

## 変形測定へのホログラフィーの応用

### APPLICATIONS OF HOLOGRAPHY TO MEASUREMENTS OF DEFORMATION

丹羽 義次\*・小林 昭一\*\*・高 錦 宏\*\*\*  
By Yoshiji Nirwa, Shoichi Kobayashi, and Koh Kin Kau

#### 1. はじめに

光には、波長と振幅と位相とが備わっている。しかし、日常生活において、数えあげることができないほど多方面に利用されている光も、実はほとんどの場合、光の強弱（振幅）と色（波長）しか利用されておらず、位相に関してはほとんど忘れ去られた感がある。このような形でしか光が利用されていなかった理由としては、(i) 自然光では位相が乱れていて、その特性が現われないうこと、(ii) われわれの眼や写真乳剤は光の位相変化を検出することができないこと、があげられよう。

光の振幅や波長のみを利用するには、おのずから限界があり、「光学は死せる学問である」とまで言われるにいたった。ようやく、1948 年になって、Dennis Gabor が、2 光束を感光材上で干渉させて記録し、回折現象を利用して再現させることに成功した。以来、位相を利用することが注目されるようになった。しかし、干渉を起こさせるには、可干渉性の光が必要であり、またその記録にも高い解像力の感光材料が必要なので、その後著しい進展は見られなかった。

1960 年になって、レーザーが発明されるに及んで、その同一波長性と 同位相性を利用して、1963 年には、光の振幅変化と位相変化とを同時に利用するホログラフィー技術が開発され、現在新しい分野へと目覚ましい発展を遂げている。

ホログラフィーの応用には際限がないとまで言われるほどその応用分野は広い。それらに関しては、適当な文献<sup>1)~5)</sup>を見て頂くこととし、ここでは、静的変形解析に関連した応用面について述べることにする。

#### 2. ホログラフィーの特徴

ホログラフィーとは、光や音の干渉現象を利用して、レンズを通さずに、物体の像を結ばせる光学技術であると言える。通常は、レーザー光の可干渉性を利用して、被写体を照射し、その物体からの反射光、あるいは透過光と、別に取り出した元のレーザー光（参照光）とを同一の写真乾板上に重ね合わせて同時に露光記録する方法を取る。記録されるのは、2つの光が干渉し合った縞模様、すなわちホログラムである。このホログラムに再びレーザー光を当てると、光の回折現象により、前方の空間に被写体の立体像を見ることができる。この方法は、今までのエネルギー（振幅）に感応する作像技術とは根本的に異なっており、光の波動に乗って運ばれる情報、すなわち、光の振幅と位相そのものを記録し、再生する点に最大の特徴がある。再生される像は、物体からの光の状態そのままの再現であるから、立体像ならば 3 次元的に、位相物体（透明物体）ならば、その位相分布のままの像として再生されることになる。これによって、従来の写真法では得られなかった多くの利点が生み出され、広範な応用分野が開けてきた。

以下に述べるホログラフィー干渉は、そのうちの一つである。再生像で位相が保存されることから、再生波面をそれ自身と、あるいは他の参照波面と重ね合わせて干渉を作り、種々の干渉計測を行うことが可能である。特にホログラフィー干渉では、従来の干渉計測法とは異なって、対象物は光学的に磨かれた面である必要はないという大きな利点がある<sup>6)</sup>。これは、ホログラフィー干渉では、粗面がある変位をしたとき、変位前後の粗面からの光の再生光を重ねてやれば、粗面の凹凸によるランダムな位相分布は互いに打ち消されて干渉縞には影響せず、変位分に相当する干渉縞だけが現われることによってい

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設株式会社

る。

ホログラフィー干渉法は、その他にも、(i) 従来の干渉法では行い得なかった異なる時刻に起った現象間の干渉が得られること、(ii) 多くの波面を多重蓄積できること、(iii) 同じ光路での干渉なので、光学系の不完全さは補償されること、(iv) 立体面へも干渉を作れることなど、多くの特徴ある利点を有している。

### 3. ホログラフィー実験装置

ホログラムを作るには、物体光と参照光とを重ねて感光材上で干渉させればよい。その目的で、現在一般に使われている光学系配置を図-1 に示す。参照光を取り出

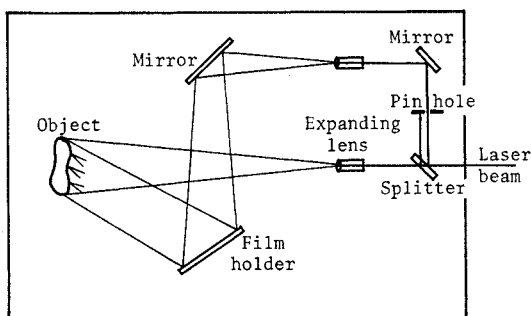


図-1 通常ホログラフィー光学系

すためにビーム・スプリッター、ピンホール（ハーフ・ミラーの前後両面からの反射光の一つのみを選ぶのに必要）、全反射ミラー・エキパンダーなどが必要である。この光学系では、多方向から同時に撮影することが非常に面倒である。

われわれは、図-2 のような光学系を考案して使用し

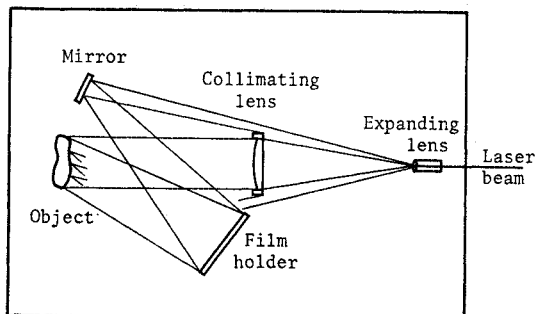


図-2 本実験のホログラフィー光学系

ている。これによると次のような利点がある。(i) 上述の装置を必要とせず、かつ上下左右360°すべての方角からも同時に多数の参照光を取り出すことができる。(ii) 装置が簡単で、取り扱いが容易なうえ、光学系の振動や汚れもそれだけ減少できることになる。(iii) 参照光と物体光の干渉性を良くするためには、その光量比が1~5が好ましいとされているが、物体光として反射光を用

いる場合には、この方法は好適である。さらに、(iv) 変位計測の場合には、光の照射方向も像を再現する際に問題となるので、本光学系のように供試体全体を平行光線で照射することが、解析上好都合である。

実験装置の全体を写真-1 に示す。また、ホログラムとそれを再生して得た立体虚像を撮影した写真を写真-2 に示す。なお、使用した光源は、日本科学社製の

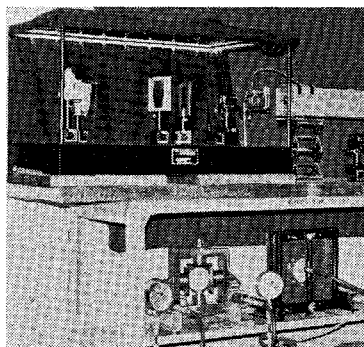


写真-1 ホログラフィー実験装置

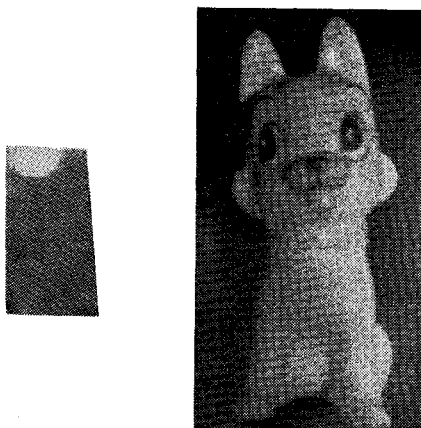


写真-2 ホログラム (a) とその再生像 (b)

Ne-He ガス・レーザー NAL-705 G 高出力型であり、発振波長は  $6328 \text{ \AA}$ 、出力は  $10 \text{ mW}$  である。また、感光材料としては、AGFA-GEVAERT 10 E 75 乾板を用い、現像にはコピナルを使用した。撮影の際の露光時間は約5秒であった。

### 4. 光弾性実験への応用

光弾性材料のように透明な物体のホログラムは、図-3 に示すような光学系を用いて求められる。光弾性モデルに載荷する前と載荷後とを二重露光して撮影し、それを再生すると、それぞれの像が互いに干渉し、位相差として等厚縞が求められる(写真-3 参照)。この等厚縞は平面応力状態の試験では、平面内の2主応力の和が一定

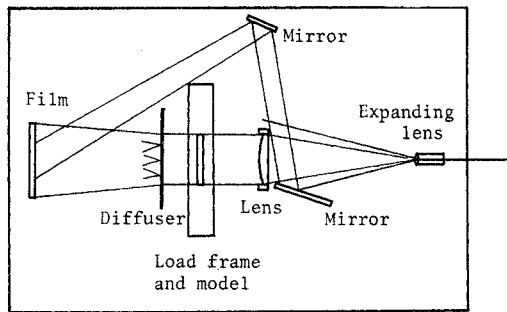
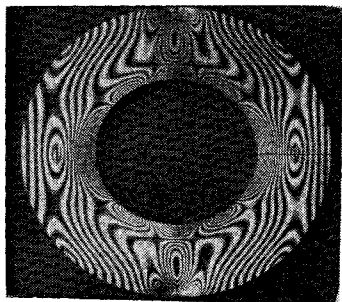
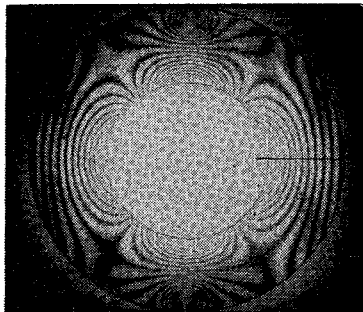


図-3 透過式ホログラフィー光学系

である線、すなわち、 $\sigma_1 + \sigma_2 = C_1 N_1$  を表わしている。これより任意点の主応力之和が求められる。ここに  $\sigma_1, \sigma_2$  は最大、最小主応力を、 $N_1$  は等厚線次数を、また  $C_1$  は材料のポアソン比と屈折率などに関係する等厚線係数を



(a)



(b)

写真-3 等色線図 (a) と等厚線図 (b)

意味する。

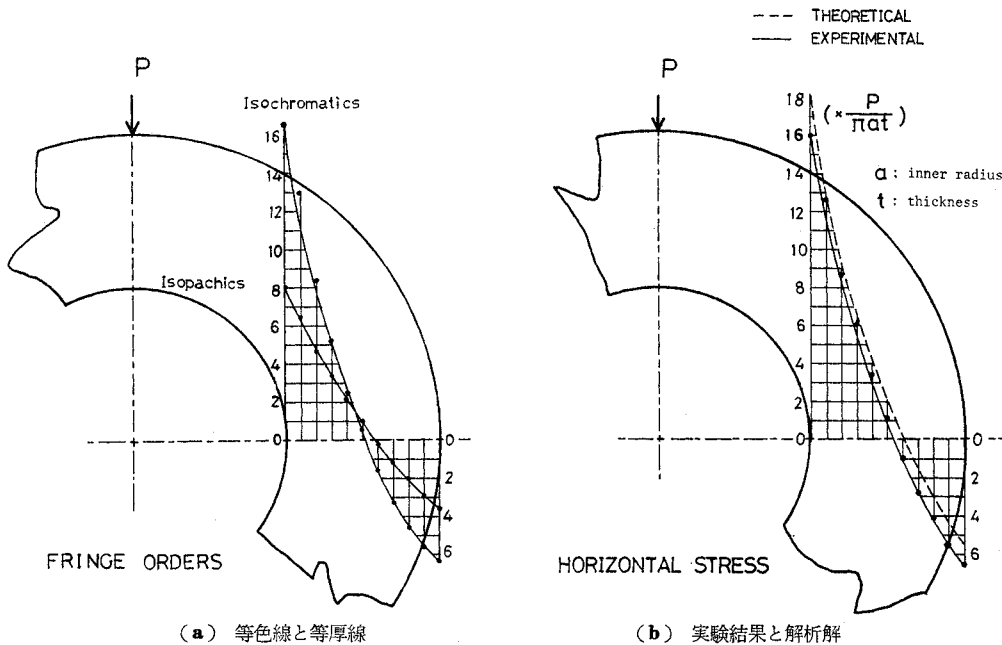
一方、光弾性実験からは、等色線 (写真-3 参照)、すなわち、主応力差  $\sigma_1 - \sigma_2 = C_2 N_2$  (一定) の線より、任意点の主応力差は容易に求められる。ここに、 $C_2$  はフリンジ応力値、 $N_2$  は等色線次数とする。

したがって、モデルの任意点の主応力は、等厚線および等色線から求めた、主応力の和および差の和および差を取ることで容易に求められる。すなわち、

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(C_1 N_1 + C_2 N_2), \quad \sigma_2 = \frac{1}{2}(C_1 N_1 - C_2 N_2)$$

ここに用いたフリンジ値  $C_2$  は、はりの純曲げなどのキャリブレーションにより容易に求められるが、厚さ変化の計測は難しく直接的に  $C_1$  を求めることは困難である。ここでは、モデルの境界上の法線方向応力が 0 であることから、 $C_1 N_1 = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2 = C_2 N_2$ 、すなわち、

$C_1 = C_2 N_2 / N_1$  という関係により  $C_1$  を求めた。なお、このようにして求めた  $C_1$  には、等色線と等厚線とを求める際の荷重の相違も含まれていることになり、荷重比が変化すれば、 $C_1$  の値も変化することになる。このことは、厚さの変化は荷重に比例すると仮定し、等厚線は単に相対的な厚さ変化の分布状態を表わしているとみなしていること、すなわち、一つの荷重に対応する絶対変化量としては求め



(a) 等色線と等厚線

(b) 実験結果と解析解

図-4 実験結果と解析解との比較

ていないことになるが、弾性範囲を問題とする限り、このような扱い方でも十分であろう。

光弾性実験に適用した例として、直径方向に対向的に圧縮したリングの解析結果を以下に示す。モデルとしては、0.5 cm 厚アラルダイト板から成形した、外径 10 cm、内径 5 cm のリングを用いた。等色線および等厚線縞を写真—3(a) および (b) に示した。なお、この際前者は、後者の 4 倍の荷重の下で求めたものである。これより、ホログラフィーの感度の良さが理解されよう。

図—4 には、この写真を解析し、無次元化して、解析解と比較して示した。この結果から、実験結果は解析解<sup>7)</sup>とよい精度で一致していることが認められる。なお、実験結果が、解析解より図上で下側にはほぼ平行移動したように、若干ずれている原因は、写真—3 (a) に見るように、等色線の水平中央断面上の 0 次数の位置がリングの変形に伴って若干内側にずれたことにあると考えられる。

以上の解析では、従来の光弾性実験法では最大の難物であった等傾線を用いる数値積分法の煩わしさから解放され、したがって、それに伴う数値解析誤差の累積から免れることができ、より簡易かつ正確な解析結果が求められる。なお、主応力方向は、等傾線より求めることになるが、本解析の場合には、応力を求めるべき点の応力の傾きだけを知ればよいので、数値積分の場合ほど正確な等色線は必要ではなくなる。以上の点を考えると、光弾性実験にホログラフィーを導入することは非常に有力な手段となる。

以下に、透過物体のホログラムに関連して、二、三の技術的な注意を述べておこう。

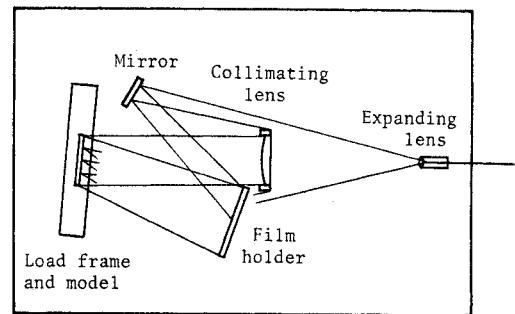
ホログラムの一点より、物体全体の像を再生させるには、物体光としては散乱光を用いなければならない。このために、一般には、スリガラスを透明なモデルの前面に配置し、散乱光をモデルに透過させているが、これより求められる等厚線は、必ずしもモデルの面に垂直な方向の変形成分のみを取り出したものではなく、見る角度によって変化するうえ、鮮明度も劣っている<sup>8)</sup>。本方法では、平行光をモデルに透過させて後、スリガラスに投射し、散乱光に変化させてホログラムを撮った。これによると鮮明かつ正確な等厚線が求められる。なお、写真—3(a) の中心部が周辺部より明るいのは、スリガラスの散乱性があまり良好でなく、均等な散乱になっていないことに原因がある。

本実験で使用したような型の外部ミラー型レーザー発振器を用いると、Brewster 角窓により、光はすでに平面偏光となっているので、モデル前後に 1/4 波長板さえ配置すれば、参照光も偏光であるので、検光子を必要とすることなく、明視野の等色線を撮ることができる。ま

た、モデルの荷重前後を二重露光すれば、容易に等色線と等厚線とが重ね合わせて求められる。しかし、実際には、それらが互いに干渉し合うので、等厚線群は等色線の黒線部分で暗くなるが、白線部では、一白線ごとに等厚線の白線と黒線が交代して不連続な縞模様になり、それらの中間部では徐々に変化するうえ、二重露光の際の前後の光量比によっても縞の位置が変化するなど厄介な点が多い<sup>9),10)</sup>。したがって、静的な実験では、等色線と等厚線とを、それぞれ適当な荷重の下で別々に撮り、その後でまとめて解析するほうが便利であるうえ、精度も高い<sup>11)</sup>。本実験はこの方法によった。

## 5. 面外変形測定への応用

物体が変形するときの前後で二重露光により得た干渉縞(ホログラム)は、レーザー光の照射方向、ホログラムの撮影方向および物体の変位方向の関数となる<sup>12)</sup>。したがって、任意形状の 3 次元物体の表面変位を解析するためには、前二者を固定してホログラムを求め、まったく同一の条件の下で再生することが必要である。この際に得られる干渉縞は、光路差に比例したもの、すなわち等変位線である。一般的な 3 次元変形の測定は、次節で扱うこととし、ここでは、平面の面外変位のみを考える。代表的な例として、平板のたわみ(面に垂直な方向への変位成分)を求めるような場合には、図—5 に示す



図—5 反射式ホログラフィー光学系

ように、平板面に垂直に照射し、ほぼ垂直な方向で撮影すればよい。この場合の微小な反射角による誤差は無視できると考えられるので、得られた干渉縞は、平板の等たわみ線を表わしていることになる。この場合の縞模様は、白縞間隔がちょうど 1 波長 (6328 Å) の光路差(変位の 2 倍)を表わしていることになる。

解析例として、周辺が単純支持された円板(アルミニウム製、直径 10 cm、厚さ 0.3 cm)に集中荷重が作用した場合の例を述べる。等たわみ線を写真—4(a) に示す。

図—6 には、周辺を固定した円板の中央対称軸上のたわみを示した。実験結果は、解析解<sup>13)</sup>によるものと良い

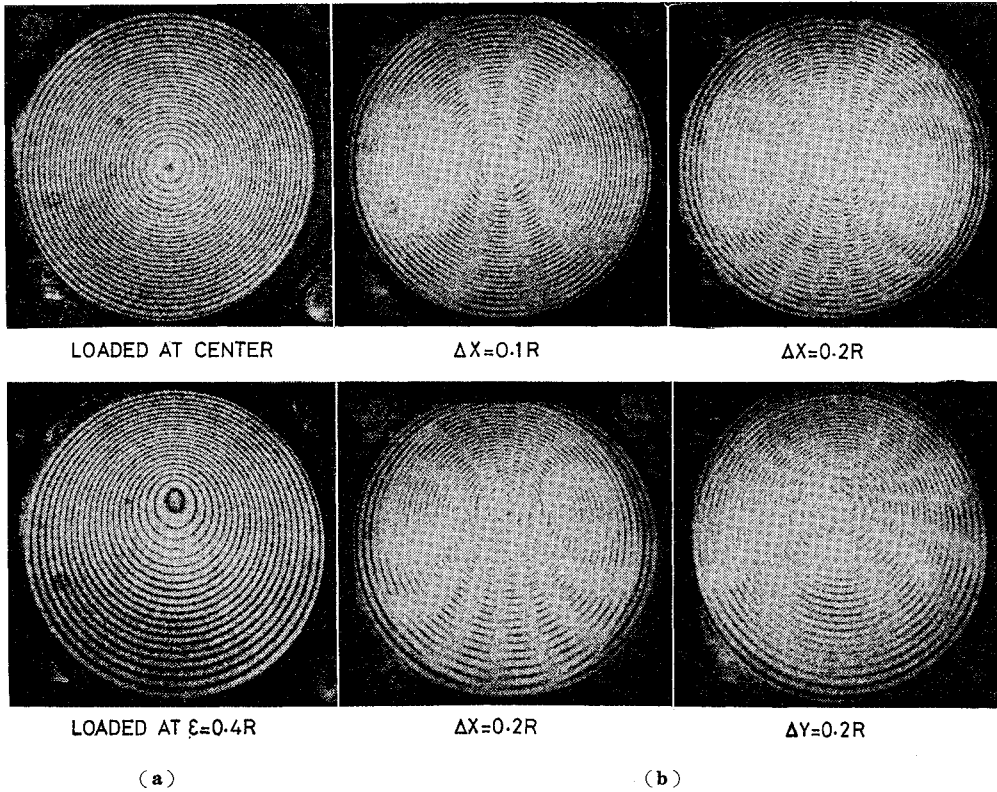


写真-4 等たわみ線図 (a) と等勾配線図 (b)

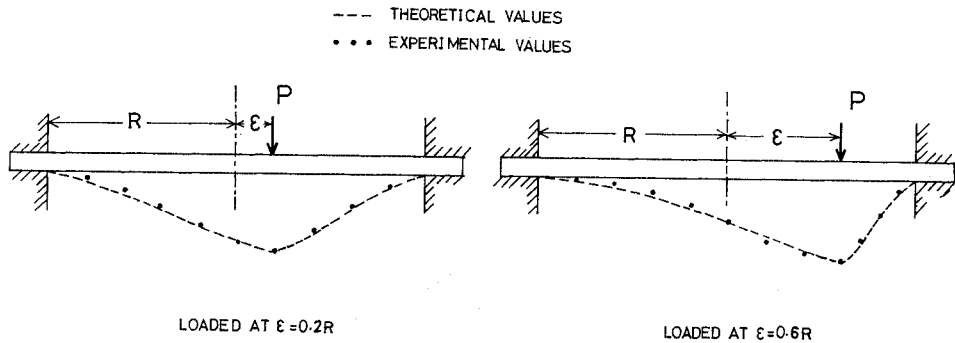


図-6 実験結果と解析解との比較 (周辺固定円板)

一致を示していることがわかる。

写真-5(b)には、等勾配線を示した。等勾配線を求めるためには、平板面内に  $\Delta$  だけ移動して求められる等たわみ線と元の位置での等たわみ線とを干渉させることが必要である。斎藤らは载荷装置を移動させて、移動前後でそれぞれ2重露光(4重露光と称している)することにより等勾配線を求めた<sup>14)</sup>。しかし、载荷装置全体を移動させることは、装置が大きくなると困難であるうえ、精度も必ずしも良くないという欠点がある。われわれは

この点を勘案して、装置はそのままとして、その代りに記録乾板を移動させる方法をとった。

なお、干渉縞には、光路差が整数波長になるとに物体の姿が現われるので、等たわみ線および等勾配線は干渉によって消えずに残った部分で表わされる。したがって、等たわみ線では白線を、また等勾配線では、元のままで残った(白黒縞の)部分を読むことになる。後者の場合には0勾配の点を含み移動方向に垂直な線が0勾配線である。したがって、その前後の縞は、1縞ごとが

(整数波長/移動距離)の勾配に対応していることになる。

### 6. 3 次元変形測定への応用

すでに 5. の最初に述べたように、一枚のホログラムに得られる干渉縞は、光源から出た光が物体面の反射を経て、乾板に至るまでの光路差を意味しており、したがって、照射方向と撮影方向との中間方向への変位を表わしていると解釈される。

Ennos<sup>15)</sup> は、拡散光で物体に斜入射して、前方および後方への両反射光をそれぞれホログラムとして記録し、この 2 方向で得た干渉縞次数の差から、変位を算出する方法を提案した。しかし、この方法には、(i) 照射光が拡散光であるので、物体への照射方向が物体の表面各点で若干異なること、(ii) 一般には、前方と後方への両反射光の強さが異なるので、ほぼ同程度とするために物体に表面処理を施す必要があること、(iii) ハーフ・ミラーを用いて得た反射光と透過光とをそれぞれの参照光として用いているため、両参照光の強さがほぼ等しくなるように表面処理しなければならないこと、など実験面および解析面両面での困難と煩わしさがある。

本実験では、これらの欠点を取り除く目的で、図-7

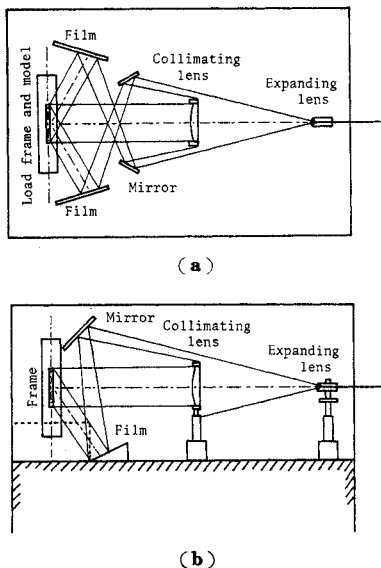


図-7 3次元変形測定のためのホログラフィー光学系

に示すように、平行光で物体を照射し、光束方向から対称的に左右 30° および下方 30° の斜め方向から、同時に 3 枚のホログラムを撮ることにより、3次元変位の測定を試みた。特に、物体表面が図示のように平面であれば、この方法は、次の理由により実験も簡便で、解析も容易

である。すなわち、(i) 照射光は平行光で物体面に垂直であるため、物体面上のすべての点で照射角は同一であり、解析が容易である、(ii) 3枚のホログラムの位置を対称的に選び得るので、物体光も参照光もそれぞれ同じ強さとなり、したがって、物体は一般の粗面のままで十分である、(iii) 参照光はすべて全反射鏡を用いているので、上述の光学系のような、反射光と透過光の強さを調整する必要もない、ことなどがあげられる。

本光学系を用いた場合には、ホログラフィー干渉縞と物体の変位との基本的な関係式は以下に述べるようになる。図-8 に示すように、ある粗面上の点 P が、 $d$  だけ変位して点 P' に移動したとする。入射光を OP(O'P') とし、反射光を PQ(P'Q') とすると、変位  $d$  による光路差  $\Delta$  は、図-8 を参照して次のように与えられる。

$$\Delta = d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\theta_1 = \angle OPP'$ 、 $\theta_2 = \angle QPP'$  とする。

次に、 $\theta = \frac{1}{2} \angle OPQ = \frac{1}{2} \angle O'P'Q'$  となるように  $\theta$  を選び、また、このようにして求めた方向と変位方向とのなす角を  $\psi$  で表わすと、式 (1) は次のように変形される。

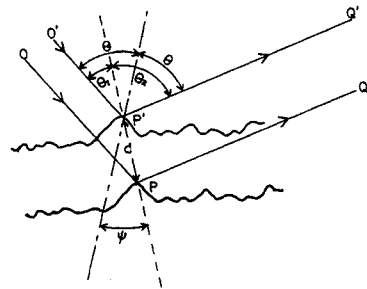
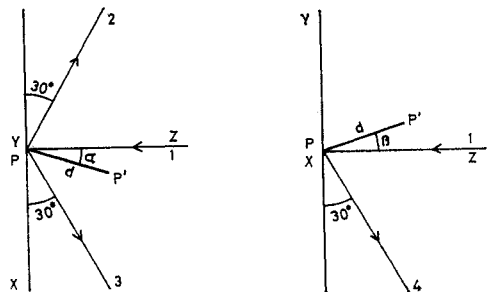


図-8 物体の変位と光線との関係

$$\begin{aligned} \Delta &= 2d \cos \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2) \cos \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1) \\ &= 2d \cos \theta \cos \psi \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで提案した光学系(図-7)では、物体表面上の点 P が、図-9 に示すように点 P' に移動したとして、変位が垂直面  $yz$  および水平面  $xz$  となす角度を、それ



(a) 水平断面上 (b) 垂直断面上

図-9 物体上の一点の変位と光線との関係

ぞれ  $\alpha$  および  $\beta$  とし、光源から乾板までの光路変化をそれぞれ  $d_{12}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{14}$  とすると、式 (2) から次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} d_{12} &= 2d \cos 30^\circ \cos(30^\circ + \alpha) \\ d_{13} &= 2d \cos 30^\circ \cos(30^\circ - \alpha) \\ d_{14} &= 2d \cos 30^\circ \cos(30^\circ + \beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

第 1, 第 2 式より

$$d_{12} + d_{13} = 3d \cos \alpha$$

を得、変位  $d$  の  $z$  軸方向への成分  $d_z$  は次のようになる。

$$d_z = d \cos \alpha = \frac{1}{3}(d_{12} + d_{13}) \dots\dots\dots (4)$$

一方、

$$d_{13} - d_{12} = \sqrt{3}d \sin \alpha$$

であるから、変位  $d$  の  $x$  軸方向成分  $d_x$  は次のようになる。

$$d_x = d \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}(d_{13} - d_{12}) \dots\dots\dots (5)$$

また、変位  $d$  の  $y$  軸方向成分  $d_y$  は、式 (3) の第 3 式および式 (4) を用いて、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} d_y &= d \sin \beta = \sqrt{3}d \cos \beta - \frac{2}{\sqrt{3}}d_{14} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}}(d_{12} + d_{13} - 2d_{14}) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

光路差は  $d = N\lambda$  ( $N$ : 縞次数,  $\lambda$ : 波長) として、容易に求められるので、式 (4)~(6) により、変位成分、

したがって、変位が求められることになる。

写真-5 には、直径方向に圧縮荷重を受けたリングの干渉縞を示す。なお、中央の十字型の物体は、変位の基準点 (中央の白い部分) を見出すために付置したものである。これを基に次数を計算して、リング表面上の縞次数が求められる。一般に、3 次元的な変位では、物体の縞模様から、直接に縞次数を読み取ることはできないので、このように他に基準を求めることが必要となる。

ひずみは、 $d_x, d_y$  を一度  $x, y$  で微分すれば求められる。あるいは、等変位線の密度として測定される。このような方法は Moiré 法に比して、精度がよく、また試料面に格子を転写する必要もなく、また、平滑面である必要もないなど多くの利点を有している。しかし、ひずみ測定を行うには、剛体的な変位を取り除くよう細心の注意が特に必要である。写真-5 では、剛体変位が大きく、この結果からひずみ状態を求めることは事実上断念した。測定精度の改良と、実際面への応用については目下検討中である。

### 7. おわりに

現在ホログラフィーによる計測は、新しさを求めるのに急であり、定量測定法としては疑問を残しているものも少なくない。しかし、変位測定をみてもわかるようにほかの方法によるものよりはるかに高精度の測定法であ

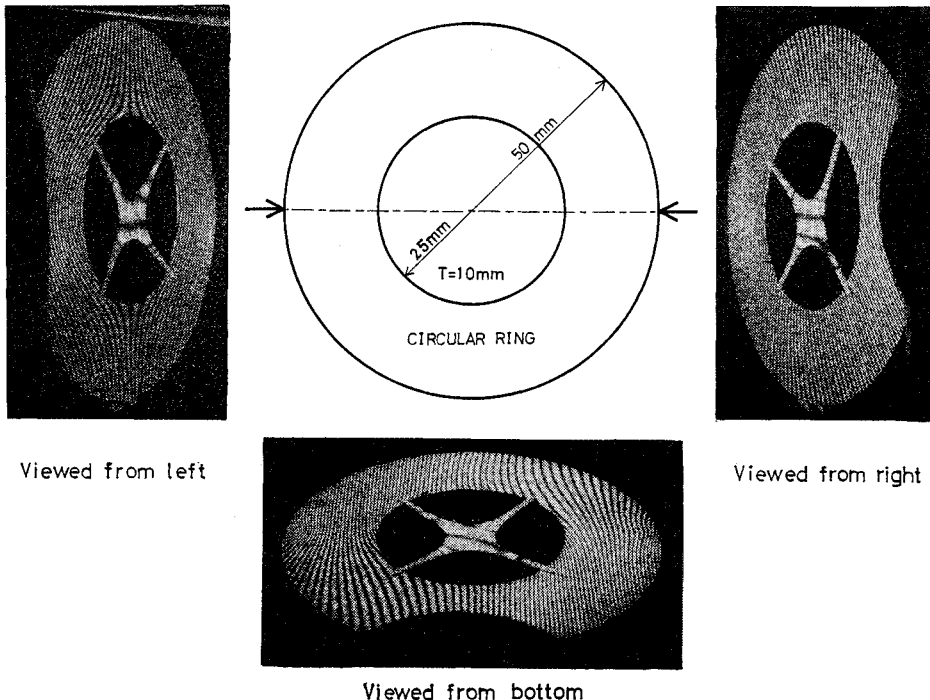


写真-5 リングの 3 方向への変位縞模様

り、今後基礎的な研究が進めば、ホログラフィー測定法はきわめて有用な測定法として、さらに広範な応用が期待されるであろう。

謝辞：本実験の遂行に際しては、神沢章氏（住友重機勤務）のご援助を得た。深く感謝の意を表したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 稲場文男ほか：レーザーハンドブック，10.2 ホログラフィー，pp. 594～622，朝倉書店，1973
- 2) Caulfield, H.J. and Sun Lieu : The Applications of Holography, Interscience, John Wiley, 1970
- 3) Lehmann, M. : Holography, Technique and Practice, FOCAL PRESS, 1970
- 4) Robertson, E.R. and J.M. Harvey (eds.) : The Engineering Uses of Holography, Cambridge Univ. Press, 1970
- 5) Gottenberg, W.G. (ed.) : Symposium on Applications of Holography in Mechanics, ASME, 1971
- 6) 斎藤弘義：ホログラフィーと応用力学，応用物理，39巻，pp. 241-248, 1970
- 7) Timoshenko, S. and J.N. Goodier : Theory of Elasticity, 2nd ed. pp. 121～123, McGraw-Hill
- 8) Fourney, M.E. : Application of Holography to Photoelasticity, Exp. Mech., 8, pp. 33～38, 1968
- 9) Hovanesian, J.P., V. Brice and R.L.Powell : A New Experimental Stress-Optic Method : Stress-Holographic Interferometry, Exp. Mech., 8, pp. 362-368, 1968
- 10) Fourney, M.E. and K.V. Mate : Further Application of Holography to Photoelasticity, Exp. Mech., 10, pp. 177～186, 1970
- 11) Sampson, R.C. : Holographic-interferometry Applications in Experimental Mechanics, Exp. Mech., 10, pp. 313～320, 1970
- 12) Holloway, D.C. and R.H. Johnson : Advancements in Holographic Photoelasticity, Exp. Mech., 11, pp. 57～63, 1971
- 13) Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger : Theory of Plates and Shells, 2nd ed., pp. 290～293, McGraw-Hill,
- 14) Saito, H., I. Yamaguchi and K. Hachimine : An Application of Holographic Interferometry to Stress Analysis of Elastic Bending Plate, Sci. Papers of Inst. Phys. Chem. Res., Vol. 64, pp. 104～111, 1970
- 15) Ennos, A.E. : Measurements of in-plane surface strain by hologram interferometry, J. of Scientific Instruments (J. of Physics E), Ser. 2., Vol. 1, pp. 731～734, 1968

(1973.8.7・受付)