

# デジタルホログラフィーによる偏光測定と応力解析への応用

照井 義隆・横田 正幸・山口 一郎

群馬大学工学部電気電子工学科 〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1

## Polarization Analysis by Digital Holography and Application for Stress Analysis

Yoshitaka TERUI, Masayuki YOKOTA and Ichirou YAMAGUCHI

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University, 1-5-1 Tenjincho, Kiryu 376-8515

Digital holographic technique has been applied to analyze the spatial distribution of polarization state of light transmitted through anisotropic objects. The polarization of the reference beam was controlled by an optical fiber Faraday rotator. A method is proposed for suppressing the phase drift during polarization switching. From a polyethyl methacrylate (PMMA) ring, subject to compression, distributions of polarization and principal stresses have been analyzed.

**Key words:** Faraday rotator, polarization analysis, digital holography, stress analysis

### 1. はじめに

偏光測定法は、これまでに数々提案されており<sup>1-7)</sup>、物体内部構造の異方性の検出や応力分布解析に重要である。特に二次元的な偏光分布の測定法が注目され、光ヘテログラフイン偏光計測法<sup>1)</sup>や、干渉偏光計測法<sup>2-4)</sup>などが提案されている。これらに対してホログラフィーは、二次元または三次元の偏光分布測定において簡便で有効な技術である。特に近年提案されたデジタルホログラフィーによる偏光測定法<sup>8-10)</sup>は結像系が不要で、また焦点合わせに機械的な操作が要らないという利点を有している。デジタルホログラフィーでは、ホログラムを CCD カメラで記録し、像の再生はパーソナルコンピュータでフレネル変換を計算することにより行われ、物体光の複素振幅の三次元分布が数値的に再生される<sup>11,12)</sup>。したがって、位相および振幅が数値的に得られるので、定量的な測定に適している。これまでに提案されている方法は、直交する2つの直線偏光<sup>9,10)</sup>や左右円偏光<sup>8)</sup>の2つの参照光路を用いて軸外し法によりホログラムを記録するもので、偏光情報が1枚のホログラムに記録できる利点があるが光学系が複雑であり、独立した2つの参照光がそれぞれの光路の影響を受けるといった欠点があった。そこで筆者らは、単一の参照光路中に鉛ガラスファイバーを利用したファラデー変調器<sup>7)</sup>を導入

し、直線偏光の偏光方位を90°回転することで直交する偏光を生成し、ホログラムを逐次2枚記録する方式を提案した<sup>13,14)</sup>。これにより、直交する2つの直線偏光は同一の参照光路を通るため、レンズの収差などの影響が等しくなり、解析においても2つの再生像の位置合わせが不要で、光学系も簡単になる。しかし、偏光方位を回転するときにはファラデー変調器のコイル電流により発生する熱や、ホログラムを逐次記録する間に加わる外乱により干渉縞が移動するための誤差が生じた。そこで今回、ホログラムに記録する物体光の一部分に偏光子や波長板を挿入し、偏光状態が既知となる参照領域を設けた。偏光状態が既知である領域において、直交する2つの偏光成分間の位相差は理論的に求められるので、理論値と実測値との差が外乱により生じた誤差となる。この値を使って、参照領域以外の物体光における直交した偏光成分間の再生光波面の位相差補正を行い、楕円偏光の主軸方位、楕円率などを計算し偏光状態を解析した。また、偏光解析の応用として、リング状のアクリル樹脂の試料に対して光弾性試験を行い、試料に加えた応力による透過光の偏光状態の変化と、試料に生じた主応力分布を求めた。また、実験結果と、有限要素法を使ったシミュレーションソフト (Sybernet 社, ANSYS) による計算結果との比較を行った。

E-mail: yokota@el.gunma-u.ac.jp

## 2. 基本原理

### 2.1 ホログラム記録・再生法

デジタルホログラフィーでは、参照光  $U_R$  と物体光  $U$  により生成されるホログラムが CCD カメラにより記録される。そのときの CCD 面におけるホログラムの強度  $I_H(x, y)$  は、

$$I_H(x, y) = |U_R(x, y)|^2 + |U(x, y)|^2 + U_R(x, y) \cdot U^*(x, y) + U_R^*(x, y) \cdot U(x, y) \quad (1)$$

で与えられる。 $(x, y)$  は CCD 面上の座標を表す。CCD 面上における物体光の偏光は、ジョーンズベクトルを用いて表すと<sup>9,15)</sup>

$$U(x, y) = \begin{pmatrix} U_{\parallel}(x, y) \\ U_{\perp}(x, y) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\parallel}(x, y) \exp[i\phi_{\parallel}(x, y)] \\ A_{\perp}(x, y) \exp[i\phi_{\perp}(x, y)] \end{bmatrix} \times \exp i\phi_0(x, y) \quad (2)$$

となる。ここで、 $A_{\parallel}(x, y)$ 、 $A_{\perp}(x, y)$  はそれぞれ偏光の直交する成分（一定の基準方向に対し水平および垂直）の振幅、 $\phi_{\parallel}(x, y)$ 、 $\phi_{\perp}(x, y)$  はその位相、 $\phi_0$  は初期位相を表す。直交する偏光の参照光に対して、それぞれホログラムを記録する。軸外し法による記録では、参照光が角度  $\theta_R$  で CCD 面に入射する場合、水平方向の偏光をもつ参照光は

$$U_{R\parallel}(x, y) = \begin{bmatrix} A_{R\parallel} \exp[i(\phi_{R\parallel} + kx \sin \theta_R)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $k=2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  は波長) である。同様に垂直方向の偏光をもつ参照光は、

$$U_{R\perp}(x, y) = \begin{bmatrix} 0 \\ A_{R\perp} \exp[i(\phi_{R\perp} + kx \sin \theta_R)] \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。各参照光により得られるホログラム強度は、式 (2)、(3)、(4) を式 (1) に代入して与えられ

$$I_{H\beta}(x, y) = A_{R\beta}^2 + A_0^2 + A_{\beta}(x, y) \exp[i\phi_{\beta}(x, y)] A_{R\beta} \times \exp[-i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_R) + A_{\beta}(x, y) \times \exp[-i\phi_{\beta}(x, y)] A_{R\beta} \exp[i(\phi_{R\beta} + kx \sin \theta_R)] \quad (5)$$

ただし、 $A_0^2 = A_{\parallel}^2 + A_{\perp}^2$ 、 $\beta$  は  $\parallel$  または  $\perp$  を意味する。CCD カメラに記録されたホログラムの再生は、ホログラム強度分布のフレネル変換を計算することにより行われる<sup>11)</sup>。 $\theta_R$  を十分大きくとれば、0 次光と共役像が横方向に分離して再生される。中央が 0 次光で、その両側に真の像と共役像が再生される。ただし、 $\theta_R$  は CCD カメラの解像限度によっても制限される。

ホログラムの再生を行う前に、いくつかの計算処理を施した。最初に、ホログラムをフーリエ変換し、周波数領域において真の像の成分だけを残すマスクをかけて、逆フー

リエ変換することにより、0 次光と共役像の成分を除去したホログラムを得る。次に、パーソナルコンピュータ (PC) 内で数値的に作成した参照光  $U_R^*$  をホログラムに掛けることにより、数値的な参照光の傾きを調整することで再生像を中央に移動し、再生像の位相分布から軸外し記録により生じる傾きの成分を除去した<sup>10,16,17)</sup>。

これらの処理を行ったホログラムのフレネル変換を計算すると、再生面における複素振幅分布  $U_i(X, Y, Z)$  は

$$U_i(X, Y, Z) = \{ \exp(i2\pi Z/\lambda) / i\lambda Z \} \times \exp[(i\pi/\lambda Z)(X^2 + Y^2)] \times \iint U_{R\beta}^*(x, y) I_{H\beta}(x, y) \times \exp[(i\pi/\lambda Z)(x^2 + y^2)] \times \exp[-(i2\pi/\lambda Z)(xX + yY)] dx dy \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $Z$  は再生距離、 $(X, Y)$  は物体面における座標である。直交する偏光の参照光に対して記録されたホログラム (式 (5)) を、式 (6) に代入することで、再生像が得られる。このときの複素振幅は、

$$U_{0\perp}(X, Y, -z_0) = |A_{R\perp}|^2 A_{0\perp}(X, Y) \exp[i\phi_{0\perp}(X, Y)] \quad (7)$$

および

$$U_{0\parallel}(X, Y, -z_0) = |A_{R\parallel}|^2 A_{0\parallel}(X, Y) \exp[i\phi_{0\parallel}(X, Y)] \quad (8)$$

である。もし、参照光の振幅が等しければ  $|A_{R\parallel}|^2 = |A_{R\perp}|^2$  となるため、物体光の振幅比は

$$\tan \alpha = A_{0\perp}(X, Y) / A_{0\parallel}(X, Y) = |U_{0\perp}| / |U_{0\parallel}| \quad (9)$$

である。再生像より得られた位相を用いて位相差を計算すると

$$\Delta\phi(X, Y) = \phi_{0\perp}(X, Y) - \phi_{0\parallel}(X, Y) - \Delta\phi_R \quad (10)$$

ただし、 $\Delta\phi_R$  は参照光の偏光方位の回転時や、外乱によって導入される二度のホログラム記録の間に生ずる位相ドリフトである。この影響を取り除くために、Fig. 1 のように物体光路中に 1/4 波長板 (QWP) を挿入することで物体への入射光の偏光を右円偏光とし、測定物体の一部分を物体光路中に挿入することで位相ドリフト補正用の参照領域として領域 A (右円偏光) を設けた。右円偏光の場合、直交する偏光成分間の位相差は  $90^\circ$  である。よって、この部分で検出される位相差と理論値の  $90^\circ$  との差が誤差として得られる。これによってこの誤差を測定領域の位相差から差し引くことにより、外乱の影響を除去できる。

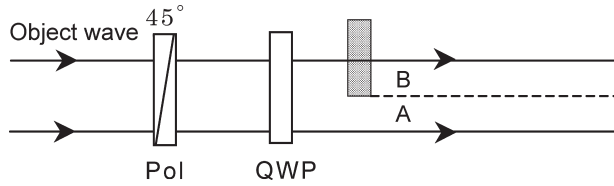


Fig. 1 Use of reference area in the object area. A: Reference area (circular polarization), B: measured area.

## 2.2 偏光解析法

直交する偏光に対する再生像の振幅から振幅比角  $\alpha(X, Y) = \tan^{-1}\{A_{\perp}(X, Y)/A_{\parallel}(X, Y)\}$  を求めて、式 (10) から得られた位相差  $\Delta\phi$  とを用いることで、Fig. 2 に示されるような楕円偏光の主軸方位角  $\psi(X, Y)$  と楕円率角  $\chi(X, Y)$  を計算して偏光状態が求められる。また、それぞれは

$$\psi(X, Y) = (1/2)\tan^{-1}\{\tan\{2\alpha(X, Y)\} \times \cos\{\Delta\phi(X, Y)\}\} \quad (11)$$

および

$$\chi(X, Y) = (1/2)\sin^{-1}\{\sin\{2\alpha(X, Y)\} \times \sin\{\Delta\phi(X, Y)\}\} \quad (12)$$

で与えられる<sup>9)</sup>。

得られた楕円偏光の主軸方位を用いて、主応力を求めることができる。物体のある点  $(X, Y)$  における互いに直交した主応力を  $\sigma_p, \sigma_q$  とし、その方向を p, q 軸とする。それぞれの方位 p, q 軸に対する屈折率変化を  $\Delta n_p, \Delta n_q$  とすると、次のような関係になることが実験的に確かめられている。

$$\begin{bmatrix} \Delta n_p(X, Y) \\ \Delta n_q(X, Y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_2 & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_p(X, Y) \\ \sigma_q(X, Y) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、 $C_1, C_2$  は光弾性定数である。また、応力とひずみの関係は、厚さ  $t$  の板が応力により厚みが変化して  $t + \Delta t$  となったとすると、試料のヤング率  $E$  とポアソン比  $\mu$  を用いて

$$\Delta t(X, Y) = -\frac{\mu t}{E}\{\sigma_p(X, Y) + \sigma_q(X, Y)\} \quad (14)$$

と表せる。応力印加による位相変化  $\phi$  は、応力印加前後での光路長の変化を  $\Delta L$  とすると、 $\phi = 2\pi\Delta L/\lambda$  で表されるので、 $n_0$  は空気の屈折率、 $n_s$  は応力印加前の試料の屈折率とすると、応力による p, q 軸偏光成分のそれぞれの位相変化  $\phi_p(X, Y), \phi_q(X, Y)$  は

$$\begin{bmatrix} \phi_p(X, Y) \\ \phi_q(X, Y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} \Delta n_p(X, Y)t - (n_s - n_0)\Delta t(X, Y) \\ \Delta n_q(X, Y)t - (n_s - n_0)\Delta t(X, Y) \end{bmatrix} \quad (15)$$

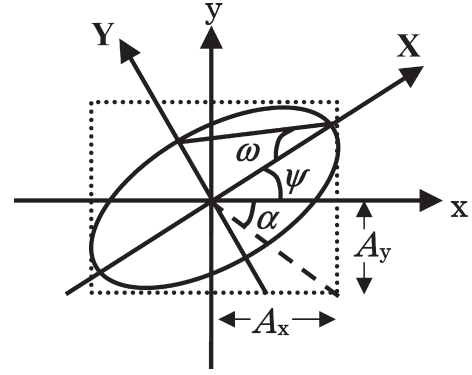


Fig. 2 Polarization ellipse.

となる。これに式 (13), (14) を代入して

$$\begin{bmatrix} \phi_p(X, Y) \\ \phi_q(X, Y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi t}{\lambda} \begin{bmatrix} C'_1 & C'_2 \\ C'_2 & C'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_p(X, Y) \\ \sigma_q(X, Y) \end{bmatrix} \quad (16)$$

を得る。ただし、 $C'_1, C'_2$  は

$$\begin{aligned} C'_1 &= C_1 - (n_s - n_0)\mu/E \\ C'_2 &= C_2 - (n_s - n_0)\mu/E \end{aligned} \quad (17)$$

と表される。

応力を印加した光弾性試料では、主応力の方向と複屈折の方向が一致するため、試料に円偏光を入射させれば、その部分での主応力方向にかかわらずに直交する主応力軸に等しい振幅が分離される。したがって、円偏光を試料に入射させた場合、試料の透過光の偏光状態から、両主軸方向 p, q に対して  $45^\circ$  傾いた楕円偏光が出射する<sup>18)</sup>。したがって、この楕円偏光の主軸方位を求めれば、主応力の方向を決定できる。p 方向の複素振幅は

$$\begin{bmatrix} U_p(X, Y) \\ U_q(X, Y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi - \pi/4) & \sin(\psi - \pi/4) \\ -\sin(\psi - \pi/4) & \cos(\psi - \pi/4) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{\parallel}(X, Y) \\ U_{\perp}(X, Y) \end{bmatrix} \quad (18)$$

より求められる。なお、q 方向の複素振幅は p 方向と直交するので、式 (18) の位相の部分は  $(\psi - \pi/4 + \pi/2) = (\psi + \pi/4)$  で与えられる。

ここで、 $U_p(X, Y)$  と  $U_q(X, Y)$  の位相角をとると、応力印加による位相変化  $\phi_p(X, Y) = \arg[U_p(X, Y)]$ ,  $\phi_q(X, Y) = \arg[U_q(X, Y)]$  を求めることができる。式 (16) より、主応力  $\sigma_p(X, Y), \sigma_q(X, Y)$  の大きさが

$$\begin{bmatrix} \sigma_p(X, Y) \\ \sigma_q(X, Y) \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi t} \begin{bmatrix} C'_1 & C'_2 \\ C'_2 & C'_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_p(X, Y) \\ \phi_q(X, Y) \end{bmatrix} \quad (19)$$

で与えられる。ただし、応力による厚み、屈折率変化の 1 次の項だけを考えた。こうして、位相変化  $\phi_p(X, Y), \phi_q(X, Y)$  により、主応力  $\sigma_p(X, Y), \sigma_q(X, Y)$  の分布が得られる。

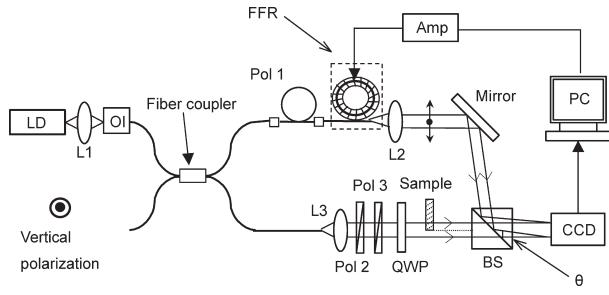


Fig. 3 Experimental setup. LD: laser diode, OI: optical isolator, FFR: flint glass fiber Faraday rotator, BS: beam splitter, L: lens, Pol: polarizer, Amp: current amplifier, PC: personal computer.

### 3. 実 験

Fig. 3 に実験配置を示す。波長 785 nm の半導体レーザー (LD) の出力を、シングルモードファイバーカップラーにより参照光と物体光に分けた。参照光は、光ファイバー偏光子 Pol 1 により方位  $45^\circ$  の直線偏光で鉛ガラスファイバーファラデー変調器に入射する。使用したファラデー変調器は  $32.1 \text{ deg/A}$  の変調効率である。したがって、 $\pm 1.41 \text{ A}$  の直流電流を変調用コイルに印加することで偏光方位を  $\pm 45^\circ$  回転させ、直交する 2 つの直線偏光を逐次生成した。物体光は偏光子 Pol 2 により光強度を調整し、偏光子 Pol 3 および  $1/4$  波長板 (QWP) により生成した右円偏光を試料への入射偏光とした。挿入した試料の透過光と参照光はビームスプリッター (BS) により合波し、CCD 面上にホログラムを形成した。参照光は、物体光に対して約  $1^\circ$  傾けて CCD 面に入射させた。CCD カメラ (IMPERX IPX-VGA120) は  $512 \times 512$  画素、階調度 8 ビットでフレームレート 110 Hz のものを使用した。CCD カメラのピクセルサイズは  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$  で、偏光子 Pol 2, Pol 3 は消光比 50 dB のグラントムソン偏光子である。

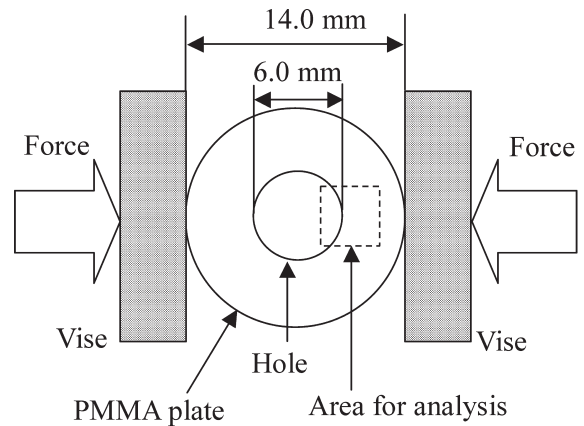


Fig. 4 Observation of photoelastic effect occurred in a compressed PMMA ring. The ring was 14.0 mm in diameter, 3.0 mm thickness, which has a hole of  $\phi 6.0$  at its center part.

CCD カメラで記録した画像データのフレネル変換を計算することにより、物体光の複素振幅の再生を行った。得られた直交する 2 つの偏光成分間の振幅比と位相差から楕円の主軸方位角と楕円率角を計算し、偏光状態を解析した。

### 4. 結 果

試料は Fig. 4 に示すようなリング状の亚克力樹脂 (PMMA) 板で、直径が 14.0 mm、穴の直径が 6.0 mm、厚さが 3.0 mm である。その試料に両側から万力で応力を加えてゆき、応力印加する前と、応力を印加したとき (万力のギャップ変化 2.0% および 2.8% 変化したとき) について、それぞれホログラムを取り込み、解析を行った。

試料は CCD 面から 156 mm の位置に置き、試料に対する入射光は右円偏光とした。照射部分は Fig. 4 の点線で

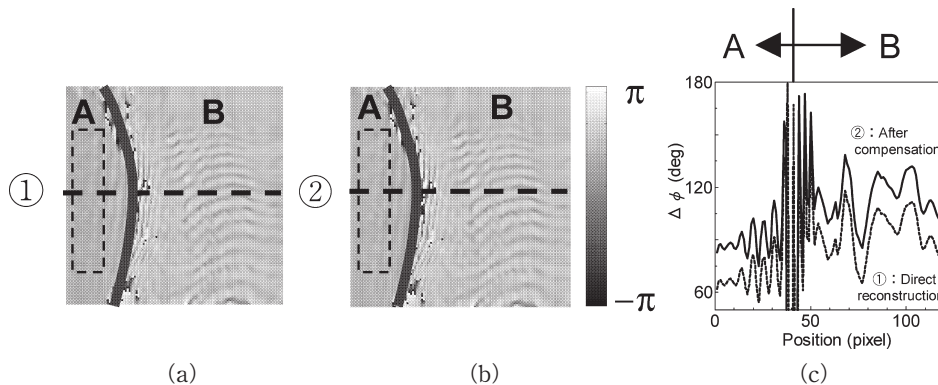


Fig. 5 Effect of phase compensation. (a) Direct reconstruction, (b) after compensation, (c) cross section at ① and ②.

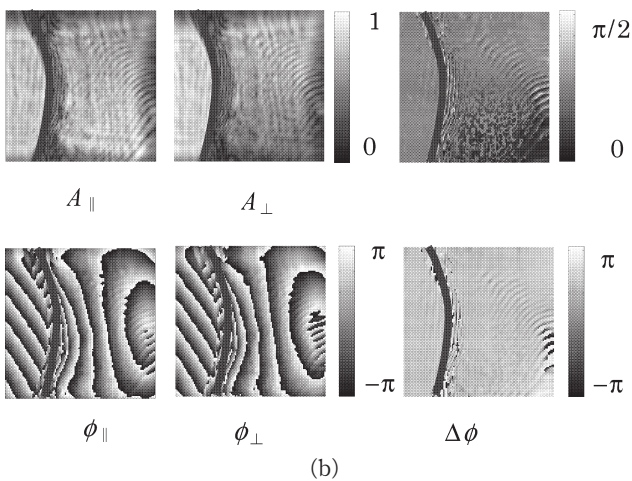
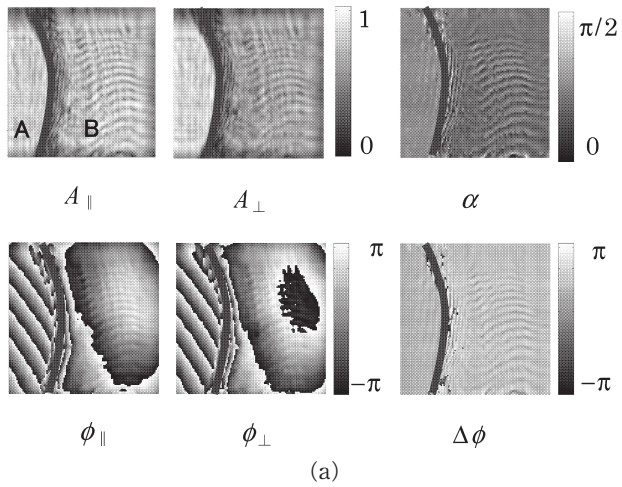


Fig. 6 Reconstructed amplitude  $A_{\parallel}$ ,  $A_{\perp}$ , and phase  $\phi_{\parallel}$ ,  $\phi_{\perp}$  for the horizontal ( $\parallel$ ) and vertical ( $\perp$ ) polarizations with calculated amplitude ratio  $\alpha$  and phase difference  $\Delta\phi$ . (a) Initial, (b) low stress.

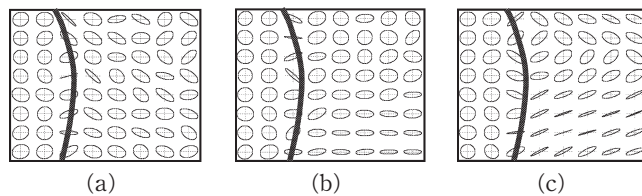


Fig. 7 Polarization state at  $8 \times 8$  representative points in each state of compressed sample. (a) Initial, (b) low stress, (c) high stress.

囲んだ部分である。試料の穴の部分を通じた入射光を参照領域として用いた。応力印加前の状態について、補正を施す前後におけるそれぞれの直交した偏光成分間の位相差を Fig. 5 (a), (b) に示す。(a) において、参照領域 A の点線で囲んだ部分の  $\Delta\phi$  の平均値は約  $69^\circ$  である。この部分の理論値は  $90^\circ$  であるので、理論値と参照領域の  $\Delta\phi$  の平均値との差を測定領域、および参照領域から差し引くと

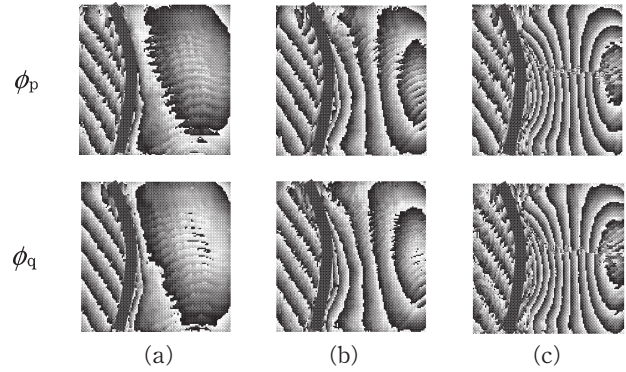


Fig. 8 Phase change of direction of p or q. (a) Initial, (b) low stress, (c) high stress.

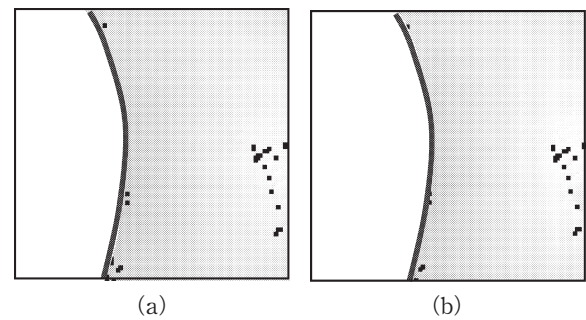


Fig. 9 Result of phase unwrap. (a)  $\phi_p$ , (b)  $\phi_q$ .

(b) が得られる。(a) と (b) の同じラインについて断面をとったものを Fig. 5 (c) に示す。

応力印加前、および万力のギャップ変化 2.0% (low stress) における再生像の振幅・位相分布、さらに位相差  $\Delta\phi$  と振幅比  $\alpha$  の分布を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、縁の左側が参照領域 (A) で、右側が測定領域 (B) である。

次に、応力印加前後における偏光状態を  $8 \times 8$  の代表点において表示した。それを Fig. 7 に示す。弧の左側が参照領域、右側が測定領域である。ギャップ幅が 2.8% 変化したときに、測定領域において楕円偏光の主軸方位の分布が上下で対照的となっていることがわかる。また、それぞれに対して式 (18) より主応力方位 p, q 軸に対する位相変化  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  を求めた。結果を Fig. 8 に示す。応力印加前や、ギャップ変化 2.0% (low stress) の場合には大きな変化がみられないが、ギャップ変化 2.8% (high stress) のときには  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  の分布にリングの中心に向かう不連続な線がみられる。本来、リング圧縮における主応力線図は連続する分布となる<sup>19)</sup>。この原因としては、試料に熱処理していないことによる残留応力の影響やギャップ変化が大きい場合の試料の変形により偏光状態の導出が不連続になっていることが要因として挙げられるが、今後詳細な検討

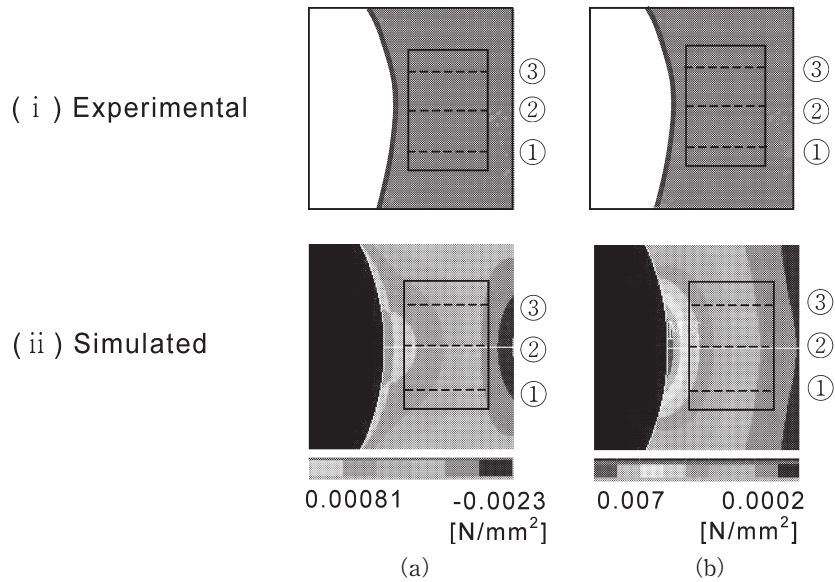


Fig. 10 Distribution of principal stress  $\sigma_p$ ,  $\sigma_q$  obtained by (i) experimental and (ii) simulation (ANSYS). (a)  $\sigma_p$ , (b)  $\sigma_q$ .

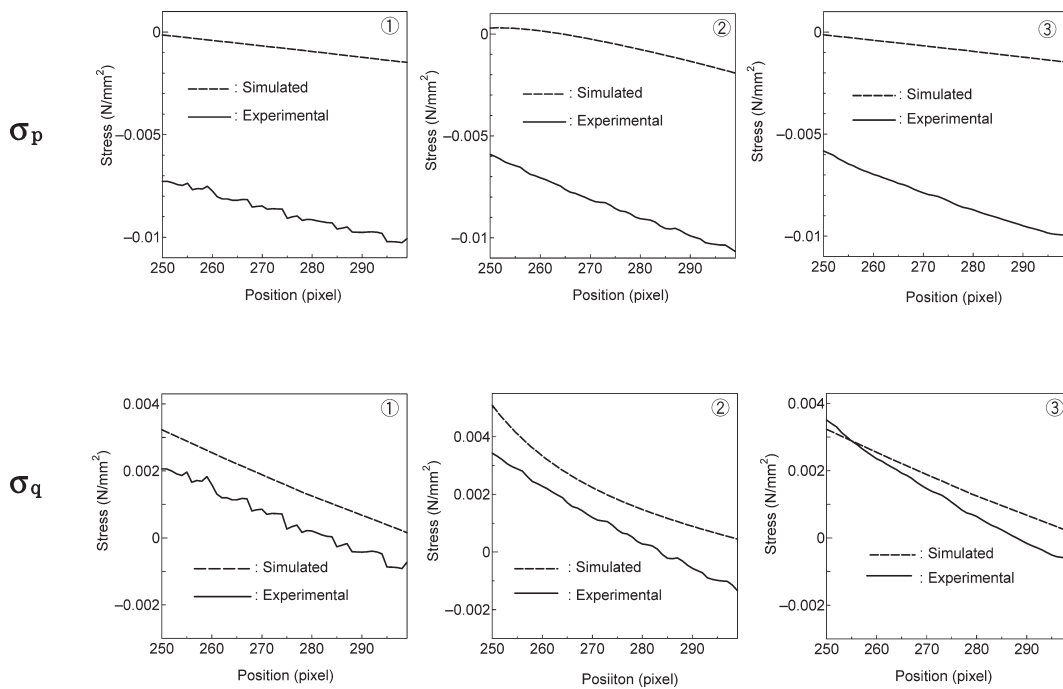


Fig. 11 Cross section at line ①-③ in Fig. 10 for principal stress of  $\sigma_p$  and  $\sigma_q$ .

が必要であると考えている。

主応力方向の位相変化  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  に式 (19) を適用すれば、主応力の大きさが求められる。しかし、このまま主応力を求めるとすると、主応力方向の位相変化  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  は分布に  $2\pi$  の位相飛びによる縞ができていますので、主応力も不連続となる。よって、主応力方向の位相変化  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  に位相接続を施した。なお、ギャップ変化 2.8% (high stress) の場合には不連続な線が入っているため、ギャップ変化

2.0% (low stress) の場合について位相接続を施した。位相接続の結果を Fig. 9 に示す。ここでは、参照領域の結果は取り除いて、測定領域の位相接続の結果のみを表示している。この結果を用いて、アクリル樹脂の光弾性定数を参考文献 20 から、 $n_s=1.5$ ,  $E=0.3 \text{ Mpa}$ ,  $\mu=0.23$ ,  $C_1'=-1.15 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ ,  $C_2'=-1.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$  のように引用して、主応力  $\sigma_p$ ,  $\sigma_q$  の分布を求めた。結果を Fig. 10 に示す。実験結果と比較するために、有限要素法

を用いて、応力分布の数値計算 (ANSYS を使用) を行った。数値計算では、実験に使用したアクリル樹脂の形状と、文献 20 より引用した光弾性定数を使用した。

Fig. 10 の①から③のラインについて断面を求めて、実験結果と計算結果を比較した。結果を Fig. 11 に示す。点線が計算結果、実線が実験より得られた結果である。これらのグラフから、主応力  $\sigma_p$ ,  $\sigma_q$  とともに、計算結果と実験結果は一致してはいないが、数値的に近い範囲で同じような変化をしていることがわかる。有限要素法による計算方法や光弾性定数などの数値の与え方により、計算結果、実験結果ともに変化すると考えられる。より詳細な数値計算や試料の光弾性定数を求めて、検討を進めることが今後の課題であろう。

## 5. 結 論

ファラデー変調器を用いて、直交する 2 つの偏光の参照光をつくり出すデジタルホログラフィーによる偏光解析の実験を行った。試料にはリング状のアクリル樹脂 (PMMA) 板試料を用い、応力印加による光弾性効果の実験を行った。解析では、外乱による影響を物体光の一部に参照領域を設けることにより除去した。さらに、主軸方位から求めた主応力方向の位相変化  $\phi_p$ ,  $\phi_q$  を求め、主応力の大きさを求めて、有限要素法による計算結果と比較を行った。試料の熱処理やより詳細な光弾性定数が得られれば、より詳細な比較検討が可能になると考えられる。また、今回使用したアクリル樹脂よりも大きな光弾性定数をもつエポキシ樹脂などを試料に用いれば、より顕著な光弾性効果が期待できるため、小さな応力に対しても明瞭な結果が得られるであろう。

## 文 献

- 1) T. Yamaguchi, K. Oka and Y. Ohtsuka: "Dynamic photoelastic analysis by optical heterodyne polarimetry," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 276-277.
- 2) J. F. de Boer, T. E. Milner, M. J. C. van Gemert and J. S. Nelson: "Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 934-936.
- 3) J. Lesso, A. Duncan, W. Sibbett and M. Padgett: "Surface

- profilometry based on polarization analysis," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1800-1802.
- 4) J. Moreau, V. Lorient and A.-C. Boccara: "Full-field birefringence imaging by thermal-light polarization-sensitive optical coherence tomography. 2. Instrument and results," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 3811-3817.
- 5) K. Oka and Y. Ohtsuka: "Polarimetry for spatiotemporal photoelastic analysis," *Exp. Mech.*, **33** (1993) 44-48.
- 6) Y. Ohtsuka and K. Oka: "Contour mapping of the spatiotemporal state of polarization of light," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2633-2636.
- 7) M. Yokota, Y. Sato, I. Yamaguchi, T. Kenmochi and T. Yoshino: "A compact polarimetric glucose sensor using a high-performance fiber-optic Faraday rotator," *Meas. Sci. Technol.*, **15** (2004) 143-147.
- 8) D. Beghuin, E. Cuhe, P. Dahlgren, C. Depeursinge, G. Delacretaz and R. Salathe: "Single acquisition polarization imaging with digital holography," *Electron Lett.*, **35** (1999) 2053-2055.
- 9) T. Colomb, P. Dahlgren, D. Beghuin, E. Cuhe, P. Marquet and C. Depeursinge: "Polarization imaging by use of digital holography," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 27-37.
- 10) T. Colomb, E. Cuhe, F. Montfort, P. Marquet and C. Depeursinge: "Jones vector imaging by use of digital holography: Simulation and experimentation," *Opt. Commun.*, **231** (2004) 137-147.
- 11) U. Schnars and W. Juptner: "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-180.
- 12) I. Yamaguchi and T. Zhang: "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 13) 横田正幸, 照井義隆, 山口一郎: "デジタルホログラフィーによる偏光分布の解析", *Proceedings of 35th Meeting on Light-wave Sensing Technology* (2005) pp. 49-54.
- 14) M. Yokota, Y. Terui and I. Yamaguchi: "Analysis of polarization state by digital holography with polarization modulation," *Opt. Rev.*, **13** (2006) 405-409.
- 15) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 4th ed. (Pergamon Press, 1970).
- 16) E. Cuhe, P. Marquet and C. Depeursinge: "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 6994-7001.
- 17) E. Cuhe, P. Marquet and C. Depeursinge: "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 4070-4075.
- 18) 岡 和彦, 大塚 喜弘: "偏光計測を利用した動的弾性による時空間応力解析", *Proceedings of 8th Meeting on Light-wave Sensing Technology* (1991) pp. 23-30.
- 19) 辻 次郎, 西田正孝, 河田幸三: 光弾性実験法 (日刊工業新聞社, 1977) 1-50.
- 20) 清水紘治, 高橋 賞: "光学定数の測定法について", 日本機械学会論文集 (A 編), **519** (1989) 2342-2347.