〔学術賞受賞特別寄稿〕

真 空 分 光 計 に つ い て†

瀬 谷 正 男*・波 岡 武**

* 日本眼鏡専門学校 東京都世田ヶ谷区上馬 3-6-10 (〒154)
 ** 東北大学科学計測研究所 仙台市片平 2-1-1 (〒980)

(1988年7月14日受理)

1. は し が き

私共の研究室(東京教育大学光学研究所)で行なった真空分光計に関する研究の概要を紹介させていただきたいと思う。

真空紫外線とは、波長約 $2000 \text{ \AA}$ から数 $\text{ \AA}$ に至る範囲の短波長の光である。この光は空気強く吸収されるため、その実験には、光の通路を真空にしなければならないので、かような名称がつけられている。

真空紫外線全領域を透過させる物質はない。したがって、約 $1200 \text{ \AA}$ 以下の波長域の分光にプリズムやレンズを使用することはできない。また、どのような物質表面に対しても直入射反射率が極めて低い。そのため、1950年頃は、反射面を2回以上使用することは許されず、凹面回折格子を用いる以外に真空紫外線を分光する方法はなかった。

真空紫外全領域のスペクトル写真の撮影が可能になったのは1927年に J. B. Hoag¹⁾ が斜入射型真空分光写真器を製作してからであり、真空紫外域用の分光計が現われたのは戦後(1945年以後)のことではないかと思う。

私共が真空分光計に注目し始めたのは、昭和24年(1949年)頃であった。その頃海外の分光学の論文を見ていると、真空紫外領域の測定を光電的に行なう論文を見掛けるようになってきた。写真分光器に比べ、分光計では波長はそう正確に求められないが、強度は遙かに精度よく、しかも簡単に測れるので、分光計には強い関心を抱くようになった。

真空分光計が手許にあれば、研究に役立つことは言うまでもないが、当時助手や院生であった私共が購入できるはずはない。しかし、興味深い装置なので、勉強だけ

は続けることとした。もちろん、あわよくば手製の真空分光計を作ってみようという下心はあった。これが私共の研究の出発点であった。

2. 凹面回折格子とローランド円

すでに述べたように、真空紫外線の分光には凹面回折格子を使用する以外に方法がなかった。そこで、真空分光計の問題とは、入射スリットと凹面格子を如何に配列し、射出スリット上の波長を変えるには何を動かすかを定めることであった。

凹面格子とは、凹球面上にアルミニウムを蒸着し、蒸着面にダイヤモンド・ツールで刻線し、凹面の中心における接平面上への刻線の投影が等間隔の直線群となるようにしたものである。この凹面格子にはローランド円と呼ばれる不思議な性質を持った円が附属する。

Fig. 1 でGは凹球面の中心、Cは凹球面の曲率中心で、刻線群をG点での接平面へ投影した直線群が紙面に垂直なとき、GC を直径とする紙面上の円がローランド円である。ローランド円上に入射スリットを置き、光を入射させると、各波長の光は回折格子で回折された後、ロー

図 1 凹面格子とローランド円

† 本報は昭和63年5月20日、日本分光学会春季講演会(5月19日～20日東京)にて日本分光学会学術賞授与式の際に行なった講演を整理、加筆したものである。

ランド円上のそれぞれの波長に特有な位置に結像するので、ローランド円上に射出スリットを置けば単色光が取り出せる。

凹面格子を使用するときには、入射スリットと射出スリットはローランド円上に置き、というのが凹面格子使用上の鉄則とされていた。

3. 真空分光計の一例

昭和24年(1949年)頃に市販されていた真空分光計に米国 Baird 社のものがあつた。その原理を Fig. 2 に示す。忠実に前記の鉄則を守るように設計されている。入射スリットと射出スリットとはローランド円上に固定されていて、凹面格子は図の(A)、(B)のようにローランド円に接しながら移動する。この移動によって射出スリット上の波長が変えられる。この配置は動径マウンティングまたは Beutler マウンティングとして知られている²⁾。

ローランド円の鉄則を満たしているから像は鮮鋭であろう。しかしこの方式では、射出スリットから出てくる射出光の方向が波長によって変るし、(A)と(B)とでは格子面上での入射光強度分布も同一とは考えられない。

Baird 方式の他にも二三の真空分光計が発表されていた。何れもローランド円の鉄則を固く守っているものであつた。

初めは垂涎的であつた真空分光計も調べてみると、私共の研究に必要と思われるものとは大分異なっていることが分かってきた。

私共にとっては、入射スリットや射出スリットに大きな装置を取り付けることもあるので、両スリットは固定されていなければならない。分光計の構造を簡単にし、さらに入射主光線は常に格子面の中央に入射し、射出光の方向変化を気にしなくてもよいようにするには、凹面格子を z 軸 (Fig. 1 参照) のまわりに回転すればよい。ただし、これらは使用するうえでの希望条件であつて、

図 2 Baird 社の真空分光計の原理

これでよい分光計ができるという保証はない。

4. 私共に望ましい真空分光計

私共にとって望ましい真空分光計は入射スリットも射出スリットも固定されていて、凹面格子を z 軸のまわりに回転するものとする、分光計の構造はほとんど決つてしまう。あとは、Fig. 3 に記してある r, r', C をどのように決定するかということだけである。

すぐ分かることは、このような方式ではローランド円の鉄則と両立しないということである。私共にとっては、鮮鋭度が多少低下しても、この方式のものの方が望ましかった。

Fig. 3 で A は入射スリット、B は射出スリットで、 x 軸は G での格子面への法線に、 y 軸は刻線に垂直にとる。凹面格子の曲率半径を R 、AG の長さを r 、BG の長さを r' 、 $\angle AGB$ を C とする。入射角を α 、回折角を β とすると、 $C = \alpha - \beta$ となる*。格子溝上の任意の一点を $P(\xi, w, l)$ とすると、我々の問題は、A から入射し、P 点で回折された光が P 点の位置 w, l の如何にかかわらず B 点に結像し、さらに凹面格子を z 軸のまわりに回転して α を変化させても別の波長の光が B に結像するようにするには、 r, r', C をどのように定めたらよいかということになる。

その計算には、H. G. Beutler の論文³⁾が大変役立った。Beutler の理論によれば、入射スリットの中心 $(r, \alpha, 0)$ から入射した光が P 点で回折され、射出スリットの中心 $(r', \beta, 0)$ に結像する、すなわち水平焦点を結ぶ条件式は

$$\left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \left(\frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \beta}{R} \right) = 0 \quad (1)$$

図 3 真空分光計

* 回折光 GB が法線 (x 軸) に対して、入射光 AG と同じ側にあれば $\beta > 0$ 、反対側にあれば $\beta < 0$ にとるものとする。

で、これを満す代表的な特解の一つが

$$r = R \cos \alpha, \quad r' = R \cos \beta \quad (2)$$

である。(2)式は、スリットA, Bが曲率半径 R を直径とする円周上になければならないことを示している。この円がローランド円なのである。しかもこの場合、 w や l の多項式で表された収差項の多くが0となり、射出スリット上に鮮鋭なスペクトル像が得られる。

収差項を極めて小さくしようとすると、ローランド円以外の解はない。私共は多少収差は大きくなってよいと考え、私共が望む方式のもとで(1)式の左辺

$$f = \frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \beta}{r'} - \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{R} \quad (3)$$

$$= \frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 (\alpha - C)}{r'} - \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha - C)}{R} \quad (4)$$

が0になる解を求めることにした。ある特定の波長に対してだけ f を0にするのであれば簡単だが、射出スリット上のスペクトルの波長を変えるためには、ある範囲にわたって α を変えなければならない。 α を変えても f が0になるような都合のよい解が存在するか否かによって、私共の望む真空分光計の運命が定まる。複雑な計算は省略し、結果だけを示すと、

$$r = R/1.222, \quad r' = R/1.223, \quad C \doteq 70^\circ 15' \quad (5)$$

という非常に具合のよい結果が得られた⁴⁾。手元に 3m の凹面格子があったので、水銀灯を光源とし、射出スリットの位置に乾板を置いて、スペクトル写真を撮ってみた。予想外に綺麗な写真が得られた。ただ空気中での実験であるから、真空紫外域でもよいとは言えないが、可視紫外より条件がよくなるので、よりよい結果が期待できた。

実際に真空分光計の製作に着手したのは、昭和27年(1952年)頃であった。製作には特に予算があったわけではなかったので、多くの方々の御好意にすがるしかなかった。作業は順調に進み、翌年(1953年)春には水素の多線スペクトルの光電測定ができるまでになった⁵⁾。初期の目的は一応達成できたわけである。

昭和32年(1957年)に突然米国 Jarrel-Ash 社の技師長が私の研究室に訪ねて来た。私共が研究した真空分光計を作って世界に供給したいので、製造販売の承諾を受けに来たというのである。私共は特許を申請したわけでもないで、どうぞ御自由にと答えておいた。かようなことではるばる米国から挨拶に来られるとは義理難いことだと感心したが、ローランド円を無視した分光計にも世間で認められる時がきたかと思うと長年の苦勞も一度

に吹き飛んでしまったような気がした。

5. 不等間隔曲線溝凹面回折格子

凹面格子は1882年に H. A. Rowland⁶⁾ によって発明されて以来、刻線溝を接平面に投影したものが等間隔直線群となるものと相場が決っていた。だが、この凹面格子にも技術革新が起った。

昭和46年(1971年)であったと思う。米国の友人がホログラフィック凹面格子を持って私共の研究所へ訪ねて来られた。メーカーは Jobin Yvon 社である。噂では聞いていたものの、現物を見るのは初めてであった。

ホログラフィック回折格子は、高出力アルゴンイオンレーザーと高解像度のフォトレジストの開発によって初めて製作可能となったもので、1967年に Rudolph と Schmahl による最初の報文⁷⁾ が発表されている。ガラス基板に塗布したフォトレジストにレーザー光で作った2光束干渉縞を記録し現像すると、干渉縞はフォトレジストの凹凸となる。これにアルミニウムなどを蒸着すれば、反射型の回折格子となる。フォトレジスト面上にできる干渉縞の形は、2つの記録用点光源を焦点とし、焦点を結ぶ直線を回転軸とする回転双曲面群とフォトレジスト面との交線群となる^{*}。したがって、現像してできた溝を格子面の中心での接平面に投影すると、投影された溝は一般に直線でもなければ等間隔でもない。記録用点光源の配置を適当に選ぶことによって、いろいろな結像特性の凹面格子を作れる可能性がでてきたことになる。

既に述べたように、真空分光計の研究では(1)式のみを0とし、収差項を無視したが、ホログラフィックな手法を使えば収差項もある程度消せるのではないかと考えた。いろいろ計算してみると、ある特定な記録用点光源配置によって収差を低減できることが分ってきた。

幸い昭和47年度科研費(A)が認められ、アルゴンイオンレーザーを購入できた。当時東京教育大学の院生であった野田さん(現筑波大)はこれを使って収差補正ホログラフィック凹面格子の製作に成功するとともに、私共のホログラフィック回折格子の設計法や光線追跡法の正しいことを実証した⁸⁾。これがきっかけになって、世界各国で分光計用収差補正ホログラフィック凹面格子の設計、製作が盛んになったように思う。

日立中研の原田さん等は世界に先駆けて不等間隔曲線溝の凹面格子の機械刻線の研究を進めておられたが、昭和49年(1974年)のICOの際に成果を発表され、注目

* 記録用点光源の一方が無限遠にあれば、回転放物面群と、虚光源であれば回転楕円面群とフォトレジストの交線群となる。

を集めた⁹⁾。私共の真空分光計用の収差補正型凹面格子も製作され、その性能を一段と向上させることが可能になった¹⁰⁾。そのような真空分光計は現在、分子科学研究所の極紫外放射光実験施設で活躍している。

さらに昨年には、島津製作所の小池さん等と筑波大の野田さんが非球面波干渉記録方式という新しいホログラフィック回折格子の製作法を開発された¹¹⁾。この方法で作られた凹面格子を用いることで、私共の分光計の可視紫外での性能が一層向上することが実験で確かめられた¹¹⁾。

6. あとがき

私共の真空分光計は Jarrel-Ash 社が生産に入った段階で研究は一応完了したものと思っていた。しかし、全く予期しなかった科学技術の進歩により、大出力レーザーや高解像度フォトレジストなどが現われ、電算機の普及と相俟って、回折格子は不等間隔曲線溝の時代へと移行した。それに伴い、分光計の研究は個々の研究目的に適した注文仕立の凹面格子の研究に移っていると思う。

多くの方々の研究が付け加えられて、私共の分光計の性能は次第に改善され、今なお世界各国で研究用に、産

業用にと広く使用されている。研究の成果を活用していただくほど研究者にとって励みになることはない。有難いことで、感謝のほかはない。

文 献

- 1) J. B. Hoag: *Astrophys. J.* **66**, 225 (1927).
- 2) R. A. Sawyer: *Experimental Spectroscopy*, 2nd Ed. (Prentice-Hall, New York, 1951) p. 161.
- 3) H. G. Beutler: *J. Opt. Soc. Am.* **35**, 311 (1945).
- 4) M. Seya: *Sci. Light (Tokyo)* **2**, 8 (1952); T. Namioka: *J. Opt. Soc. Am.* **49**, 951 (1959).
- 5) T. Namioka: *Sci. Light (Tokyo)* **3**, 15 (1954).
- 6) H. A. Rowland: *Phil. Mag.* **13**, 469 (1882).
- 7) D. Rudolph and G. Schmahl: *Umschau in Wissenschaft und Technik* **67**, 225 (1967).
- 8) T. Namioka, H. Noda and M. Seya: *分光研究* **23**, Suppl. No. 1, 29 (1974); H. Noda, T. Namioka and M. Seya: *J. Opt. Soc. Am.* **64**, 1031, 1037, 1043 (1974).
- 9) T. Harada, S. Moriyama and T. Kita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **14**, Suppl. 14-1, 175 (1975).
- 10) T. Kita and T. Harada: *分光研究* **29**, 256 (1980).
- 11) 原田善寿・小池雅人・野田英行: *島津評論* **44**, 365 (1988).