イメージングプレートによる二次元検出回折像
を用いた X 線三軸応力解析*佐々木 敏彦^{*1}, 広瀬 幸雄^{*1}X-ray Triaxial Stress Analysis Using Whole Diffraction Ring
Detected with Imaging Plate

Toshihiko SASAKI and Yukio HIROSE

This paper describes a study on X-ray stress analysis using a two-dimensional X-ray detector. An imaging plate (IP) was adopted in this study as one of the two-dimensional detectors, which enabled us to obtain whole diffraction patterns rapidly and accurately and also to analyze their digital data in a computer. A new X-ray triaxial stress analysis, which is fitted to use the two-dimensional detector, was presented. This method was applied to measure residual stresses, introduced by grinding, as well as applied ones on a steel. The stresses measured by the present method agreed well with those measured by the conventional Dölle-Hauk method. The scattering of stresses obtained by the present method was almost the same as that obtained by the conventional method. The time of measurement for full triaxial stress analysis by the present method was almost one-thirtieth that of the conventional one. It was found that the use of IP effectively shortened the measurement time in case of triaxial stress analysis, compared with the case of plane stress analysis.

Key Words: Residual Stress, Experimental Stress Analysis, Combined Stress, Nondestructive Inspection, X-ray Stress Measurement, Imaging Plate, Triaxial Stress Analysis, $\cos \alpha$ Method, Debye-Scherrer Ring

1. ま え が き

X 線応力測定法⁽¹⁾は残留応力の有力な測定手段であり広く普及している。本法では一般に特性 X 線を材料に照射し、結晶より発生する回折 X 線の方から Bragg の式に基づいて、格子面間隔を基準とした縦ひずみ(X 線的ひずみ)を求め、平面応力を仮定した $\sin^2 \phi$ 法により応力を決定する。通常、ゴニオメータのように正確で複雑な装置を使用し、条件により 10~数十分程度の測定時間を要する。測定時間短縮には、検出器として回折線図形を一次元的に取り込める PSPC⁽²⁾⁽³⁾の使用が有効であるが、その効果はほぼ限界に達している。

近年、新しい X 線検出器として回折環全体を一度に計測する二次元的検出器が発達し、コンピュータによる回折環全体の解析が容易となってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その結果、従来の $\sin^2 \phi$ 法のように X 線的ひずみと ϕ との関係を利用した、いわゆる ϕ 角基準による方法に対して、新たに回折環全体を利用して X 線的ひずみと回折環の中心角(α 角)との関係に基づいた α 角基準による方法の実用化が可能となってきた。 α 角基準法

では、機械的な ϕ 角駆動が不要となるため装置の簡便化と測定の迅速化が期待できる。その一方で、回折環形状の変化が十分なひずみ感度を与えるか、現状の二次元検出器が応力測定に必要な分解能をもつか、入射 X 線ビーム位置を正確に把握可能か、応力測定のための新たな画像処理法の開発、など未知の課題も少なくない。

回折環全体を用いた X 線応力測定理論に関しては、平・田中⁽⁶⁾により平面応力解析法($\cos \alpha$ 法)が X 線フィルム時代に提案されている。最近この方法に対してイメージングプレート(以下 IP)を使用した場合の検討が吉岡^{(7)~(13)}により、またその後著者ら⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾により行われた。

しかし研削加工した鋼材において観察される三軸応力状態^{(16)~(20)}に対する α 角基準による測定理論はまだ提案されていない。そこで本研究では、IP および画像処理技術を活用し、回折像全体を用いて三軸応力解析するための新しい測定方法の開発を試みた。その結果、2 方向の X 線入射角から計測される 2 個の回折環のみから全三軸応力成分が決定可能であること、したがって X 線三軸応力解析に対する IP の使用は、 α 角基準法に準じた本研究の方法の適用により、平面応力解析以上に測定の迅速化に効果的であることが明らか

* 原稿受付 1995 年 3 月 20 日。

^{*1} 正員, 金沢大学 (〒920-11 金沢市角間町)。

かとなった。ただし、本研究の方法で測定される応力値は回折条件によって定まる X 線侵入深さの範囲における平均応力である。

2. 二次元回折像からの X 線三軸応力解析理論

図 1 (a) に示すように回折環上の $-\eta$ 側から α 角方向の X 線のひずみ (ε_a) を X 線入射角 (ψ_0, ϕ_0), α , Bragg 角 θ の補角 $\eta (= \pi/2 - \theta)$, 試料座標系の応力およびひずみによって表すことを考える。試料表面の X 線照射位置 O を座標の原点にとり, IP 上の入射 X 線ビームの中心を A, IP 面と ε_a 方向の交点を B とする。また, OA, OB, AB の各方向の単位ベクトルをそれぞれ $\vec{n}_0, \vec{n}, \vec{e}_a$ とすると, $\angle AOB = \eta$ であるから

次式が成立する。

$$\vec{n} = \vec{e}_a \sin \eta + \vec{n}_0 \cos \eta \quad \cdots \cdots (1)$$

さて, 図 1 (b), (c) に示すように試料座標系 O-xyz を z 軸を中心として角 ϕ_0 回転してできる座標系を O-x'y'z', さらにその y' 軸を中心として角 ψ_0 回転してできる座標系を O-x''y''z'' とする。また, z'' 軸を中心として ($\pi - \alpha$) 回転してできる座標系を O-x'''y'''z''' とする。O-xyz 系から O-x''y''z'' 系への変換マトリックスを ω_{ij} , O-xyz 系から O-x'''y'''z''' へのそれを ξ_{ij} とすると, それぞれ次のように与えられる。

$$\omega_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \phi_0 \cos \phi_0 & \cos \phi_0 \sin \phi_0 & -\sin \phi_0 \\ -\sin \phi_0 & \cos \phi_0 & 0 \\ \sin \phi_0 \cos \phi_0 & \sin \phi_0 \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \end{pmatrix} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\xi_{ij} = \begin{pmatrix} -\cos \phi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha - \sin \phi_0 \sin \alpha & -\cos \phi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha + \cos \phi_0 \sin \alpha \sin \phi_0 \cos \alpha \\ -\cos \phi_0 \cos \phi_0 \sin \alpha + \sin \phi_0 \cos \alpha & -\cos \phi_0 \sin \phi_0 \sin \alpha - \cos \phi_0 \cos \alpha \sin \phi_0 \sin \alpha \\ \sin \phi_0 \cos \phi_0 & \sin \phi_0 \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \end{pmatrix} \quad \cdots \cdots (3)$$

図 1 に示されるように $\vec{n}_0, \vec{e}_a$ はそれぞれ z'' 軸, x''' 軸と平行であるから, 次式に示す成分をもつことになる。

$$\vec{n}_0 = (\omega_{31}, \omega_{32}, \omega_{33}), \quad \vec{e}_a = (\xi_{11}, \xi_{12}, \xi_{13}) \quad \cdots \cdots (4)$$

こうして式 (1) ~ (4) より $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ の成分は次のように与えられることがわかる。

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos \eta \sin \phi_0 \cos \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \cos \phi_0 \cos \alpha - \sin \eta \sin \phi_0 \sin \alpha \\ n_2 &= \cos \eta \sin \phi_0 \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \sin \phi_0 \cos \alpha + \sin \eta \cos \phi_0 \sin \alpha \\ n_3 &= \cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \sin \phi_0 \cos \alpha \end{aligned} \quad \cdots \cdots (5)$$

後述するように, 本研究では $\phi_0 = 0$ なる条件を使用するので, このときの $n_1 \sim n_3$ を上式より求めると次のように表される。

$$n_1 = \cos \eta \sin \phi_0 - \sin \eta \cos \phi_0 \cos \alpha, \quad n_2 = \sin \eta \sin \alpha, \quad n_3 = \cos \eta \cos \phi_0 + \sin \eta \sin \phi_0 \cos \alpha \quad \cdots \cdots (6)$$

次に試料座標系のひずみ成分を $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ で表し, これらを用いて $\vec{n}$ 方向の縦ひずみ ε_a を求めることを考える。まず, ひずみの座標変換則より次式が成り立つ。

$$\varepsilon_a = n_1^2 \varepsilon_x + n_2^2 \varepsilon_y + n_3^2 \varepsilon_z + n_1 n_2 \gamma_{xy} + n_2 n_3 \gamma_{yz} + n_3 n_1 \gamma_{xz} \quad \cdots \cdots (7)$$

上式はひずみ成分表示における本法の基礎式である。さらにこれを応力成分で表示することを考える。試料座標系における応力成分を $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ とし等方性材料を仮定してひずみ成分との関係を表すと次のようになる。

Fig. 1 Principle of the present method for triaxial stress analysis, and definition of coordinate system and symbols used in the text

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy}, \gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{yz}, \gamma_{xz} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xz}\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(8)$$

式(8)を式(7)へ代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \sigma_x \frac{1}{E}[n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \sigma_y \frac{1}{E}[n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)] + \sigma_z \frac{1}{E}[n_3^2 - \nu(n_1^2 + n_2^2)] \\ &\quad + \tau_{xy} \frac{2(1+\nu)}{E}n_1n_2 + \tau_{yz} \frac{2(1+\nu)}{E}n_2n_3 + \tau_{xz} \frac{2(1+\nu)}{E}n_3n_1\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(9)$$

上式が本三軸応力測定法の基礎式の応力成分表示である。さて、本基礎式から応力成分を得るために、図2に示すように回折環上において α が ε_a と π 異なるものを $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ とし、同様にして、 $-\alpha$ 方向、 $\pi-\alpha$ 方向における X 線のひずみをそれぞれ $\varepsilon_{-\alpha}$ および $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ と表し、これらのひずみから次のようなパラメータ $a_1 \sim a_3$ を導くことを考える⁽⁶⁾⁽¹⁴⁾。

$$a_1 \equiv \frac{1}{2}[(\varepsilon_a - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})], a_2 \equiv \frac{1}{2}[(\varepsilon_a - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})], a_3 \equiv \frac{1}{2}[(\varepsilon_a + \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} + \varepsilon_{\pi-\alpha})]\quad \dots\dots\dots(10)$$

そうすると、式(9)、(10)から次の関係式が得られることがわかる。

$$\begin{aligned}a_1 &= -\frac{1+\nu}{E}[(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\phi_0 + 2\tau_{xz} \cos 2\phi_0] \sin 2\eta \cos \alpha \\ a_2 &= \frac{2(1+\nu)}{E}[\tau_{xy} \sin \phi_0 + \tau_{yz} \cos \phi_0] \sin 2\eta \sin \alpha, \quad a_3 = \Phi \cos^2 \alpha + \Psi\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし Φ および Ψ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{2(1+\nu)}{E}[(\sigma_x - \sigma_z) \cos^2 \phi_0 - (\sigma_y - \sigma_z) - \tau_{xz} \sin 2\phi_0] \sin^2 \eta \\ \Psi &= \sigma_x \left(\frac{2}{E}\right)[\cos^2 \eta \sin^2 \phi_0 - \nu(\sin^2 \eta + \cos^2 \eta \cos^2 \phi_0)] + \sigma_y \left(\frac{2}{E}\right)(\sin^2 \eta - \nu \cos^2 \eta) \\ &\quad + \sigma_z \left(\frac{2}{E}\right)[\cos^2 \eta \cos^2 \phi_0 - \nu(\sin^2 \eta + \cos^2 \eta \sin^2 \phi_0)] + \tau_{xz} \frac{4(1+\nu)}{E} \cos^2 \eta \sin 2\phi_0\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(12)$$

このように a_1 および a_2 はそれぞれ $\cos \alpha$, $\sin \alpha$ に関して直線関係をもつことがわかる。そこでこの直線の傾きを求めると次のように表される。

$$\begin{aligned}\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} &= -\frac{1+\nu}{E}[(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\phi_0 + 2\tau_{xz} \cos 2\phi_0] \sin 2\eta \\ \frac{\partial a_2}{\partial \sin \alpha} &= \frac{2(1+\nu)}{E}[\tau_{xy} \sin \phi_0 + \tau_{yz} \cos \phi_0] \sin 2\eta\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(13)$$

さらにこの両者について $\phi_0 > 0$ と $\phi_0 < 0$ に対する次式のような平均と偏差を求めることを考える。

Fig. 2 Explanation of X-ray starins determined from diffraction ring and symbols used in the text

$$\begin{aligned}b_1 &\equiv \frac{1}{2} \left[\frac{\partial a_1(\phi_0 > 0)}{\partial \cos \alpha} + \frac{\partial a_1(\phi_0 < 0)}{\partial \cos \alpha} \right] \\ b_2 &\equiv \frac{1}{2} \left[\frac{\partial a_1(\phi_0 > 0)}{\partial \cos \alpha} - \frac{\partial a_1(\phi_0 < 0)}{\partial \cos \alpha} \right] \\ b_3 &\equiv \frac{1}{2} \left[\frac{\partial a_2(\phi_0 > 0)}{\partial \sin \alpha} + \frac{\partial a_2(\phi_0 < 0)}{\partial \sin \alpha} \right] \\ b_4 &\equiv \frac{1}{2} \left[\frac{\partial a_2(\phi_0 > 0)}{\partial \sin \alpha} - \frac{\partial a_2(\phi_0 < 0)}{\partial \sin \alpha} \right]\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(14)$$

式(13)を式(14)へ代入して応力成分に関して整理すると次式が得られる。

$$\sigma_x - \sigma_z = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\phi_0} b_2$$

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \phi_0} b_4 \\ \tau_{yz} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \phi_0} b_3 \\ \tau_{xz} &= -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos 2\phi_0} b_1 \\ &\dots\dots\dots(15)\end{aligned}$$

すなわち、図 1 (a) に示すように X 線入射方向が $+\phi_0$ および $-\phi_0$ の場合について回折環を計測して a_1 および a_2 を実測し、続いて式(14)より $b_1 \sim b_4$ を求めると、全せん断応力および垂直応力成分の差 ($\sigma_x - \sigma_z$) が得られる。

一方、式(11)、(12)における ϕ より $\sigma_y - \sigma_z$ に関する次のような関係式が得られる。

$$\begin{aligned}\sigma_y - \sigma_z &= -\phi \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin^2 \eta} \\ &+ (\sigma_x - \sigma_z) \cos^2 \phi_0 - \tau_{xz} \sin 2\phi_0 \dots\dots\dots(16)\end{aligned}$$

ここで、式中の ϕ は、まず回折環から測定されるひずみについて式(10)で定義される a_3 を計算し、続いて a_3 を $\cos^2 \alpha$ に対して直線近似したときの傾きとして与えられる量である。式(15)よりすでに $\sigma_x - \sigma_z$ および τ_{xz} が得られているので上式から $\sigma_y - \sigma_z$ が決定できる。以上の結果に基づいてさらに垂直応力成分を分離するために、 ε_α を σ_z のみによって表すことを考える。すなわち、式(9)を整理すると次式のように書き換えることができる。

$$\varepsilon_\alpha = \frac{1-2\nu}{E} \sigma_z + X \dots\dots\dots(17)$$

ここで右辺第 2 項の X は次式で表される。

$$\begin{aligned}X &= \frac{2(1+\nu)}{E} (\tau_{xy} n_1 n_2 + \tau_{yz} n_2 n_3 + \tau_{xz} n_3 n_1) \\ &+ \frac{1}{E} (\sigma_x - \sigma_z) [n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] \\ &+ \frac{1}{E} (\sigma_y - \sigma_z) [n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)] \dots\dots\dots(18)\end{aligned}$$

上式において $n_i (i=1, 2, 3)$ は式(5)に示されるように回折環の中心角 α の関数であるので、 X も α の関数 $X(\alpha)$ となる。そこで α を変えることによって X

を変数のように変化させると、 ε_α と X の関係は式(17)より、その傾きが 1 で、切片が $\sigma_z(1-2\nu)/E$ であるような直線になる。したがって、 σ_z はその切片から得られる。また得られた σ_z の値と、すでに得られている $\sigma_x - \sigma_z$ および $\sigma_y - \sigma_z$ とから各垂直応力成分が判明する。こうして計 6 個の全三軸応力成分がすべて分離して求められるようになる。なお、以上の応力解法は $\pm \phi_0$ の 2 方向入射から得られる回折環を用いた場合に対する方法であるが、測定精度向上のためには X 線入射角度数を増やし、回折像データをより多く測定する方法の導入が考えられる。例えば、 $\phi_0=0$ および 90° に対してそれぞれ $+\phi_0$ および $-\phi_0$ の合計 4 個の回折像を利用する方法や、さらには各 ϕ_0 に対して複数の ϕ_0 に対する回折像を使用する方法も考えられる。前者においては σ_y 成分の、また後者では全応力成分の測定精度向上に有効であると考えられる。

3. 理論の検証

3.1 試験片および実験方法 本実験に用いた試料は市販の炭素鋼 S55C である。素材を L 55 mm $\times$ W 10 mm $\times$ H 5 mm の形状寸法に加工した後各表面を研削仕上げしてから焼なまし ($850^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$ 保持後炉冷) を行い、さらに、均一な回折像を得るために焼入れ ($850^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$ 保持後油冷) および焼戻し ($550^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ 保持後水冷) を施した。その後表面を研削加工して残留応力を与えた。研削加工は、上向き研削を設定切込み量 10 μm 、研削パス数 1 pass にて行い、砥石には $\phi 280 \times 32 \text{ mm}$ の WA46J6V を使用し、砥石の周速 1 365 m/min、テーブル速度 20 m/min とした。X 線測定には CrK α 線を回転対陰極形の発生装置にて使用し、表 1 に示す条件で行った。X 線カメラは、市販の背面反射ラウエカメラを一部改良して、フィルムカセット部に 5 in $\times$ 5 in の IP シートが装着できるようにした。また試験片は図 3 に示すように試料表面を中心に回転可能な自作の四点曲げ負荷ジグに取付けた。入射 X 線ビームの中心を決定する目的で、鉄粉末を図 3 に示すようなカセットに取付けて使用した。このとき粉末と試験片間距離は 30 mm (粉末-IP 間距離は 50 mm) とし、試験片の回折像および粉末の回折像を IP 上に二重撮影した。

IP からの X 線強度の読取りには市販の装置を使用して行った。本装置は回転ドラム上に IP を装着した状態で回転させながらレーザービームを当て、発生する蛍光を計測してコンピュータに読み込む方式のものである。本実験では読取り分解能 100 μm にて行った。こうして回折像を 1 024 $\times$ 1 140 個の画素によって表し

Table 1 Conditions of X-ray diffraction experiment in case of the present method using imaging plate

X-ray	CrK α
Diffraction line	α Fe 211
Reference diffraction	α Fe 211 (powder)
Tube voltage	30 (kV)
Tube current	50 (mA)
Collimator diameter	1 (mm) in diameter
IP-specimen distance	80 (mm)
IP-powder distance	50 (mm)
Incident angle ϕ	$\pm 30^\circ$
Irradiated time	150 (sec)(specimen)
Irradiated time	60 (sec) (powder)

た。画像データはハードディスクにセーブされた後コンピュータ画面上に表し(後述の図5), 画面よりおよそその入射ビームの中心位置の画素番号を読み取れるようにした。そしてこの位置より半径方向の回折線図形(後述の図6)およびピーク位置を, 後述する画像処理方法によって決定した。

なお, 試験片にはひずみゲージを X 線照射面の裏面に取付け, この値が 0 から 1000×10^{-6} まで 200×10^{-6} 間隔で負荷し, それぞれ 5 回ずつ応力測定した。

本実験結果の比較用として, 試験片の残留応力をあらかじめシンチレーションカウンタを用いた市販の X 線応力測定装置によって求めておいた。おもな測定条件を表 2 に示す。得られた測定データに対して

Table 2 Conditions of X-ray diffraction experiment in case of the Dölle-Hauk method

X-ray	CrK α
Diffraction line	α Fe 211
Tube voltage	30 (kV)
Tube current	10 (mA)
Irradiated area	2×6 (mm ²)
Fixed time	3 (sec)
Step width near peak	0.3°
Step width for B.G.	1.0°
Tilt angles (ϕ)	7.5°, 13°, 18°, 23° 27°, 30°, 33°, 36°, 39° 42°, 45°, 48°, 51°
Measured direction (ϕ)	0.45°, 90°, 180°, 225° 270°
Peak determination	Half value breadth method

Table 3 Material constants used for the calculation of stresses

X-ray Young's modulus	$E_x = 206$ (GPa)
X-ray Poisson's ratio	$\nu_x = 0.28$
Mechanical Young's modulus	$E_m = 206$ (GPa)
Diffraction angle at stress free	$2\theta_0 = 156.4^\circ$ (α Fe)

Fig. 3 Experimental procedure for applying mechanical bending stress, and for obtaining diffraction patterns of specimen (top) and standard substance (bottom)

Dölle-Hauk 法⁽¹⁷⁾ を適用して応力計算した。本法および Dölle-Hauk 法による応力計算で使用した定数値を表 3 に示す。

3.2 回折環画像データ処理 回折環半径方向の回折線図形を得るために, 本研究で用いた画像データ処理法を図 4 に示す。すなわち, 回折環中心から距離 P 離れた点に対して, P を囲む一辺 $200 \mu\text{m}$ の正方形領域を設定し, この範囲に含まれる全画素についてこの領域に含まれた面積を重みとする加重平均を求め, この値を点 P の X 線強度とみなした。このような操作を $100 \mu\text{m}$ 間隔で行い, α 方向の強度分布を得た。さらに回折線図形に対し, 前後 3 画素の移動平均処理による平滑化を行った後, 半価幅中点法による回折ピーク位置決定を行った。この処理を α が $1^\circ \sim 360^\circ$ について連続して行う C++ によるプログラムを開発し, UNIX 機上で使用した。

3.3 回折環および回折線図形 図 5 には本実験で得られた回折環, および前述の画像処理によって求められた全ピーク位置の変化を比較して示す。いずれも内側がカメラ長 50 mm の鉄粉末, 外側が同 80 mm

Fig. 4 Procedure of image processing for obtaining diffraction profiles from image data detected with imaging plate

Fig. 5 Example of diffraction patterns of steel processed by grinding (outer ring of (a)) and that of standard substance (inner ring of (a)), and positions of diffraction peaks determined after the present procedure (b). Applied strain is 0, and $\phi_0 = 30^\circ$

の試験片の回折環に対応する。図 6 は $\alpha=0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ における回折環中心から半径方向の回折線図形を比較した図である。いずれも左側ピークが鉄粉末の 211 回折、右側が試験片の 211 回折である。粉末のピーク位置がほぼ一定であるのに対し試験片では変化しており、試験片表面には研削による残留応力が生じていることがわかる。

3・4 入射 X 線ビーム位置決定 本法の適用においては、入射 X 線ビームの正確な位置の決定が不可欠であると考えられる。そこで本研究では IP に二重撮影した鉄粉末の回折環を利用して行った。まず粉末の回折環は真円であるからその直径の中心が円の中心であり、X 線ビームの中心位置と一致すると考えた。ただし、画面上に再生した回折環から最初に目視で求めた粗中心による誤差を考慮して、まず $\alpha=1^\circ$ 間隔で 180 個の直径の中心を求め、その平均位置を新原点として全データの座標を修正した。次に全データを Taylor の微分補正法によって式(9)の関数形に近似した。ただし計算時間および収束の安定性の理由で $\sigma_x = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ とした。このようにして得られた近似式から α が 1° 間隔の座標点を計算して求めた。このような操作を原点移動量が $0.1 \mu\text{m}$ 以下となるまで繰返し、こうして最後に得られた中心位置を入射 X 線ビーム位置とみなした⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。その結果、本実験における X 線ビーム位置補正量(初期推定粗中心位置と収束計算後の位置との差)は最大のもので約 $800 \mu\text{m}$ 、平均 $300 \mu\text{m}$ 程度であった。

3・5 a_1, a_2, a_3 線図 試験片から得られた回折環ピーク位置座標を上記の入射 X 線ビーム位置に関して修正ならびに関数近似後、 α が 1° 間隔の座標点および回折環半径を求めた。その回折環半径 (R) および IP-試験片表面間距離 (L) からまず $2\eta = \tan^{-1}(R/L)$ を計算した。続いて回折角 $2\theta = (\pi - 2\eta)$ ならびに X 線のひずみ $\varepsilon_a = (\theta_0 - \theta) \cot \theta_0$ を得た。図 7 はこのようにして得られた回折環上の 4 個のひずみか

Fig. 6 Example of diffraction profiles for different central angle α obtained from image data detected with imaging plate

ら計算された式(10)の a_1, a_2, a_3 について、それぞれ α に対する変化を図示したものである。ただし、 α が 10° 間隔のデータのみをプロットした。いずれの関係も直線関係を示しており式(11)の理論式と一致する。 a_1 と a_2 では X 線入射角 ϕ_0 の符号に依存して異なる傾きを示している。式(13)よりそれぞれの傾きが応力に対応している。

3・6 測定応力と負荷応力の対応 図 8 は式(15)～(18)を用いて 6 個の三軸応力成分を求め、計測されたひずみゲージの値と表 3 に示した機械的ヤング率 (E_m) とを掛けて得られる負荷応力に対してプロットした図である。図中には 5 回測定に対する 90% の信頼区間も示す(以降の図も同様)。 σ_x は負荷応力に対して増加を示し、その傾きはほぼ 1 に等しい。それ以外の応力はいずれの場合も負荷応力に依らず一定値を示している。以上の測定結果はいずれも妥当なものである。5 回測定におけるばらつきは σ_y において他より大きい傾向が見られるが、その他の応力成分に関しては従来の $\sin^2 \phi$ 法と遜色ない結果が得られている。比較のため、通常の X 線応力測定装置を用いて Dölle-Hauk 法による三軸応力解析を負荷応力 0 MPa の場

Fig. 7 Parameters a_1, a_2 and a_3 as a function of central angle α in case of applied strain of 1000×10^{-6}

Fig. 8 Stress components determined by the present method (○) as well as those determined by the Dölle-Hauk method (●), and their change due to applied stress

Fig. 9 Distribution of X-ray strain along the central angle α of diffraction ring. Unit of applied strain (ϵ_{app}) in the figure is $\times 10^{-6}$

Fig. 10 Influence of the diffraction angle at stress free state, $2\theta_0$, on the stress, σ_x , determined by both the present method and the Dölle-Hauk method

合について行った結果、ならびに IP を使用した本法の結果 (5 回測定の実値) とを列記すると次のようになった。

$$\begin{aligned} \text{本研究の方法: } & \begin{bmatrix} -327 & -9 & 22 \\ -9 & -415 & 2 \\ 22 & 2 & 3 \end{bmatrix} \text{ [MPa]} \\ \text{Dölle-Hauk 法: } & \begin{bmatrix} -366 & 0 & 18 \\ 0 & -355 & 0 \\ 18 & 0 & 37 \end{bmatrix} \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

また、Dölle-Hauk 法による結果を図 8 中に黒丸印によって示すが、本法で得られた応力はほぼ Dölle らの方法による結果と一致していることがわかる。本法の測定精度に影響する因子として、まず三軸解析で問題となる無応力状態における回折角 ($2\theta_0$) が重要と考えられるが⁽¹⁸⁾、そのほかにもひずみ感度、入射 X 線ビーム位置の精度、IP と試験片表面間距離、IP 画像処理条件⁽¹⁵⁾ なども重要である。そのうちのいくつかについて以下で考察する。

4. 考 察

まず、本法のひずみ感度を Dölle らの方法の場合と

比較する。図 9 に回折環全体における ϵ_α の変化を、負荷ひずみおよび ϕ_0 が変化する場合について図示する。これより回折環全体でのひずみの最大変化量は約 800×10^{-6} である。Dölle-Hauk 法用に測定した $2\theta\text{-sin}^2\phi$ 線図では、 $0 \leq \phi \leq 51^\circ$ の測定範囲において約 1300×10^{-6} のひずみ変化となり、上記の回折環全体の変化量に対して約 1.6 倍であった。これは回折環上の ϕ 変化範囲は $\phi_0 - (\pi/2 - \theta) \leq \phi \leq \phi_0 + (\pi/2 - \theta)$ で表され、これより本実験の場合 $18.2^\circ \leq \phi \leq 41.8^\circ$ となり、測定した $2\theta\text{-sin}^2\phi$ 線図上の ϕ 変化量に比べて少なくなるからである。本法における ϕ 範囲は ϕ_0 および θ に依存するが、Dölle-Hauk 法のような従来の ϕ 角基準法に比べ通常狭い範囲となる。しかしながら、本法では回折環全体の情報がつねに得られるため ϵ_α と α の関係について非常に多数のデータを使用できる特長がある (本実験では 360 個使用)。Dölle-Hauk 法では各 ϕ 方向について通常 10 個程度 (本実験は 13 個) 用いることに比べれば、本法でははるかに多数個のデータ数が迅速かつ容易に使用可能であり、この特長により本法では測定精度の維持が可能になるものと推察される。

次に、X 線三軸応力測定において従来よりつねに問題視されている $2\theta_0$ の影響を検討する。 $2\theta_0$ が 156° および 157° として本法による応力計算を行い、応力値の変動を調べた結果を図 10 に示す。図 10 には同様に Dölle-Hauk 法の結果も併記した。これより、 $2\theta_0$ が 1° 変化すると σ_x は本法が約 170 MPa 変化するのに対し、Dölle-Hauk 法では 850 MPa すなわち本法の 5 倍変化することがわかる。同様にして他の応力成分の場合について調べた結果、Dölle-Hauk 法ではすべての垂直応力が $2\theta_0$ の影響を大きく受けるがそれらの差の値は影響をほとんど受けなかった。これに対して本法では σ_x , σ_z , $\sigma_x - \sigma_z$ は大きな影響を受けないが σ_y および $\sigma_y - \sigma_z$ が影響を受け、しかもその変化量は Dölle-Hauk 法のものより大きいことがわかった。 $2\theta_0$ 変動に対する両方法の異なった挙動の原因については今のところ不明であるが、本法において σ_x および σ_z が $2\theta_0$ の変動に対して従来法の 1/5 程度と比較的影響が少ない点は注目に値する。なお、本法の精度に関する解析的な説明は今後の課題とする。

本法において σ_y の測定精度を改善させる方法として、新たに $\phi = \pm 90^\circ$ の測定を追加し合計 4 個の回折環を用いることが考えられる。IP に必要な測定時間は標準粉末の撮影を含めても数分以下であり、このような測定によっても Dölle らの方法を用いる場合に比較すればはるかに短時間で測定であり、測定の迅速化には大きな影響はないと考えられる。

5. む す び

二次元的 X 線検出器で回折像を計測した場合に対する新しい X 線三軸応力測定法を提案した。本研究の方法は α 角基準を採用することにより、2 個の X 線入射角によって得られる回折像の全体から、全三軸応力成分が測定可能である点が大きな特徴である。従来のシンチレーションカウンタや PSPC を使用して Dölle-Hauk 法によって同様な解析を行う場合には、条件にもよるが本法の約 30 倍以上の入射角個数が必

要であるから、本法により大幅な測定の迅速化が期待できる。本研究ではイメージングプレートを使用した実験装置を試作し、また、専用の回折画像処理方法を開発して本法の検証を行った結果、ほぼ従来法と匹敵する測定精度が得られる見通しを得た。なお、 σ_y には他の応力成分に比べてやや大きな誤差が見られたが、 $\phi = \pm 90^\circ$ の測定や ϕ_0 数を増やすなどの工夫によって改善される可能性があるので今後の検討課題としたい。

最後に、本実験に対して献身的に協力された金沢大学学生、小熊雅章、加藤光兼、山田敏寛、の各氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 日本材料学会編, X 線応力測定法, (1981), 54, 養賢堂.
- (2) 吉岡・長谷川・持木, 材料, **27**-294(1978), 216.
- (3) 吉岡・長谷川・持木・関口, 非破壊検査, **27**-11(1978), 744.
- (4) 雨宮・神谷・宮原, 応用物理, **55**(1986), 957.
- (5) Amemiya, Y., Kamiya, N. and Satow, Y., *Nucl. Instr. Meth.*, **A**, **246**(1986), 572.
- (6) 平・田中・山崎, 材料, **27**(1978), 251.
- (7) 吉岡・新開・大谷, 第 26 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1989-7), 122.
- (8) 吉岡・大谷・新開, 非破壊検査, **39**-8(1990), 666.
- (9) 吉岡・大谷・長谷川・笹野, 第 27 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1990-7), 98.
- (10) 吉岡・新開・大谷, 第 22 回応力ひずみ測定シンポジウム, (1990-1), 95.
- (11) 吉岡・大谷・篠原・門間, 第 28 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1992-7), 1.
- (12) Yoshioka, Y., Ohya, S., Hasegawa, K. and Sasano, M., *Residual Stress* **3**, (1992), 985.
- (13) 吉岡・大谷・古川・第 29 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1993-7), 167.
- (14) 佐々木・広瀬, 第 30 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1994-7), 22.
- (15) 佐々木・加藤・広瀬, 日本非破壊検査協会平成 6 年度秋季大会講演概要集, (1994-10), 215.
- (16) 石井, 機論, **13**-43(1947), 71.
- (17) Dölle, H., *J. Appl. Cryst.*, **12**(1979), 489.
- (18) 英・藤原, 材料, **31**-342(1982), 227.
- (19) 英・藤原, 材料, **30**-338(1981), 1095.
- (20) 英・藤原, 材料, **32**-354(1983), 245.