高速度カメラと光電管によるライン プロフィールの連続測定の方法*

浜田繁雄・横田昌広・(日大理工)**
内田岱次郎・吉村久光

The idea and principle of the method is described and discussed. The image is not swept along an arc-like film surface as in usual high speed cameras, but is scanned repeatedly at one place. The plane mirrors are arranged tangentially on an elliptical surface. The exit slit and the rotating mirror are set in the position of the foci of this ellipse. Thus the image of the line profile is scanned at the slit each time the light beam sweeps across one of the plane mirrors. However, the image plane rotates with the rotating mirror, so a narrow width slit is not suitable for this instrument. Therefore, one knife edge of the exit slit is fixed in the focussing plane and the slit width made greater than the length of the image so that the signal from the photomultiplier is independent of the rotation of the image plane. The signal will indicate the integrated light intensity of the image. The output signal from the photomultiplier is fed to the

* The Method of Continuous Observation of Line Profile by High Speed Camera and Photomultiplier.

** S. Hamada, M. Yokota, T. Uchida and H. Yoshimura.
Department of Physics, College of Science and Engineering,
Nihon University.

differential circuits. Thus the signal through this circuit indicates the real line profile.

§ 1 はじめに

プラズマから出る光を分光して、時間的に追いつて測定しようとする時、光量が大変に落ちる。そのため非常に感度の高いフィルムをつかっても非常に明るい線しか観測出来ない。しかも写真を利用しようとする、フォトメトリーの手続に可成の努力をくりかえさなければならない。このためなるべく光電管でやりたいが、光電管にすると測定量が1ビットで、写真のフィルムのように巾と強さの時間的変化を同時にみるというわけにはいかない。そのため光電管で2ビット以上の情報量をあつかおうとするとこんどは光電管と測定系の数がふえてくる。このやり方の例はステラレーターに用いられたタンデム・エタロンによる線巾の測定である。¹⁾ 光電子増倍管を沢山つかうと感度をそろえるか、相互に校正しなければならない。そのため才1に経済性、才2に取扱いの簡単さを考えて次の様なやり方にすることにした。それは線のプロファイルを像面の上でくりかえし走査させ、そのくりかえしの1回の走査時間を現象の変化時間より充分速くすれば、1本の光電管で巾と強度が連続的にとりだせる。

像を振動させるということにだけ注目すれば、1つの方法は光学系の分散系の屈折率を急速に変化させるということであろう。そのために今の観測のくりかえし振動の時間から超音波を通して透明な液体に光のビームを音波の半波長に対して無視出来る程の巾にして通す。しかし乍ら之は技術的に見て毎秒数百万回の測定は困難である。と云うのは数百万サイクルの音波が得られてもその波長は極短に短くなってしまうからである。光学系の分散部の大部分を一様にかえる方法はまだないようである。そこで観測の速度から考えて、高速カメラを使うのがよいということになる。

廻転をくりかえし運動に直すやり方として次のようにする。楕円鏡の一方の焦点から出る光は他の焦点に集まるので、一方の焦点に廻転鏡を置き、他の焦点にスリットを置く。スリットの所でくりかえし走査させるために、楕円鏡のかわり楕円に切するように沢山の平面鏡をならべる。

平面鏡の場所によつて入射角がわずかに変わるので、像は焦点の所でくりかえし走査することになる。

(i) M_i の位置 (才 2 図)

$$a_i + b_i = A$$

- 409 -

Fig 2

このとき

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\theta_i + \phi + \tan^{-1} \frac{x}{A} \right) \quad (2.1)$$

或は

$$x = A \tan(2\alpha - \theta_i - \phi) \quad (2.2)$$

となる。(2.2) から x/A が充分小さく、 M_0 の角速度 $\dot{\alpha}$ が一定ならばスリット S における走査速度は一定であることが分る。次に鏡 M_i によつて $x=X$ なる像が S に結ばれた時鏡 M_{i+1} によつて $x=-X$ なる像が S に結ばれるように、 θ_{i+1} を定めよう。このとき (2.1) から

$$\theta_{i+1} + \phi - \tan^{-1} \frac{X}{A} = \theta_i + \phi + \tan^{-1} \frac{X}{A}$$

故に

$$\theta_{i+1} - \theta_i = 2 \tan^{-1} \frac{X}{A} = \Delta\theta \quad (2.3)$$

高速度カメラと光電管によるラインプロファイルの連続測定の方法

従つて各鏡の M_0 に関する角距離は等間隔である。仮りに $A=50\text{ cm}$ $X=2.5\text{ mm}$ とすると

$$\theta_{i+1} - \theta_i = \frac{1}{100} \text{ radian}$$

になる。従つて M_0 の廻転速度が 10^5 Radian/sec (ベックマン高速カメラ) であるとする、 $0.1\mu\text{ sec}$ 毎に line profil を取ることが出来る。

ii) スリットSに入る光の傾き

スリットSが例えばスペクトル線のプロファイルの像の巾よりもせまい時にはスリットと $\vec{b}_i$ との傾きによつて光量が変わる。この様な光量の変化は小さい方がよい。今楕円上の任意の点をQ M_0 の軸からQへ向うベクトルを $\vec{a}$; QからSへのベクトルを $\vec{b}$ とし $\vec{a}$ と $\vec{c}$; $\vec{b}$ と $\vec{c}$ の角を夫々 θ, η とすると (才9図)

Fig. 3

$$\frac{d\eta}{d\theta} = - \frac{A^2 - c^2}{A^2 + c^2 - 2Ac \cos \theta} \quad (2.4)$$

なる関係がある。この式から点Qが M_0 の近くにある時の方が $\left| \frac{d\eta}{d\theta} \right|$ が小さいことが結論される。従つて鏡 M_1 はなるべく M_0 の近くに配置した方がよい。同じ理由で c をAに近した方が $\left| \frac{d\eta}{d\theta} \right|$ が小さいからなるべく細長い楕円をえらんだ方がよい。

Ⅲ) スリット S に達する光量

スリット S に達する光量はどの鏡 M_i についても一定で、しかも出来るだけ大きくなければならない。この条件を満足するためには二つの方法がある。一つは S からみた鏡 M_i の視角をすべて等しくし、他方 M_0 による P の像 P_i' に集まる光束の中に常に M_i が含まれるようにすることである。 M_i の S に対する視角を $\Delta\eta$ とすると

(2.4) から

$$\Delta\eta \leq \frac{A^2 - c^2}{A^2 + c^2 - 2Ac \cos \theta_N} \cdot \Delta\theta \quad (2.5)$$

でなければならない。ここで Suffix N は N 枚の鏡のうちで最も M_0 に近い鏡を示すものとする。 $\Delta\theta$ は (2.3) で与えられるが、実は (2.3) は像の大きさ X で定まる $\Delta\theta$ の最小値を与えているにすぎない。 M_0 の角速度を ω とすると

$$\tau = \frac{\Delta\theta}{\omega} \geq \frac{2}{\omega} \tan^{-1} \frac{X}{A} \quad (2.6)$$

は繰返し走査の週期を与える。従つて τ が長くてもよければ $\Delta\theta$ は大きく取ることが出来る。

(2.6) を使つて (2.5) から $\Delta\theta$ を消去すると、

$$\Delta\eta \leq \frac{A^2 - c^2}{A^2 + c^2 - 2Ac \cos \theta_N} \omega \tau \quad (2.5)'$$

を得る。(2.5)' は走査週期 τ を短くすれば光量を犠牲にしなければならぬことを示している。

次に鏡の数 N は

$$N = \frac{\theta_N - \theta_1}{\Delta\theta} = \frac{\theta_N - \theta_1}{\tau\omega} \leq \frac{\pi}{2 \tan^{-1} \frac{X}{A}} \quad (2.7)$$

で押えられる。次にレンズ F の直径を D, F と M_0 の距離を B, 鏡 M_0, M_i の長さを夫々 ℓ_0 , として、 ℓ_0 及び D の最小値を求めよう。 P_i から出て M_i を含む光束は常に M_0 に含まれる必要がある。 P'_0 は M_i に関する S の対称点だから P_i' から見た M_i の視角は $\Delta\eta$ である。

従つて $\frac{X}{A}$ を無視すると

$$\Delta\eta \leq \frac{\ell_0}{A} \sin \frac{1}{2} (\phi + \theta_1) \leq \frac{\ell_0}{A} \sin \frac{1}{2} (\phi + \theta_i)$$

或は

$$\ell_0 \geq \frac{A\Delta\eta}{\sin \frac{1}{2} (\phi + \theta_1)} \quad (2.8)$$

を得る。

Dについては $1 \ll \frac{X}{D}$ として

$$D \geq \frac{A+B}{A} \ell_0 \sin \frac{1}{2} (\phi + \theta_N) \quad (2.9)$$

を得る。

以上の方法は M_i を一種のスリットとみて各々の鏡の寸法を定めて S に達する光量を一定にしたことに相当する。もう一つの方法は M_i の寸法は (2.6) で定まる $\Delta\theta$ で定め、レンズ F の直後にしぼりスコットをおいて光量を一定にする仕方である。この方が技術的に容易であろう。しぼりスリットの巾を d とする。 P_i' に対する光束の開きは $\frac{d}{A+B}$ である。この光速が常に M_i にふくまれればよい。(この光束は当然 M_0 にもふくまれねばならない。) それ故先づ ℓ_0 は

$$\ell_0 \geq \frac{A}{A+B} \frac{d}{\sin \frac{1}{2} (\phi + \theta_1)} \quad (2.10)$$

でなければならない。次に (2.4) によつて

$$\frac{d}{A+B} \leq \frac{A^2 - c^2}{A^2 + c^2 - 2Ac \cos \theta_N} \quad \Delta\theta = \frac{(A^2 - c^2) \omega \tau}{A^2 + c^2 - 2Ac \cos \theta_N} \quad (2.11)$$

を得る。この式と (2.5)' を比較すると明るさに差はない。また (2.10) と (2.8) を比較すれば同じ明るさを得るために必要な ℓ_0 も大差ないことが判る。従つて技術的な容易さからみてオ二の方法が優れている。

§ 3. スリットについて

鏡 M_i によつてスリット S に出来る像は少しづつ異なつた傾きを持つ。また S に入る光束も S に対して少しづつ異なつた入射角を持っている。従つてせまいスリットを使う時は、入射角についての補正が必要である。所がスペクトルラインのプロファイルの巾より広いスリットを使用すれば入射角の補正は不必要である。此時は Fig. 3. に示す様に、フォトマルの Output はプロファイルの積分曲線となる。この output を微分回路に入れてやれば、プロファイルそのものをオツシログラフ上に描ける。もう一回微分すれば、最大微係数を持つ位置の間の線巾が求まる。ガウス型のプロファイルの場合は半巾とこの巾は簡単な関係にある。

§ 4. お わ り に

以上簡単に方法の原則的なことだけを示した。この他実際の設計に当つては像の大きさ、焦点深度、廻転鏡の廻転軸からのズレ等を考慮に入れる必要がある。またプロフィールの観測のためには分散系（エタロンを使うのがよいであろう）の明るさ、フォトマルの感度等について詳しい検討が必要であるが、それ等は別の機会にゆずる。この装置は単にプロフィールの観測のみでなく、例えば、誘導ピンチによつて出来るプラズマ柱の半径方向の光度分布を流し写真のフォトメトリによるよりも正確且つ容易に調べることが出来よう。更にフィルターを使用すれば一層詳しいデータを取ることが出来る。

- 1) C.R. Burnett Controlled Thermonuclear Conference
Helded Washington D.C., Feb. 1958. p. 472.