擬似 ψ 角変化法による狭隘部曲面の X 線残留応力測定[†] —ラック歯元部の歯たけ方向応力測定—

小 栗 泰 造* 村 田 一 夫** 山 口 勝 己*

X-Ray Residual Stress Measurement of Cylindrical Surface at Narrow Part by Pseudo- ψ Angle Changing Method — Residual Stress in the Tooth Depth Direction at Tooth Root of Rack —

by

Taizo OGURI*, Kazuo MURATA** and Katsumi YAMAGUCHI*

An X-ray stress measuring technique —pseudo- ψ angle changing method— is proposed to measure circumferential stress on a concave cylindrical surface at a narrow part. To avoid X-ray interception by a side wall, X-ray irradiation and detection are conducted in a plane parallel to the plane including the central axis of the cylindrical surface (the configuration of axial stress measurement by the iso-inclination method), and the diffraction angle at $\psi=0^\circ$ is measured on an inclined surface (part of the cylindrical surface). This measurement is conducted on five or more irradiation positions changed along the circumference of the cylindrical surface by moving a measured object, keeping the attitude of the object fixed, in the direction of the normal of the plane including the X-ray path. The position change causes the shift of diffraction peak since the angle between the normal of the irradiated area and incident X-rays changes according to the position, i.e. the position change is equivalent to the change of ψ angle in the conventional $\sin^2\psi$ method. The circumferential stress is obtained from the relation between the irradiation position and the diffraction angle at $\psi=0^\circ$. To examine the validity of pseudo- ψ angle changing method, residual stress in the tooth depth direction at the tooth root of a rack was measured using this method and the conventional method respectively. The measured values of the stress by two different methods were in good agreement.

Key words : X-ray stress measurement, Curved surface, Concave cylindrical surface, Circumferential stress, Diffraction, Non-destructive inspection, Residual stress, Rack, Tooth root, Tooth depth direction

1 緒 論

$\sin^2\psi$ 法を基礎とする X 線応力測定法¹⁾ (以下「従来法」という) は、非破壊残留応力測定手法として広く利用されているが、この方法で歯車の歯元部のような狭隘部に位置する曲面の応力測定を行うことは一般に困難である。これは、(a) 測定対象物自体が X 線経路を遮断し、十分に大きい X 線入射角を設定できないこと、および (b) 測定領域が曲面であることに由来する応力測定誤差が生じることに起因する。^{2)~5)}

問題 (a) を解決する方法としては、 φ - $\sin^2\psi$ 法⁶⁾と Larsson 法⁷⁾が提案されている。これらは、 φ 回転あるいは無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 の値を利用することにより、入射角が制限される方向の応力を推定する方法である。ただし、いずれの方法も、従来法と同様に測定領域が平坦であることを前提条件としている。問題 (b) に関しては、著者らが円柱状曲面および球状曲面を従来法で測定する場合について検討しており、曲面形状に起因した応力測定誤差の推定法を提案している。^{5), 8)~10)}

問題 (a) および (b) が併存する状況を取り扱った研究としては、著者らによる照射面積変化法¹¹⁾および表面応力分布推定法¹²⁾がある。これらは、凹状円筒面の円周方向応力もしくはその円周方向分布の測定を目的とした応力測定法であり、その原理は、X 線経路の遮断が生じにくい並傾法・軸方向応力測定の配置の下で X 線照射寸法もしくは照射位置を円周方向に変化させた際に、回折ピークがこれらの変化量および円筒部の応力状態に依存してシフトするという現象に基づいている。しかしながら、これらの手法を適用する場合には、照射寸法および照射位置の変化は、ゴニオメーターの ψ 回転に関する角度基準軸 (以下「 ψ 参照軸」という) に関して対称であることが必要であり、さらに、その変化範囲内において曲面形状が ψ 参照軸に関して対称でなくてはならない。このため、開口寸法に比して深さの大きい溝 (以下「深溝」という) の側壁に近い隅部のような部位への適用は困難であった。例えば、ラック歯元部の歯たけ方向残留応力 (歯の曲げ疲労強度に大きな影響を及ぼす) を測定する場

[†] 原稿受理 平成 17 年 3 月 7 日 Received Mar. 7, 2005

* 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 和泉市あゆみ野, Tech. Res. Inst. of Osaka Pref., Ayumino, Izumi, 594-1157

** 正 会 員 東大阪市立産業技術支援センター 〒577-0065 東大阪市高井田中, Industrial Tech. Support Inst. of Higashi Osaka City, Takaida-naka, Higashiosaka, 577-0065

合, 上述の条件を満たすためには, 歯元部表面の法線が ψ 参照軸と一致するようにラックを傾斜させなくてはならないが, 傾斜に伴いラックと応力測定装置との干渉や隣接歯による X 線経路の遮断などが起こり得るためである。

そこで, 本研究では, 深溝底の隅部の凹状円筒面に適用可能な円周方向応力測定法を提案する。この方法では, X 線の照射および検出は, 溝側壁による X 線経路遮断を防ぐため, 溝底隅部の凹状円筒面の中心軸を含む平面に平行な平面内で行うこととし (並傾法による軸方向応力測定の配置), 円筒面の一部を構成する傾斜面において $\psi = 0\text{deg}$ の回折角を測定する。その測定は, 円筒面の複数の位置について行うこととし, 照射位置は, 被測定物の姿勢を一定に保ったまま, 被測定物を X 線経路面の法線方向に逐次移動させることにより変化させる。このようにして得た照射位置と測定回折角との関係から円筒面の円周方向応力を求める。

本手法の本質は, 照射位置の変化が, 従来法における ψ 角の変化と実質的に同一の効果を生じさせることにある。すなわち, 被測定物の姿勢を一定に保ったまま被測定物を平行移動させて照射位置を円周方向に沿って変化させれば, 照射位置の表面法線と入射 X 線とのなす角が変化することとなるから, ゴニオメーターや被測定物を回転させることなく, 実質的に ψ 角を変化させることができることとなる。このような特徴に基づき, 本手法を「擬似 ψ 角変化法」と呼ぶものとする。

以下において, 擬似 ψ 角変化法の理論を示し, ラック歯元部への適用事例を通じて本手法の妥当性を検証する。

2 擬似 ψ 角変化法

狭隘部円筒面の X 線応力測定を可能とする擬似 ψ 角変化法の理論について述べる。まず, 前述の X 線経路条件下で, 円筒表面各位置において測定される $\psi = 0\text{deg}$ 時回折角ならびに軸方向応力, および照射位置, 照射寸法ならびに実在する真の応力等の諸量間の関係を理論的に導く。この理論式から, 照射位置を変化させることにより円周方向応力が求められることを示す。

2・1 理論モデル

Fig. 1 に, 半円筒 (内径 ρ , 厚さ t) 内面の傾斜面における, 従来法と並傾法・ ψ 一定法による軸方向応力測定の模式図を示す。Fig. 1 に示すように直角座標系 (x, y, z) を定める。原点 O は円柱の中心軸上にあり, z 軸は円柱の中心軸, y 軸は ψ 参照軸に平行とする。また, 原点が O で, y 軸を $\omega = 0\text{deg}$ とする円柱座標系 (r, ω, z) を定める。 ω の正の方向は, z 軸方向に進む右ねじが回転する方向とする。

Fig. 1 に示すように, 円筒面の角度位置 $\omega = \Omega$ の傾斜面に平行 X 線ビーム [矩形形状 $(2\zeta \times 2\zeta)$] を yz 平面に平行な平面内で照射する状況を考える。照射領域は, 円弧 P_1P_2 の範囲とする (yz 面から角度 ω_1 と ω_2 の範囲)。X 線ビームの中心線と照射面との交点を P とする。X 線照射焦点 (ゴニオメーター中心) は点 P に合わせるものとする。

ここで本モデルでの解析を進めるにあたって下記のように仮定する。

- (1) X 線ビームサイズは測定面の曲率半径ならびにゴニオメーター中心と検出器間の距離に比べて十分に小さく, 照射面における高低差 (h_1, h_2) によるピークシフト (並進効果¹³⁾) は無視できるものとする。
- (2) 円筒面には, 一様な円周方向応力 σ_c および軸方向応力 σ_A が存在するとし, X 線侵入深さ内に半径方向応力は存在しないものとする。
- (3) 半円筒内の位置 (r, ω, z) にある微小体積 $dV (dV = r dr d\omega dz)$ の中には, 多数の結晶粒がランダムな方位で存在するとし, $\sin^2\psi$ 法が適用できるものとする。

2・2 傾斜面での X 線回折

体積要素 dV における X 線回折を考える。Fig. 1 に示すように, dV における入射 X 線と回折 X 線が z 軸と角度 γ_A および β_A でそれぞれ交わるとすれば, 回折 X 線の強度 dI_A は材料内での減衰を考慮して次式で表わされる。

Fig. 1. Schematic illustrations of the axial stress measurement on an inclined area of a cylindrical surface by the iso-inclination method ($\psi = 0\text{deg}$ for pseudo- ψ angle changing method).

$$dI_A = a_A b_A I_0 \sin \gamma_A \cos \omega \exp(-\mu L_A) r dr d\omega dz \quad (1)$$

$$L_A = \left(\frac{1}{\sin \gamma_A} + \frac{1}{\sin \beta_A} \right) (r \cos \omega - \sqrt{\rho^2 - r^2 \sin^2 \omega})$$

$$\gamma_A = \theta_A + \psi, \quad \beta_A = \theta_A - \psi$$

ここで、 a_A は回折に寄与する結晶粒の体積比、 b_A は単位体積あたりの回折比、 I_0 は単位面積あたりの入射 X 線強度、 μ は線吸収係数、 L_A は試料表面から体積要素 dV までの X 線の経路長である。 θ_A は dV での Bragg 角であり、次式により与えられる。¹²⁾

$$2\theta_A = \frac{\sigma_A - \sigma_C \sin^2 \omega}{K} \sin^2 \psi + 2\theta_0$$

$$- \frac{\nu}{K(1+\nu)} (\sigma_A + \sigma_C) + \frac{\sigma_C}{K} \sin^2 \omega \quad (2)$$

ここで、 K は応力定数、 $2\theta_0$ は無ひずみ状態の回折角、 ν は Poisson 比である。

式(1)および式(2)は、体積要素における回折角および回折強度が、いずれも体積要素の位置 (角度 ω) によって異なることを示している。したがって、測定される回折角 $\langle 2\theta_A \rangle$ は、次式で与えられるように、 $2\theta_A$ の回折強度 dI_A に関する照射領域全体にわたっての重みつき平均値となる。

$$\langle 2\theta_A \rangle = \frac{\int_V 2\theta_A dI_A}{\int_V dI_A} = F \sin^2 \psi + G - H + 2\theta_0 \quad (3)$$

$$V = \{(x, y, z); \rho^2 \leq x^2 + y^2 \leq (\rho + \tau)^2, \\ |x - \rho \sin \Omega| \leq \zeta, |z| \leq \zeta / \cos(\psi - \eta)\}$$

$$F = \int_V (\sigma_A - \sigma_C \sin^2 \omega) dI_A / \left(K \int_V dI_A \right)$$

$$G = \int_V \sigma_C \sin^2 \omega dI_A / \left(K \int_V dI_A \right)$$

$$H = \frac{\nu}{K(1+\nu)} \int_V (\sigma_A + \sigma_C) dI_A / \int_V dI_A$$

ここで、 V は円筒内部を含む全照射領域を表す。

式(3)において、 F 、 G そして H はいずれも、 dI_A に含まれている γ_A および β_A に起因する ψ 依存性を有しているが、その依存性は小さく、 $\langle 2\theta_A \rangle$ は $\sin^2 \psi$ に関して線形とみなすことができる。すなわち、 $F \cdot K$ は傾斜面での軸方向応力を意味し、 $G - H + 2\theta_0$ は傾斜面での $\psi = 0$ deg 時の回折角を意味するとみなすことができる。

2・3 円周方向応力

式(3)において、 $\psi = 0$ deg 時の回折角に注目する。ただし、回折角変化の特徴を抽出するために、最も回折強度の強い表面のみを考慮するものとする。 a_A 、 b_A および I_0 は定数とみなす。また、回折角の変化量は、一般に無ひずみ状態の回折角に比べてかなり小さいことに基づき、次の近似を導入する。

$$\sin \gamma_A \approx \sin(\theta_0 + \psi), \quad \sin \beta_A \approx \sin(\theta_0 - \psi) \quad (4)$$

これらの近似により、式(3)を次のように変形させる。

$$\langle 2\theta_A \rangle_{\psi=0^\circ} \approx G - H + 2\theta_0$$

$$= \frac{a_A b_A I_0 \rho \sin(\theta_0 + \psi) \sigma_C \int_{\omega_1}^{\omega_2} \sin^2 \omega \cos \omega d\omega}{K a_A b_A I_0 \rho \sin(\theta_0 + \psi) \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \omega d\omega}$$

$$- \frac{\nu}{K(1+\nu)} (\sigma_A + \sigma_C) + 2\theta_0$$

$$= \frac{\sigma_C}{K} \sin^2 \Omega + \frac{\sigma_C}{3K} \left(\frac{\zeta}{\rho} \right)^2$$

$$- \frac{\nu}{K(1+\nu)} (\sigma_A + \sigma_C) + 2\theta_0 \quad (5)$$

$$\omega_1 = \sin^{-1} \left(\sin \Omega - \frac{\zeta}{\rho} \right), \quad \omega_2 = \sin^{-1} \left(\sin \Omega + \frac{\zeta}{\rho} \right)$$

式(5)の第1項および第2項は、それぞれ照射位置および X 線ビームサイズと円周方向応力との関係を表している。すなわち、照射位置もしくは X 線ビームサイズの変化により回折ピークがシフトし、そのシフト量が円周方向応力に比例することを示している。第3項および第4項は定数である。したがって、式(5)より、照射位置または X 線ビームサイズと $\psi = 0$ deg 時回折角との関係を実測すれば、円周方向応力を求めることができる。なお、式(5)から明らかなように、照射位置を変化させることによって生じる回折ピークシフト量の方が、X 線ビームサイズの変化によって生じるそれよりも大きい (応力検出感度が高い)。

擬似 ψ 角変化法は第1項を利用する方法 (照射位置を変化させる方法) である。すなわち、式(5)の両辺を $\sin^2 \Omega$ で偏微分することにより次式を得る。

$$\sigma_C = K \frac{\partial \langle 2\theta_A \rangle}{\partial \sin^2 \Omega} \Big|_{\psi=0^\circ} \quad (6)$$

式(6)は $\sin^2 \psi$ 法の応力算出式ときわめて類似しており、照射位置 (Ω) の変化が従来法における ψ 角の変化と対応付けられることを示している。式(6)を用いれば、X 線入射角を円周方向に変化させることなく並傾法・軸方向応力測定の配置で、照射位置の変化に伴って生じる $\psi = 0$ deg 時回折角の変化から円周方向応力 σ_C を求めることができる。

3 実 験

擬似 ψ 角変化法の妥当性を検証するため、ラック歯元曲面部の歯たけ方向残留応力を擬似 ψ 角変化法および従来法 (通常の側傾法・ $\sin^2 \psi$ 法) で測定し、両者を比較した。

3・1 実験方法

試料には、JIS B 1701 標準歯形のラック (モジュール: 8, 材質: S45C) を用いた。ラックは、従来法により歯たけ方向残留応力の基準値測定を行うため、Fig. 2 に示すように、一歯を切り出して試料とした。

試料に均一な表面残留応力を付与すべく、焼きなましおよびサンドブラスト処理を行った。Fig. 3 に、サンドブラスト処理した歯元部における歯幅方向残留応力および歯たけ方向残留応力の分布状態を示す (Ω は Fig. 2 において定義された角度である)。なお、分布状態の測定は

Fig. 2. Schematic illustrations of rack's shape and the X-ray path in the stress measurement in the tooth depth direction by pseudo- ψ angle changing method. P_0 : the middle point of the circular arc, s : the amount of step movement, $l = 7.12\text{mm}$ (actual size), 6.94mm (ideal size).

Fig. 3. Distributions of residual stresses in the region of tooth root of the rack (Ω is the angle defined in Fig. 2).

従来法によるものとし、測定面法線が ψ 参照軸と一致するようにラックの姿勢を適宜調整した上で、歯幅方向残留応力については並傾法で、歯たけ方向残留応力については側傾法でそれぞれ3回測定し平均をとった。コリメーターは $\phi 0.3\text{mm}$ を使用し、揺動は行わなかった。Fig. 3によれば、歯たけ方向残留応力は -417MPa から -454MPa の範囲で、歯幅方向残留応力は -430MPa から -461MPa の範囲で分布している。

形状寸法については、輪郭形状測定機（フォームトレサ CS-5000, ミットヨ）を用いて測定した。残留応力の測定には、直線型 PSPC (Position-Sensitive Proportional Counter) を備えた微小部 X 線応力測定装置 (PSPC/RSF システム, 理学電機) を用いた。CrK α 特性 X 線による αFe211 回折を測定し、半価幅法により回折角を求めた。試料のセッティングにあたっては、装置に備え付けられた倍率 40 倍の光学顕微鏡を用いた。

Fig. 2 に示すように、ラック形状に対してピッチ線方向に x 軸、歯幅方向に y 軸、それらと直交する方向を z 軸とする直角座標系を定める。擬似 ψ 角変化法においては、X 線経路が yz 平面に平行な面内に限定されるよう並傾法・歯幅方向応力測定の配置とし、 $\psi = 0\text{deg}$ 時の回折角を測定するものとする。測定位置 P (z 軸からの角度 Ω) は、歯のエッジ (歯先稜) を基準位置として実測寸法から求めた P_0 点 (円弧の中央, z 軸からの角度 35deg) を原点とし、 x 軸上で歯先側 4 点、歯底側 3 点の合計 8 点を定めた (P 点の x 座標を s とする)。 P 点は適宜試料を移動させることによりゴニオメーターの回転軸上に合わせた。各測定点への試料の移動は、マイクロメーターヘッドを備えた微動ステージにより行った。X 線ビームサイズについては、隣り合う測定点で X 線ビームが重ならないように、また並進効果によるピークシフトが無視できるように直径 0.15mm のコリメーターを用いた。この測定条件の場合 (曲率半径 3.04mm , X 線ビームサイズ 0.15mm)、曲面に起因する応力測定誤差は無視することができ、照射面は平坦とみなし得る。^{5), 14)} 照射寸法がきわめて小さいことによる回折強度および回折に關与する結晶粒数の低下は、積算時間の増加 (Fixed time 900sec) と y 軸空間揺動 (振幅 15mm , 周期 8sec) により補った。

擬似 ψ 角変化法による測定値を検証するため、従来法である側傾法・ $\sin^2\psi$ 法により歯たけ方向残留応力の基準値を測定した。測定においては、 P_0 点における接平面の法線が ψ 参照軸と平行になるようにラックを傾斜させて P_0 点における歯たけ方向残留応力を測定した。測定 ψ 角は、 $2\theta - \sin^2\psi$ 線図において $\sin^2\psi$ の値がほぼ等間隔となるような 5 種を選んだ。ビーム径および揺動条件は擬似 ψ 角変化法の場合と同じとした。

両測定法ともに測定を 3 回行い、それぞれ平均を取った。X 線応力測定条件を Table I に示す。

3・2 実験結果

Fig. 4 に、擬似 ψ 角変化法で測定した $2\theta_{\psi=0} - \sin^2\Omega$ 線図と従来法で測定した $2\theta - \sin^2\psi$ 線図を示す。両線図ともに良好な線形性を示しており、空間揺動の効果が現れているものと思われる。なお、回折プロファイルに関しては、 ψ 角および Ω 角の変化にともなう回折強度の著しい変動はなく、半価幅は $\Omega < 45\text{deg}$ では約 2.5deg , $\Omega > 45\text{deg}$ では Ω 角とともに広がる傾向を示し、最大で約 3deg であった。

両線図から式 (6) および $\sin^2\psi$ 法の応力算出式を用いて、歯たけ方向残留応力値をそれぞれ算出した。Fig. 5 に、両測定法により測定された歯たけ方向残留応力値を示す。擬似 ψ 角変化法および側傾法による測定値の平均値はそれぞれ 412MPa および 428MPa である。両測定法ともに測定値の再現性は良く、3 回の繰り返し測定により評価されたばらつきは $\pm 15\text{MPa}$ 程度である。両測定値はよく一致しており、擬似 ψ 角変化法の妥当性を示している。

Table I. Conditions for X-ray stress measurement.

Method	Pseudo- ψ angle changing	Conventional $\sin^2\psi$
Diffraction	CrK α , α Fe211	
Tube voltage, current	30 kV, 20 mA	
Detector	Linear PSPC (span: 100 mm, 20 deg)	
Scanning method	—————	Side-inclination, fixed η
Peak determination	Half-value breadth	
Correction	Lorentz, polarity, absorption $\mu = 95.05 \text{ mm}^{-1}$	
Ω angle	64.5, 55.1, 47.6, 41.0, 35.0, 29.4, 19.1, 4.6 deg	
	$s = -4\Delta, -3\Delta, -2\Delta, -\Delta, 0, \Delta, 3\Delta, 6\Delta, (\Delta = 0.25 \text{ mm})$	
ψ angle	0 deg	0, 20, 30, 38, 45 deg
Stress constant	-318 MPa/deg	
Collimator	0.15 mm in diameter	
Spatial oscillation	Amplitude 15 mm, period 8 sec	

Fig. 4. (a) $2\theta_{\psi=0}-\sin^2\Omega$ diagram and (b) $2\theta-\sin^2\psi$ diagram for the residual stress in the tooth depth direction at the tooth root of the rack.

4 考 察

擬似 ψ 角変化法の適用に際して留意すべき点について検討する。

4・1 形状寸法誤差と位置決め誤差

擬似 ψ 角変化法では、照射面の傾斜角 (Fig. 1 における Ω 角) を従来法でいう ψ 角とみなすため、応力測定値の確度は、傾斜角の確度に強く依存する。したがって、傾斜角度はその場実測することが望ましいが、本報で採

Fig. 5. Values of the compressive residual stress in the tooth depth direction at the tooth root of the rack measured by different two methods.

用したように、照射位置と形状寸法情報から間接的にこれを求めることも可能である。ただし、規格寸法をもとに測定位置を定める場合には、Fig. 2 に示すように、実物の形状寸法が規格値と若干異なっていることがあるため、照射面の傾斜角度を実際とは異なる角度として認識する可能性がある。また、実測形状寸法をもとに測定位置を定める場合であっても、基準位置の設定に際して誤差があれば、先と同様の結果を招くこととなる。例えば、本研究において採用したような、歯先稜を基準位置として利用する方法の場合では、歯先稜が有限の幅を有しているために、理論上の歯先稜線の位置を特定することが困難であり、基準位置の設定誤差を避けることができない (なお、本研究では、用いたラックの歯先稜の幅は、Fig. 2 における z 軸方向から見て約 0.06mm であり、これの中間位置を理論上の歯先稜線とみなした)。

そこで、擬似 ψ 角変化法による測定結果 (Fig. 4a) について、歯元中央部 P_0 点の設定誤差と測定応力値との関係を解析的に調べた。ただし、 P_0 点を起点とした各測定点 P への移動においては累積誤差は生じないものとした。

Fig. 6 に、 P_0 点の位置設定に際して +0.1mm (歯底側) ~ -0.1mm (歯先側) の設定誤差があるものと仮定した場合の $2\theta_{\psi=0}-\sin^2\Omega$ 線図を示す。Fig. 6 によれば、位置設定誤差がある場合でもプロット点の線形性につい

Fig. 6. $2\theta_{\psi=0}-\sin^2\Omega$ diagrams calculated for the case in which the positioning error of point P_0 is ranging from +0.1mm (bottom side) to -0.1mm (tip side) with respect to the experimental result shown in Fig. 4a.

ては顕著な低下は認められないが、回帰直線の勾配は変化している。式 (6) を用いて勾配から応力値をそれぞれ算出すれば、曲面内基準点 P_0 の位置設定誤差 ($\pm 0.1\text{mm}$) に起因した応力測定誤差はおおよそ $\pm 25\text{MPa}$ である。この値は、実用上許容し得る誤差量であると思われる。したがって、本実験では、位置設定は 0.1mm 程度の誤差までは許容されるであろう。当該ラックの歯先稜幅が 0.06mm であること、および位置決めがマイクロメータ (分解能 0.001mm) を用いてなされていることを考慮すれば第 3 章の実験は、許容位置設定誤差範囲内で実施されたと考えられる。

4・2 応力分布

擬似 ψ 角変化法では、従来法の適用条件である「深さ方向に変化しない平面応力状態」に加えて、測定範囲とする曲面の全体についてその表面の応力状態が一様であることを要求する。これらの条件が満たされない場合は $2\theta_{\psi=0}-\sin^2\Omega$ 線図は線形にならず、従来法において非線形な $2\theta-\sin^2\psi$ 線図が得られたときと同様、応力を算出することは困難となる。ただし、応力が円筒面の円周方向に沿ってのみ分布しているとみなせる場合で、X 線経路の遮蔽が回避できる範囲内については、著者らが考案した「曲面内多点測定による表面応力分布推定法¹²⁾」を用いることにより、円筒面上の応力分布を推定することが可能である。しかし、ラックでは既報の場合と異なり、角度 Ω の変化範囲が ψ 参照軸に関して非対称となり、また、一般には、その区間の両端での応力値は互いに異なると考えられることから、応力分布関数の近似には、既報のように周期関数を用いるより、むしろべき級数を用いることが望ましいであろう。

4・3 X 線ビームサイズと測定点数

X 線応力測定法標準では、 $0 \leq \sin^2\psi \leq 0.6$ ($0 \leq \psi \leq 50^\circ$) の範囲で 5 点以上測定することを推奨している。¹⁵⁾ 擬似 ψ 角変化法においてもこれに準拠し、上述の範囲で Ω 点を定める ($0 \leq \Omega \leq 50^\circ$) が望ましいと考えられる。

擬似 ψ 角変化法においてビームサイズを大きくすることは、従来法においては X 線入射角の揺動範囲を増すことに相当する。これは、Fig. 1 に示すように、X 線ビームが $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ の角度範囲に一括して照射されるため、照射領域内の各位置において X 線入射角が異なるからである。従来法で入射角揺動を行う場合、その角度範囲は一般に $\pm 5^\circ$ 程度であるから、擬似 ψ 角変化法においてもこの範囲内に収まるようビームサイズを選定することが望ましいと考えられる。例えば、曲率半径 3mm の円筒部であって、照射位置 (角度 Ω) を最大で 45° まで変化させる場合であれば、当該条件を満たす最大の X 線ビームサイズは約 0.4mm である。

5 結 論

(1) 円筒面の一部をなす傾斜面に対して並傾法・軸方向応力測定の配置で X 線ビームを照射する場合、測定される $\psi=0^\circ$ 時の回折角は、傾斜面の法線と X 線経路平面とがなす角および X 線ビームサイズに依存する。また、これらの量を変化させることによって生じる $\psi=0^\circ$ 時回折角のシフト量は、円筒面の円周方向応力に依存する。

(2) 結論 (1) に基づき、深溝底の隅部の凹状円筒面に適用可能な円周方向応力測定法「擬似 ψ 角変化法」を考案した。

この方法では、X 線の照射および検出は、溝側壁による X 線経路遮断を防ぐため、溝底隅部の凹状円筒面の中心軸を含む平面に平行な平面内で行う (並傾法による軸方向応力測定の配置)。測定する物理量は、円筒面 (曲率 ρ) の一部を構成する傾斜面 (傾斜角度 Ω) における $\psi=0^\circ$ の回折角 $\langle 2\theta_A \rangle_{\psi=0^\circ}$ である。その測定は、傾斜角度 Ω の値が異なる複数の位置について行うこととし、 Ω の変化は、被測定物の姿勢を一定に保ったまま照射位置を X 線経路面の法線方向に逐次移動させることにより行う。

擬似 ψ 角変化法による円周方向応力 σ_c の算出式は次のとおりである。

$$\sigma_c = K \frac{\partial \langle 2\theta_A \rangle}{\partial \sin^2 \Omega} \Big|_{\psi=0^\circ}$$

ここで、 K は応力定数である。

(3) ラック歯元部の歯たけ方向残留応力を擬似 ψ 角変化法および通常の $\sin^2\psi$ 法に基づく X 線応力測定法を用いてそれぞれ測定した結果、両測定値はほぼ一致した。

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会, “X 線応力測定法標準 一鉄鋼編一”, p.5 (2002).
- 2) B. Dionnet, M. François, J. M. Sprauel and F. Nardou, J. Appl. Cryst., **32**, 883 (1999).
- 3) 蒲池一義, 白岩俊男, 材料, **20**, 1240 (1971).

- 4) 小栗泰造, Study on X-ray Residual Stress Analysis of Curved Surfaces, 大阪市立大学博士論文, 7 (2003).
- 5) 小栗泰造, 村田一夫, 佐藤嘉洋, 日本材料学会第 141 回 X 線材料強度部門委員会研究討論会, 11 (2003).
- 6) 永井欣一, 岩田光正, 菊地恭三, 奥本勇二, 小林博栄, 溶接学会誌, **45**, 1037 (1976).
- 7) L. E. Larsson, Scand. J. Metallurgy, **3**, 119 (1974).
- 8) 小栗泰造, Study on X-ray Residual Stress Analysis of Curved Surfaces, 大阪市立大学博士論文, 25 (2003).
- 9) 小栗泰造, 村田一夫, 水谷勝己, 材料, **49**, 645 (2000).
- 10) T. Oguri, K. Murata, K. Mizutani and K. Uegami, Mat. Sci. ResearchInt., **8**, 74 (2002).
- 11) T. Oguri, K. Murata, K. Uegami and Y. Sato, J. Strain Analysis, **37**, 427 (2002).
- 12) 小栗泰造, 村田一夫, 佐藤嘉洋, 材料, **52**, 776 (2003).
- 13) D. N. French, J. Am. Ceram. Soc., **52**, 271 (1969).
- 14) 小栗泰造, Study on X-ray Residual Stress Analysis of Curved Surfaces, 大阪市立大学博士論文, 48 (2003).
- 15) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会, “X 線応力測定法標準 一鉄鋼編—”, p.9 (2002).