

# 皮膜散乱光法による 3 次元物体の表面ひずみの測定<sup>†</sup>

林 佳彦\* 平野 貞三\* 今井 康文\*\*

## Strain Measurement of Surface Coatings on a Three-Dimensional Body by the Scattered-Light Method

by

Yoshihiko HAYASHI<sup>\*</sup>, Teizo HIRANO<sup>\*</sup> and Yasufumi IMAI<sup>\*\*</sup>

A method for measuring large surface strains of three-dimensional bodies under tension is proposed, which utilizes the scattered light technique with polymer coating. A major advantage of this method is that interference fringes at the boundary between a real specimen and coatings can be observed directly. The difference in normal strains and shear strain on the surface of real specimen in axisymmetric tension problems can be calculated from three kinds of scattered-light fringe patterns obtained by three different incidences of polarized light. For the demonstration of effectiveness of this method, surface strains of solid and circumferentially notched cylindrical specimens made of aluminum alloy were measured under uniaxial tension. For the unnotched specimen, measured longitudinal strains were well consistent with ones calculated from the elongation of the gauge length. For the notched specimen, distributions of the measured normal and shear strains on the notch surface were well consistent with FEM analyses.

**Key words:** Photoviscoplasticity, Surface strain, Coating method, Scattered-light, Polyester coating, Three-dimensional problem, Tension

### 1 緒 言

従来より実物表面のひずみ分布を光学的に測定する方法として光弾性皮膜法がある。この方法は、反射型光弾性装置を用い、実物表面に接着した皮膜表面に垂直な方向から円偏光を入射し、皮膜表面に現れる等色線縞より実物表面の主ひずみ差を測定する方法であり、機械・構造物の 2 次元問題のひずみ測定に広く利用されている。<sup>1)~6)</sup>しかし、この方法には、皮膜厚さ内のひずみの積分値に相当する等色線縞しか観察できないため、得られた縞には実物表面のひずみを忠実に伝達されていない部分を含んでしまう。また、等色線縞のみではひずみ成分の分離ができない、などの問題点がある。さらに、この方法を 3 次元問題へ適用することは、縞の観察方法やひずみ成分の分離方法などの問題が未解決であるため、ほとんど検討されていない。したがって、反射型皮膜法の問題点を解決でき、また 3 次元問題へも適用できる新しい皮膜実験法の開発が望まれている。

そこで著者らは、従来の反射型皮膜法に代わって新たに散乱光法を用いた皮膜法として、皮膜材にポリエステルを使用し、皮膜のひずみ解析に 3 次元光粘弾塑性法<sup>7)~9)</sup>を応用した皮膜散乱光法を開発してきた。<sup>10), 11)</sup>この方法は、散乱光実験装置を用い、薄い帯状のレーザー偏光を皮膜に入射して得られる散乱光の干渉縞より実物表面のひずみを測定する方法である。皮膜散乱光法の特徴は、従来の反射型皮膜法では観察できなかった皮膜接着面上

の干渉縞が観察でき、また測定精度の低い等傾線を使用しなくても、ひずみ成分の分離ができる点にある。

これまでに著者らは、皮膜散乱光法を用いて、ねじりの軸対称問題における実物表面のせん断ひずみ成分を異なる 2 方向から平面偏光を入射して得られる 2 種類の散乱光縞の連続観察から測定する方法を提案し、その方法を用いて、ねじり荷重を受けるアルミニウム合金の平滑丸棒および円弧切欠き丸棒試験片の表面ひずみ分布を解析し、その有効性を明らかにした。<sup>10)</sup>また、2 次元問題では、実物表面が塑性域にある場合の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を異なる 3 方向から平面偏光を入射して得られる 3 種類の散乱光縞の連続観察から測定する方法を提案し、その方法を用いて、引張り荷重を受けるアルミニウム合金の円弧切欠き帯板試験片の最小断面上のひずみ成分を解析し、その有効性を明らかにした。<sup>11)</sup>

本研究では、皮膜散乱光法を軸対称応力場で引張り荷重を受ける 3 次元物体の表面ひずみの測定に適用し、実物表面が塑性域にある場合のひずみ成分を異なる 3 方向からの平面偏光入射による 3 種類の散乱光縞の連続観察のみから測定する方法を提案した。提案した方法を用いて、アルミニウム合金の平滑丸棒と円弧切欠き丸棒試験片の引張試験を行い、平滑試験片では引張りひずみを求め、切欠き丸棒試験片では切欠き部周上の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分の分布を解析した。さらに、その解析結果を平滑丸棒試験片では、標点間の伸びより算出

† 原稿受理 平成 15 年 1 月 8 日 Received Jan. 8, 2003

\* 正 会 員 久留米工業大学工学部機械システム工学科 〒830-0052 久留米市上津町, Dept. of Mech. Sys. Eng., Kurume Inst. of Tech., Kamitsumachi, Kurume, 830-0052

\*\* 正 会 員 長崎大学工学部機械システム工学科 〒852-8521 長崎市文教町, Dept. of Mech. Sys. Eng., Nagasaki Univ., Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521

した引張りひずみと、切欠き丸棒試験片では、有限要素解析から得られた結果と比較し、本解析法の有効性について検討した。

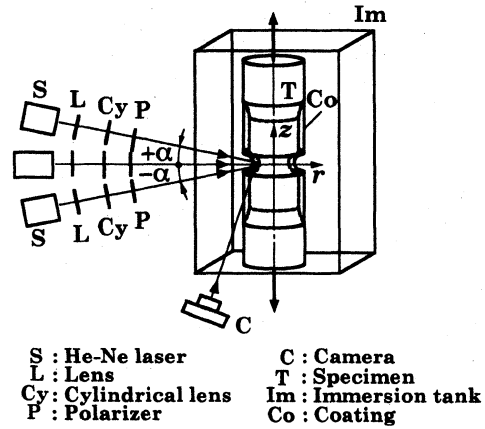
## 2 実験方法

実験に使用した実物材料の素材は、市販のアルミニウム合金 (A1050BD-O) の丸棒材より平行部直径 15mm の平滑丸棒試験片と最小断面の直径が 15mm、切欠き半径 10mm の円弧切欠き丸棒試験片に機械加工した後、温度 350°C で 1 時間の焼きなまし処理を行った。

実験に使用した皮膜材は、前報<sup>11)</sup>と同様、硬質ポリエステル (リゴラック 1557) と軟質ポリエステル (リゴラック 70F) を重量比 3 : 7 の割合で混合し、所定の触媒 (パーメック N) と硬化促進剤 (ナフテン酸コバルト) を全重量比の 0.5% の割合で添加した混合ポリエステルである。この混合ポリエステルをシラン処理した試験片表面に流し込み、室温で 24 時間硬化させた後、さらに 70°C で 12 時間の熱処理を行った。その後、Fig. 1 に示す形状寸法に機械加工して皮膜接着試験片を作製した。なお、試験片の皮膜厚さは、平滑丸棒試験片では約 3mm、切欠き丸棒試験片では、切欠き部のひずみ集中を考慮して約 2.5mm とした。

引張試験は、島津オートグラフ DCS 型引張試験機を用い、皮膜を接着した平滑および切欠き丸棒試験片とも引張速度 0.3mm/min で行い、全ての実験は温度 34°C で行った。

散乱光実験に用いた光学系の概略図を Fig. 2 に示した。光源には He-Ne レーザー (波長  $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) を使用し、平面偏光が試験片表面に入射する際の反射と屈折を避けるために液浸法を用いた。その浸漬液には、皮膜材料と同一の屈折率をもつポリエステルモノマー溶液を用いた。引張り問題における散乱光縞の撮影では、モデル内を通過する光層面を  $45^\circ$  の角度から観察するため、通常の撮影では光層面の上下でカメラまでの距離が異なるので、上下がゆがんだ被写体像の写真が得られる。このゆがみを補正するため、本実験では  $z$  軸から  $45^\circ$  回転



S : He-Ne laser  
L : Lens  
Cy : Cylindrical lens  
P : Polarizer  
C : Camera  
T : Specimen  
Im : Immersion tank  
Co : Coating

Fig. 2. Schematic illustration of experimental apparatus.

した下方より、あおり機構付きカメラを用いて  $rz$  面内の散乱光縞を設定時間毎に撮影した。

縞の解析には、コンピューターを用いて、散乱光縞写真を 1 画面あたり  $480 \times 480$  画素で、各画素の輝度値を 256 階調のデジタル画像データで表し、輝度値分布から縞次数を算出した。

## 3 皮膜材の材料特性

ポリエステル皮膜材の材料特性については、前報<sup>11)</sup>で詳細に報告しているため、本論文では表面ひずみの解析に必要な実験式のみを再録する。

平面偏光が半径方向 ( $r$  方向) から平滑丸棒試験片の中心軸 ( $z$  軸) を含む  $rz$  面に沿って入射するとき、 $rz$  面内の 2 次相当ひずみ  $\Gamma'$  を次式のように定義する。

$$\Gamma' = \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_\theta)^2 + \gamma_{\theta z}^2} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_z$ 、 $\epsilon_\theta$  は軸方向および円周方向の垂直ひずみ、 $\gamma_{\theta z}$  はせん断ひずみである。 $\Gamma'$  は主ひずみ差に等しく、ねじりの場合せん断ひずみに等しい。散乱光縞次数を  $N$ 、入射点からの光路長を  $S$  としたとき、 $n = dN/dS$  を縞こう配といい、これは入射面内の 2 次主ひずみ差と関係づけられる。 $\Gamma'$  が 0.0685 となる値を  $\Gamma'_y$  とし、 $\Gamma'_y$  に対応する縞こう配の値を降伏縞こう配  $n_y$  と定義すれば、この  $n_y$  はひずみ速度に依存し、平面偏光の波長  $\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) を用いて、次式のように表せる。

$$n_y \lambda = 2.10 \times 10^{-4} \left( \frac{\dot{\Gamma}'}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{0.0343} \quad (2)$$

ここでは、 $\dot{\Gamma}_0$  はひずみ速度を無次元化するための標準値 ( $\dot{\Gamma}_0 = 10^{-3} 1/s$ ) である。

得られた  $n$  と  $\Gamma'$  の値をそれぞれ  $n_y$  と  $\Gamma'_y$  で無次元化した  $n/n_y - \Gamma'/\Gamma'_y$  の関係は、ひずみ速度に関係なく次式で表せる。

$0 < \Gamma'/\Gamma'_y < 1$  のとき

$$\frac{n}{n_y} = 0.80 \left( \frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right) + 0.20 \left( \frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right)^4 \quad (3)$$

$\Gamma'/\Gamma'_y \geq 1$  のとき

$$\frac{n}{n_y} = 1.60 \left( \frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right) - 0.60 \quad (4)$$

また、降伏縞こう配  $n_y$  は、式 (2) のようにひずみ速度  $\dot{\Gamma}'$

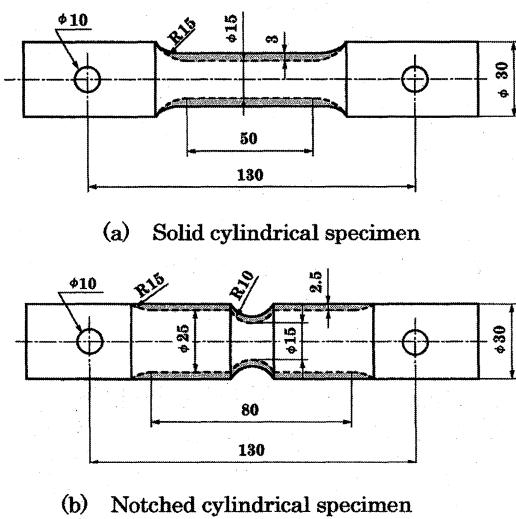


Fig. 1. Shapes and dimension of specimens.

の関数であるが、ひずみ速度  $\dot{\Gamma}'$  は縞こう配増加速度  $\dot{n}$  ( $= dn/dt$ ) から評価でき、最終的に次式のように表せる。

$$n_y \lambda = 2.51 \times 10^{-4} \left( \frac{\dot{n} \lambda}{\Gamma_0} \right)^{0.0332} \quad (5)$$

以上の結果より、ポリエステル縞こう配  $n$  と 2 次相当ひずみ  $\Gamma'$  との関係は、ひずみ速度の影響を含んだ簡単な関数として

$$n = f(\Gamma', \dot{n})$$

のように表すことができ、時間的に変化する散乱光縞の連続観察のみから皮膜内の 2 次相当ひずみ  $\Gamma'$  を上式の逆関数として、

$$\Gamma' = g(n, \dot{n})$$

のように推定することができる。なお、この皮膜のポアソン比は、0.48 であった。

#### 4 皮膜散乱光法による 3 次元問題のひずみ解析

##### 4.1 縞こう配とひずみ成分の関係

皮膜内の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を求めるために、Fig. 3 に示すように試験片軸を  $z$  軸とする円柱座標系を取り、 $z$  軸を含む  $rz$  面内に沿って平面偏光を 3 方向から入射させると、 $rz$  面内の 2 次相当ひずみ  $\Gamma'$  は、それぞれの平面偏光入射方向から得られる縞こう配  $n_i$  と縞こう配増加速度  $\dot{n}_i$  により次式で表せる。

(1)  $r$  方向から入射したとき

$$\Gamma_0' = \pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) = g(n_0, \dot{n}_0) \quad (6)$$

(2)  $r$  方向となす角度  $+\alpha$  方向から入射したとき

$$\begin{aligned} \Gamma_{+\alpha}' &= \pm \left\{ (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \sin^2 \alpha \right. \\ &\quad \left. + \gamma_{rz} \sin \alpha \cos \alpha \right\} \\ &= g(n_{+\alpha}, \dot{n}_{+\alpha}) \end{aligned} \quad (7)$$

(3)  $r$  方向となす角度  $-\alpha$  方向から入射したとき

$$\begin{aligned} \Gamma_{-\alpha}' &= \pm \left\{ (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \sin^2 \alpha \right. \\ &\quad \left. - \gamma_{rz} \sin \alpha \cos \alpha \right\} \\ &= g(n_{-\alpha}, \dot{n}_{-\alpha}) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_z$  は、それぞれ半径方向、円周方向、軸方向の垂直ひずみ、 $\gamma_{rz}$  はせん断ひずみ、添字の 0、 $+\alpha$  および  $-\alpha$  は入射方向を表す。

式 (6)~(8) より 3 つの垂直ひずみ差  $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)$ 、 $\pm(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)$ 、 $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_r)$  およびせん断ひずみ成分  $\pm\gamma_{rz}$  は次式で求められる。

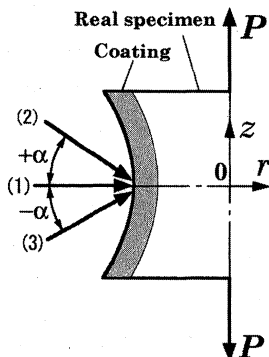


Fig. 3. Coordinate system and incident directions of polarized light.

$$\left. \begin{aligned} \pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) &= \Gamma_0' \\ \pm(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left( \Gamma_0' \cos^2 \alpha - \frac{\Gamma_{+\alpha}' + \Gamma_{-\alpha}'}{2} \right) \\ \pm(\varepsilon_z - \varepsilon_r) &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left( \Gamma_0' - \frac{\Gamma_{+\alpha}' + \Gamma_{-\alpha}'}{2} \right) \\ \pm\gamma_{rz} &= \frac{1}{\sin 2\alpha} (\Gamma_{+\alpha}' - \Gamma_{-\alpha}') \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

##### 4.2 ひずみの解析手順

(1) ある時間間隔毎に縞次数  $N_0$ 、 $N_{+\alpha}$  および  $N_{-\alpha}$  を測定し、縞こう配  $n_0$ 、 $n_{+\alpha}$  および  $n_{-\alpha}$  を算出し、縞こう配  $n_i$  の時間的変化から縞こう配増加速度  $\dot{n}_i$  を求め、式 (5) より降伏縞こう配  $n_{iy}$  を算出する。

(2)  $n_i < n_{iy}$  のとき式 (3) より、 $n_i \geq n_{iy}$  のとき式 (4) より 3 方向の 2 次相当ひずみ  $\Gamma_0'$ 、 $\Gamma_{+\alpha}'$ 、 $\Gamma_{-\alpha}'$  を求め、式 (9) より、3 つの垂直ひずみ差  $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)$ 、 $\pm(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)$ 、 $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_r)$  およびせん断ひずみ成分  $\pm\gamma_{rz}$  を算出する。

特に、試験片表面が塑性域にある場合には体積不変となり、3 つの垂直ひずみ成分  $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_z$  は簡単に決定することができる。

#### 5 有限要素解析

平滑丸棒試験片を用いた引張試験の場合、試験片平行部の引張りひずみは、別の実験法により測定できるので、皮膜散乱光法による結果の有効性は簡単に判断できる。しかし、切欠き丸棒試験片の場合、切欠き部周上の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分の分布は、別の実験法により測定することは容易ではない。皮膜散乱光法から得られたひずみ分布を有限要素解析の結果と比較することにより、本解析法の有効性を検討した。切欠き丸棒試験片の対称性から 1/2 部分を解析対象とした。ポリエステル皮膜とアルミニウム合金部にそれぞれ 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、接着境界は完全固着として、軸対称弾塑性-粘弾性解析を行った。本解析に使用した要素分割図を Fig. 4 に示した。図中の薄墨色の部分がポリエステル皮膜である。アルミニウム合金の加工硬化係数は実験より求め、ある応力レベルごとに与えた。皮膜の粘弾性解析の方法は以前報告した方法<sup>10), 11)</sup>と同様である。

#### 6 実験結果とその考察

提案したひずみ解析法を用いて、引張り負荷を受ける平滑丸棒および切欠き丸棒試験片の表面が塑性域にある場合のひずみ成分の解析を行った。さらに、解析結果の有効性について検討した。

##### 6.1 平滑丸棒試験片の解析結果

Fig. 1 (a) に示す皮膜を接着したアルミニウム合金の平滑丸棒試験片を用いて引張試験を行い、そのとき得ら

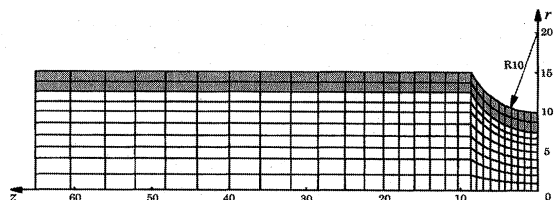


Fig. 4. FEM division of the notched cylindrical specimen.

れた荷重  $P$  と時間  $t$  の関係を Fig. 5 に示した。また、半径方向 ( $r$  方向) から平面偏光を入射して得られた明視野での散乱光縞の一例を Fig. 6 に示した。いずれの荷重においても、縞が等間隔に現れ、縞こう配  $n_0$  は皮膜内で一様となっている。

本実験では、実物試験片が単軸応力状態にあるので、そのポアソン比を  $\nu$  とすれば、横ひずみ  $\epsilon_r$ 、 $\epsilon_\theta$  は  $-\nu\epsilon_z$  となる。また、実物表面が塑性域にある場合には、 $\nu = 0.5$  とすればよい。したがって、試験片表面の引張りひずみ  $\epsilon_z$  は、皮膜接着面上の縞こう配  $n_0$  のみから求めることができる。この解析結果  $\epsilon_{zp}$  と標点間の伸びより求めた引張りひずみ  $\epsilon_{zm}$  の結果を Table I に示した。この両者を比較すると、その違いは約 5% 以内であり、本解析法は、単軸応力場における実物表面のひずみ解析法として有効であると考えられる。

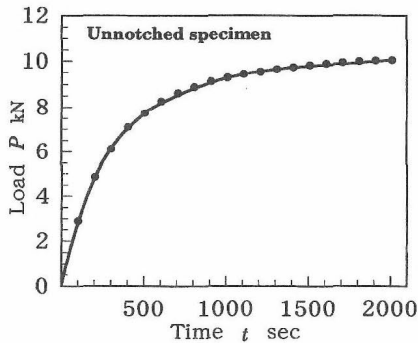


Fig. 5. Load-time curve for the aluminum solid cylindrical specimen under uniaxial tension.

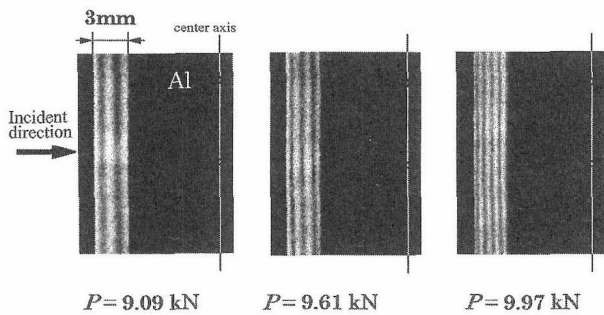


Fig. 6. Scattered-light fringe patterns in the coatings for the aluminum solid cylindrical specimen under uniaxial tension.

Table I. Comparison of measured longitudinal strains for the aluminum solid cylindrical specimen.

P (kN)	$\epsilon_{zp}$	$\epsilon_{zm}$	$\epsilon_{zp}/\epsilon_{zm}$
8.60	0.0517	0.0541	0.956
9.09	0.0695	0.0706	0.984
9.41	0.0889	0.0879	1.011
9.61	0.110	0.105	1.046
9.79	0.125	0.122	1.025
9.97	0.149	0.146	1.021

**P:** applied load,  
 **$\epsilon_{zp}$ :** present method,  
 **$\epsilon_{zm}$ :** from elongation of gauge length

### 6・2 切欠き丸棒試験片の解析結果

Fig. 1 (b) に示すアルミニウム合金に皮膜を接着した切欠き丸棒試験片を用いて引張試験を行い、そのとき得られた荷重  $P$  と時間  $t$  の関係を Fig. 7 に、明視野での散乱光縞写真の一例を Fig. 8 に示した。Fig. 8 の上段に半径方向 ( $r$  方向) とすす角度  $+\alpha$  ( $\alpha = 28.9^\circ$ ) 方向からの入射、中段に半径方向からの入射、下段に半径方向となす角度  $-\alpha$  方向からレーザー偏光を入射して得られた縞写真を示している。

得られた3種類の散乱光縞写真から、切欠き部周上の3種類の縞こう配  $n_0$ 、 $n_{+\alpha}$  および  $n_{-\alpha}$  を算出し、その分布を Fig. 9 (a)~(c) に示した。これらの図の横軸には、切欠き部周上の位置を切欠き底からの角位置  $\phi$  で表し、ここでは、 $\phi$  の値が 0.7rad までの範囲について示した。いずれの荷重においても、縞こう配  $n_0$  と  $n_{+\alpha}$  の分布は、切欠き底で最大となり、切欠き底から遠ざかるにつれて減少している。しかし、 $n_{-\alpha}$  の分布は、切欠き底から約

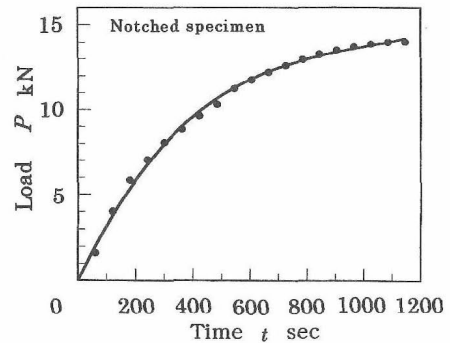


Fig. 7. Load-time curve for the aluminum notched cylindrical specimen under uniaxial tension.

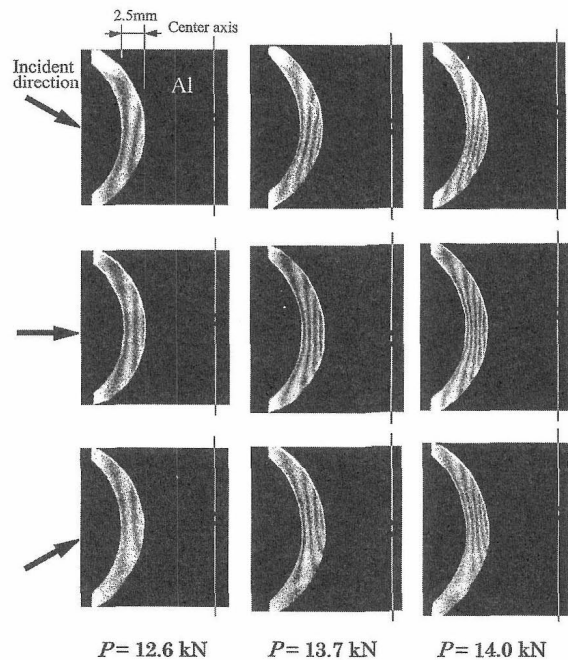


Fig. 8. Scattered-light fringe patterns in the coatings for the aluminum notched cylindrical specimen under uniaxial tension.

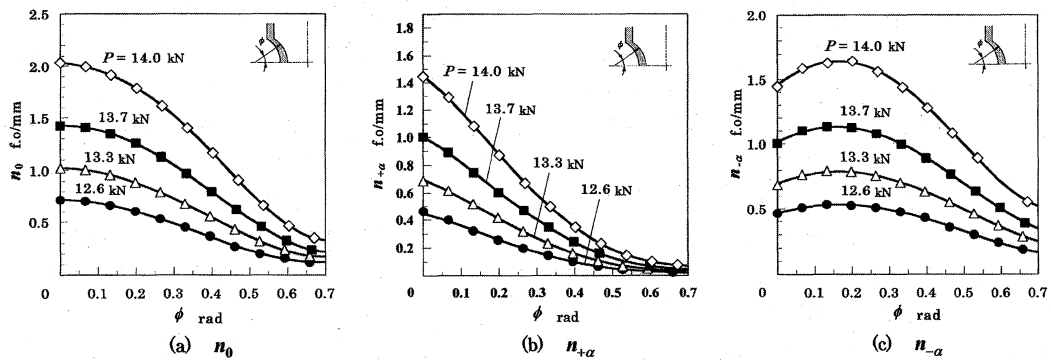


Fig. 9. Distribution of fringe gradients on the notch surface for the aluminum notched cylindrical specimen under uniaxial tension.

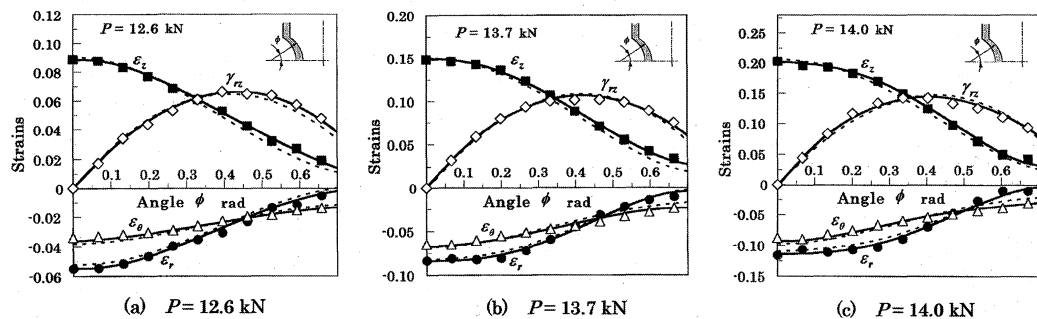


Fig. 10. Distribution of normal and shear strains on the notch surface for the aluminum notched cylindrical specimen under uniaxial tension.

0.2rad までは増加し、その後切欠き底から遠ざかるにつれて減少している。

提案した解析法を用いて、切欠き部周上の各垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を求めた。その分布を Fig. 10 に示した。横軸には、縞こう配と同様に切欠き部周上の位置を切欠き底からの角位置  $\phi$  で表した。図中の実線は本解析法の結果を示し、垂直ひずみ成分  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_z$  およびせん断ひずみ成分  $\gamma_{rz}$  を、それぞれ●, △, ■および◇の印で表した。また、破線は有限要素解析の結果を示した。いずれの荷重においても、垂直ひずみ成分  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_z$  の分布は、切欠き底から遠ざかるにつれて減少しているが、せん断ひずみ成分  $\gamma_{rz}$  の分布は、切欠き底から約 0.4rad までは増加し、その後切欠き底から遠ざかるにつれて減少している。

本解析法の結果と有限要素解析の結果を比較すると、切欠き底から遠ざかるにつれて光粘塑性解析により求めた結果の方が少し高い値を示しているが、その分布の傾向は良く一致している。したがって、提案した解析法は、軸対称応力場で引張りを受ける3次元実物体のひずみ成分を解析する方法として有効であると考えられる。

## 7 結 論

皮膜散乱光法を3次元物体の軸対称問題に適用し、軸対称応力場で引張り荷重を受ける実物表面の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を皮膜法によって解析する方法を提案した。提案した解析法を用いて、引張り荷重を受けるアルミニウム合金の平滑丸棒試験片と切欠き丸棒試験片の表面が塑性域にある場合の表面ひずみ分布の解析に適用し、その有効性について検討した。その結果、次

のような結論が得られた。

(1) 引張りの軸対称応力場では、異なる3方向からの平面偏光入射による3種類の散乱光縞の連続観察のみから、実物表面上の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を解析することができる。

(2) 本解析法を用いて、引張り荷重を受けるアルミニウム合金の平滑丸棒試験片と切欠き丸棒試験片の表面ひずみを解析した結果、平滑丸棒試験片では、標点間の伸びより求めた結果とよい一致を示し、切欠き丸棒試験片では、切欠き部周上の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分の分布は有限要素解析より求めた結果とよい一致を示し、本解析法の有効性を確認することができた。

## 参 考 文 献

- 1) K. Kawata, J. Sci. Res. Inst., **52**, 17 (1958).
- 2) D. Post and F. Zandman, Exp. Mech., **1**, 21 (1961).
- 3) J. Duffy and T. C. Lee, Exp. Mech., **1**, 109 (1961).
- 4) S. S. Redner, Exp. Mech., **3**, 170 (1963).
- 5) J. W. Dally and W. F. Riley, "Experimental stress analysis", p.280 (1965) McGraw-Hill, Kogakusha.
- 6) A. S. Kobayashi, "Handbook on Experimental Mechanics", p.254 (1993) SEM-VCH.
- 7) 平野貞三, 林 佳彦, 今井康文, 材料, **44**, 213 (1995).
- 8) T. Hirano, Y. Imai and Y. Hayashi, Exp. Mech., **37**, 159 (1997).
- 9) 平野貞三, 今井康文, 林 佳彦, 材料, **46**, 555 (1997).
- 10) 平野貞三, 林 佳彦, 今井康文, 材料, **48**, 1443 (1999).
- 11) 林 佳彦, 平野貞三, 今井康文, 材料, **50**, 1388 (2001).