

曲面のX線残留応力測定

Application of X-ray Residual Stress Measuring Technique to Curved Surface

小栗 泰造* 村田 一夫** 佐藤 嘉洋***
 Taizo Oguri Kazuo Murata Yoshihiro Sato

(2004年7月1日 受理)

This paper elucidates the origin of geometric effects in X-ray stress measurement of a curved surface. It presents a stress measuring technique for curved surfaces to cope with cases in which ψ -rotation is restricted because of complicated shape. The chief focus is placed on a cylindrical surface. Characteristics in the fundamental data of X-ray stress measurement are shown (diffraction profiles, diagrams, and measured stress values). A criterion of X-ray irradiation size is proposed to disregard the influence of the curved surface. Irradiation size-changing technique and multiple-point measuring technique are proposed for measuring a cylindrical surface at confined portions of mechanical components. The former measures the circumferential stress without tilting X-ray beams in the circumferential direction by changing the size of irradiation area in that direction. The latter gives the circumferential distributions of the circumferential stress and the axial one without tilting X-ray beams in the circumferential direction by conducting multiple-point measurement of the axial stress at the inclined area on the cylindrical surface.

キーワード：X線応力測定，曲面，円筒面，円周方向応力，残留応力，非破壊検査

記号の説明

		t	照射領域制限マスクの厚さ
		w	照射領域の軸方向長さ
		x, y, z	直角座標系
C, D	Fourier 係数	2ζ	照射領域の弦長さ
d	無ひずみ状態の格子面間隔	θ, θ_0	Bragg 角および無ひずみ状態の Bragg 角
g	照射面積変化法における幾何学因子	$\langle 2\theta \rangle$	傾斜面で測定された回折角
h	ゴニオメーターの ψ 回転軸から照射位置までの高低差	ν	Poisson 比
i	正の整数	ρ	曲率半径
k	傾斜面応力測定を行う測定箇所の数	σ	残留応力
K	応力定数	$\langle \sigma \rangle$	傾斜面で測定された軸方向応力
m	フーリエ展開次数 (正の有限確定値)	ψ	鉛直軸と回折面法線とがなす角
M	照射寸法と残留応力との関係を表す近似曲線のパラメーター	ψ'	試料表面法線と回折面法線とがなす角
		ω	鉛直軸を基準とした照射領域の角度位置
		$\omega\zeta$	半有効角 = $\sin^{-1}(\zeta/\rho)$
		ω_E	ω の最大値

* 機械金属部 金属材料系

** 東大阪市立産業技術支援センター

*** 大阪市立大学大学院工学研究科機械物理系専攻

添字

A, C 軸方向および円周方向成分

 i, e 正の整数

measured, actual 測定値, 真値

1. はじめに

X線応力測定法^{1,2)}は残留応力の非破壊測定法として一般に広く用いられているが、実用機械部品への適用に際しては注意を要する場合がある。実用機械部品は一般に複雑な形状を有しており、残留応力測定を要する部位は曲面であることが少なくない(例えば、歯車の歯元部、クランクシャフトのフィレットロール加工部、熱交換器のU型配管底部など)。X線応力測定法は測定面が平坦であることを前提としているため、曲面部に適用した場合には、測定原理からの逸脱に基づく測定誤差が生じることになる。また、くぼんだ位置の測定では、X線入射角を十分な範囲で変化させることが困難であることが多く、測定精度が悪化したり、あるいは測定そのものが実施できないことが多い³⁾。このため、X線応力測定の実用的観点からは、曲面に起因した応力測定誤差の程度や、その誤差を許容範囲内に収めるための照射寸法の指針に関する情報、ならびにくぼんだ位置において実施可能な応力測定手法が望まれている。

本稿では、曲面のX線応力測定に関する基本的情報として、X線回折に及ぼす幾何学的影響因子、ならびに測定データ(回折プロファイル、 $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図および測定応力値)に現れる曲面の影響を単純な曲面の場合について説明するとともに、曲面形状に基づく応力測定誤差と曲率半径および照射寸法との関係を示す。また、複雑形状物の応力測定に対処する方法として、X線経路が遮断されがちな湾曲方向にX線を傾斜させる必要のない、湾曲方向応力測定法および湾曲方向応力分布推定法を提案する。

2. X線回折における曲面の影響

図1に、円柱表面の円周方向応力測定について、曲面形状に起因した測定誤差の発生要因を模式的に示す。図中の六角形は結晶粒を表し、その中の平行線はX線応力測定において対象とする特定の結晶面を表すものとする。また、応力 σ は円周方向に一様であるものとする。X線回折に影響を及ぼす幾何学的影響因子は3種ある：(1)回転効果、(2)並進効果、(3)照射領域内の不均一な吸収効果。曲面の応力測定において

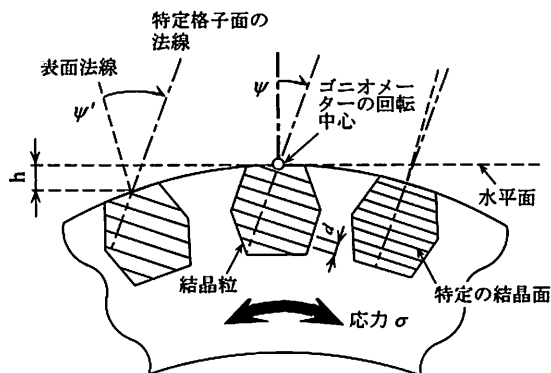


図1 周方向応力のX線応力測定における幾何学的影響の模式図

Schematic illustration of geometric effects in the X-ray stress measurement for circumferential stress on a cylindrical surface

は、これらの効果が重畳して測定結果に影響を与える。

(1) 回転効果

図1に示すように、測定対象とする結晶面のある特定方向の格子面間隔は、曲面内の各位置によって異なるものとなる。これは、試料面法線に対する結晶面法線が曲面内の位置で異なる($\psi \rightarrow \psi'$)ことにより、結晶面の法線方向に作用する応力の大きさが異なってくることによる。回転効果とは、このことによって生じる回折ピーク角の変動である。回転効果は平坦試料であっても試料のミスセット(試料表面が水平面から傾斜していること)により起こり得るが、曲面の測定においてはミスセットがなくても不可避に生じる。

(2) 並進効果

並進効果とは、図1において、試料表面がゴニオメーターの回転中心を含む水平面からずれていること(照射領域における高低差 h)によって生じる見かけ上の回折ピークシフトである。並進効果も回転効果と同様に、平坦試料においてもミスセットにより生じ得るが、曲面の測定においては不可避に生じる。試料表面が水平面よりも低い場合(図1の場合)、並進効果により回折角は実際よりも小さく測定される。逆に高い場合には、回折角は実際よりも大きく測定される。

(3) 不均一な吸収効果

回転効果において説明したように、試料表面の法線方向に対するX線入射角が曲面内で一定でないため、X線侵入深さは曲面内で不均一になる。すなわち、回折に寄与する体積量が曲面内で不均一になることから、応力測定結果への寄与度は曲面の各位置によって異なるものとなる。

3. X線応力測定における曲面の影響

曲面にX線応力測定を適用した場合の回折プロファイル, 2θ - $\sin^2\psi$ 線図および測定応力値の特徴について述べる. 対象形状は主に円柱形状とする.

(1) 回折プロファイル

図2に, 円柱形状曲面(球状化焼なまし処理された炭素工具鋼丸棒, 直径5mm)に対して, 種々の照射寸法を設定し, 円周方向応力および軸方向応力を並傾法で測定したときの回折プロファイルを示す. 照射領域は, 試料の一部をマスクで覆うことにより定め, 円周方向の寸法(弦長さ 2ζ)を1~3mmの範囲で変化させた.

図2によれば, いずれの応力成分についても回折プロファイルに著しい非対称性は認められない. また, ψ 角変化にともなう極端な回折強度変化も見られない. 半価幅に関しても, 照射寸法の増加にともなう一定の変化傾向は認められない.

このように測定面が曲面であっても, 回折プロファイルには応力測定に支障をきたすような異常は認められない. この傾向は, 球形状曲面の場合も同様である.

(2) 2θ - $\sin^2\psi$ 線図

図3に, 図2の回折プロファイルから求めた照射寸法変化に伴う 2θ - $\sin^2\psi$ 線図の変化を示す.

円周方向応力(図3a)に関しては, 照射領域(弦長さ 2ζ)が大きくなるとともに回帰直線の勾配は減少している. また, 2ζ の値が大きいときには 2θ 対 $\sin^2\psi$ 関係の分布にやや非線形性が見られるが, 2ζ の値が小さいときには比較的良好な線形性を示している.

一方, 軸方向応力(図3b)に関しては, 照射寸法が変化しても 2θ - $\sin^2\psi$ 関係の勾配はあまり変化せず, 平行移動のような変化が生じている. また, 2θ 対 $\sin^2\psi$ 関係の線形性は良い.

球形状曲面に対する照射寸法と 2θ - $\sin^2\psi$ 線図の関係は, 円柱状曲面のそれとは若干異なったものとなるが, おおむね同様の傾向が見られる.

(3) 測定応力値

測定面の曲率半径に比べて照射領域の大きさが十分に小さくないとき, 測定応力値は曲面の影響を受け, 実在する応力とは異なるものとなる.

図4に, 円柱形状曲面について行った円周方向応力および軸方向応力測定のシミュレーションから得られた照射寸法と測定応力値との関係を示す. 横軸は照

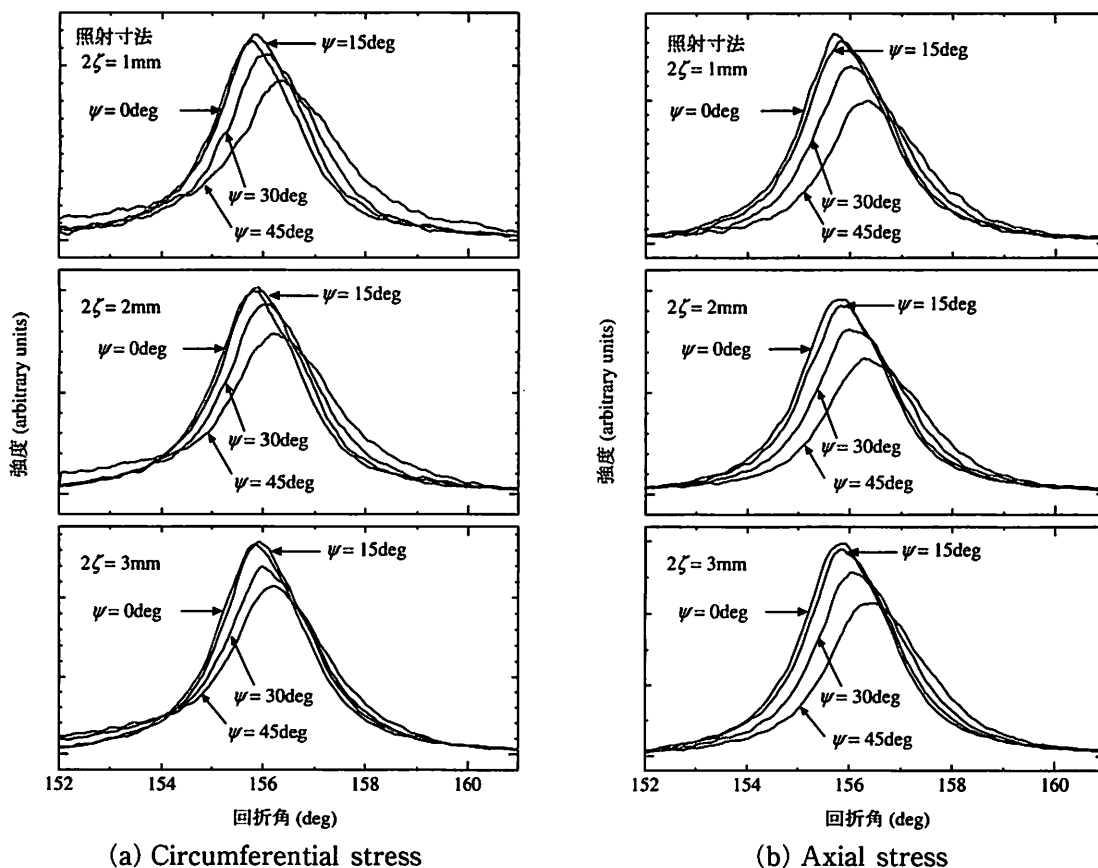
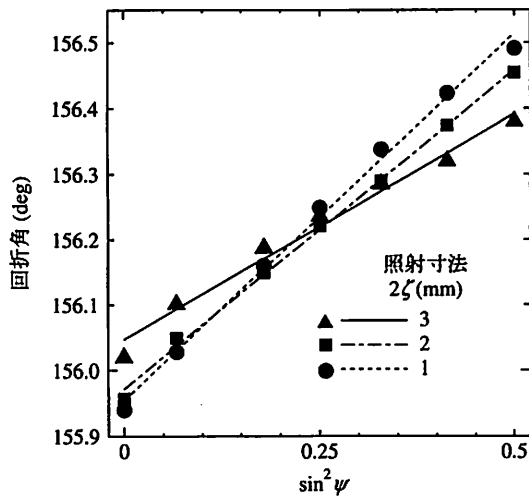
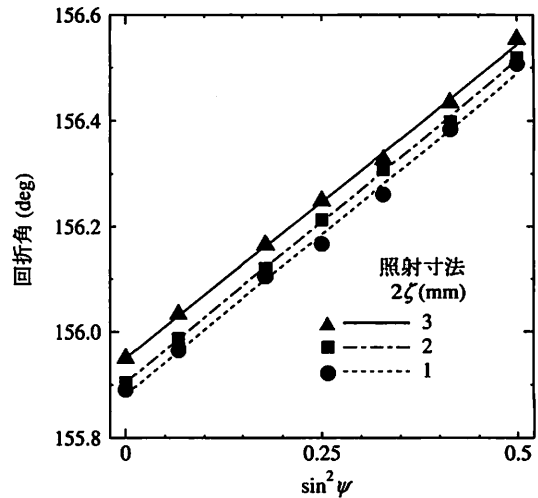


図2 $\phi 5$ 丸棒表面で種々の大きさの照射領域を設定したときの回折プロファイル
Diffraction profiles measured for various sizes of irradiation areas on $\phi 5$ bar surface



(a) Circumferential stress



(b) Axial stress

図3 φ5丸棒表面上で種々の大きさの照射領域を設定したときの 2θ - $\sin^2\psi$ 線図
 2θ - $\sin^2\psi$ diagrams measured for various sizes of irradiated areas on the φ5 bar surface

照射寸法(弦長さ 2ζ)を円柱直径(2ρ)で無次元化しており、縦軸は測定応力値(σ_{measured})を実在する円周方向残留応力または軸方向残留応力(σ_{actual})で無次元化している。シミュレーション方法については文末の参考文献⁴⁾を参照されたい。

図4に示すように、両応力成分ともに、照射寸法が大きくなると実在する残留応力の大きさよりも小さく評価される。とりわけ、円周方向応力は照射寸法の影響を強く受ける。例えば、幾何学的影響に基づく測定誤差の許容範囲を10%以下にするためには、照射寸法を曲率半径のおよそ40%以下($\zeta/\rho \leq 0.2$)にしなければならない。この曲線を利用すれば、幾何学因子と測定応力値のみから、実在する真の円周方向応力を概略で推定することができる。また、円周方向応力は照射寸法を定めるために用いるマスクの厚さ(t)の影響も受ける。マスク厚さを考慮した応力推定式を図中に示す。推定式において、マスク厚さが大きくなるとともに係数 M の値が1より大きくなるため、曲線は図中で上方にシフトする。すなわち、実在する残留応力よりも大きく評価される場合がある。

なお、軸方向応力の測定値は、円周方向応力の影響を受ける。図4に示した軸方向応力に対する曲線は、測定面が等二軸応力状態にある場合を表すものであり、任意の応力状態について成立するものではない。

4. 狭隘部曲面の応力測定法

狭隘部のX線応力測定法としては、 φ - $\sin^2\psi$ 法⁵⁾とLarsson法⁶⁾が提案されているが、いずれも測定

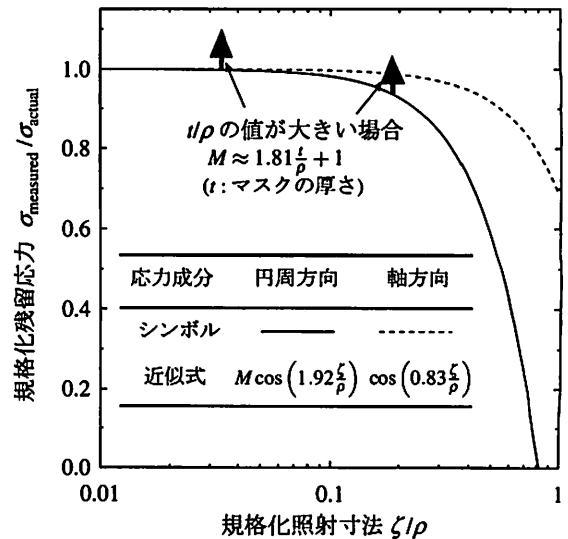


図4 円柱曲面について計算された規格化照射寸法 ζ/ρ と規格化残留応力 $\sigma_{\text{measured}}/\sigma_{\text{actual}}$ との関係を表す近似曲線

Approximate curves representing the relation between the normalized irradiation size ζ/ρ and the normalized residual stress $\sigma_{\text{measured}}/\sigma_{\text{actual}}$ calculated for a cylindrical surface

面は平坦でなくてはならない。ここでは、狭隘部で曲面となる箇所の応力測定法を提案する。これは、曲面形状を積極的に利用することにより、湾曲方向(入射角が制限される方向)にX線を傾斜させることなく、その方向の応力を得ようとするものである。

(1) 照射面積変化法

照射面積変化法は円柱状曲面の円周方向応力を測定する手法である。これは、図5aに示すように、並傾

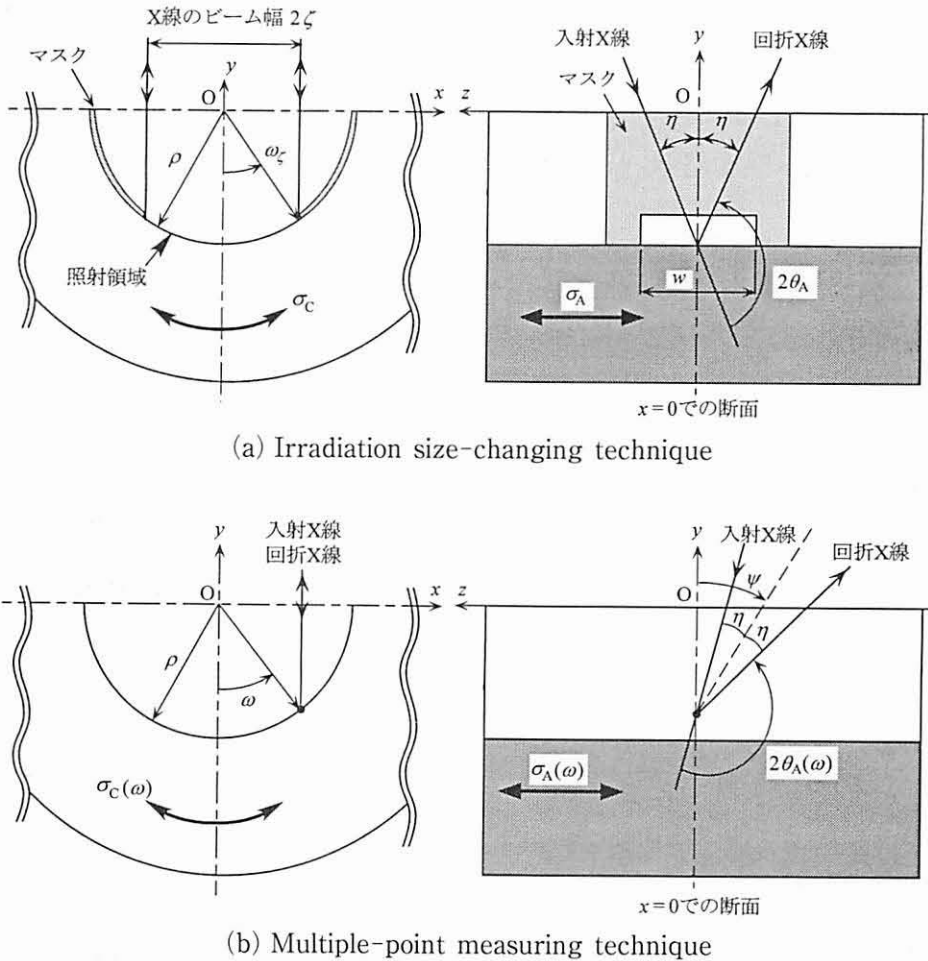


図5 円筒凹面におけるX線応力測定の様式図

Schematic illustrations of the X-ray stress measurement for a concave cylindrical surface

法・軸方向応力測定における $\psi=0^\circ$ 時の測定配置とし、円周方向の照射寸法（弦長さ 2ξ ，有効角 $2\omega\xi$ ）を変化させて、 $\psi=0^\circ$ 時の回折角と照射領域の大きさとの関係である $(2\theta_A)_{\psi=0^\circ} - \sin^2 \omega\xi$ 線図（ $\sin^2 \psi$ 法における $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図に相当）を求め、その線図の勾配から円周方向応力 σ_C を求める方法である。この方法では円周方向に X 線を傾斜させないため、測定対象物自体による X 線の遮蔽が生じにくい。なお、この方法では、円周方向および軸方向の応力は一様と仮定している。

実測した $(2\theta_A)_{\psi=0^\circ} - \sin^2 \omega\xi$ 線図から回帰直線の勾配を算出すれば、次式より円周方向応力 σ_C を求めることができる。

$$\frac{\sigma_C}{K} \approx g \frac{\partial (2\theta_A)_{\psi=0^\circ}}{\partial (\sin^2 \omega\xi)} \quad (1)$$

ここで、 K は応力定数である。パラメーター g は曲率半径と X 線有効浸入深さに依存する値であるが、表面での回折のみを考慮する場合には定数となり $g=3$

である⁷⁾。

(2) 曲面内多点計測法による応力分布推定

前述の照射面積変化法では、曲面内で応力は一様と仮定したが、本節で述べる曲面内多点計測法は、円周方向に応力が変化する場合に対応するものである。

本手法は、図 5 b に示すように、並傾法・軸方向応力測定で曲面内の複数点（角度位置 ω ）について傾斜面の応力測定を行い、傾斜面における軸方向の測定応力値および $\psi=0^\circ$ の回折角と照射位置（角度位置 ω ）との関係性を求め、それをもとに級数近似した未知応力分布関数 [$\sigma_C(\omega)$ および $\sigma_A(\omega)$ ，円周方向応力および軸方向応力の円周方向分布] の展開係数を最小二乗法で決定する方法である。本手法は円周方向に X 線を傾斜させないため、測定対象物自体による X 線の遮蔽が生じにくい。本手法の詳細を以下に示す。

傾斜面において測定される軸方向応力 $\langle \sigma_A(\omega) \rangle$ および $\psi=0^\circ$ 時の回折角 $\langle 2\theta_A(\omega) \rangle_{\psi=0^\circ}$ は次式で表される⁸⁾。ただし、X 線ビームサイズは無限小とみなし、表面での回折のみを考慮した場合である。

$$\langle \sigma_A(\omega) \rangle = \sigma_A(\omega) - \sigma_C(\omega) \sin^2 \omega \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \langle 2\theta_A(\omega) \rangle_{\psi=0^\circ} &= \frac{\sigma_C(\omega)}{K} \sin^2 \omega + 2\theta_0 \\ &\quad - \frac{\nu}{K(1+\nu)} [\sigma_A(\omega) + \sigma_C(\omega)] \quad (3) \end{aligned}$$

$2\theta_0$ は無ひずみ状態の回折角, ν は Poisson 比である。したがって, $\sigma_C(\omega)$ と $\sigma_A(\omega)$ を未知の応力分布関数とする二つの式が得られることから, $\langle \sigma_A(\omega) \rangle$ および $\langle 2\theta_A(\omega) \rangle_{\psi=0^\circ}$ を実測すれば, 両式から未知の応力分布関数 $\sigma_C(\omega)$ と $\sigma_A(\omega)$ を求めることができる。

式(2)を式(3)に代入することにより $\sigma_A(\omega)$ を消去し, 両辺を角度位置 ω で微分すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} [(\sin^2 \omega - \nu) \sigma_C(\omega)] \\ = \frac{d}{d\omega} \langle 2\theta_A(\omega) \rangle_{\psi=0^\circ} + \frac{\nu}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} \langle \sigma_A(\omega) \rangle \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)を満たすような $\sigma_C(\omega)$ を求めるにあたり, ここでは未知関数を Fourier 級数に展開して, その係数を最小二乗法により決定する。まず, 円周方向応力 $\sigma_C(\omega)$ を次式に示すように展開する。

$$\sigma_C(\omega) \equiv \frac{C_0}{2} + \sum_{i=1}^m \left(C_i \cos \frac{i\pi\omega}{\omega_E} + D_i \sin \frac{i\pi\omega}{\omega_E} \right) \quad (5)$$

ここで, C_0, C_i および D_i ($i=1, 2, \dots, m$) は $\sigma_C(\omega)$ の Fourier 係数である。 m は展開次数であり, 有限確定した正の整数値とする。 ω_E は, 残留応力測定を行う角度位置 ω の最大値である。次に式(5)を式(4)に代入し, 項別に微積分演算を行えば次式が得られる。

$$\sum_{i=1}^m [M_i(\omega) C_i + N_i(\omega) D_i] + \frac{1}{2} M_0(\omega) C_0 = Q(\omega) \quad (6)$$

$$M_0(\omega) = \frac{1}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} (\sin^2 \omega - \nu)$$

$$M_i(\omega) = \frac{1}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} \left[(\sin^2 \omega - \nu) \cos \frac{i\pi\omega}{\omega_E} \right]$$

$$N_i(\omega) = \frac{1}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} \left[(\sin^2 \omega - \nu) \sin \frac{i\pi\omega}{\omega_E} \right]$$

$$Q(\omega) = \frac{d}{d\omega} \langle 2\theta_A(\omega) \rangle_{\psi=0^\circ} + \frac{\nu}{K(1+\nu)} \frac{d}{d\omega} \langle \sigma_A(\omega) \rangle$$

k 個の ω 点について測定データが得られるならば, $[\omega = \omega_e (e=1, 2, \dots, k > 2m+1)]$, そのそれぞれを式(6)に代入することにより, 次の優決定連立一次方程式が得られる。

$$B\mathbf{u} = \mathbf{Q} \quad (7)$$

$B =$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} M_0(\omega_1) M_1(\omega_1) \dots M_m(\omega_1) N_1(\omega_1) \dots N_m(\omega_1) \\ \frac{1}{2} M_0(\omega_2) M_1(\omega_2) \dots M_m(\omega_2) N_1(\omega_2) \dots N_m(\omega_2) \\ \frac{1}{2} M_0(\omega_3) M_1(\omega_3) \dots M_m(\omega_3) N_1(\omega_3) \dots N_m(\omega_3) \\ \vdots \dots \dots \dots \dots \dots \vdots \\ \frac{1}{2} M_0(\omega_k) M_1(\omega_k) \dots M_m(\omega_k) N_1(\omega_k) \dots N_m(\omega_k) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = [C_0 C_1 C_2 C_3 \dots C_m D_1 D_2 D_3 \dots D_m]^T$$

$$\mathbf{Q} = [Q(\omega_1) Q(\omega_2) Q(\omega_3) \dots Q(\omega_k)]^T$$

最小二乗問題は, 残差平方和を最小化することであり, その解は次の正規方程式の解 \mathbf{u} である。

$$B^T B \mathbf{u} = B^T \mathbf{Q} \quad (8)$$

式(8)を解くことにより, 円周方向応力 $\sigma_C(\omega)$ の推定値が得られる。軸方向応力 $\sigma_A(\omega)$ に関しても同様の手続きにより推定値が得られる。

5. おわりに

曲面の応力測定では, 平坦とみなせない程度に照射領域が大きくなると測定誤差が生じることは知られていたが, 曲率と照射領域の大きさ, 応力測定誤差の関係は定量的に明らかにされていなかった。また, 狭隘部で曲面となるような複雑形状物に対する適切な応力測定方法は, X線応力測定における一つの課題であった。

ここでは, 曲面の X線応力測定において, X線回折への幾何学的影響, ならびに回折プロファイル, $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図, および測定応力値など, X線応力測定データへの幾何学的影響の特徴を明らかにするとともに, 曲面による応力測定誤差を回避するための照射寸法選定の指針, ならびに実在する真の応力値を幾何学因子と測定応力値から推定する概算式を示した。また, 複雑形状物に対する応力測定法として, X線経路が遮断されがちな湾曲方向への X線傾斜を必要としない測定方法—照射面積変化法および曲面内多点計測法—を提案した。これらの応力測定法は曲面形状を積極的に利用する方法であるため, 実用部品への適用にあたっては, 形状を正確に把握し, 測定位置を精密に定める必要がある。現在, 提案した方法を用いて実用部品の応力測定を試みており, ラック歯元の歯たけ方向残留応力測定に成功している。詳細については別報を参照されたい⁹⁾。

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 (2002)
- 2) 日本材料学会 (編), 改著 X線応力測定法, 養賢堂 (1990)
- 3) 蒲池一義, 白岩俊男: 材料, **20** (1971) p.1240
- 4) 小栗泰造: 大阪市立大学学位論文 (2003) p.34
- 5) 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** (1976) p.1037
- 6) L. E. Larsson: Scand. J. Metallurgy, **3** (1974) p.119
- 7) 小栗泰造, 村田一夫, 佐藤嘉洋: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.17 (2003) p.69
- 8) 小栗泰造, 村田一夫, 佐藤嘉洋: 材料, **52** (2003) p.776
- 9) 小栗泰造, 村田一夫, 山口勝己: 日本材料学会第53期學術講演会講演論文集 (2004) p.55