

ラック歯元部のX線残留応力測定

キーワード：残留応力、曲面、ラック、歯元、歯たけ方向、X線応力測定法、回折、非破壊検査

はじめに

歯車歯元部の残留応力、特に歯たけ方向残留応力は、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す。

しかし、この応力を一般的な非破壊残留応力測定法であるX線応力測定法¹⁾によって測定することはきわめて困難です。これは、測定領域が曲面であることに起因する応力値の測定誤差や、隣接歯によるX線の遮蔽が生じるためです。

そこで、このような狭隘部曲面におけるX線応力測定技術として「擬似 ψ （プサイ）角変化法」を考案しました。その測定原理およびラック歯元部に適用した事例について説明します。

擬似 ψ 角変化法の測定原理

図1に示すように、半円筒曲面（曲率半径 ρ ）の一部をなす傾斜面（傾斜角度 Ω ）にX線を照射する場合を考えます。そして以下の条件を仮定します。1: 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、2: X線侵入深さ内に半径方向応力は存在しない、3: X線ビームは矩形形状（ $2\zeta \times 2\zeta$ ）とします。

擬似 ψ 角変化法では、円周方向応力を求めるにあたり、図1に示すように、X線経路面を一定（ yz 平面）にし、照射位置を x 軸上で変化させます。これに伴い照射面の傾斜角度 Ω が変化し、回折ピークがシフトします。具体的には、ある照射位置（傾斜角度 Ω ）において測定される $\psi=0^\circ$ 時回折角 $\langle 2\theta_A \rangle$ は次式で表されます。（導出過程は省略、詳細は文献²⁾を参照）

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

ここで、 K は応力定数、 $2\theta_0$ は無ひずみ状態の回折角、 ν はポアソン比です。式(1)の両辺を $\sin^2 \Omega$ で偏微分すれば次式が得られます。

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

式(2)より、照射位置の変化に伴う傾斜角度 Ω の変化と $\psi=0^\circ$ 時回折角との関係を実測すれ

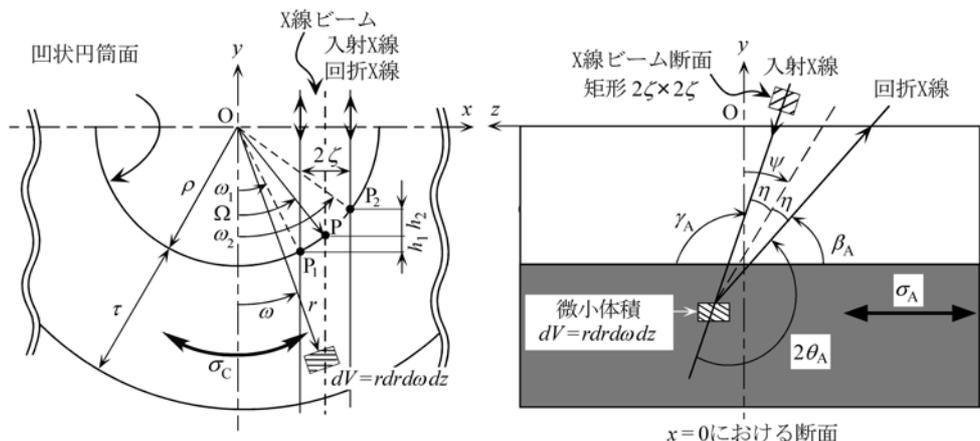


図1 凹円筒面の傾斜面における軸方向応力を並傾法・軸方向応力測定の設定で測定する状況を示す模式図（擬似 ψ 角変化法においては $\psi=0^\circ$ ）

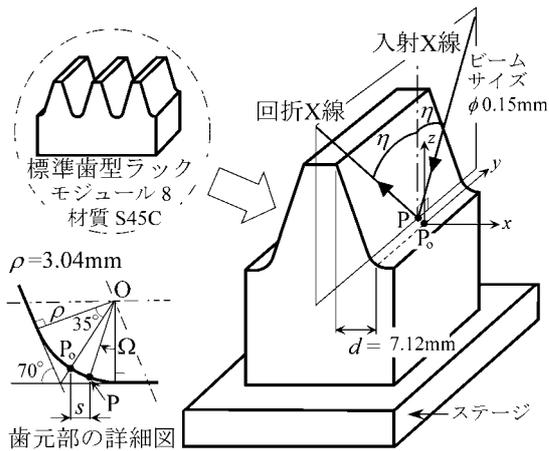


図2 ラック形状と擬似 ψ 角変化法におけるX線経路の模式図

ば、円周方向応力を求めることができます。

ラック歯元部への適用事例

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・ $\sin^2\psi$ 法で測定しています。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、ラックは、JIS B1701 に定められた標準ラック歯形で、モジュール 8、材質は S45C のものを用います。形状寸法は、輪郭形状測定機 (フォームトレーサ CS-5000、ミツトヨ) を用いて測定しています。図 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ました。試料には焼なまし後サンドブラスト処理を行い、均一な表面残留応力を与えています。

擬似 ψ 角変化法では、図 2 に示すような X 線経路の下で X 線を照射します。照射位置 P としては、 P_0 点 (曲面部の中心) を原点として x 軸上で歯先側 4 点、歯底側 3 点の合計 8 点を定めています。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おこない、X 線ビームサイズは、 ϕ 0.15mm としています。

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ましたが、その他の条件は先と同じです。

図 3 および図 4 に、二つの方法で測定した

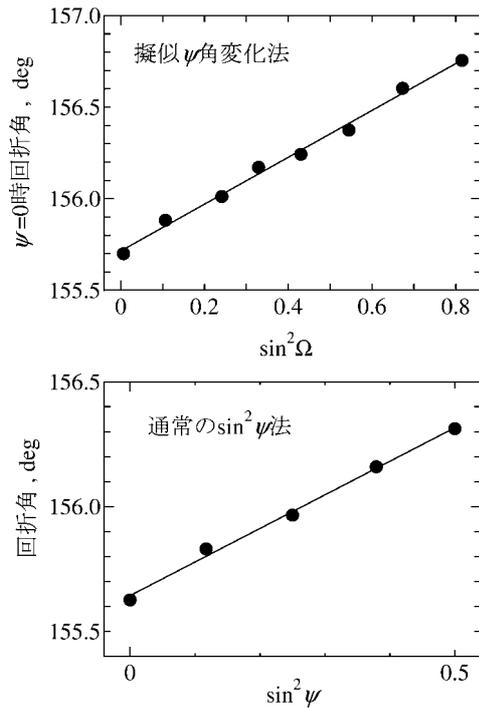


図3 $2\theta_{\psi=0}-\sin^2\Omega$ 線図および $2\theta-\sin^2\psi$ 線図

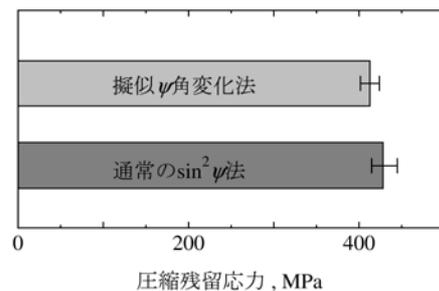


図4 異なる二種類の方法で測定した歯元部歯たけ方向残留応力値の比較

結果を示します。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ます。

おわりに

提案した擬似 ψ 角変化法により、歯元部の残留応力を測定できることが分かります。

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 鉄鋼編 (2002)
- 2) 小栗泰造、村田一夫、山口勝己、日本材料学会第 53 期学術講演会講演論文集、pp.55-56(2004)