2次元 X 線検出器イメージングプレートを用いた 全平面応力成分の単一入射 X 線応力測定†

佐々木 敏彦* 広瀬 幸雄*

Single Incidence X-Ray Stress Measurement for All Plane Stress Components Using Imaging Plate of Two-Dimensional X-Ray Detector

by

Toshihiko SASAKI* and Yukio HIROSE*

This study was performed to examine the possibility of X-ray measurement by analyzing the whole part of Debye-Scherrer ring. An imaging plate (IP) was used for the detection of X-ray in order to obtain a high degree of accuracy and efficiency. Through the investigation on the Tanaka's method, we proposed new equations for σ_y and τ_{xy} . We also found that the Tanaka's method involved an assumption that the angle η is constant. So we proposed a new method for the determination of stress from Debye-Scherrer ring without the above approximation on angle η . For the experiment, a new system of processing image data, calculating stresses and a back-reflection Laue camera for IP with a four-point-bending-device was manufactured. The stress applied mechanically with this device was compared to that obtained from the present method. The result showed that it was possible to obtain the stress with the same accuracy as that obtained by the $\sin^2\psi$ method. The advantage of this method is that one can obtain all three components of the stress in a plane stress state from one diffraction ring with single incidence of X-ray beam.

Key words: X-ray stress measurement, The $\cos\alpha$ method, Imaging plate, Debye-Scherrer ring, Residual stress, Plane stress

1 ま え が き

X 線応力測定を行う場合ディフラクトメータを使用し、 $\sin^2\psi$ 法で応力を計算する方法が一般的になっている。これに対して単一入射角によって得られた一個の回折環の全周を利用して²⁾ X 線応力測定が可能である。このような方法は田中らによって最初に $\cos\alpha$ 法と称して提案され、細束 X 線測定において有効なことが実証されている。しかし、X 線フィルム使用の低作業性と $\sin^2\psi$ 法の定着によってその後十分な検討が行われていない。最近、吉岡らはイメージングプレート(imaging plate, 以下 IP と呼ぶ)と称される新しい 2 次元 X 線検出器を X 線材料強度研究へ適用し、細束 X 線解析や X 線応力測定への応用を行った。IP を使用すると X 線フィルムのような現象作業は不要であり、レーザー照射による蛍光作用によって回折 X 線強度を検出するのでコンピュータによる画像解析による応力測定が可能である。その結果 $\cos\alpha$ 法の主要な障害が解消されるようになった。

$\cos\alpha$ 法の特長として、当初、田中らは長時間を要する細束 X 線応力測定の時間短縮を考え、吉岡らは $\sin^2\psi$ 法のような ψ 軸の駆動が不要である点に注目し、測定位置の信頼性に優れ微小部測定において有効なことを指摘した。また、大谷らは十分な測定精度が得られ、結晶状態の評価が可能であることを示した。

本報では、IP を使用して回折環の全周から応力測定を行う方法に関する研究の第 1 報として、応力測定理論を中心とした基礎的な検討結果について報告する。本研究の結果、回折環の 2 次元データ解析することによって全平面応力成分を単一入射のみによって同時一括計測が可能であり、今後有望な方法であることを認識するに到った。

2 田中らの $\cos\alpha$ 法の原理²⁾

Fig. 1 に示すように主軸から ϕ_0 および ψ_0 で示される方向から原点 O へ X 線を照射して回折環を IP 上に撮影したとする。 $-\eta$ から反時計回りに α の角度方向の回

Fig. 1. Explanation of the $\cos\alpha$ method proposed by Tanaka *et al.*

† 原稿受理 平成 6 年 9 月 26 日 Received Sep. 26, 1994

* 正 会 員 金沢大学自然科学研究科 〒920-11 金沢市角間町, Dept. of Mat. Sci. & Eng., Kanazawa Univ., Kakumamachi, Kanazawa, 920-11

折X線に対応するひずみ ε_α は次式で表される。

$$\varepsilon_\alpha = n_1^2 \varepsilon_1 + n_2^2 \varepsilon_2 + n_3^2 \varepsilon_3 \quad (1)$$

ここで, n_1, n_2, n_3 は ε_α 方向の方向余弦を表し次式で与えられる。

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \phi_0 \cos \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \\ &\quad \times \cos \phi_0 \cos \alpha - \sin \eta \sin \phi_0 \sin \alpha \\ n_2 &= \cos \eta \sin \phi_0 \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \\ &\quad \times \sin \phi_0 \cos \alpha + \sin \eta \cos \phi_0 \sin \alpha \\ n_3 &= \cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \sin \phi_0 \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

これより

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \varepsilon_x (\cos \eta \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \alpha \cos \phi_0) \\ &\quad + \varepsilon_y \sin^2 \eta \sin^2 \alpha \\ &\quad + \varepsilon_z (\cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \cos \alpha \sin \phi_0) \\ &\quad + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \sin 2\phi_0 \sin \alpha \sin \eta \\ &\quad \times (\sin \eta \cos \alpha \cos \phi_0 - \cos \eta \sin \phi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。次に平面応力を仮定して式(3)に

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (4)$$

を代入し(ただし E をヤング率, ν をポアソン比とする), さらに $\alpha, \pi+\alpha, -\alpha, \pi-\alpha$ 方向のひずみをそれぞれ $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_{\pi+\alpha}, \varepsilon_{-\alpha}, \varepsilon_{\pi-\alpha}$ と表して次式の値を計算する。

$$\bar{\varepsilon}_\alpha = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_\alpha = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad (6)$$

これらを求めて整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_\alpha &= \frac{1+\nu}{E} [\sin^2(\phi_0 - \eta) - \sin^2(\phi_0 + \eta)] \\ &\quad \times \cos \alpha \cdot \sigma_x \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tilde{\varepsilon}_\alpha = -\frac{2(1+\nu)}{E} \sin 2\eta \sin \phi_0 \sin \alpha \cdot \tau_{xy} \quad (8)$$

こうして $\bar{\varepsilon}_\alpha$ と $\cos \alpha$ の直線関係を利用してその傾きより σ_x が得られる。同様に $\tilde{\varepsilon}_\alpha$ と $\sin \alpha$ の関係も直線関係を示すのでその傾きより τ_{xy} が得られる。すなわち

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2(\phi_0 - \eta) - \sin^2(\phi_0 + \eta)} \\ &\quad \times \left[\frac{\partial \bar{\varepsilon}_\alpha}{\partial \cos \alpha} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \phi_0} \left[\frac{\partial \tilde{\varepsilon}_\alpha}{\partial \sin \alpha} \right] \quad (10)$$

こうして回折環の全周を用いることで σ_x と τ_{xy} が得られることが判明する。著者らの検討によれば, 上記以外の式からも τ_{xy} が得られるとともに σ_y の測定も可能なことが分かったのでこれについて次章に述べる。

3 測定理論の拡張(その1)

まず座標軸を主軸を基準とせず一般の xyz 軸を用

いて考える。Fig. 1 の x_1 軸 (x 軸) から ϕ_0 , x_3 軸 (z 軸) から ϕ_0 の方向より X 線を入射したとすると, 発生した回折環の α 方向のひずみ ε_α は

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= n_1^2 \varepsilon_x + n_2^2 \varepsilon_y + n_3^2 \varepsilon_z + n_1 n_2 \gamma_{xy} \\ &\quad + n_2 n_3 \gamma_{yz} + n_1 n_3 \gamma_{xz} \end{aligned} \quad (11)$$

で表される。なお方向余弦は式(2)と同様である。次に上式に応力-ひずみ関係式を代入して整理すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \sigma_x \left(\frac{1}{E} \right) [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] \\ &\quad + \sigma_y \left(\frac{1}{E} \right) [n_2^2 - \nu(n_1^2 + n_3^2)] \\ &\quad + \sigma_z \left(\frac{1}{E} \right) [n_3^2 - \nu(n_1^2 + n_2^2)] \\ &\quad + \tau_{xy} \frac{2(1+\nu)}{E} (n_1 n_2) + \tau_{yz} \frac{2(1+\nu)}{E} (n_2 n_3) \\ &\quad + \tau_{xz} \frac{2(1+\nu)}{E} (n_1 n_3) \end{aligned} \quad (12)$$

入射 X 線ビームが xz 面上にある場合を考えると, このとき $\phi_0 = 0$ であるから次式を得る。

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \cos \alpha \\ n_2 &= \sin \eta \sin \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

$$n_3 = \cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \sin \phi_0 \cos \alpha$$

式(5), (6)と同様の値を計算すると平面応力のとき,

$$\bar{\varepsilon}_\alpha = -\frac{(1+\nu)}{E} \sin 2\phi_0 \sin 2\eta \cos \alpha \cdot \sigma_x \quad (14)$$

$$\tilde{\varepsilon}_\alpha = \frac{2(1+\nu)}{E} \sin \phi_0 \sin 2\eta \sin \alpha \cdot \tau_{xy} \quad (15)$$

となる。したがって応力成分は次式より与えられる。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\phi_0} \left[\frac{\partial \bar{\varepsilon}_\alpha}{\partial \cos \alpha} \right] \quad (16)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta \sin \phi_0} \left[\frac{\partial \tilde{\varepsilon}_\alpha}{\partial \sin \alpha} \right] \quad (17)$$

上式はいずれも田中らの式(9), (10)と一致する。式(16)は式(9)の変形である。

さて σ_y を導くために新たに次式の関係について考える。

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} + \varepsilon_{\pi-\alpha})] \\ &= \Phi \cos^2 \alpha + \Psi \end{aligned} \quad (18)$$

ここで

$$\Phi = \frac{2(1+\nu)}{E} (\sigma_x \cos^2 \phi_0 - \sigma_y) \sin^2 \eta \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{2}{E} \sigma_x (\cos^2 \eta \sin^2 \phi_0 - \nu \sin^2 \eta \\ &\quad - \nu \cos^2 \eta \cos^2 \phi_0) \\ &\quad + \frac{2}{E} \sigma_y (\sin^2 \eta - \nu \cos^2 \eta) \end{aligned} \quad (20)$$

となる。 σ_x は既に式(9)または式(16)から得られているので, 式(19)から σ_y が次のように得られる。

$$\sigma_y = \sigma_x \cos^2 \phi_0 - \Phi \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2 \eta} \quad (21)$$

また Ψ から次式によって σ_y が求められる.

$$\sigma_y = \left[\frac{E}{2} \Psi - \sigma_x |\cos^2 \eta \sin^2 \phi_0| - \nu (\sin^2 \eta + \cos^2 \eta \cos^2 \phi_0) \right] \times \frac{1}{\sin^2 \eta - \nu \cos^2 \eta} \quad (22)$$

さらに, 次式から τ_{xy} 用の第2の測定式が得られる.

$$E_2 = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} + \varepsilon_{\pi-\alpha})] \\ = -\frac{2(1+\nu)}{E} \sin^2 \eta \cos \phi_0 \sin 2\alpha \cdot \tau_{xy} \quad (23)$$

よって τ_{xy} は次のように与えられる.

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2 \eta \cos \phi_0} \times \left(\frac{\partial E_2}{\partial \sin 2\alpha} \right) \quad (24)$$

以上から回折環の全周を用いれば3個の平面応力成分がすべて得られることが分かる. $\sin^2 \psi$ 法を用いて同様の結果を得るためには3種類の ϕ 方向について $\sin^2 \psi$ 線図を求めなければならないので, 本法の方がはるかに能率的である. なお, この特長を生かすためには本法の応力測定値が $\sin^2 \psi$ 法に対して同等の精度と信頼性を持つことが必要であるので後述の実験において検証する. なお, 式(12)を用いれば三軸応力測定が可能となることが判明しているので別の機会に報告する予定である.

4 測定理論の拡張(その2)

これまでに述べてきた応力解法はその基本的仮定として回折角 (2θ) の余角である η が α の影響を受けずに常に一定であるとして導かれたものである. しかし実際には η は α によって変化することが普通であるので, この仮定による応力測定精度への影響について検討しておく必要がある. そこで正確に η を変数として扱った場合の新解法について以下に検討する.

まず平面応力を仮定し式(12)を次式のように表す.

$$\varepsilon_\alpha = \sigma_x \chi_1 + \sigma_y \chi_2 + \tau_{xy} \chi_3 \quad (25)$$

ただし

$$\chi_1 = \left(\frac{1}{E} \right) [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] \\ \chi_2 = \left(\frac{1}{E} \right) [n_2^2 - \nu(n_1^2 + n_3^2)] \\ \chi_3 = \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2 \quad (26)$$

この式において σ_x , σ_y , τ_{xy} を未知の係数, χ_1 , χ_2 , χ_3 を α と η 等からなる変数と考えれば, 3個の応力成分は Taylor の微分補正法を用いて初期値から推定可能である. 以下にその手法を示す.

応力の初期推定値をそれぞれ ${}^0\sigma_x$, ${}^0\sigma_y$, ${}^0\tau_{xy}$ とし, また真の応力との差を $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_y$, $\delta\tau_{xy}$ とする.

$$\delta\sigma_x = \sigma_x - {}^0\sigma_x \\ \delta\sigma_y = \sigma_y - {}^0\sigma_y \\ \delta\tau_{xy} = \tau_{xy} - {}^0\tau_{xy} \quad (27)$$

そうすると次の正規方程式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} \right)^2 & \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} & \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} \\ \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} & \sum \left(\frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} \right)^2 & \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} \\ \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} & \sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} & \sum \left(\frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} \right)^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta\sigma_x \\ \delta\sigma_y \\ \delta\tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_x} R_i \\ -\sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \sigma_y} R_i \\ -\sum \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial \tau_{xy}} R_i \end{bmatrix} \quad (28)$$

ここで R_i は次式のように初期応力値による ε_α の計算値と測定値 ${}^m\varepsilon_\alpha$ との差を表す.

$$R_i = \varepsilon_\alpha(\chi_{1i}, \chi_{2i}, \chi_{3i}, {}^0\sigma_x, {}^0\sigma_y, {}^0\tau_{xy}) - {}^m\varepsilon_\alpha \quad (29)$$

総和 $\sum$ は全データ個数について計算するものとする. この連立方程式を解けば $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_y$, $\delta\tau_{xy}$ が得られる. その結果,

$$\sigma_x = {}^0\sigma_x + \delta\sigma_x \\ \sigma_y = {}^0\sigma_y + \delta\sigma_y \\ \tau_{xy} = {}^0\tau_{xy} + \delta\tau_{xy} \quad (30)$$

より各応力成分が得られる. 精度を高めるためには $\delta\sigma_x$ 等の値が十分小さな値になるまで ${}^0\sigma_x \rightarrow {}^0\sigma_x + \delta\sigma_x$ のように置き換えて同様の計算を繰返し行えばよいことになる. 本章の方法と2, 3章の方法を文献(14)と同様な数値的シミュレーションによって比較し, η 近似の影響について調べた結果, ϕ_0 が 90 (deg) に近づく範囲(実際は測定不可能)では影響が現れるが, 通常の測定範囲である $\phi_0 < 50$ (deg) では実用上問題がないことを確認している.¹⁵⁾

5 実験方法

回折環の撮影はロータリーターゲットタイプの X 線発生装置と背面反射ラウエカメラを使用して行い, 寸法 127×127 (mm) の IP 上へ回折環を記録した. IP の読取りはドラム回転式の市販のものを用い, 回折 X 線強度分布を 100 μm ごとに読取り IP 上を 1024×1140 画素で表した. 画像データの読取りとピーク位置(回折角 2θ)の決定はワークステーションを使用し UNIX 上の C++ 言語にて作成したプログラムで処理した.

IP 画像データからの回折ピーク位置決定法はおおむね次のとおりである. まず, デイスプレイ上に表示した回折環よりおよそその入射ビーム位置を推定し, この仮のビーム中心から半径方向に α 角の方向 (Fig. 1 参照) に位置する画素をピックアップして半径方向の回折 X 線強度分布曲線を得た(後述の Fig. 3 参照). このとき同一行または同一列にある画素を平均化し, 行または列上の強度分布を表した後, 平滑化(移動平均法)を経て半価幅中点法に基づいてピーク決定を行った. 行または列の選択方法は, 走査方向と最も接近した軸に平行する方を選択した. たとえば, $\alpha = 10$ (deg) の場合にはこのライン上にある同一行の画素データを平均し, 仮定したビーム中心位置と同一列に対して強度分布を求めた. α

角は $\alpha=0$ から 359 度まで1度おきに解析し、その結果をフロッピーディスク上のファイルにセーブした。応力計算はこうして得られたピーク位置のデータファイルに対してパソコン上で行った。

応力測定精度に重要な入射 X 線ビームの位置を正確に把握する目的で、カメラ長を変えて二重撮影した鉄粉末の 211 回折環を利用した。すなわち、残留応力を持たない粉末の回折環は真円であるとして α 角が π 異なる回折環上の 2 点を結ぶ直径の midpoint が円の中心であることを利用し、 α が 1 度ごとの 180 個の直径の midpoint の平均値から円の中心（入射ビーム位置）を求めた。次に α および回折環半径を新しい中心位置に関して修正した。さらに回折環全体を式 (25) の関数に最小自乗近似してから、再度 $\alpha=0$ から 1 度ごとの回折環半径を計算した。こうして同様の補正を繰返し、新しい中心位置がその前の位置と x および y 座標とも $0.1\mu\text{m}$ 以下の差になった時点を入射ビームの中心とみなした。

次に、試験片からの回折ピーク位置を上記の方法によって得られた入射ビーム位置に関して修正し、応力計算を行った。ただしビーム位置の修正によって α およびピーク位置は $\cos\alpha$ 法に必要な角度関係を持たなくなるので、一旦回折環全体を式 (25) の関数に最小自乗近似してから $\alpha=0$ から 1 度ごとの回折環半径を求め直した後、 $\cos\alpha$ 法を適用した。なお、4 章の方法による応力値は式 (25) の最小自乗近似の過程で得られる。

本法の検証のために、S55C 材に四点曲げを荷重し裏面に貼ったひずみゲージによる機械的応力（ヤング率 206 (GPa) 使用）と本法の測定値を比較した。試験片は S55C を長さ 55×幅 10×厚さ 5 (mm) に加工し、焼なまし (850°C, 30 min, 炉冷)→焼入れ (850°C, 30 min, 油冷)→焼もどし (550°C, 1 hr) を行った後実験に使用した。X 線には Cr-K α 線を 30 (kV), 50 (mA), コリメータ径 1 (mm) の条件で使用し、試験片と IP の距離を 80 (mm), 標準粉末と IP の距離を 50 (mm), $\phi_0=40$ (deg) とした。X 線照射時間については、試験片に対して 150 (sec), 標準粉末に対して 120 (sec) とした。

6 実験結果

本実験で得られた 211 回折環の例を Fig. 2 に示す。外側が試験片、中側がビーム中心を求めるための Fe の標

Fig. 2. Debye-Scherrer rings on display of UNIX work-station obtained with IP. Inner ring is from Fe-powder and outer ring is from specimen. (211 diffraction)

Fig. 3. Example of diffraction profile obtained with IP. Left peak is from Fe-powder and right one is from specimen. ($\alpha=0$)

準粉末の回折環である。この場合の半径方向の回折 X 線強度分布曲線の例として $\alpha=0$ の場合について Fig. 3 に示す。図の左のピークが Fe 粉末、右が試験片からの 211 回折である。Fig. 4~7 はこうして回折環から式 (5), (6), (18), (23) に対応したひずみを求め、それぞれ α および負荷ひずみに対して図示したものである。いずれも良好な直線関係が得られている。Fig. 8~10 はそれぞれ 2 章~4 章の方法によって求めた測定応力を負荷応力と比較して示した図である。負荷が零における $\sin^2\psi$ 法の測定値を ● で併記した。 σ_x はほぼ負荷応力に対して 1 対 1 の関係を示しており、また、 σ_y および τ_{xy} は負荷応力に依らず一定値が得られており、いずれも本法の妥当性を示すものである。また、 σ_x および τ_{xy} に関しては田中らの式と 4 章の結果は図中では識別できない程度によく一致した。その理由として、両者の相違が縮小する $\phi_0=40$ deg を選んだこと¹⁵⁾、入射ビーム位置を補正する際に 4 章の方法の基礎である式 (25) を用いたことが考えら

Fig. 4. $\bar{\epsilon}_\alpha$ as a function of $\cos\alpha$ for determination of stress σ_x using $\cos\alpha$ method.

Fig. 5. E_1 as a function of $\cos^2\alpha$ for determination of stress σ_y using $\cos\alpha$ method modified in this paper.

Fig. 6. $\tilde{\epsilon}_a$ as a function of $\sin \alpha$ for determination of stress τ_{xy} using $\cos \alpha$ method.

Fig. 7. E_2 as a function of $\sin 2\alpha$ for determination of stress τ_{xy} using $\cos \alpha$ method modified in this paper.

Fig. 8. Relation between applied stress by strain gauge and measured stress σ_x from whole Debye-scherrer ring on IP.

れる。

測定結果に対する各実験定数の影響を調べた結果を Table I~IV に示す。その結果次のような傾向が見られた。Table I は、IP と標準粉末との距離の入力値を粉末の回折環とあらかじめ求めておいた $2\theta_0$ (無ひずみ時の 2θ) = 156.4 (deg) を用い、幾何学的関係より算出した値 (output) および 4 章による応力値を比較したものである。その結果、このような計算によって IP-標準粉末間距離の誤差を高精度に補正可能であり、たとえば同距離に 4 mm の誤差を与えたときの誤差を $1 \mu\text{m}$ 以下に修正することができた。Table II, III は $2\theta_0$ および IP-試験片間距離の入力値を変えた場合の算出応力値等を示している。これらの値の変動は σ_x および τ_{xy} には殆ど影響を与えず、 σ_y に顕著に影響することが分かる。本実験の場合、 $2\theta_0$ が 1 (deg) 変動すると σ_x は 3 (MPa) 以下、 τ_{xy} は 2 (MPa) 以下、 σ_y は約 560 (MPa) 異なった。よっ

Fig. 9. Relation between applied stress by strain gauge and measured stress σ_y from whole Debye-scherrer ring on IP.

Fig. 10. Relation between applied stress by strain gauge and measured stress τ_{xy} from whole Debye-scherrer ring on IP.

て σ_y を 10 (MPa) 以内とするためには $2\theta_0$ を 2/100 (deg) 以内の精度で求めておくことが必要である。また、上記距離が 1 mm 変動するとき σ_x は 2 (MPa) 以下、 τ_{xy} は 0、 σ_y は約 390 (MPa) 異なった。よって σ_y を 10 (MPa) 以内とするためには上記距離の精度を約 $30 \mu\text{m}$ 以内に調整する必要がある。ただし、 $\phi = \pi/2$ の測定を行えば σ_y が高精度に得られるはずであるからこのような配慮は不要と考えられる。Table IV は、入射ビーム

Table I. Influence of distance between powder and IP on stresses. Applied stress was 200 MPa.

Powder-IP distance (mm)		Authors' method (MPa)		
Input	Output	σ_x	σ_y	τ_{xy}
46.0	50.0219	129	-79	45
47.0	50.0221	130	-78	45
48.0	50.0220	130	-78	45
49.0	50.0222	130	-77	45
50.0	50.0213	130	-77	45

Table II. Influence of $2\theta_0$ on stresses. Applied stress was 200 MPa.

$2\theta_0$ used (deg)	Authors' method (MPa)		
	σ_x	σ_y	τ_{xy}
155.0	133	804	47
156.0	131	157	46
157.0	128	-405	44
158.0	123	-886	43

Table III. Influence of the distance between specimen and IP on stresses. Applied stress was 200 MPa.

Distance (mm)		Authors' method (MPa)		
Sp-Pow (input)	Sp-IP (output)	σ_x	σ_y	τ_{xy}
30.0	80.022	132	-632	45
31.0	81.022	131	-234	45
32.0	82.022	129	154	45
33.0	83.022	128	533	45

Table IV. Influence of position of center of X-ray beam on stresses. Applied stress was 40 MPa.

EPS (μm)	Distance corrected (μm)		Authors' method (MPa)		
	Δ_x	Δ_y	σ_x	σ_y	τ_{xy}
0.1	-1038.8	500.4	-13	-207	47
1.0	-1038.3	500.4	-13	-208	47
10.0	-1029.7	500.4	-13	-208	41
100.0	-968.8	500.5	-13	-208	0
1000.0	-503.2	499.8	-14	-215	-311

推定計算において収束判定値 (EPS) を粗く設定した場合のビーム位置補正量および応力値への影響を示している。これより、入射 X 線ビーム中心位置は τ_{xy} に対して顕著に影響するが、 σ_x と σ_y には大きな変化を及ぼさないこと、また、EPS=10 (μm) でも十分な応力値が得られることが分かる。

なお、露光時間による応力測定値への影響を本実験と同一な測定条件下において調べたところ、試験片に対する露光時間が 10 (sec) であっても実用上十分な測定精度を示すことが判明している¹⁵⁾。このような結果は IP の検出感度が高いことに依ると思われるが、本法による迅速な応力測定が今後期待される。

また、本法では IP の読み取りのために専用の装置が必要であるが、回折データ取得に関しては背面反射カメラのみの簡単な光学系でよく、単一入射による必要空間スペースの狭さ、照射時間の短さ、などの点から、測定箇所に応じた複数の IP シートが使用可能ならば読み取り・解析を実験室で別に行うなどにより現場測定にも対応可能である。本法における測定経費は、従来法と同程度であるが、IP の再使用性および短時間の照射の点で有利な部分も見られる。今後、本法のような方法の理論面および装置面での一層の進歩により新しい可能性が開拓できるように思われる。

7 ま と め

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

(1) 田中らが提案した測定理論 ($\cos\alpha$ 法) の妥当性を確認するとともに、理論を発展させて σ_y の測定式および τ_{xy} の新測定式を提案した。こうして単一入射による一個の回折環から全平面応力成分が得られるようになった。

(2) $\cos\alpha$ 法は η 角を一定値と仮定することに伴う測定誤差の問題が存在する点を指摘し、この仮定を含まない新応力解法を提案しその有効性が実証できた。

(3) 本研究では、IP 画像データから回折環半径方向の回折強度曲線を抽出し半価幅中点法により回折角を決

定した。また、粉末の回折環を利用して X 線ビーム中心を高精度に決定した結果、正確な回折位置が回折環全周について得られた。また、必要な α 角データを 4 章の基礎式で近似して得、その際、4 章の応力値を得た。その結果、本実験で構築した IP 応力測定システムが応力測定用に十分有効であることを確認した。

本研究の結果、回折環の全周を使用した X 線応力測定の精度が $\sin^2$ 法とほぼ匹敵するものである見通しを得た。本法が単一入射のみのデータから全平面応力成分を得るという合理性を持つこと、 ψ 軸および 2θ 軸駆動を要さない簡単な光学系が使用できること、IP の高検出感度により測定時間が短縮可能なこと、などの特長を考慮すると、すみ肉溶接部や溝などの狭小部や高所などの現場測定に有利であり、今後 X 線応力測定における有望な手法となることが期待できる。

参 考 文 献

- 1) 日本材料学会編, “X 線応力測定法”, p. 54 (1981) 養賢堂。
- 2) 平 修二, 田中啓介, 山崎利春, 材料, **27**, 251 (1978)。
- 3) 吉岡靖夫, 新開 毅, 大谷真一, 日本材料学会第26回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 122 (1989)。
- 4) 吉岡靖夫, 大谷真一, 新開 毅, 非破壊検査, **39**, 666 (1990)。
- 5) 吉岡靖夫, 大谷真一, 長谷川賢一, 笹野睦雄, 日本材料学会第27回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 98 (1990)。
- 6) 吉岡靖夫, 新開 毅, 大谷真一, 第22回応力ひずみ測定シンポジウム, p. 95 (1990)。
- 7) 吉岡靖夫, 大谷真一, 篠原充裕, 門間輝聰, 日本材料学会第28回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 1 (1992)。
- 8) Y. Yoshioka, S. Ohya, K. Hasegawa and M. Sasano, Residual Stress 3, 985 (1992) Elsevier Applied Science。
- 9) 吉岡靖夫, 大谷真一, 古川勝久, 日本材料学会第29回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 167 (1993)。
- 10) 雨宮慶幸, 神谷信夫, 宮原諄二, 応用物理, **55**, 957 (1986)。
- 11) 大谷真一, 太田省三郎, 篠原充裕, 日本材料学会第28回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 117 (1992)。
- 12) 篠原充裕, 古川勝久, 大谷真一, 太田省三郎, 日本材料学会第29回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 191 (1993)。
- 13) T. R. マッカーラ, “計算機のための数値計算法概論”, p. 225 (1972) サイエンス社。
- 14) 佐々木敏彦, 倉元真実, 吉岡靖夫, 非破壊検査, **42**, 37 (1993)。
- 15) 佐々木敏彦, 広瀬幸雄, 日本材料学会第30回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, p. 22 (1994)。