

# 市販フィルムによるホログラフィ

山口 一郎・小瀬 輝次

最近の話題をにぎわしているホログラフィを概説し、手近な感光材料を用いた場合の結像性能を理論と実験により検討してみた。

## 1. ま え が き

われわれの用いる detector は、光のように周波数の高い電磁波に対しては電場あるいは磁場の二乗平均値だけしか測定できない。したがって普通の写真法などでは光の振幅は記録されるが、位相を記録することはできない。そこで光の干渉を利用して光の振幅と位相を、つまり波面を、記録し再生しようとするのがホログラフィである。

ホログラフィは次のように2段階に分けられる。第一は記録すべき波面、すなわち物体からの散乱波あるいは回折波に、これとコヒーレントな一定の形の参照波と呼ばれる波面を重ねて生ずる干渉パターンを写真乾板などの感光材料に記録して、ネガまたはポジを作ることである。得られたものをホログラムという。次にホログラムを適当なコヒーレント光で照明すると、回折によって生ずる波が特定の位置に最初の物体の像を結ぶ。これが第二の再生の段階である。以上のことを数式によって説明してみよう。

(1) 波面の記録すなわちホログラムの作製：記録すべき波の写真乾板上における複素振幅を

$$s(x) = A(x)e^{i\psi_s(x)}$$

で表わし、参照波の複素振幅を振幅は一様であるものとして

$$r(x) = R_0 e^{i\psi_r(x)}$$

で表わすと、両者を重ね合わせることによって得られる干渉パターンの強度分布  $U(x)$  は

$$\begin{aligned} U(x) &= |s(x) + r(x)|^2 \\ &= R_0^2 + A^2(x) + 2R_0 A(x) \cos[\psi_s(x) - \psi_r(x)] \end{aligned} \quad (1)$$

と与えられる。記録を行なった乾板に適当な処理を行なって  $U(x)$  に比例するような振幅透過率  $t(x)$  を持つホログラムを作る。

$$t(x) = \alpha U(x) \quad \alpha: \text{定数} \quad (2)$$

(2) 波面の再生：ホログラムを参照波  $R_0 e^{i\psi_r}$  で照明すると、ホログラム直後の振幅分布はホログラムの縁による影響を無視すれば、

$$\begin{aligned} r(x)t(x) &= \alpha R_0^2 \{ R_0 e^{i\psi_r(x)} + A^2(x) e^{i\psi_r(x)} / R_0 \\ &\quad + A(x) e^{i\psi_s(x)} + A(x) e^{i[2\psi_r(x) - \psi_s(x)]} \} \end{aligned} \quad (3-1)$$

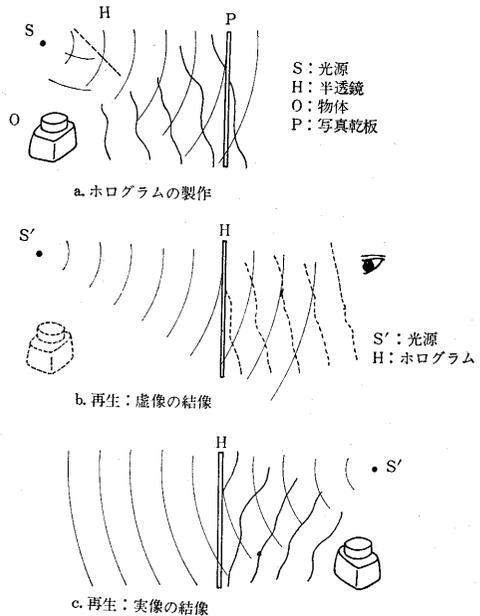
となる、右辺第3項を見ると記録された波面が再生されていることがわかる。この成分はもとの物体位置に虚像

を作る。次に乾板に関する参照光の光源の対称点に虚光源を持つ光でホログラムを照明すると、生ずる波は

$$\begin{aligned} r^*(x)t(x) &= \alpha R_0^2 \{ R_0 e^{-i\psi_r(x)} + A^2(x) e^{-i\psi_r(x)} / R_0 + \\ &\quad A(x) e^{i[\psi_s(x) - 2\psi_r(x)]} + A(x) e^{-i\psi_s(x)} \} \end{aligned} \quad (3-2)$$

で与えられる。ここに\*は複素共役を表わす。右辺第4項は記録された波面と複素共役な波面が生ずることを示しているが、この成分は乾板に関する物体の対称位置に実像を結ぶ。

以上のことを参照波として球面波を用いた場合について図・1に示しておく。



図・1 ホログラフィの原理

## 2. ホログラフィの問題点

前節において確かに波面の記録と再生が可能であることが明らかにされた訳であるが一般論に過ぎず、実際問題としては次の点が解決されなければならない。

(1) 共役像の分離：(3-1)式、(3-2)式からわかるようにホログラムとなる感光材料の二乗特性のために、再生で生ずる波面は目的とするもの以外の不必要な波面を含んでいる。ホログラフィの原理が1948年、イギリスの D. Gabor<sup>1)</sup> によって初めて発表されて以来、目的の再生波面だけを取り出すことが最大の課題であった。た

だし(3-1)式, (3-2)式における右辺第1項はホログラム照明光そのもので, 一様な振幅の background を作る波面であり, 第2項は照明光の振幅  $R_0$  を物体からの波の振幅  $A(x)$  に比べて十分大きくとることによって, 他の項に対して無視できるほど小さくすることができる。したがって中心問題は共役波と呼ばれる第3項と第4項の分離であるが, Gabor は一方の像の結ばれる位置では他方の像が大きくピントをはずれていることを利用したために, 再生像に noise が多く含まれて完全な分離とはならなかった。

ホログラムに一種の回折格子の役割を与えて(3-1)式あるいは(3-2)式の各項を方向的に分離したのが E. N. Leith & J. Upatnieks<sup>2)</sup>(1962)であって, ホログラフィに一紀元を開くことになった。彼らの方法の詳細についてはあとで述べる。

(2) 感光材料の問題: (1)式で示される強度分布を写真乾板に記録して(2)式の振幅透過率を持つホログラムを作るためには, 後に明らかになるようにネガ, ポジの反転を必要とするが実際上はめんどうである。参照波の振幅を十分大きくとることによって, ネガについても(2)式を近似的に満足させることができる。しかしこの場合でも(1)式に含まれる信号成分の変動の全範囲にわたって乾板の $\gamma$ は一定でなければならない。

さらに乾板の解像力が有限であるために, 干渉パターンの細かい部分まで完全に記録されず, 厳密には(1)式から(2)式にそのまま移行することはできない。

普通の写真では振幅だけが記録されるが, ホログラムには振幅と位相の両方が記録されているために貯えられる情報量は増している。したがって解像力を考える場合でも, 単にどの程度の細かさの振幅変化が再現されているかをみるだけでなく, どの程度の細かさの位相変化まで再現されているかもあわせて考慮に入れるべきであろう。しかし最終的判定を行なうわれわれの眼が位相には感じないために, ホログラムに用いる感光材料の解像力と再生像の解像力の関係は簡単にはわからない。

(2)式においてはホログラムの光学的な厚みが一様であることが仮定されているが, これも実際には乳剤層の感光部分が盛り上るタンニング効果などから推すと疑わしい。ことにロール・フィルムのように平面度を保つのがむずかしい感光材料ではこの位相の乱れが大きな問題となることが予想される。

以上のようにホログラフィの実用化にはいくつかの問題があるが, 次にホログラフィの特徴とその応用について簡単に述べてみよう。

### 3. ホログラフィの特徴とその応用

(1) 結像にレンズを必要としないこと: (3-2)式の実像を作る波面の再生の際にはホログラム自体が結像レンズの作用を示し, 照明波の一部を結像波に変えている。フ

レネルの輪帯板が振幅物体にもかかわらずレンズの働きを持つことはよく知られているが, これは点物体に対するホログラムと考えられる。一般の物体を多数の点物体の集合とみなすならば, 3次元物体がそのまま3次元のひろがりを持つ像として再生されることがわかる。

さらに(3-2)式の実像を作る波面には収差が含まれていないので, レンズ系では不可能な無収差結像を行なわせることができる。(3-1)式, (3-2)式ではホログラムの照明波を参照波そのもの, あるいはその共役波にとったが, これを別の形の波面にすると生ずる像には収差を伴うと同時に倍率がかかってくる。すなわち再生の際にホログラムの照明を参照波と異なる波長や曲率を持つ波面で行なったり, ホログラムにあらかじめ引伸しを与えておいたりすると, 再生像には任意の倍率がかかる<sup>3)</sup>。適当なレンズがまだ見出されていない極端業界やX線の領域でも, もし適当なコヒーレント放射源と干渉パターンを高解像力で吸収率あるいは屈折率の変化にかえられる物質があればホログラムを作ることが可能で, 得られたホログラムの再生に光波を用いると高倍率の拡大ができる。ホログラフィを顕微鏡として利用する分野をマイクロ・ホログラフィと呼んでいる。

(2) 情報処理への応用: ホログラムは波面を干渉パターンとして感光材料に記録したものであるから, 多数の波面を多重露光を利用して重ねて貯える場合も, 記録されている干渉パターンが互いに影響を及ぼし合わない限り, 再生の際に各波面を独立に取り出すことができる。多重露光の時に記録すべき波面ごとに形の異なった参照波面を用いて作られたホログラムでは, 再生の際に参照波と同一の波面で照明しない限り, 記録された波面は再生されず, したがって明瞭な像(この場合は虚像)も得られない。このことを使ってホログラフィを画像のコーディングに応用することができる。

また同一の物体を波長の異なるコヒーレント光で照明して作られる多重露光のホログラムを, それぞれの光で同時に照明すれば白黒乾板によってカラーの再生像が得られる。

(2)式をみるとわかるように, 位相については物体からの波面と参照波面はホログラム内で全く対称な働きをしている。したがって, 再生の際にホログラムを物体からの光で照明すると, 振幅は異なるが参照波と同一の形をした波面が再生される。これは上で述べたコーディングと逆にパターン認識に応用することができる。このことはホログラムが物体からの波の位相に対する matched filter を含んでいることを意味している。

(3) 干渉測定への応用: (2)とは別の行き方で, 同一の参照波を用いていくつかの波面を多重露光によって一つのホログラムに記録し再生すると, 各波面の間の干渉縞を観察できる。このようにすると時間的あるいは空間

的にずれた波面同志の比較が可能となるので、振動の解析や応力測定などに有用である<sup>4)</sup>。

これまでではホログラフィの概観を述べてきたが、筆者はホログラフィの実用化という観点に立って手近な 35 mm フィルム数種をホログラム用感光材料として使用した時の再生像の特性を比較し、理論解析とあわせて検討を行なってみた。以下その結果についてふれてみたい。

#### 4. 理論的解析

前記の問題点の項で指摘したように、ホログラフィではホログラムとして用いる感光材料の特性が像性能に最も大きな影響を与える。感光材料のレスポンス関数の影響については、すでに R. F. van Ligtен<sup>5)</sup> の解析があるがここでは少し違った取扱いを行なってみた。

Leith らの方式で参照波と物体照明波がともに平面波の場合を考える。

(1) ホログラム面における干渉パターン<sup>6)</sup>の強度分布：振幅透過率  $o(x')$  の平面物体を垂直入射の平行光で照明すると、その後方  $Z_1$  にあるホログラム面における振幅分布  $s(x)$  は近似的にフレネル回折で与えられる。

$$s(x) = \int o(x') \exp[ik(x-x')^2/2Z_1] dx' \quad (4)$$

ここで  $k=2\pi/\lambda$ 、定数係数は省いてある。

上式は  $f_1(x) = \exp(ikx^2/2Z_1)$  とおくと  $o(x)$  と  $f_1(x)$  の convolution 積分になっている。

参照波としてホログラム面に角度  $\alpha_1$  で入射する平面波  $r(x) = \exp(ik\alpha_1 x)$  ( $\sin\alpha_1 \doteq \alpha_1$  として) を用いるものとする、干渉の結果生ずる強度分布は(1)式に相当する

$$\begin{aligned} U(x) &= |r(x) + s(x)|^2 \\ &= 1 + |s(x)|^2 + s(x) \exp(-ik\alpha_1 x) \\ &\quad + s^*(x) \exp(ik\alpha_1 x) \end{aligned} \quad (5)$$

によって与えられる。

(2) ホログラムの振幅透過率：(5)式で表わされる干渉パターンが感光材料に記録されるが、この時の感光特性は D. H. Kelly<sup>6)</sup> の与えたモデルにしたがうものと考えられる。

入射光が乳剤内を透過する際に受ける散乱の効果のために、実際にハロゲン化銀を黒化させるのに寄与する露光量(有効露光量)  $H(x)$  は、乳剤の混濁度を  $G(x)$  とし

$$H(x) = U(x) \otimes G(x)$$

で与えられる。ここに  $\otimes$  は convolution 積分を表わす。 $G(x)$  のスペクトル  $\hat{G}(\xi)$  は乳剤のレスポンス関数と呼ばれている。

現像中に液の濃度が一様に保たれている場合には、出来上るネガの濃度  $B(x)$  は次のような H&D 曲線の関係で与えられる。

$$B(x) = \gamma \log_{10} [H(x)/H_0]$$

濃度と強度透過率  $T(x)$  とは  $B(x) = -\log_{10} [T(x)]$  の

関係で結ばれるから、定数係数を省くと

$$T(x) = [H(x)]^{-\gamma}$$

となる。したがってホログラムの振幅透過率  $t(x)$  は  $\sqrt[\gamma]{T}$  で与えられ、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} t(x) &= [H(x)]^{-\gamma/2} \\ &= [1 + |s(x)|^2 \otimes G(x) + s(x) \exp(-ik\alpha_1 x) \otimes G(x) \\ &\quad + s^*(x) \exp(ik\alpha_1 x) \otimes G(x)]^{-\gamma/2} \end{aligned} \quad (6)$$

a) ネガ、ポジ反転を行なって  $\gamma = -2$  にすればホログラムの振幅透過率は有効露光量に比例し、物体からの回折波の複素振幅を和として含んでいる。

b)  $\gamma = -2$  の場合は  $|s(x)| < 0.4$  ((6) 式の第 1 項以外の和の絶対値が 1 を超えない条件) として(6)式を近似展開すると

$$\begin{aligned} t(x) &= 1 - \gamma/2 [ |s(x)|^2 \otimes G(x) \\ &\quad + s(x) \exp(-ik\alpha_1 x) \otimes G(x) \\ &\quad + s^*(x) \exp(ik\alpha_1 x) \otimes G(x) ] \end{aligned} \quad (7)$$

を得るのでやはり物体からの回折波の複素振幅を和の形で含んでいる。上の条件は高い透過率の物体に対しては照明光を落して回折光を参照光より弱めて、コントラストの低い干渉縞を作るようにしなければならないことを意味している。

(3) 再生像の振幅分布：ホログラムから物体の像を再生するために、ホログラム面に角度  $\alpha_2$  で入射する平面波を照明光として用いる。ホログラム面の後方  $Z_2$  の面上における振幅分布  $i(X)$  は(4)式と同様にフレネル回折で与えられる。ここではホログラムの大きさを  $A(x)$  によって決め、(4)式の  $f_1(x)$  に相当する位相項  $f_2(X) = \exp(ikX^2/2Z_2)$  を用いると  $i(X)$  は次のような convolution 積分で書かれる。

$$i(X) = A(x) t(x) \exp(ik\alpha_2 X) \otimes f_2(X) \quad (8)$$

ただし

$$A(x) = 1: |x| \leq L, \quad A(x) = 0: |x| > L$$

convolution 積分はスペクトルで考えるとそれぞれのスペクトルの積となるので見通しを得るのに便利であるから、以下スペクトルについて考える。

(8)式をフーリエ変換すると

$$\hat{i}(\xi) = \left\{ \hat{i} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \otimes \hat{A}(\xi) \right\} \hat{f}_2(\xi)$$

ここに  $\hat{i}$ ,  $\hat{A}$ ,  $\hat{f}_2$  は  $i$ ,  $A$ ,  $f_2$  のスペクトルを示す。(7)式を使うと上式は次のように書くことができる。

$$\hat{i}(\xi) = \hat{i}_0(\xi) + \hat{i}_1(\xi) + \hat{i}_2(\xi) + \hat{i}_3(\xi) \quad (9)$$

$$\hat{i}_0(\xi) = \hat{A} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_2(\xi) \quad (10-1)$$

$$\hat{i}_1(\xi) = -\frac{\gamma}{2} \left[ \left[ \hat{G} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_1 \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \otimes \hat{o}^* \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right. \right.$$

$$\left. \left. \hat{f}_1^* \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right] \hat{G} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right] \otimes \hat{A}(\xi) \right\} \hat{f}_2(\xi)$$

$$(10-2)$$

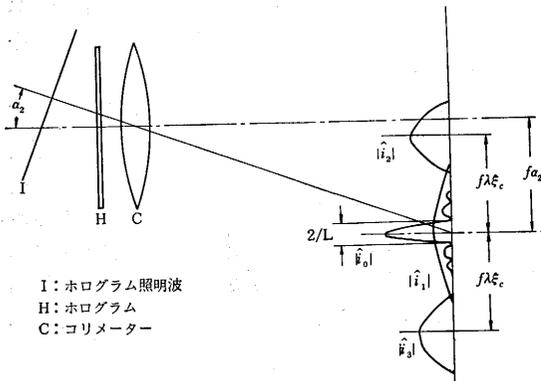
$$i_2(\xi) = -\frac{\gamma}{2} \left\{ \left[ \hat{o} \left( \xi - \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_1 \left( \xi - \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \hat{G} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right] \otimes \hat{A}(\xi) \right\} \hat{f}_2(\xi) \quad (10-3)$$

$$i_3(\xi) = -\frac{\gamma}{2} \left\{ \left[ \hat{o}^* \left( \xi + \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_1^* \left( \xi + \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \hat{G} \left( \xi + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \right] \otimes \hat{A}(\xi) \right\} \hat{f}_2(\xi) \quad (10-4)$$

ただし

$$\hat{f}_1(\xi) = \exp(i\pi\lambda Z_1 \xi^2), \quad \hat{f}_2(\xi) = \exp(i\pi\lambda Z_2 \xi^2) \\ \hat{A}(\xi) = \frac{\sin 2\pi\xi L}{\pi\xi}$$

これらの各スペクトル成分の物理的な意味は次のようにして示すことができる。今ホログラムの背後に図・2に示される焦点距離  $f$  のコリメーターレンズ  $C$  をおくと、その後側焦点面には  $i_0, i_1, i_2, i_3$  に対応する振幅分布を生じていることになる。回折格子の場合にならって  $i_0, i_1$  に相当する光波を0次の回折光,  $i_2, i_3$  に相当する光波をそれぞれ+1次, -1次の回折光と呼ぶことにする。



I: ホログラム照明波  
H: ホログラム  
C: コリメーター

図・2 再生で現われる波

ホログラムの振幅透過率をふりかえるとホログラムと回折格子の類似性がはっきりする。すなわち今の場合にホログラムが本来持つべき振幅透過率  $t(x)$  は(1)式と(2)式において  $R_0=1, \phi_r = k\alpha_1 x = 2\pi\alpha_1 x/\lambda$  としたもので与えられる。

$$t(x) = \alpha U(x) = \alpha \{ 1 + A^2(x) + 2A(x) \cos[2\pi\xi_c x - \phi_r(x)] \}$$

ただし  $\xi_c = \alpha_1/\lambda, A(x)$  と  $\phi_r(x)$  はホログラム面における物体のフレネル回折波の振幅と位相である。したがって理想的なホログラムとは記録すべき波の振幅に比例する振幅変調と、位相に等しい位相変調を受けた空間周波数  $\xi_c$  の(振幅)回折格子である。以上のような理由から参照波の傾き  $\alpha_1$  に比例する  $\xi_c$  をホログラムの搬送周波数と呼ぶことにする。

(4) 再生波の結像: (10-1)式の  $i_0$  はホログラムの縁による照明光のフレネル回折像のスペクトルである。(10-2)式の  $i_1(\xi)$  は物体の振幅の2乗に関係する項であり、

参照波を物体からの波に比べて強くとした場合には他の項より一段と小さくなる。

a) +1 次の方向に回折される  $i_2$  の項を考えよう。いま  $Z_1+Z_2=0, \alpha_1-\alpha_2=0$  が成立すれば

$$\hat{f}_1 \left( \xi - \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_2(\xi) = 1$$

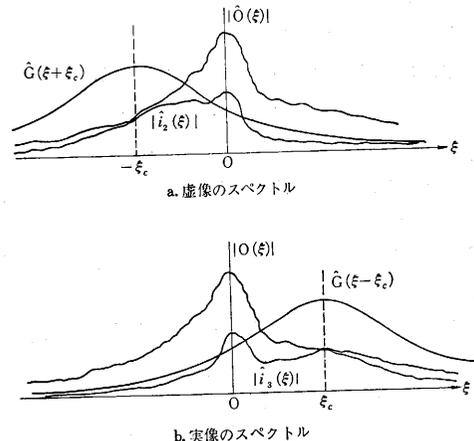
の関係をj得る。簡単のためにホログラムの縁の影響を無視して  $L \rightarrow \infty$  にとると、

$$\hat{A}(\xi) = \delta(\xi) \quad \delta(\xi): \text{Dirac のデルタ関数}$$

となるので、これを(10-3)式に代入すると、再生像のスペクトルとして

$$i_2(\xi) = -\frac{\gamma}{2} \delta(\xi) \hat{G}(\xi + \xi_c) \quad (11-1)$$

が得られる。 $Z_2 = -Z_1 < 0, \alpha_2 = \alpha_1$  ということはホログラムを参照波で照明すると物体位置に虚像が結ばれることを意味する。(11-1) 式の意味を図・3aに示す。



図・3 再生像のスペクトル

虚像の振幅分布  $i_2(X)$  を求めるのには上式をフーリエ変換すればよい。

$$i_2(X) = -\frac{\gamma}{2} o(X) \otimes G(X) \exp(i 2\pi\xi_c X) \quad (11-2)$$

b) -1 次の回折光に対応する  $i_3$  について次に考える。今度は  $Z_1-Z_2=0, \alpha_1+\alpha_2=0$  の場合に

$$\hat{f}_1^* \left( \xi + \frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \right) \hat{f}_2(\xi) = 1$$

が成り立つので、a)と同様に縁の影響を無視すると(10-4)式は次のように簡単な形をとる。

$$i_3(\xi) = -\frac{\gamma}{2} o^*(\xi) \hat{G}(\xi - \xi_c) \quad (12-1)$$

$Z_2=Z_1>0, \alpha_2=-\alpha_1$ , したがって参照波と逆の傾きを持つ平面波でホログラムの照明を行なうと物体の対称位置に実像が結ばれる。上式の意味を図・3bに示しておく。この図からもわかる通り、虚像と実像の振幅分布は一般には異っている。(12-1)式をフーリエ変換して虚像の振幅分布を求めてみると

$$i_3(X) = -\frac{\gamma}{2} o^*(X) \otimes G(\hat{X}) \exp(-i 2 \pi \xi_c X) \quad (12-2)$$

が得られる。

(5) 再生像の解像力：実像あるいは虚像の解像力はまず第一に、図・2に示されるコリメーターCの後側焦点面に絞りを置いて他の成分と重ならずにとり出すことのできる帯域で与えられる。ただし前の節でも簡単にふれたように、図・2のスペクトルのひろがりには波面の形の細かさによるひろがりも含まれているが波面の形は実際には観察できない。したがって実際の画像がこのような考察から得られる限界まで解像されるかどうかは疑わしいが、まず基本的には妥当な考え方であると言えよう。

図・2において $|i_1|$ 、 $|i_2|$ 、 $|i_3|$ が物体のスペクトル幅以外にホログラムの縁によるひろがり $2/L$ を含んでいることを考慮に入れて上に述べた帯域 $\xi_i'$ を求めると

$$\xi_i' = \frac{1}{3} \left( \xi_c + \frac{2}{L} \right)$$

が得られる。しかし $\xi_c$ が大きくなって感光材料の cutoff 周波数 $\xi_p$ に近づくと、図・3からわかるように再生像のスペクトルは今度は $\xi_p$ によって抑えられる。これから決まる解像力 $\xi_i''$ は

$$\xi_i'' = \xi_p - \xi_c$$

と与えられるので、結局再生像における解像限界 $\xi_i$ としては

$$\xi_i = \text{Min}(\xi_i', \xi_i'')$$

をとれば良い。ホログラムが十分な大きさを持ち、感光材料の解像力が搬送周波数 $\xi_c$ に比べて十分高い時は

$$\xi_i = \xi_c / 3$$

で与えられる。

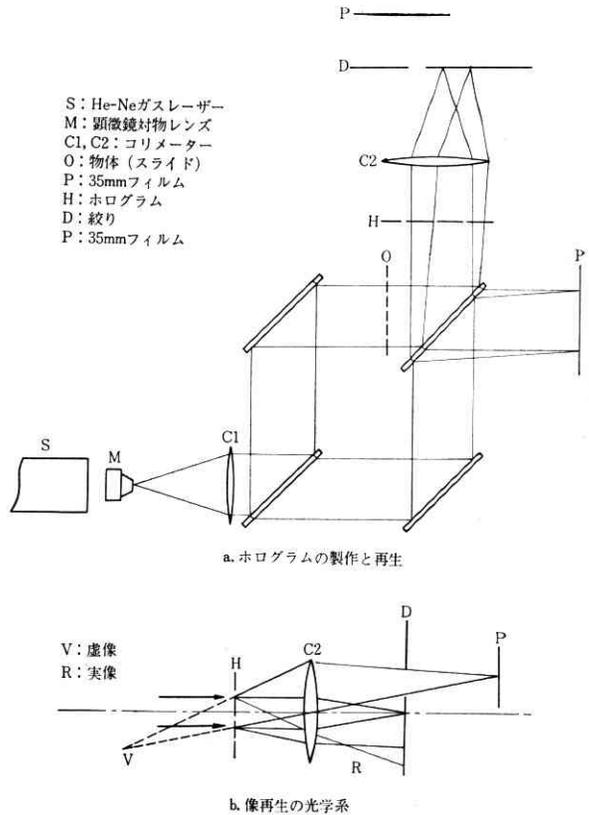
本節で得られた結果と実験結果の間の関係について次に考察しよう。

### 5. 実験結果との比較

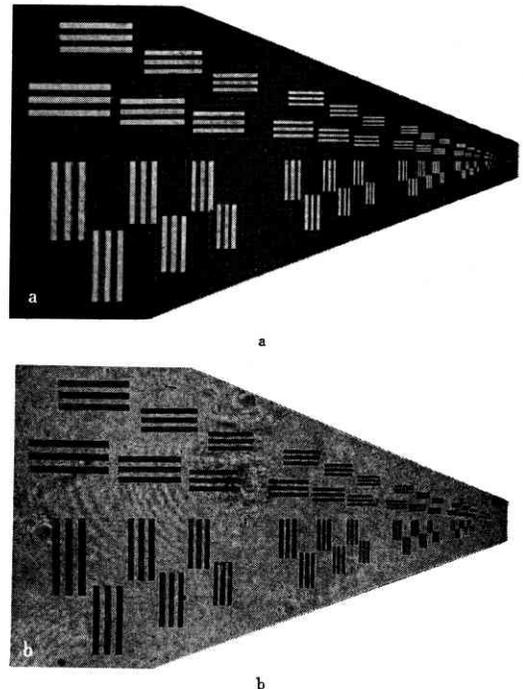
(1) 実験装置：用いた光学系の概要を図・4に示す。

He-Ne ガスレーザーを光源とする Mach-Zehnder 型干渉計を利用しており、ホログラムの製作と像再生とを同時に行なうことができる。図・4bは再生像を撮影するための光学系を説明したもので、虚像がコリメーターレンズによって実像に変えられている。

(2) フィルムの比較：手近の35mm フィルムの内から表・1にあげた5種を選んで、濃度タブレットと図・5の解像力試験用チャートの再生像を調べ、コントラストの再現性と解像力を比較した。物体とフィルム間の距離 $Z_1$ は約300mmに、搬送周波数 $\xi_c$ は40本/mm(この時の参照波の傾き $\alpha_1$ は約 $1.4^\circ$ )にとっている。再生像を撮影したフィルムのネガを拡大観察して解像力の測定を行なったのであるが、再生像が非常に暗いために像の位置を正確に求めることが困難で、得られた値は必ずしも信頼



図・4 実験装置



図・5 解像力試験用チャートの再生像

におけるものとは言えない。

まず再現されるコントラストの幅はミニコピーとパ

表・1 使用フィルム

フ イ ル ム 名	現像液, 現像時間	$\gamma$ (公称値)	最大解像力 (公称値)
ネオパン SSS (フジ)	マイクロファイン8分(20°)	0.6	70(本/mm)
ネオパン SS (ㄥ)	マイクロファイン8分(ㄥ)	0.5	90
ネオパン F (ㄥ)	マイクロファイン8分(ㄥ)	0.7	120
ミニコピー (ㄥ)	コピナール5分(ㄥ)	2.9	280
パナトミック(コダック)	マイクロファイン8分(ㄥ)	不明	不明

ナトミックXの場合が最も広い。これは再生像がネオパンフィルムの場合よりも明るいことによる。

解像力は図・5a のチャート(以下ネガチャートと呼ぶ)ではどのフィルムについても15本/mmを得た。しかし図・5bのチャート(以下ポジチャートと呼ぶ)に対しては、パナトミックXとミニコピーがネガチャートと同じく15本/mmを与えたのに反して、ネオパン・フィルムではいずれも10本/mm程度に落ちている。観察結果によるとネオパン・フィルムの再生像は他の2つのフィルムのものよりもかなり暗く、ポジ・チャートの場合は白地の部分に目立つ粒状性が解像力を下げる作用をしている。ネオパンフィルム3種の内ではFがコントラストの再現性についても、解像力についても一番良い結果を与えているが、ミニコピー、パナトミックXに比べるとかなりの差がみられる。

以上の結果を理論と比較してみると、像の明るさの違いは、フィルムの $\gamma$ の違いによるものであることがわかる。すなわち(11-2)式あるいは(12-2)式で示される再生像の振幅は $\gamma$ に比例している。一方、表・1をみるとネオパン・フィルムの $\gamma$ がいずれも1以下であるのに対して、ミニコピーははるかに大きな値を持っていることがわかる。

フィルムの解像力は主として再生像に生ずる粒状性と結びついているようで、解像力の低いものほど粒状性の現われ方が著しい。また白地を背景とする物体では粒状性の著しさの度合によって再生像の解像力が決まっているように観察された。

実測された解像力の値15本/mmは理論の与える $\xi_c/3 = 13$ 本/mmよりやや大きい。コリメーターの後側焦点面の絞りを大きく開いたにもかかわらず、 $\eta$ 成分の裾が弱いために解像力を下げる効果を与えなかったことによると思われる。

以上の考察からわかるように前節に述べた大ざっぱな理論から実際の解像力を解釈するのは困難であり、物体自体の性質や、ホログラムの光学的厚みの乱れとか粒状性による散乱光をさらに考えることが必要となる。この比較実験によってパナトミックXとミニコピーがホログラムの材料に適していることが判明した。

(3) 再生像の特徴: 画像の濃淡の変化の著しい部分が強調される点で一般の写真像と大分異なり、丁度細密銅版画のような感じを与える。これは図・3に示されてい

るように物体のスペクトルが正負の周波数に対して非対称なゲインを得ることによるものと思われる。すなわち一種のシュリーレン法によってもとの像を見ることに等しくなっている。

(4) 搬送用周波数と再生像の画質: ミニコピーを使って $\xi_c$ を60本/mm( $\alpha_1=2.2^\circ$ )から180本/mm( $\alpha_1=7.2^\circ$ )まで変えて、上記のテスト・チャートや一般のスライドの再生像を観察した。

著しい点は $\xi_c$ を増すとともに像が暗くなっていくことである。同時に(3)で述べた画像の特徴も目立たなくなり、普通の写真像に近づいていく。この効果は図・3における系の周波数特性のゲインが小さくなり、しかも0周波数の周辺の正負の周波数について大体一定の値をとるためであろう。

解像力はネガ・チャートの再生像が鮮明になって、 $\xi_c$ が160本/mmおよび180本/mmで17~20本/mmという値を得た。しかし理論の与える $\xi_c/3$ をはるかに下回っている。ポジ・チャートの場合は $\xi_c$ の増加とともに白地の部分が速かに暗くなり、解像力 $\xi_c$ は上らない。

本節で得られたことはホログラフィの解像力を論ずるためには非常に多くの因子を考える必要があり、写真像の場合のように簡単な定義はできないということである。

## 6. む す び

以上の研究からホログラフィで良好な再生像を得るためには次の条件を必要とすることがわかった。

- (1)  $\gamma$ が大きく、解像力の高いフィルムを用いて、搬送周波数 $\xi_c$ をフィルム解像力の1/2程度にとる。
- (2) 物体からの波の強度を参照波の1/10以下にする。

搬送周波数 $\xi_c$ は複雑な形の面を記録しようとする場合には十分高くしないと像を完全に分離できない。立体物体からの拡散光などを忠実に記録、再生するためにはアメリカで汎用されている超高解像力(2000本/mm)の乾板が必須のものとなるが、この研究で扱ったような平面物体の場合は手近なフィルムでも結構実用になることが明らかになった。(1966年7月19日受理)

## 参 考 文 献

- 1) D.Gabor: Nature, 161, 77 (1948); Proc. Roy. Soc. (London), A 197, 454 (1949); Proc. Phys. Soc. (London), B 64, 449 (1951).
- 2) E. N. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., 52, 1123(1962); *ibid* 53, 1377(1963); *ibid* 54, 1295(1964).
- 3) R. W. Meier: J. Opt. Soc. Am., 55, 987 (1965).
- 4) より詳しい解説が  
田中俊一: 計測と制御, 5, 242 (1966).  
に述べられている。また上記の文献と  
R. P. Chambers and J. S. Courtney-Pratt: SMPTE, 75, 373 (1966) に完備した文献目録がつけられている。
- 5) R. F. van Ligten: J. Opt. Soc. Am., 56, 1 (1966).
- 6) D. H. Kelly: J. Opt. Soc. Am., 50, 269 (1960).