アーク (直流アーク 2.2 A, gap 4 mm) を 5461 Å を中心波長として撮影したものが Fig. 10 である. 同じく 20 W 白色蛍光灯*を撮影したものが Fig. 11 である. 使用フィルムは Konipan SS (ASA 100) で D-19 で 6 分現像した. 非常に明るいことが推測できるものとする.

低圧水銀燈を用いて乾板面に目盛付アイピースを置いて波長ダイヤルの再現性を調べて見ると $\pm 0.05 \text{ mm}$ 程度である. したがってモノクロメータとしても十分使用に堪えるものと考えられる.

調整中に定偏角プリズムのバルサム接着面に欠陥があることが見出された. またプリズムの固定方法が悪かったり, プリズムに手を触れているとその熱による像の歪が観測された. バルサム接着方法を工夫してかなり改良されたが, プリズムの薄い部分の歪は完全にとり切れずコリメータを僅かにマスクする必要がある. これは今後改良すべき最大の問題点である. また熱による像のゆがみはプリズム部全体が一定の温度であれば問題なく, 局所的加熱の場合も約 1 時間ほどで復元する. 適当な断熱を行なうべく準備中である.

最後に製作に当り御指導を戴いた日本光学工業の原井健三博士に深謝する. また小杉設計課長以下の方々の熱

* 少なくとも 1 年以上使用したと推定される.

Fig. 10. 短焦点カメラ ($f/4$) による鉄アークスペクトル
(5461 Å 中心) 乳剤コニノン SS
電流 2.2 Å, gap; 4 mm

Fig. 11. 短焦点カメラによる 20 W 蛍光灯のスペクトル

心な協力に感謝する。無電極放電管 (H_{β} - D_{β} 線) の製作 手伝って戴いた高島教一郎研究員に感謝する、
をして載いた河口広司研究員ならびに分散曲線の作製を