211

曲面のX線残留応力測定
— 擬似ψ角変化法によるラック歯元部の応力測定 —

阪府産技総研　○小栗 泰造，　村田 一夫，　山口 勝己

1 緒　言

歯車歯元部の残留応力は，歯の曲げ疲労強度に影響するため，これを把握しておくことは強度評価上重要である．しかし，最も一般的な非破壊残留応力測定法であるX線応力測定法を用いて，曲げ疲労強度に影響する歯元部の歯たけ方向残留応力を測定することは，測定領域が曲面であることに起因した応力値の測定誤差や，X線ﾋﾞｰﾑが隣接歯によって遮蔽されるなどの問題が生じるため，きわめて困難である．

本報では，凹状円筒面のような狭隘部曲面における円周方向応力の測定法を提案する．この方法では，X線経路の遮断を防ぐために，並傾法・軸方向応力測定の配置としてX線経路を中心軸を含む一平面に限定し，円周方向に沿って多点測定した曲面部のψ=0°時回折角から円周方向応力を求める．これは，曲面における測定位置の変化がψ角の変化と等価であることを利用しており，擬似ψ角変化法と称する．ここでは，ﾓﾃﾞﾙ材としてﾗｯｸを取り上げ，擬似ψ角変化法および通常の側傾法・$\sin^2\psi$法で歯元部の歯たけ方向応力を測定し，両者を比較した結果について報告する．

2 擬似ψ角変化法

2.1 理論モデル　Fig.1に，半円筒（内径ρ，厚さτ）内面の傾斜面において，並傾法・ψ一定法により軸方向応力測定を行う様子を表す模式図を示す．Fig.1に示すように，直交座標系(x, y, z)と円柱座標系(r, ω, z)を定める．X線ﾋﾞｰﾑは矩形形状（$2\zeta\times2\zeta$）とする．照射領域は，円周方向に円弧P_1P_2の範囲とする（yz面から角度ω_1とω_2の範囲）．X線ﾋﾞ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（ｺﾞﾆｵﾒｰﾀｰ中心）は点Pに合わせるものとする．X線ﾋﾞｰﾑ寸法は測定面の曲率半径に比べて十分に小さく，照射面における高低差(h_1, h_2)によるﾋﾟｰｸｼﾌﾄ（並進効果）は無視できるものとする．円筒内部には，半径方向および円周方向に変化しない円周方向応力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．半円筒内の位置(r,ω)にある微小体積dVの中には，多数の結晶粒がﾗﾝﾀﾞ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．

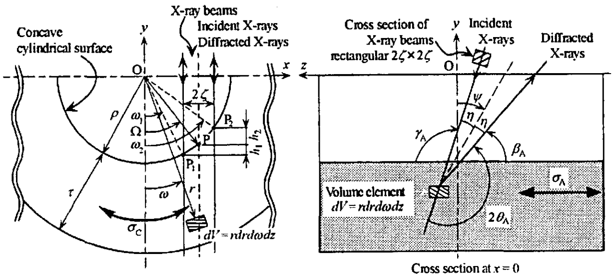

Fig.1. Schematic illustrations of the axial stress measurement on inclined area of a cylindrical surface by the iso-inclination method (ψ=0° for the pseudo ψ angle-changing method).

2.2 傾斜面でのX線回折　体積要素dVにおける入射X線と回折X線が，z軸と角度γ_A，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式(1)で表わされる．

$$dI_A = a_A b_A I_0 \sin\gamma_A \cos\omega \exp(-\mu L_A)\, r dr d\omega dz \quad (1)$$
$$L_A = \left(\frac{1}{\sin\gamma_A}+\frac{1}{\sin\beta_A}\right)\left(r\cos\omega-\sqrt{\rho^2-r^2\sin^2\omega}\right)$$
$$\gamma_A=\theta_A+\psi \quad , \quad \beta_A=\theta_A-\psi$$

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までの経路長である．θ_AはdVでのBragg角であり，式(2)により与えられる．

$$2\theta_A = \frac{\sigma_A-\sigma_C\sin^2\omega}{K}\sin^2\psi+2\theta_0 - \frac{\nu}{K(1+\nu)}(\sigma_A+\sigma_C)+\frac{\sigma_C}{K}\sin^2\omega \quad (2)$$

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．体積要素における回折角および回折強度は，いずれも体積要素の位置によって異なる．したがって，測定される回折角$\langle 2\theta_A\rangle$は，式(3)で与えられるように，$2\theta_A$の回折強度dI_Aに関する重みつき平均値となる．

$$\langle 2\theta_A\rangle = \frac{\int_V 2\theta_A dI_A}{\int_V dI_A} = F\sin^2\psi+G-H+2\theta_0 \quad (3)$$
$$V=\left\{(x,y,z);\rho^2\le x^2+y^2\le(\rho+\tau)^2,\ |x-\rho\sin\Omega|\le\zeta,\ |z|\le\zeta/\cos(\psi-\eta)\right\}$$
$$F=\int_V\left(\sigma_A-\sigma_C\sin^2\omega\right)dI_A\Big/\left(K\int_V dI_A\right)$$
$$G=\int_V\sigma_C\sin^2\omega\, dI_A\Big/\left(K\int_V dI_A\right)$$
$$H=\frac{\nu}{K(1+\nu)}\int_V(\sigma_A+\sigma_C)dI_A\Big/\int_V dI_A$$

ここで，Vは円筒内部を含む全照射領域を表す．

2.3 円周方向応力　式(3)において，ψ=0°時の回折角に注目する．ただし，回折角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．また，a_A，b_AおよびI_0は定数とみなすとともに，θ_Aに関しては，一般に回折角の変化量が無ひずみ状態の回折角に比べてかなり小さいことより，以下の近似を導入するものとする．

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

このとき，傾斜面におけるψ=0°時回折角は次式で表される．

$$\langle 2\theta_A\rangle_{\psi=0°,r=\rho} = \frac{\sigma_C}{K}\sin^2\Omega+\frac{\sigma_C}{3K}\left(\frac{\zeta}{\rho}\right)^2 + 2\theta_0-\frac{\nu}{K(1+\nu)}(\sigma_A+\sigma_C) \quad (5)$$

式(5)の第1項および第2項は，それぞれ，照射位置および照射寸法の変化による回折角ｼﾌﾄ量を表しており，そのｼﾌﾄ量はいずれも円周方向応力に依存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)から，照射位置または照射寸法とψ=0°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と考えられる．

式(5)によれば，第1項は第2項に比べて応力検出感度が高い．そこで，第1項に注目し，照射位置を変化させる方法を採用するものとすれば，円周方向応力σ_Cは，次式を用いて求められる．

$$\sigma_C = K \left.\frac{\partial\langle 2\theta_A\rangle}{\partial \sin^2\Omega}\right|_{\psi=0°, r=\rho} \tag{6}$$

3 実 験

3.1 実験方法 ﾗｯｸの歯元部歯たけ方向残留応力を擬似ψ角変化法および通常の側傾法・$\sin^2\psi$法で測定した．残留応力測定には，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．用いたﾗｯｸは，JIS-B1701に定められた標準ﾗｯｸ歯形で，ﾓｼﾞｭｰﾙ8，材質はS45Cである．形状寸法については，輪郭形状測定機（ﾌｫｰﾑﾄﾚｰｻ CS-5000，ﾐﾂﾄﾖ）を用いて測定した．Fig.2に示すように，通常の$\sin^2\psi$法による基準値測定を行うため，切り出した一歯を試料とした．試料は焼きなまし後ｻﾝﾄﾞﾌﾞﾗｽﾄ処理を行い，均一な表面残留応力を与えた．

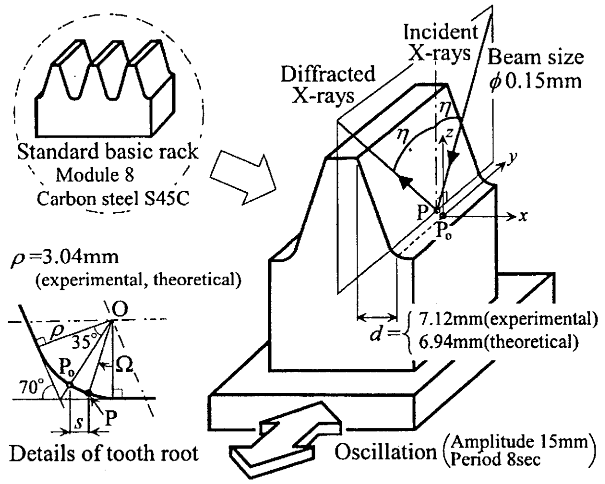

Fig.2. Schematic illustrations of rack's shape and the X-ray path in the pseudo ψ angle-changing method).

Table I. Conditions for X-ray stress measurement.

	Pseudo ψ angle-changing	Conventional $\sin^2\psi$
Diffraction	CrKα , αFe211	
Tube voltage, current	30 kV, 20 mA	
Detector	Linear PSPC, Span: 100 mm, 20 deg	
Scanning method	Iso-inclination , Fixed ψ_0	Side-inclination , Fixed η
Peak determination	Half value breadth	
Correction	Lorentz, Polarity, Absorption μ=95.05 mm^{-1}	
Ω or ψ angle	s = −4Δ, −3Δ, −2Δ, −Δ, 0, Δ, 3Δ, 6Δ (Δ=0.25mm) Ω = 64.5, 55.1, 47.6, 41.0, 35.0, 29.4, 19.1, 4.6 deg	ψ = 0, 20, 30, 38, 45 deg
Stress constant	−318 MPa/deg	
Collimator	ϕ0.15 mm	

擬似ψ角変化法では，Fig.2に示すように，X線経路をyz平面に制限し，ψ=0°の配置でX線を照射した．測定位置Pは，歯のｴｯｼﾞを基準位置として実測寸法から求めたP_0点（曲面部の中心）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．各測定点への試料の移動は，ﾏｲｸﾛﾒｰﾀｰﾍｯﾄﾞを備えた微動ｽﾃｰｼﾞにより行った．照射寸法は，隣り合う測定点でX線ﾋﾞｰﾑが重ならないように，また並進効果によるﾋﾟｰｸｼﾌﾄが無視できるようにϕ0.15mmのｺﾘﾒｰﾀｰを用いた．照射寸法がきわめて小さいことによる回折強度および巨視的等方性の低下は，積算時間の増加とy軸空間揺動（振幅15mm，周期8sec）により補った．通常の$\sin^2\psi$法では，P_0点における接平面が水平となるようにﾗｯｸを傾斜させて測定した．ﾋﾞｰﾑ径，揺動条件は先と同じである．Table Iに X線応力測定条件を示す．

3.2 実験結果 Fig.3およびFig.4に，二つの方法で測定した結果を示す．両者とも良好な線形性を示しており，応力値もほぼ一致している．

擬似ψ角変化法において，P_0点の位置設定精度を±0.1mmとした場合，これに起因した応力値測定誤差はおよそ±25MPaと算出された．

5 結 言

狭隘部にある曲面部のX線応力測定法―擬似ψ角変化法―を提案した．ﾗｯｸ歯元部の歯たけ方向応力測定に適用し，その妥当性を確認した．

参考文献

省略

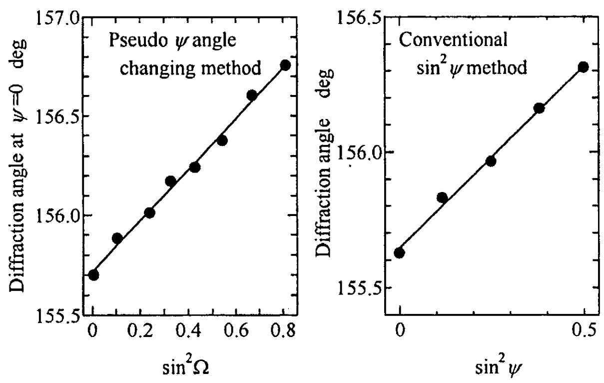

Fig.3. $2\theta_{\psi=0}$–$\sin^2\Omega$ diagram and 2θ–$\sin^2\psi$ diagram.

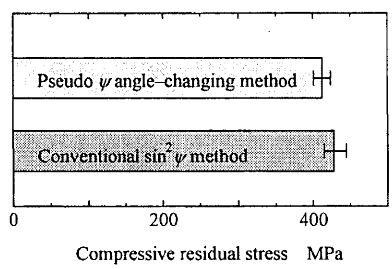

Fig.4. Comparison between the stresses in the load direction at the root of tooth measured by different two methods.