$\cos\alpha$ 法による円筒面の X 線応力測定†

小栗 泰造* 田中 努* 岡野 俊之**
村田 一夫** 川上 洋司*** 佐藤 嘉洋***

X-ray Stress Measurement of the Cylindrical Surface by the $\cos\alpha$ Method

by

Taizo OGURI*, Tsutomu TANAKA*, Toshiyuki OKANO**,
Kazuo MURATA**, Hiroshi KAWAKAMI*** and Yoshihiro SATO***

The investigation was made on the phenomena observed in the X-ray stress measurement on a curved surface by the $\cos\alpha$ method. Numerical analysis was performed simulating the $\cos\alpha$ method for the circumferential stress and the axial stress on a cylindrical surface. The X-ray residual stress measurements by the $\cos\alpha$ method and the $\sin^2\psi$ method were carried out respectively for the blasted surface of round steel bars with various diameters. It was found that the debye ring turned oval and the slope of $\cos\alpha$ diagram decreased as the ratio of the X-ray beam size to the bar diameter increased, i.e. the magnitude of the measured stress was smaller than that of actual one. These tendencies were remarkable in the circumferential stress measurement. With respect to the relation between the X-ray beam size and the measured value of stress, the difference between the $\cos\alpha$ method and the $\sin^2\psi$ method was found to be small. The measurement error due to a cylindrical surface was negligible when the X-ray beam size was less than 1/3 of the diameter.

Key words:

Residual stress, $\cos\alpha$ method, Two-dimensional detector, Debye ring, Curved surface,
X-ray stress measurement, Non-destructive inspection

1 緒 言

$\cos\alpha$ 法^{1),2)}は X 線応力測定法の一つである。2 次元検出器を用いる単一入射法であることと、デバイリング全体を利用することを特徴とする。近年、2 次元検出器および周辺機器の電子化が進んだことを背景に、 $\cos\alpha$ 法による測定が可能な装置が市販されるようになった。単一入射法ではゴニオメータのような複雑な機構を必要としないため小型化が容易であり、一定角度での X 線照射で足りるため迅速測定が可能である。このような利点があるため、 $\cos\alpha$ 法をはじめとする 2 次元検出器方式の X 線応力測定機は、産業界を中心に普及する兆しを見せている。

しかし、長年にわたるデータの積み重ねがあつて測定法標準³⁾にも採用されている $\sin^2\psi$ 法には絶大な信頼力があり、 $\cos\alpha$ 法への置き換えを検討する際には $\sin^2\psi$ 法による測定値との一致性が問題となることが少なくない。 $\sin^2\psi$ 法とは光学系が大きく異なり、条件によっては両者による測定結果が一致しない場合があり得るからである。このため、複数の学協会において、2 次元検出器方式で精度良く測定するための検討が進められつつある。

このような背景の下、本研究では、機械・構造物の応

力測定の際にしばしば直面する「曲面の応力測定」に焦点を当て、 $\cos\alpha$ 法を曲面に適用した場合にデバイリング、 $\cos\alpha$ 線図および応力測定値にいかなる影響が現れるかについてシミュレーションと実験を行った。また、曲面に起因した測定誤差を概略推定する方法と、曲面起因測定誤差の発生を回避するための照射寸法の指針を明らかにするとともに、曲面の応力測定値に関して $\sin^2\psi$ 法による測定結果との一致性を調べた。

2 解 析

2.1 解析モデル

Fig. 1 に、円柱（直径 2ρ ）に X 線ビーム（直径 $2\zeta_0$ ）を照射して $\cos\alpha$ 法で残留応力を測定する場合における X 線回折の模式図を示す。Fig. 1 に示すように、直角座標系 $O-xyz$ および極座標系 $O-r\omega z$ を定義する。 z 軸は円柱の中心軸と一致し、 x 軸は鉛直方向を向いている。角度 ω は x 軸から y 軸に向かう方向を正とする。円柱面の頂点 Q が X 線コリメーターの中心軸上にあるように配置し、2 次元検出器の中心 A を通して円柱曲面の広い範囲に X 線を一括照射する。この場合において、照射領域内の点 P 直下の微小体積要素 $dV = r dr d\omega$ による X 線回

† 原稿受理 平成 28 年 12 月 12 日 Received Dec.12, 2016 ©2017 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 (地独)大阪府立産業技術総合研究所 金属材料科 〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1
Metallic Materials Section, Technology Research Institute of Osaka Prefecture, Ayumino, Izumi, 594-1157.

** (株)オカノブラスト 〒599-8247 大阪府堺市中区東山 644
Okano Blast Co. Ltd., 644 Higashiyama, Naka-ku, Sakai, 599-8247.

*** 大阪市立大学大学院工学研究科 〒558-8585 大阪市住吉区杉本
Grad. Sch. Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585.

折を考える．微小体積要素中には十分な数の結晶粒があり，ランダム配向状態にあるものとする．微小体積要素で生じた回折X線は2次元検出器に到達して「要素デバイリング」を形成するものとし，これを照射領域全体について積分することにより「合成デバイリング」を得るものとする．

点Pを共通の原点とする三つの直角座標系（局所座標系 L: $P-x_L y_L z_L$ ，試料座標系 S: $P-x_S y_S z_S$ および測定座標系 M: $P-x_M y_M z_M$ ）を定義する． z_L 軸は鉛直方向を向き， z_M 軸は入射X線に平行である．X線入射角は ψ_0 とする． z_S 軸は円柱面上の点Pにおける法線方向である．点Cは要素デバイリング上の点であり，要素デバイリングの上端を基準として中心角 α の位置にある．角度 α は，図中の矢印の方向を正にとる．点Bは $\angle APB = \angle CPB = \eta$ なる点である．

円柱面には座標系 S の下で一様かつ一定の応力およびひずみが存在するものとし，応力成分は $(\sigma_x^S, \sigma_y^S, \sigma_z^S, \tau_{xy}^S, \tau_{yz}^S, \tau_{xz}^S)$ と，ひずみ成分は $(\epsilon_x^S, \epsilon_y^S, \epsilon_z^S, \gamma_{xy}^S, \gamma_{yz}^S, \gamma_{xz}^S)$ とする．

2.2 微小体積要素の垂直ひずみ

まず，微小体積要素 dV の $\vec{n}$ 方向の垂直ひずみ $\epsilon(\alpha, \omega)$ を計算する．座標系 S → L → M への座標変換行列を $[u_{ij}^C]$ （円周方向応力測定の場合）および $[u_{ij}^A]$ （軸方向応力測定の場合）とし，さらに z_M 軸を中心として x_M 軸を AC と平行にする回転を加える座標変換行列をそれぞれ $[v_{ij}^C]$ と $[v_{ij}^A]$ とする ($i, j = 1, 2, 3$)．座標変換行列は各座標軸間の方向余弦から構成され，次式で表される．

$$[u_{ij}^C] = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & 0 & -\sin \psi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_0 & 0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[u_{ij}^A] = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & 0 & -\sin \psi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_0 & 0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[v_{ij}^C] = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [u_{ij}^C] \quad (3)$$

$$[v_{ij}^A] = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [u_{ij}^A] \quad (4)$$

Fig. 1 に示すように， $\vec{n}_0$ は z_M 軸に平行であるから座標変換行列 $[u_{ij}^C]$ または $[u_{ij}^A]$ の第三行である $[u_{3j}^C]$ または $[u_{3j}^A]$ を成分とし， $\vec{e}_\alpha$ は x_M 軸が AC と平行になるように回転したものであるから座標変換行列 $[v_{ij}^C]$ または $[v_{ij}^A]$ の第一行である $[v_{1j}^C]$ または $[v_{1j}^A]$ を成分とする．すなわち，次式が得られる．

$$\vec{n}_0 = (u_{31}^C, u_{32}^C, u_{33}^C) \text{ or } (u_{31}^A, u_{32}^A, u_{33}^A) \quad (5)$$

$$\vec{e}_\alpha = (v_{11}^C, v_{12}^C, v_{13}^C) \text{ or } (v_{11}^A, v_{12}^A, v_{13}^A) \quad (6)$$

また， $\vec{PA}$ ， $\vec{PB}$ および $\vec{AB}$ の単位ベクトルをそれぞれ $\vec{n}_0$ ， $\vec{n}$ および $\vec{e}_\alpha$ とすれば，それらの間には，Fig. 1 に示すよ

(a) Circumferential stress measurement

(b) Axial stress measurement

Fig. 1 Schematic illustrations of X-ray diffraction in the residual stress measurement for a cylindrical surface.

うに，次の関係がある．^{1), 2)}

$$\vec{n} = \vec{n}_0 \cos \eta + \vec{e}_\alpha \sin \eta \quad (7)$$

よって，円周方向応力測定の場合における $\vec{n}$ の各成分 (n_1, n_2, n_3) は次式で表される．

$$n_1 = \cos \eta \sin(\psi_0 - \omega) - \cos \alpha \sin \eta \cos(\psi_0 - \omega) \quad (8)$$

$$n_2 = \sin \alpha \sin \eta \quad (9)$$

$$n_3 = \cos \eta \cos(\psi_0 - \omega) + \cos \alpha \sin \eta \sin(\psi_0 - \omega) \quad (10)$$

同様に軸方向応力測定の場合については次式で表される．

$$n_1 = \cos \eta \sin \psi_0 - \cos \alpha \sin \eta \cos \psi_0 \quad (11)$$

$$n_2 = \sin \alpha \sin \eta \cos \omega \quad (12)$$

$$n_3 = \cos \eta \cos \psi_0 \cos \omega - (\cos \eta \cos \psi_0 + \cos \alpha \sin \eta \sin \psi_0) \sin \omega \quad (13)$$

$$n_3 = \cos \eta \cos \psi_0 \cos \omega + (\cos \alpha \sin \psi_0 \cos \omega + \sin \alpha \sin \omega) \sin \eta$$

微小体積要素 dV の $\vec{n}$ 方向の垂直ひずみ $\epsilon(\alpha, \omega)$ は, 次式で示すように, 座標系 S で定義されたひずみを座標変換することにより求めることができる.^{1),2)}

$$\epsilon(\alpha, \omega) = n_1^2 \epsilon_x^S + n_2^2 \epsilon_y^S + n_3^2 \epsilon_z^S + n_1 n_2 \gamma_{xy}^S + n_2 n_3 \gamma_{yz}^S + n_1 n_3 \gamma_{xz}^S \quad (14)$$

また, 等方弾性体 (Young 率 E , Poisson 比 ν) と平面応力状態を仮定すれば, 次式のように応力成分で表示することができる.^{1),2)}

$$\epsilon(\alpha, \omega) = \frac{\sigma_x^S}{E} [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \frac{\sigma_y^S}{E} [n_2^2 - \nu(n_1^2 + n_3^2)] + \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}^S n_1 n_2 \quad (15)$$

2.3 デバイリング

微小体積要素 dV の垂直ひずみ $\epsilon(\alpha, \omega)$ から, dV により形成される要素デバイリングの半径 $R(\alpha, \omega)$ を計算する. 検出器上の点 C における要素デバイリングの半径 $R(\alpha, \omega)$ は次式で表される.

$$R(\alpha, \omega) = |\vec{AC}| = D(\omega) \tan[\pi - 2\theta(\alpha, \omega)] \quad (16)$$

$$D(\omega) = |\vec{AP}| = D_0 + D_T(\omega) \quad (17)$$

$$D_T(\omega) = \rho(1 - \cos \omega) \sec \psi_0 \quad (18)$$

ただし, $2\theta(\alpha, \omega)$ は回折角, $D(\omega)$ は照射点と検出器との間の距離, D_0 は円柱面の頂点 Q と検出器との間の距離, $D_T(\omega)$ は測定面の湾曲に起因した照射点・検出器間距離の変化量である. 微小体積要素 dV での回折角は, 垂直ひずみ $\epsilon(\alpha, \omega)$ を用いて次式で表すことができる.^{1),2)}

$$2\theta(\alpha, \omega) = 2\theta_0 - 2\epsilon(\alpha, \omega) \tan \theta_0 \quad (19)$$

ただし, $2\theta_0$ は無ひずみ状態の回折角である.

照射領域全体からの X 線回折により検出器上の C 点に形成される合成デバイリングの半径 $\langle R(\alpha) \rangle$ は, 同位置における要素デバイリングの半径 $R(\alpha, \omega)$ を, 微小体積要素の回折強度 $W(\alpha, \omega)$ で重み付けしたうえで, 照射領域 V の全体にわたって重み付き平均積分を行うことにより計算する.

$$\langle R(\alpha) \rangle = \frac{\int_V R(\alpha, \omega) W(\alpha, \omega) dV}{\int_V W(\alpha, \omega) dV} \quad (20)$$

回折強度の重み $W(\alpha, \omega)$ には, 無ひずみ試料 (鉄粉) を種々の角度 ω または Ω だけ傾斜させて α 角ごとに記録した積分強度 (吸収補正なし) の実測値を使用する. Fig. 2 に, $W(\alpha, \omega)$ の実測結果を示す. 回折強度が α 角依存性を示すのは, 入射 X 線のビームサイズが一定であっても回折 X 線のビームサイズが α 角によって異なること, および有効 X 線侵入深さが回折 X 線の経路に依存することによる. そして, 回折 X 線のビームサイズと回折 X 線の経路は ω 回転または Ω 回転によっても変化する, 回折強度は ω または Ω 依存性を示す.

X 線ビームが $\phi 2\zeta_0$ の円形であることを考慮に入れて, 式 (20) を次式に置き換える.

$$\langle R(\alpha) \rangle = \frac{\int_{-\zeta_0}^{\zeta_0} \zeta dz \int_{\omega_1}^{\omega_2} R(\alpha, \omega) W(\alpha, \omega) d\omega}{\int_{-\zeta_0}^{\zeta_0} \zeta dz \int_{\omega_1}^{\omega_2} W(\alpha, \omega) d\omega} \quad (21)$$

ただし, X 線ビーム半径 ζ と ω 角の積分範囲は次式で表わされる (Fig. 1 参照).

$$\zeta = \zeta(z) = \sqrt{\zeta_0^2 - z^2} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 \\ \omega_2 \end{aligned} \right\} = \mp \sin^{-1} \left[\sin \psi_0 \left\{ \sin \psi_0 \pm \frac{\zeta}{\rho} \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \psi_0 \sqrt{\cot^2 \psi_0 \mp \frac{\zeta}{\rho} \left(2 \pm \frac{\zeta}{\rho} \csc \psi_0 \right) \csc \psi_0} \right\} \right] \quad (23)$$

(for circumferential stress measurement)

(a) ω rotation

(b) Ω rotation

Fig. 2 Relations between the α angle of debye ring and the integrated diffraction intensity of ferrite powder rotated at an angle of ω or Ω . These relations are regarded as weight factors $W(\alpha, \omega)$ or $W(\alpha, \Omega)$ in the weight averaged integrations.

$$\left. \begin{array}{l} \omega_1 \\ \omega_2 \end{array} \right\} = \mp \sin^{-1}(\zeta/\rho) \quad (\text{for axial stress measurement}) \quad (24)$$

積分は円柱の表面について行うものであるが、 $W(\alpha, \omega)$ に X 線の吸収効果が含まれているため、深さ方向への X 線の侵入も考慮したものとなる。上記の積分を α 角ごとに行うことにより、照射面全体からの合成デバイリングを得ることができる。

2.4 応力の算出

合成デバイリングから回折角とひずみを求め、応力を計算する。合成デバイリングの中心角 α における半径 $\langle R(\alpha) \rangle$ から、次式により重み付き平均回折角 $\langle 2\theta(\alpha) \rangle$ と重み付き平均ひずみ $\langle \epsilon_\alpha \rangle$ を計算する。^{1), 2)}

$$\langle 2\theta(\alpha) \rangle = \pi - \tan^{-1} \frac{\langle R(\alpha) \rangle}{D_0} \quad (25)$$

$$\langle \epsilon_\alpha \rangle = \cot \theta_0 (\langle \theta(\alpha) \rangle - \theta_0) \quad (26)$$

続いて、ひずみパラメーター a_1 および a_2 を次式により計算する。^{1), 2)}

$$2a_1 = (\langle \epsilon_\alpha \rangle - \langle \epsilon_{\pi+\alpha} \rangle) + (\langle \epsilon_{-\alpha} \rangle - \langle \epsilon_{\pi-\alpha} \rangle) \quad (27)$$

$$2a_2 = (\langle \epsilon_\alpha \rangle - \langle \epsilon_{\pi+\alpha} \rangle) - (\langle \epsilon_{-\alpha} \rangle - \langle \epsilon_{\pi-\alpha} \rangle) \quad (28)$$

a_1 対 $\cos \alpha$ 線図の勾配に次式の応力定数 K を乗じれば垂直応力 σ_x が求められ、同様に a_2 対 $\sin \alpha$ 線図の勾配からはせん断応力 τ_{xy} を求めることができる。^{1), 2)}

$$K = \begin{cases} -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} & (\text{for } \sigma_x) \\ \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \psi_0} & (\text{for } \tau_{xy}) \end{cases} \quad (29)$$

2.5 解析条件

Table 1 に示すとおり、次章で説明する実験条件と整合する条件を与えた。ただし、照射 X 線ビームの発散角に起因する、照射領域内での X 線入射角の変動は無視した。また、一部の試料は等二軸応力状態にないが、すべての試料が等二軸圧縮応力状態にあるものとした。

3 実験および解析結果

3.1 実験方法

円柱直径および照射寸法と残留応力測定値との関係を以下のように調べた。

Table 1 Analysis conditions of the $\cos \alpha$ method.

Incident angle ψ_0	35 deg
Work distance D_0	39 mm
Diffraction angle $2\theta_0$	156.396 deg
Young's modulus E	224 GPa
Poissons ratio ν	0.28
Stress constant K	−465 GPa (for σ_x) 381 GPa (for τ_{xy})
X-ray beam size $2\zeta_0$	2mm in diameter
Residual stress σ_x, σ_y	−450MPa equi-biaxial stress

試料にはみがき棒鋼の丸棒 (JIS G 3108 に規定する鋼材から製造された JIS G 3123, SGD400-D, 直径 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20mm, 長さ約 100mm) を用いた。表面はガラスビーズでブラスト処理した。一定の残留応力を均一に付与して、形状以外の影響因子を排除するためである。ただし、直径 3, 4, 5mm の試料については、受け入れままの状態では軸方向応力測定時の $\sin^2\psi$ 線図にややうねりが見られたことから、アルゴン雰囲気中で 600 °C・1 時間の焼きなましをした後に前記ブラスト処理をした。

$\sin^2\psi$ 法での測定には、(株) リガクの X 線応力測定装置 AutoMATE を使用した。 $\sin^2\psi$ 法を曲面に適用した場合の現象については報告がある^{4)~7)}。しかしここでは、実用性の観点および $\cos \alpha$ 法による測定結果との比較を容易にする観点から、先行研究^{4)~7)} のようにマスクにより照射寸法を定めるのではなく、コリメータにより照射寸法を定めて測定を行い、コリメータ・サイズを様々に変えて、円周方向応力 (σ'_x) は側傾法で、軸方向応力 (σ'_y) は並傾法で測定した。なお、この章で用いる応力成分の表記 (σ'_x 等) は、Fig. 3, Fig. 4 および Fig. 9 に図示した応力成分と対応しており、Fig. 1 に示す座標系とは関係しない。コリメータ・サイズを X 線ビームサイズとみなした。

Table 2 Conditions of the X-ray stress measurement.
(a) $\cos \alpha$ method

X-ray stress analyzer	μ -X360n (Pulstec)
X-ray tube	Cr
Tube voltage, current	30 kV, 1 mA
Diffraction	α Fe211
Detector	Imaging plate
Peak determination	Lorentz approximation
Incident angle	35 deg
Work distance	39 mm
Stress constant	−465 GPa (for σ'_x, σ'_y) 381 GPa (for τ'_{xy}, τ'_{yx})
X-ray beam size	2mm in diameter

(b) $\sin^2\psi$ method

X-ray stress analyzer	AutoMATE (Rigaku)
X-ray tube, filter	Cr, V filter
Tube voltage, current	30 ~ 40 kV, 10 ~ 30 mA
Diffraction	α Fe211
Detector	Linear PSPC (Span: 100 mm, 20 deg)
Scanning method	Side-inclination, fixed η (σ'_x) Iso-inclination, fixed ψ_0 (σ'_y)
Peak determination	Half-value breadth method
Correction	Lorentz, polarization, absorption
ψ angle	0, 15.5, 22.2, 27.6 , 32.3, 36.7, 40.9, 45 deg
Stress constant	−318 MPa/deg
Collimator	0.3, 0.5, 1, 2, 4 mm in diameter

Fig. 3 Relations between the residual stresses of round steel bars and the size of collimator measured by $\sin^2\psi$ method.

$\cos\alpha$ 法での測定には、パルステック工業（株）のポータブル型 X 線残留応力測定装置 μ -X360n を使用した。コリメータは $\phi 1\text{mm}$ であり、照射位置でのビームサイズは約 $\phi 2\text{mm}$ である。コリメータの交換は容易でないため、一定照射寸法のもとで直径の異なる丸棒の応力測定を行い、デバイリング、 $\cos\alpha$ 線図および残留応力値を調べた。一本の試料につき一回の測定で円周方向応力 (σ'_x) とせん断応力 (τ'_{yx}) を測定した後、試料の向きを 90° 変えて軸方向応力 (σ'_y) とせん断応力 (τ'_{xy}) を測定した。試料のセッティング位置は、装置が備えるレーザーポインターおよびカメラ画像を利用して目視により定めた。ただし、小径試料の円周方向応力を測定する際のセッティングにおいては、斜め照射されたレーザー光の一部が試料から外れて照射中心が判別しづらくなるため、以下の手順で行った。(1) 高さ調整ステージ上に $\phi 10\text{mm}$ の試料を置き、そのステージごと測定装置内にセットする。(2) そのセッティングのまま試料のみ小径のものに置き換える。(3) ステージを上昇させる（必要な上昇量は、AutoMATE に備え付けられた CCD カメラを利用してあらかじめ把握しておいた）。

いずれの方法の測定においても、フェライト鋼に対する通常の X 線応力測定条件を適用した。Table 2 に X 線応力測定条件を示す。

3.2 $\sin^2\psi$ 法の実験結果

Fig. 3 に $\sin^2\psi$ 法で測定した場合の試料直径と残留応力測定値との関係を示す。いずれの丸棒のいずれの応力成分も、コリメータを小さくするとともに残留応力の大きさは大きくなり収束する傾向を示した。収束する値は丸棒によってばらつきがあり、円周方向応力はおおよそ $-490 \sim -420\text{MPa}$ の範囲に、軸方向応力はおおよそ $-440 \sim -380\text{MPa}$ の範囲にあった。このばらつきは、材料強度やプラスト強度のばらつきに起因すると考えられる。

Fig. 4 Relations between the residual stresses of round steel bars and the diameter of the specimens measured by $\cos\alpha$ method with a collimator $\phi 1\text{mm}$ (X-ray beam size: $\phi 2\text{mm}$).

直径 5mm 以下の試料では軸方向応力と円周方向応力との間に $40 \sim 80\text{MPa}$ の差が認められた。軸方向と 45° をなす方向の残留応力を測定したところ、円周方向応力と軸方向応力の平均値から大きくは外れていなかったことから、円周方向および軸方向は主応力方向に近いと考えられた。直径 5mm 超の試料では円周方向応力と軸方向応力にほとんど差がなく、おおむね等二軸応力状態にあることがわかった。

3.3 $\cos\alpha$ 法の実験結果および解析結果

Fig. 4 に $\cos\alpha$ 法で測定した場合の試料直径と残留応力測定値との関係を示す。Fig. 4 によれば、一定の X 線ビームサイズの下では、試料直径が小さくなるとともに垂直応力の測定値は小さくなる傾向を示している。68.3%信頼限界値はすべて 10MPa 未満であった。

せん断応力測定値の挙動は測定方向により異なる傾向を示している。すなわち、円周方向応力測定の配置で得たせん断応力値は試料直径によらずほぼ 0MPa であるが、軸方向応力測定の配置で得たそれは 50MPa 程度あり、しかも試料直径が小さくなるとともにやや大きくなる傾向が認められる。前節で述べたように、小径試料では軸方向応力と円周方向応力との間に差があることから、このせん断応力測定値は軸方向に実在するせん断残留応力であると解釈することもできる。しかし、この解釈は以下の三つの事実と整合しない—(1) 円周方向および軸方向は主応力方向からそれほどずれていないと考えられること、(2) 直交二方向のせん断応力測定値が異なり、共役性が満たされていないこと、(3) ほぼ等二軸応力状態にある大径試料でもせん断応力が 0MPa でないこと。よって、このせん断残留応力値を軸方向に実在するせん断残留応力であるとする解釈は妥当でなく、試料形状に影響を受けたものと推察される。せん断応力測定値の挙動については今後の検討課題とし、以降では垂直応力についての

Fig. 5 Debye rings for the circumferential stress measurement with a collimator $\phi 1\text{mm}$ (X-ray beam size: $\phi 2\text{mm}$).

Fig. 6 Debye rings for the axial stress measurement with a collimator $\phi 1\text{mm}$ (X-ray beam size: $\phi 2\text{mm}$).

み検討する。

Fig. 5 に円周方向応力測定におけるデバイリングの実験結果と解析結果を、Fig. 6 に軸方向応力測定におけるそれをそれぞれ示す。半径は無ひずみ状態のデバイリング半径 R_0 で規格化した無次元量である。実験によるデバイリングについては、出力された回折角に試料検出器間距離 39mm を適用して半径を求めた。

デバイリングは、等二軸応力状態にある平面の場合には、若干横長のほぼ真円で中心が上方にシフトしたものとなる。しかし Fig. 5(a) によれば、円筒面の場合には、デバイリングがやや縦長になる傾向と、丸棒直径が小さくなるとともに中心からの偏差が減少する傾向が認められる。同図 (b) の解析結果と比較すると、デバイリング全体の大きさが異なっているが、前記傾向は共通している。一方、Fig. 6 によれば、軸方向応力測定ではこれらの特徴はあまり現れていない。むしろ、デバイリングが縦に短くなる傾向が認められ、解析結果とも一致している。軸方向応力測定における実験結果のデバイリングが左右非対称になっている点は解析結果と異なっている。非対称はせん断応力の存在を意味しているが、前述のとおり、せん断応力の存在のみでは説明することができない。これは今後の検討課題である。

Fig. 7 に円周方向応力測定における $\cos \alpha$ 線図の実験結果と解析結果を、Fig. 8 に軸方向応力測定におけるそれをそれぞれ示す。Fig. 7 (a) によれば、円周方向応力の場合、いずれの直径の丸棒においても $\cos \alpha$ 線図には

Fig. 7 $\cos \alpha$ diagrams for the circumferential stress measurement with a collimator $\phi 1\text{mm}$ (X-ray beam size: $\phi 2\text{mm}$).

Fig. 8 $\cos \alpha$ diagrams for the axial stress measurement with a collimator $\phi 1\text{mm}$ (X-ray beam size: $\phi 2\text{mm}$).

周期的なうねりが認められる。また、直径が小さくなるとともに勾配が減少している。一方、同図 (b) の解析結果によれば、周期的うねりについては相違するが、直径が小さくなるとともに勾配が減少する特徴は共通している。実験による直径 3mm の試料に対する $\cos \alpha$ 線図の勾配が、解析結果のそれと比較して大きく減少しているのは、Fig. 3 (a) に示したとおり、直径 3mm の試料に実在する残留応力が直径 3mm および 4mm の試料のそれらに比べて小さいことが一因と考えられる。なお、うねりは平坦試料の測定においても見られることから、円筒面に起因した特徴ではない。

Fig. 8 によれば、軸方向応力の場合、丸棒直径の変化に伴う勾配の変化がわずかである点を除いて、上述の円周方向応力測定で見られた特徴が共通に認められる。

Fig. 9 に残留応力測定値と照射寸法との関係を示す。ここでは、丸棒直径や実在する残留応力が異なる複数の測定値を共通の指標で整理するため、照射寸法と残留応

Fig. 9 Relations between the normalized size of irradiation area (X-ray beam size / diameter of the specimen) and the normalized residual stress (measured stress / actual stress).

力測定値を無次元化した。無次元化照射寸法は、X線ビームサイズを円柱直径で除した量として定義した。残留応力測定値については、コリメータ直径が丸棒直径のおよそ1/10に達したときの測定値を「実在する残留応力」とみなし、この値を用いて無次元化した。 $\cos\alpha$ 法による応力測定値についても、 $\sin^2\psi$ 法で測定した「実在する残留応力」で無次元化した。Fig. 9は、このようにして求めた無次元化照射寸法と無次元化応力との関係の実験結果と解析結果である。

Fig. 9によれば、無次元化照射寸法が0.3を超えるあたりから無次元化応力は減少し、円周方向応力測定の場合に顕著である。一方、軸方向応力の測定値も無次元化照射寸法に伴い減少するが、その程度は円周方向応力の場合より小さい。これらの減少傾向に関して、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法との間に顕著な相違は認められない。また、解析結果による曲線は実験結果とおおむね一致している。よって、用いた解析モデルは妥当であると考えられる。

Fig. 9より、曲面の影響を回避し得る照射寸法は、直径の1/3（曲率半径の2/3）以下であると考えられる。また、応力測定値に含まれる曲面起因誤差は、Fig. 9の曲線から概略で推定可能であると考えられるが、今回得られた結果が等二軸圧縮応力状態以外の応力状態に対しても成立するかどうかを検討する必要があると考える。これに加えて、第3.3節で示したせん断応力測定値の挙動についても検討が必要であり、今後の検討課題としたい。

4 結 論

1. デバイリングは偏平になり、円柱直径に対するX線ビームサイズが大きくなるとともに中心からの偏差は小さくなる。これらの特徴は円周方向応力測定の場合に顕著である。
2. $\cos\alpha$ 線図の勾配は、円柱直径に対するX線ビームサイズが大きくなるとともに減少する。この傾向は円周方向応力測定の場合に顕著である。極端な非線形性は生じない。
3. 応力測定値の大きさは、円柱直径に対するX線ビームサイズが大きくなるとともに減少する。この傾向は円周方向応力測定の場合に顕著である。曲面の影響を回避するにはコリメーター・サイズを試料直径の1/3以下にすべきである。
4. 測定面の湾曲に起因する応力測定誤差に関して、 $\cos\alpha$ 法と $\sin^2\psi$ 法との間に顕著な差はない。

本研究の遂行にあたり、パルステック工業（株）のご好意により同社の測定装置を利用させていただいた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) S. Taira, K. Tanaka, and T. Yamasaki, "A method of X-ray microbeam measurement of local stress and its application to fatigue crack growth problems", Japan Society of Materials Science, Journal, Vol. 27, No. 294, pp. 251–256 (1978).
- 2) T. Sasaki and Y. Hirose, "Single incidence X-ray stress measurement for all plane stress components using imaging plate of two-dimensional X-ray detector", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 44, No. 504, pp. 1138–1143 (1995).
- 3) The Society of Materials Science, Japan, "Standard method for X-ray stress measurement", pp. 3–8 (2005).
- 4) T. Goto and T. Konishi, "Effect of surface curvature on stress measurement by X-ray side inclination method", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 34, pp. 519–524 (1985).
- 5) B. Dionnet, M. François, J.M. Sprauel, and F. Nardou, "The influence of cylindrical geometry on X-ray stress tensor analysis II, applications", Journal of Applied Crystallography, Vol. 32, pp. 883–891 (1999).
- 6) T. Oguri, Study on X-ray Residual Stress Analysis of Curved Surfaces, PhD thesis, Osaka City University (2003).
- 7) T. Oguri, K. Murata, and K. Mizutani, "An application of the X-ray stress measurement to curved surface – residual stress of cylindrical surface –", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 49, No. 6, pp. 645–650 (2000).