

## 格子変調法による等濃度線画像の作成

Formation of Equidensities by Grating Modulation

立田 光 広\*・久保田 敏 弘\*・小 瀬 輝 次\*

Mitsuhiro TATEDA, Toshihiro KUBOTA and Teruji OSE

写真画像の輝度分布を求めることは科学写真の分野においてしばしば必要であり、この目的のために等濃度線画像を作ることは有力な画像解析の手段となる。電氣的にあるいは計算機処理によってこれを得る方法も開発されているが、ここでは光学的処理による等濃度線画像の作成について最近の進歩を、主に格子変調法を中心に解説する。

## 1. ま え が き

写真画像の等濃度線を作ることは、画像解析の有力な手段であり、従来からの光学的処理にかわって電氣的な処理、計算機処理が現在多く用いられている。

図1は二次元的に画像を走査したデンシトメーターの出力を電氣的に処理したローソクの炎の写真である。計算機による画像処理は単に等濃度線ばかりでなく、コリレーション等その他の計算処理が自由にできるので、今では前記の電氣的処理より多く利用されている。しかし、医用写真、航空写真の解析などは今後増大するといえども、減少することはなく、経済的な面で大きな壁につきあたる心配もある。一方、必要とする精度によっては光学的なアナログ処理でも十分な場合もあり、場合に

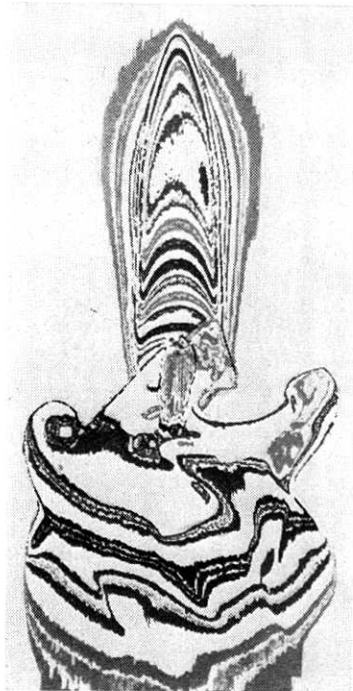


図1 電氣的処理による等濃度線

応じてこれら三つの処理法を使い分けるのが賢明と思われる。ここでは光学的処理の最近の進歩を本研究室で開発した格子変調法を中心に解説してみよう。

## 2. 光学的処理法

光学的処理には1) 写真現像処理によるもの、2) ホログラフィによるもの、3) 格子変調法によるもの、4) その他が考えられる。

1) 写真現像処理による方法には a) ネガ・ポジ重ね合わせによる方法がある。白黒のネガフィルムとそれをもとに露光量と $\gamma$ 値を変えて作ったポジフィルムを重ね合わせる。これによりポジ画像とネガ画像の境目は全体の中で最も濃度の低い部分として現わすことができる。この合成画像をコントラストの高いフィルムに記録することにより線画が形成される。これは原画のある明るさの分布を示すものである。露光量あるいは $\gamma$ 値を適当に調節することにより異なった明るさに対する線画が形成され、これを合成したものは等濃度線画像と呼ばれる。この方法は古くから行なわれており、この目的のための特殊な感光材料も発売されている。また、b) サバチエ効果を利用する方法では、現像途中のフィルムに光をあてたとき、乳剤の表面近傍では既に銀の析出によりネガ画像が形成中であり、これがマスクの役目をする。現像の進行とともにネガ像とポジ像の合成された画像が形成される。これをサバチエ効果という。この合成画像からも、前記の方法と同じ操作により、等濃度線を得ることができる。

これら従来から行なわれている方法は、望みの濃度のところの等濃度線を得ることは困難で、定性的な画像解析にしか利用できない。

さらに、c) ゼラチンのレリーフ像を利用する方法<sup>1)</sup>では、重クロム酸ゼラチンを原画とコンタクトプリントし現像することによって、原画の明るさをゼラチン膜の厚みに変換させることができる。従ってこのレリーフ像をトワイマン干渉計の一方の腕に入れれば、干渉縞によって画像の等濃度線を示すことができる。

\* 東京大学生産技術研究所 第1部

2) ホログラフィによる方法は 1960 年代後半より、情報処理の一環として研究されてきた。ホログラフィによる等濃度線の形成の原理は、二つの画像を比較し異なった部分のみを抽出するという画像の引き算の応用である。

物体光  $O$  と参照光  $R$  で一回目の露光を行ない、次に物体光  $O'$  と参照光  $R'$  で二回目の露光を行なって現象すれば、乾板上の強度は  $|O+R|^2$  と  $|O'+R'|^2$  の和となる。このホログラムに参照光  $R$  と同じ光を再生光として照明すれば、得られる直接像の振幅は  $O|R|^2 + O'RR'^*$  である。ここに  $*$  は共役複素数を示す。もし  $R'=-R$  に選べば直接像の振幅は  $(O-O')|R|^2$  となり、二つの画像の引き算が行なわれる。 $O$  を一般の画像、 $O'$  を ND フィルターとすれば、ND フィルターの濃度に等しい  $O$  の濃度の位置に暗線が現われ、等濃度線が得られる。 $R'=-R$  ということは、参照光の方向はそのまま、位相のみ  $\pi$ 、光路差で 2 分の 1 波長だけ変えることを意味する。これは実際には光路中にセルを置いてその中の気体の屈折率を変えたり<sup>2)</sup>、2 分の 1 波長の位相板を用いたり<sup>3)</sup>、円偏光を使用することによって実現される<sup>4)</sup>。ホログラフィックにこれを行なうには記録の際にもコヒーレント光が必要である。従って画像を記録するフィルムのゼラチン膜の位相変化が結果に影響を与え、実験がむずかしい点がある。

3) その他、搬送波写真において、フィルムの非線形性を利用する方法<sup>5)</sup> あるいは拡散板を使用する方法<sup>6)</sup> が考えられる。また、次章以下に述べる幅変調の一種と考えられるものに、フィルムの非線形性を利用する方法<sup>7)</sup> や原画の強度分布を各種の文字に変換する方法<sup>8)</sup> が報告されている。

### 3. 格子変調方式による等濃度線の形成

画像に一次元格子を重ねると、これは通信の振幅変調された信号に相当する。もちろん、格子の空間周波数が搬送波になる。また、格子の幅あるいは位置を物体の場所の強度に応じて変化させると、これらは通信のパルス幅変調、パルス位置変調に相当する。新聞写真に見られる網点が真のパルス幅変調であるが、これについては M. Marquet and J. Tsujiuchi により画像の解析が行なわれている<sup>9)</sup>。ここでは一次元格子のみを用いる変調を行なうのでこれらを格子幅変調、格子位置変調と呼ぶことにする。

#### 3.1 格子の光学的性質

まず図 2 に示すロンキー格子の光学的性質を述べておこう。

I) 格子間隔  $d$ 、格子幅  $l$  のロンキー格子の透過率 (インコヒーレント照明の時は強度透過率、コヒーレン

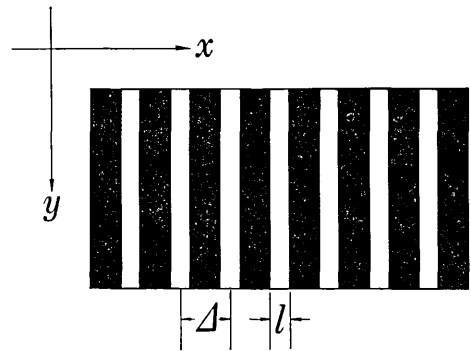


図 2 ロンキー格子

ト照明の時は振幅透過率をさすものとする) は、フーリエ級数展開を用いて、

$$G = \sum a_n \cos(2\pi n \nu x) \quad (1)$$

とかくことができる。ここに  $\nu$  は  $1/d$  で格子の空間周波数である。

いま、この格子を  $\delta$  だけわずかに移動せしめると、

$$\begin{aligned} G' &= \sum a_n \cos(2\pi n \nu(x+\delta)) \\ &= \sum a_n \cos(2\pi n \nu x + n\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

とかける。ここに  $\varphi = 2\pi n \nu \delta$  である。

(2) 式は格子を横ずれさせると  $n$  次の項では  $n\varphi$  の位相のずれを生じることを示している。以上は格子の全く数学的な表現であるが、この格子に平面波をあてることを考えると、フーリエ級数展開の各項は格子による回折光を示す。例えば  $n$  次の項は波長を  $\lambda$  として、

$$\sin \theta = n \nu \lambda \quad (3)$$

を満足する方向  $\pm\theta$  に進む二つの平面波を示している。従って(2)式の場合は  $n$  次の回折光の位相が  $n\varphi$  だけ変わることを示している。平面波の位相変調は、格子の回折波を利用すれば位相板などを用いなくとも格子をずらすだけでよいことがわかる。

II) (1) 式のフーリエ係数  $a_n$  は

$$a_n = \sin n \pi \nu l / \pi n \quad (4)$$

で与えられる。格子の幅  $l$  を変えると、 $a_n$  は正弦関数で変化する。従って格子に平面波をあてた時の回折光の振幅は格子幅  $l$  を変えることにより変化させることができる。

一般に平面波の振幅と位相を変えるには ND フィルターと位相板が必要なわけであるが、上に述べた I), II) の性質によって格子の回折波を利用する場合には、格子の幅で振幅が、横ずれて位相が変えられるわけで、格子を変調に利用する利点はここにあるわけである。

#### 3.2 振幅変調を利用するもの

物体に格子を重ねて記録した写真を光学では搬送波写真と呼んでいる。その特徴として、多くの情報を一つのフィルムに記録し、それを別々にとり出す多重記録に

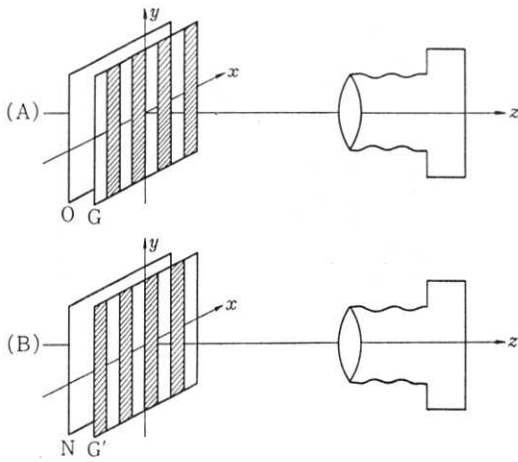


図 3 振幅変調法の撮影系

用されたり<sup>10)~11)</sup>、画像のネガ・ポジ反転に利用されたり<sup>12)</sup>している。

搬送波写真を二重露光することにより画像の引き算を行なう方法を応用すると等濃度線をつくることができる。すなわち図 3 (A) のように物体としての画面 O に格子 G を重ね、その像をカメラでフィルムに記録する。次に同図 (B) のように一様な濃度をもった画面 N に格子 G' を重ねて同じフィルムに二重露光する。このとき G' の格子周波数は G と同じであるが、(A) の場合に

対して格子を半周期だけずらしたものとする。このフィルムには強度  $O \cdot G$  と  $N \cdot G'$  が記録されているが、ホログラムの様に現像処理後のフィルムの透過率と露光量の間直線性が成り立つものとする。すなわち、振幅透過率  $V/T \sim OG + NG'$  となるようにする。このフィルムを図 4 に示す光学系の P<sub>1</sub> 面に挿入し、コヒーレント光で照明すると、レンズ L<sub>1</sub> の焦点面 P<sub>2</sub> 上にはフィルムの回折像を生じる。この面にピンホールをおいて 1 次の回折光のみを通過させて、レンズ L<sub>2</sub> で P<sub>3</sub> 面に像をつくる。この二重回折光学系は数学的にいうと、P<sub>1</sub> 面においた物体のスペクトル (フーリエ変換) が P<sub>2</sub> 面にでき、さらに P<sub>2</sub> 面のフーリエ逆変換が P<sub>3</sub> 面に生じる。従って P<sub>2</sub> 面にピンホールをおくことは、スペクトル面で周波数フィルターをかけることになる。今の場合、格子の一次のスペクトルにのった物体のスペクトルで P<sub>3</sub> 面に像をつくるから物体の像は生じるが、格子はその一つのスペクトル成分のみで結像されるから格子の像はできない。ところが前節 I) に示した性質により、O と N を変調した格子は半周期だけずれているから回折光は  $\pi$  だけ位相がずれており、像もまた  $\pi$  だけ位相がずれている。従って二つの像が重なると弱め合いの干渉の状態となり像面では (O-N) の振幅となる。これは振幅での引き算となり、物体のうちで N と同じ濃度の部分は暗くなる。これが等濃度線となる。この場合、格子は物体を振幅変調するためにのみ用いているので、物体のもつ遮断周波数の 2 倍以上の周波数を基本周波数とする格子であればよい。図 5 に等濃度線の一例を示す。(A) は原画である。回折格子 G としては 10 本/mm ものをを用いた。従って二度目の露光の際の回折格子の移動量は  $50 \mu$  である。

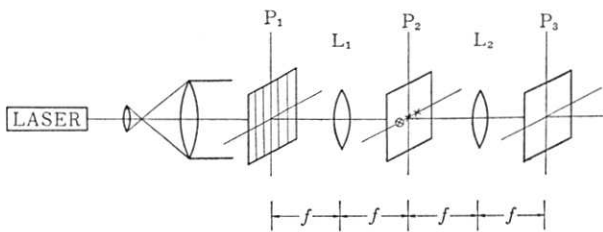


図 4 再回折光学系

### 3.3 幅変調を利用するもの

この方法は物体に格子を重ねる代わりに、物体の

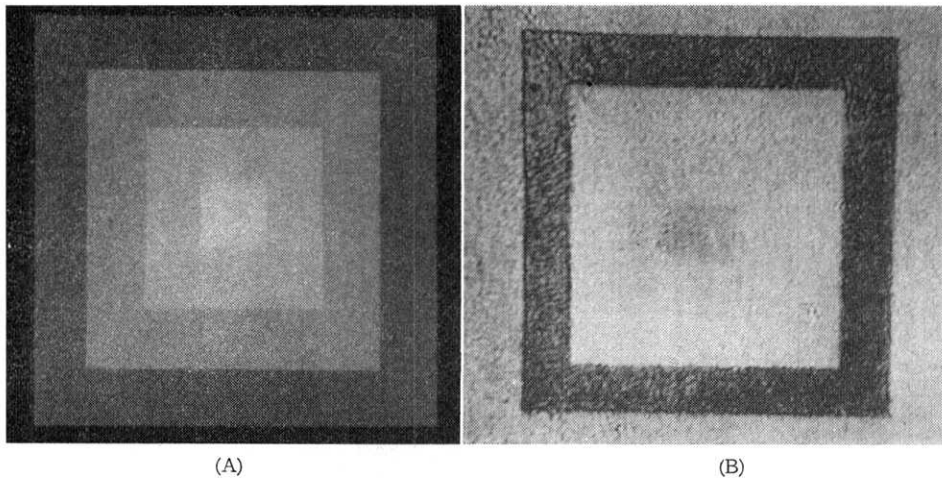


図 5 振幅変調法による等濃度線

強度分布に比例して格子の幅を変化させるものである。ここで物体の絵素内に十分多くの格子が入ると仮定すると、これは格子の性質Ⅱ) で述べた幅変調に相当し、格子の回折波の振幅が物体強度で変調されるようになる。

物体強度を  $S$ 、任意の強度を  $S_0$ 、比例定数を  $\alpha$  として、 $\alpha|S-S_0|$  に比例するように幅  $l$  を変えたと、図 6 の変調格子が得られる。 $\alpha$  を大きくとれば、微小な強度差も拡大することができる。(4)式からわかるように、

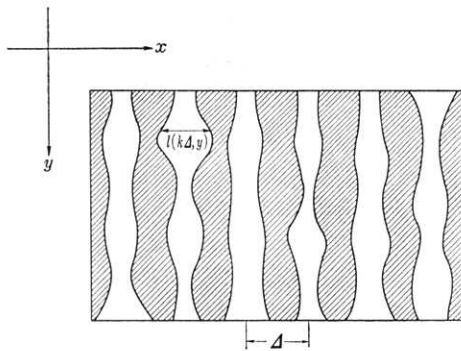


図 6 幅変調を受けた格子

$$n\pi l\nu = \pi m \quad m=0,1,2,\dots,n \quad (5)$$

のとき暗くなる。 $l\nu$ 、すなわち  $l/\Delta$  は開口比を示すが、これを変化させると像面の振幅  $\psi_n$  は図 7 のように変化し、 $n$  次の回折光に対し  $(n+1)$  個の零点をもつ。この変調の場合、格子間隔は物体のサンプル点となるので、良い像を得るには格子本数を増す必要がある。

このような幅変調を行なうには、電気的装置を一切使わずにすべて光学的に行なおうとすれば、新聞・雑誌等の写真印刷に用いられている網点印刷法の変形一仮に網

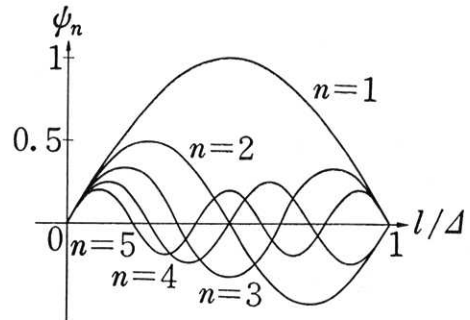


図 7 開口比による像面の振幅の変化

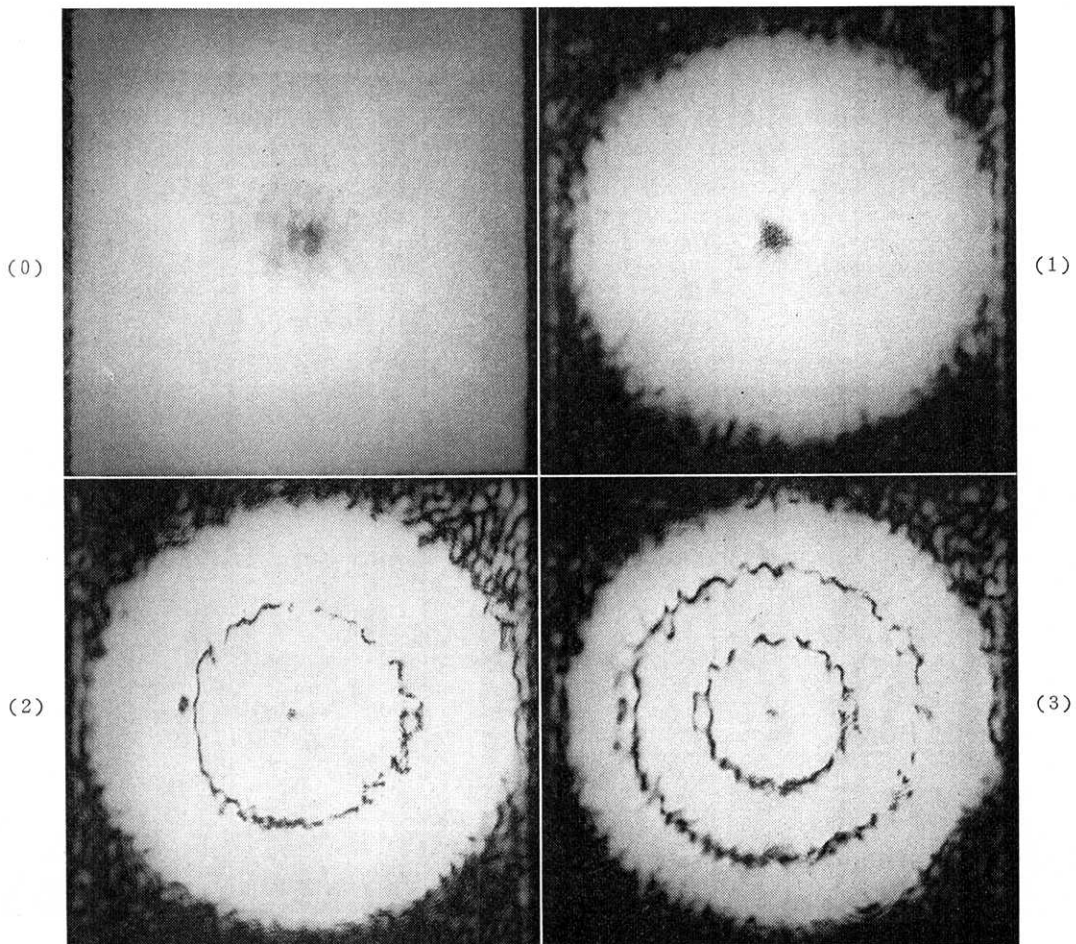


図 8 幅変調法による等濃度線

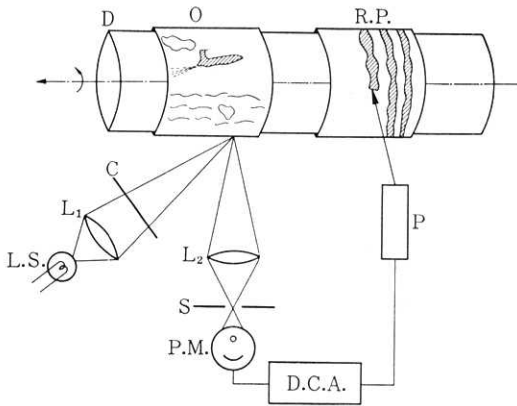


図 9 実験装置

線法としておく一が用いられる。電気的装置を用いるならば、物体の濃度分布を濃度計で走査しながらその出力をペンレコーダーで記録したり、映画のサウンドトラックと同じ手法を用いることにより幅変調が実行できる。図 8 は中央で透過率 0、ラジアル方向に透過率が大きくなる円板状の物体を仮定して、幅変調を計算機を用いて行ない等濃度線を形成した例である。写真の番号は回折次数を示す。この図は理論通りに  $n$  次の回折像から  $(n + 1)$  本の暗線（中央と外周を含む）が得られることを示している。図 8 はいわば仮想物体であったが、印画紙に焼き付けられた画像のような一般の物体に対して幅変調を行なうために図 9 のような装置を試作した。物体 O および記録紙 R.P. は同一のドラム D に貼り付けられている。光源 L.S. の像をレンズ  $L_1$  で物体上に投影し、物体を照明する。照明されている部分の、レンズ  $L_2$  による像面にスリット S を置き、適当な視野内の光を光電子増倍管 P.M. で受ける。P.M. の出力を直流電圧増幅器 D.C.A. で増幅し、ペンレコーダー P で記録紙

R.P. に記録する。光源と物体の間に光を周期的に遮断するチョッパー C がある。このため光電子増倍管の出力は交流（低周波）となり、ペンレコーダーは物体の反射率に応じた振幅で記録紙をぬりつぶす。こうして幅変調された格子が得られる。物体は回転ドラムを回転させるに従って軸方向に送られる。この時観測点はドラム上をラセン状に走査されるが、これは物体面が平行直線群で走査されたことに相当する。ライター flame の写真 (23 cm × 19 cm) を原画として用いた実験例を図 10 に示す。(A) は原画で、(B-1) は 1 次再生像、(B-2) は 2 次の再生像を示す。サンプリングピッチは 2mm、格子本数は原画の外側も含めて 120 本である。チョッパーの周期は 1/25 秒、格子を描く速さは 6.3mm/秒である。得られた格子を 1/30 に写真縮小し、図 4 の再回折光学系でフィルタリングを行なえば等濃度線画像が得られる。図 10 に見るとおり、一応等濃度線は得られたものの、本数を増そうとして高次の回折像を見ればノイズが増す。また、新たな線は flame の輪郭線付近に集中するばかりで、flame の外側のうす暗い部分の様子はよくわからない。この原因の一つに次のような理由が考えられる。図 9 の系では R.P. に記録されるのは原画の反射率であり、透過物体の場合ならば透過率に相当するものである。濃度はこれの対数に相当するから、正しく等濃度線を濃度に対して等間隔に得るためには P.M. の出力の対数をとって増幅しなければならない。この実験ではそれを行なわなかったので、原画の濃度の低い部分では濃度差はあるにもかかわらず、反射率の差が小さいため暗線が得られなかったと解釈される。

3.4 位置変調を利用するもの

原画に一次元のサンプリングを行なうことは幅変調と

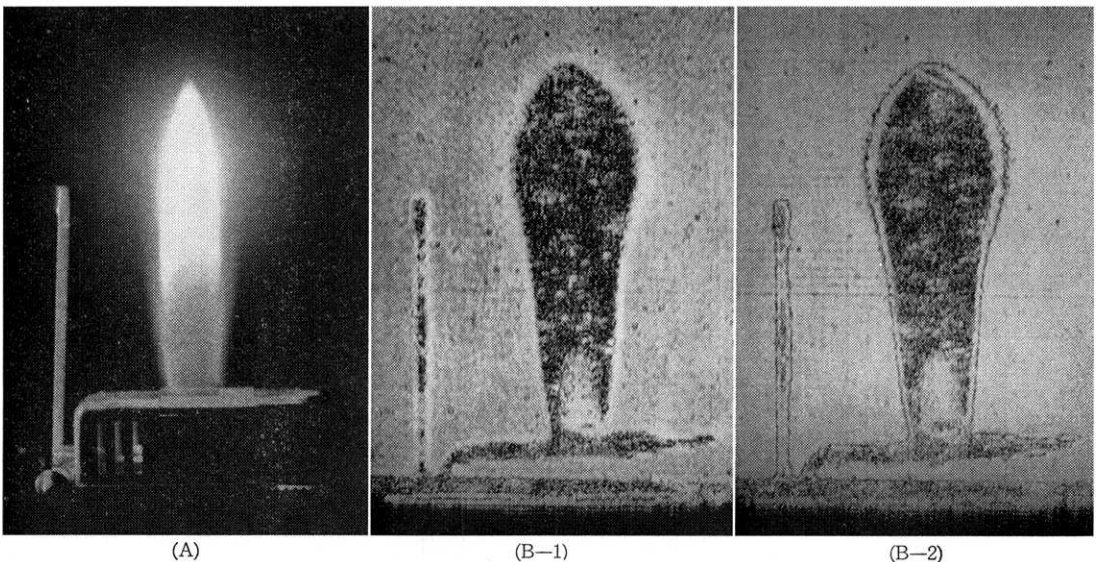


図 10 幅変調法による等濃度線

同じであるが、強度を開口比に変換する代りに、格子の

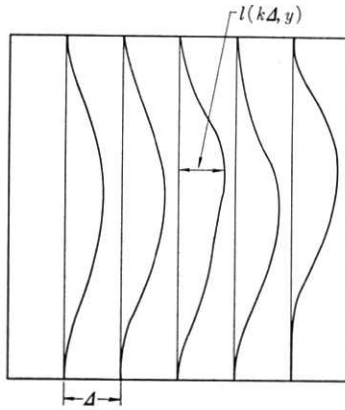


図 11 位置変調格子

中心位置の横ずらし量に変換するものである。格子の I) の性質からわかるように、格子の横ずらしは平面波をあてるとき回折波の位相変化になるから、これは物体の強度分布で回折波の位相を変調することになる。そこで図 11 のように基本格子と物体の強度に比例して位置を変えた格子を二つ書き、これを 2 重回折系の P<sub>1</sub> 面に入れ P<sub>2</sub> 面で第 n 次の回折光だけをフィルターして取り出し像を作ると、基準格子から出る平面波と位相変化を与えられた波面とが像面で干渉し、P<sub>3</sub> 面では両者の干渉縞を像の中に見ることができる。干渉縞の強度は  $\cos n\phi$  で変化するから、 $n2\pi\psi l = (2m+1)\pi$  のところに暗線を生じる。したがって、 $l \sim \alpha(S - S_0)$  とすると、

$$l = \frac{2m+1}{2n} \Delta$$

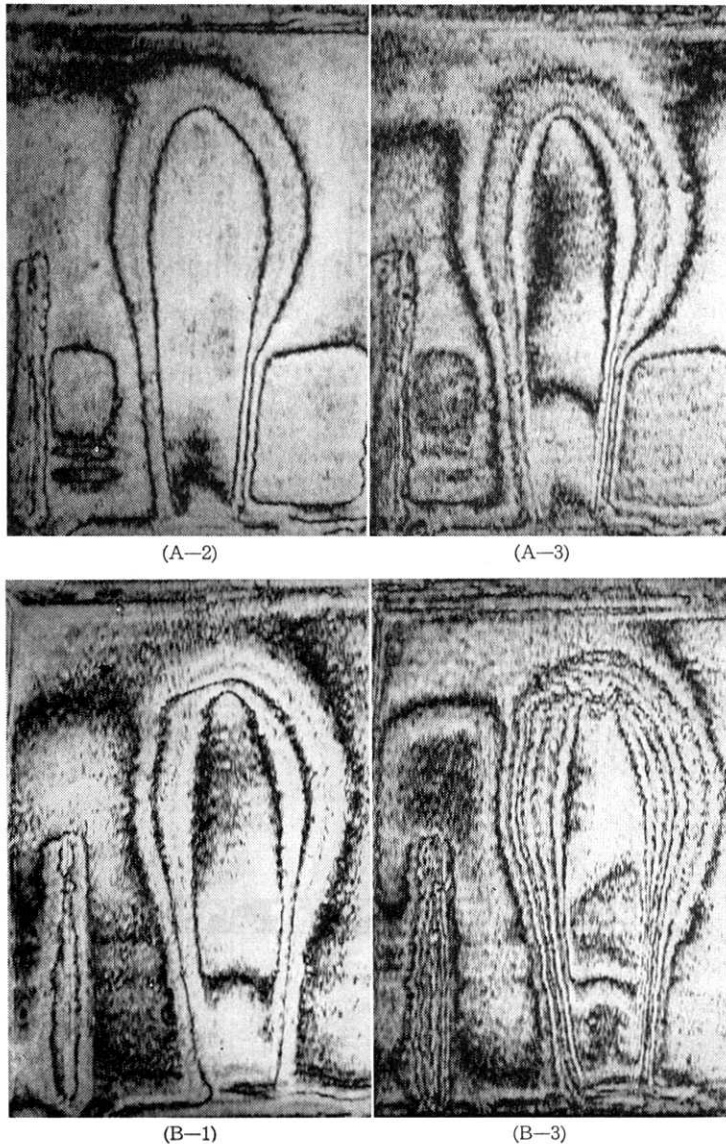


図 12 位置変調法による等濃度線

を満たすところで暗くなる。幅変調法の場合と同じ原画を用いた実験例を図 12 に示す。図の番号は回折次数を示す。位置変調を行なうための装置は幅変調を行なうのに用いた装置 (図 9) からチョッパー C を取り除いたものを用いた。このため、原画の反射率はそのまま光電子増倍管の出力となってペンレコーダーを動かす、ペンの位置に変換される。サンプリングピッチは 2mm、格子本数は 120 本とし、幅変調の場合と同じにした。図 12(A) に見るとおり、次数が高くなるにつれて等濃度線の数が増し、炎の輪郭線の外側の背景の部分の濃度分布も明らかになっている。この実験例では変調感度  $\alpha$  は比較的小さく、 $\alpha \sim \Delta$  程度である。図 12(B) は変調感度を大きくとった場合の等濃度線で、 $\alpha \sim 2.5\Delta$  程度である。ここでは一次の像からすでに 3 本の等濃度線が見られる。

これらを幅変調によるもの (図 10) とくらべてみると、次のような点で位置変調の方が勝っていることがわかる。第一に変調感度  $\alpha$  の制限がゆるやかなこと。第二に高次の像の劣化がさほど急でないことである。変調感度については、 $0 \leq S \leq 1$  の場合に話を限ると、幅変調の場合は  $\alpha$  の最大値は  $\Delta$  をこえることはできないが、位置変調の場合は  $3\Delta$ ,  $4\Delta$  の値をとることも可能である。このため変調の dynamic range を十分大きくとれるので、幅変調では知ることのできなかつた炎の輪郭線の外側の濃度分布をも、位置変調では知ることができた。次に、次数による像の質の変化については、幅変調では次数の二乗に反比例して光量が減少するのに対し、位置変調では次数による光量の変化はない。このため、ノイズに対する S.N. 比は幅変調の場合にくらべ、位置変調の場合の方が良くなる。

#### 4. ま と め

以上、等濃度線画像を光学的手法で得る方法について

述べてきたが、振幅変調法は本質的には格子の回折効率の違いを利用するものであり、幅変調法は格子の回折像の強度が開口比によって変わることを利用するものであり、位置変調法は基本格子と変調格子を通った波面の干渉を利用するものである。

原画の、ある特定の濃度を持つ部分の分布状態を知りたい時は振幅変調法が適しているが、いくつかの濃度に対する等濃度線を同時に見たい場合は幅変調法または位置変調法が適している。

これまでに述べたように、等濃度線画像を光学的に得る方法は従来からいくつか知られているが、われわれの方法では得られた等濃度線画像から原画の濃度分布が定量的に解析できるという特徴がある。特に、幅変調法および位置変調法では等濃度線が一定の濃度差毎に得られるため、解析が非常に簡単になった。

(1974 年 2 月 15 日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) A. Elliott: J. Phot. Sci. 18 68 (1970)
- 2) L.F. Collins: Appl. Opt. 7 203 (1968)
- 3) G.W. Stroke: *An Introduction to Coherent Optics and Holography* (Academic Press, New York, 1966) p. 90
- 4) E. Marom: Opt. Commun. 6 86 (1972)
- 5) K. Biedermann: J. Opt. Soc. Amer. 61 1439 (1971)
- 6) C.D. Grover: Opt. Commun. 5 256 (1972)
- 7) J. Schwider and R. Burrow: J. Opt. Soc. Amer. 60 1421 (1970)
- 8) E. Delingat: Optik 37 82 (1973)
- 9) Mme M. Marquet and J. Tsujiuchi: Opt. Acta 8 267 (1961)
- 10) J.D. Armitage and A.W. Lohmann: Appl. Opt. 4 399 (1965)
- 11) P.F. Mueller: Appl. Opt. 8 267 (1969)
- 12) O. Bryngdahl: J. Opt. Soc. Amer. 62 807 (1972)

