

# Measurement of Residual Stress Distribution by Means of Image Plate and Computerized Tomography

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/569">http://hdl.handle.net/2297/569</a>

# IP および CT 理論を用いた残留応力分布測定

佐々木 敏彦・関 勝博\*

## Measurement of Residual Stress Distribution by Means of Image Plate and Computerized Tomography

Toshihiko SASAKI and Katsuhiro SEKI

### 1. 緒 言

通常、X線を用いた応力測定法には Bragg の条件式と弾性理論を用いて応力値が求められ、 $\sin^2\Psi$  法が一般的に用いられている。一方、1960 年頃までは写真法が主流であり、背面反射カメラと X 線フィルムを用いて測定されていた。近年、その X 線フィルムに代わって、イメージングプレート (Image Plate, 以下 IP) と称される新しい 2 次元的 X 線検出器を X 線材料強度研究への適用や、細束 X 線解析、X 線応力測定への適用が吉岡らによって最初に行われ、X 線フィルム時代に平、田中らが考案した  $\alpha$  角基準法 ( $\cos\alpha$  法) を使用する一連の報告がされている。

一般に使われている  $\sin^2\Psi$  法は、数点の入射角  $\Psi$  について測定を行う（角基準法であるのに対し、 $\cos\alpha$  法は回折環全周の情報を用いて測定を行う。また、 $\cos\alpha$  法を用いる場合单一入射によって応力測定が可能ため、測定時間の短縮が図れるとともに、入射角  $\Psi$  および回折角  $2\theta$  軸の駆動が不要なため測定装置が簡単な構造となる。その結果測定に必要な空間が少なく、狭い箇所の測定にも使用できる。そのため、今後有望な応力測定法であると考えられる。

だが、一般的に粗大結晶粒の応力測定を行うと、回折に寄与する結晶粒の個数が不十分となり、回折環が斑点状になる。また、 $\cos\alpha$  法で応力を算出するのに重要な入射 X 線中心からの半径分布についても非常に大きなばらつきが生じる。これは、微小部の X 線応力測定を行う際の現象と同じである。そのため、X 線照射

中に試験片の平面のみを移動させる（以下 試料平面運動法）等を行い、回折に寄与する結晶粒の個数を増加させ、測定を行っている。しかしながら、これによって得られる応力値は X 線照射領域の平均的な応力値となり微小領域の応力値とはいえない。

そこで本研究では、このような平均的な応力値からコンピュータトモグラフィ (Computerized Tomography, 以下 CT) 理論を適用することにより、微小領域の応力値を得るために基礎的な研究を行った。

### 2. 測定理論

2-1 平面応力解析理論 ( $\cos\alpha$  法) Fig. 1 のように試料と IP の座標系を定義し、入射 X 線ビームを試料の法線方向から  $\phi_0$  だけ傾斜して入射させ、これによって材料から発生する回折環を入射ビームと垂直に配置した IP 上に撮影する場合について考える。多相材料の場合、試料表面と垂直な方向の応力成分を無視できないため、測定される応力値は次式のように ( $\sigma_x - \sigma_z$ ) の形で表す。

$$\sigma_x - \sigma_z = \frac{1}{\sin 2\eta_0} \left[ - \left( \frac{2}{S_2} \right) \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_i}{\partial \cos \alpha} \right) - 2\tau_{xz} \cos 2\eta_0 \right] \quad (1)$$

ここで、 $\eta$  は Bragg $\theta$  の余角 ( $\eta = \pi/2 - \theta$ )、 $\alpha$  は回折環中心角、 $S_2$  は X 線弾性定数 ( $S_2 = 2(1+\nu)/E$ ) を表す。また、 $a_i$  は、回折環の中心角がそれぞれ  $\alpha, -\alpha, \pi + \alpha, \pi - \alpha$  であるような回折ビームから得られる X 線的ひずみ  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_{-\alpha}, \varepsilon_{\pi+\alpha}, \varepsilon_{\pi-\alpha}$  から導かれるパラメータで、次式で与えられる。

$$a_1 = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad (2)$$

ここで簡単のため、 $\tau_{xz} = 0$  とみなすと(1)より次式が得られる。

$$\sigma_x - \sigma_z = -\left(\frac{2}{s_2}\right) \frac{1}{\sin 2\psi_0} \frac{1}{\sin 2\eta} \left(\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha}\right) \quad (3)$$

式(3)を利用すると、1個の回折環全体のX線的ひずみから  $a_1$  対  $\cos \alpha$  関係を求め、その直線の傾きを得ることにより、応力 ( $\sigma_x, \sigma_z$ ) が決定できることになる。

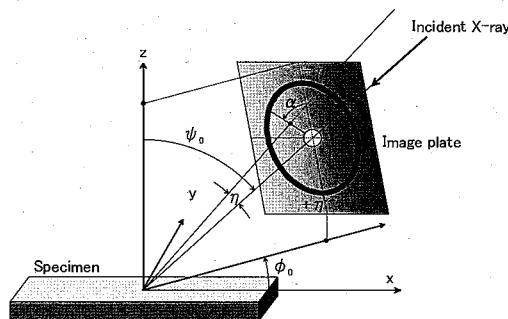


Fig. 1 Definition of coordinate system and symbols.

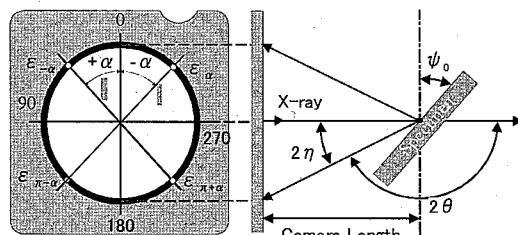


Fig. 2 X-ray stains used for stress calculation.

**2-2 X線回折におけるCT理論** 近年における臨床医学機器のうちで最も画期的な発明は、X線断層撮影装置であると言われている。この装置によるX線CT法は、対象物体に対して様々な方向からX線を透過させX線強度の変化により観察像を得る過程と、その観察像をコンピュータ内で再生する過程から構成されてい

る。この手法により、三次元的広がりを持つ対称内部の情報を外側から観察することが可能となった。

しかしながら、応力測定はX線回折法によるものであるため、通常のCT理論とは多少異なる。そこで、本節ではX線応力測定時のCT理論について説明する。

Fig. 3のように試料面上に試料座標系を設定する。試料座標系  $s_1, s_2$  をそれぞれ  $x, y$  とする。また、原点を中心として反時計まわりに  $\theta$  回転した座標系を XY 座標系とし、試料面の応力分布を  $\sigma_{ij}(x, y)$  とする。

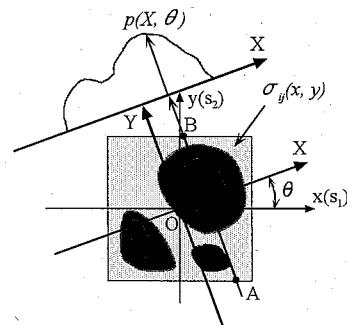


Fig. 3 Principle of computerized tomography.

ここで、Y軸に平行な直線AB上のX線応力測定について考える。X線照射領域内の結晶数が少ない場合（粗大結晶材の測定や微小領域測定）などはAB上の各点でのポイント測定では回折環が斑点状となるため、正確なX線応力解析は困難となる。そこで前述の試料平面運動法を適用すれば、均一かつ連続的な回折環が得られ、X線応力測定理論が適用可能となる。なお、このとき得られた応力は照射線AB上の平均的な応力である。以下、この応力を  $\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta)$  と表す。ここで、簡単のためコリメータの径が小さく、応力は照射点内においてXに関して一定であると仮定する。そうすると  $\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta)$  について次式が成立する。

$$\sigma_{ij}^{IP}(X, \theta) = \frac{\int_{AB} \sigma_{ij}(x, y) dY}{l(X, \theta)} \quad (4)$$

このとき、 $l(X, \theta)$  は試料上の AB の長さを表す。次に次式のように  $p(X, \theta)$  を定義する。

$$p(X, \theta) = \sigma_{ij}^{IP}(X, \theta) \cdot l(X, \theta) \quad (5)$$

そうすると式(4), (5)から次式が得られる。

$$p(X, \theta) = \int_{AB} \sigma_{ij}(x, y) dY \quad (6)$$

したがって、試料面の応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  を再構成するには、式(6)の積分を解けばよいことになる。このとき  $p(X, \theta)$  は、 $\sigma_{ij}(x, y)$  の  $\theta$  方向へのプロジェクション (Projection, 投影) である。もし、 $p(X, \theta)$  が X および  $\theta$  の異なる種々の線上に対して得られるならば、CT 理論による断層画像の再構成プロセスを経て、応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  が求められる。

次に、式(6)から応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  を求めるためには再構成する必要がある。再構成法には様々な方法が存在するが本研究ではフィルタ補正と、多数の投影から 2 次元分布を近似的に復元する逆投影法を組み合わせた convolution 法を用いた。

convolution 法は、投影像に対してフィルタ補正を行い、その後、逆投影を行う方法である。本方法の場合、応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  は次式のようになされる。

$$\sigma_{ij}(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi q_0(X) d\theta \quad (7)$$

ただし、各パラメータの意味は次のとおりである。

$$X = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (8)$$

$$q_0(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p(X - S, \theta) h(S) dS \quad (9)$$

$$h(X) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |U| \exp(iUX) dU \quad (10)$$

ここで、U は XY 座標系に対応するフーリエ空間上の UV 座標に対応する。式(7)～(10)はフーリエ逆変換である  $h(X)$  と  $p(X, \theta)$  との重畠積分  $q_0(X)$  をまず求め、次に、 $q_0(X)/2\pi$  の値を  $\theta$  に関して積分すれば、xy 平面における応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  が得られることを示している。この方法によれば、各点でのスポット測定において均一かつ連続的な回折環が得られなくとも、試料平面振動法により線上的平均応力が求められれば応力分布  $\sigma_{ij}(x, y)$  が推定可能となる。

### 3. 実験方法

3-1 試験片 供試材には、連続铸造法により製造した二相ステンレス鋼 (SUS329J4L) の冷間圧延材を用いた。組織写真を Fig. 4 に示す。あらかじめ引張り試験により機械的性質を求めた結果、0.2%耐力、引張強さはそれぞれ 620 MPa, 790 MPa であった。

形状はワイヤー放電加工機で切り出し、加工誘起変態の影響を取り除くため測定面を 1 mm 平面研削した後、片側 200 μm ずつ電解研磨を行った。最後に再びワイヤー放電加工機で切欠きを入れ Fig. 5 に示す形状とした。

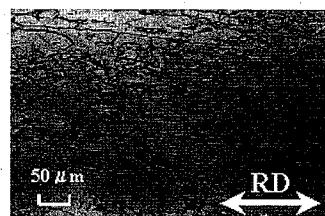


Fig. 4 Microstructures of specimen

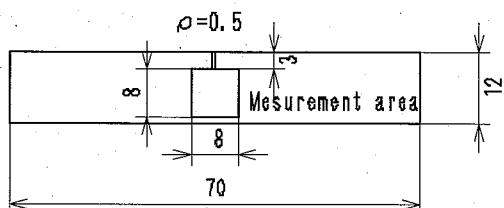


Fig. 5 Shapes of specimen

Table I Chemical components of specimen. (wt. %)

Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.91	24.67	7.37	3.01	Bal.

3-2 測定方法 本測定ではFig. 5に示すように、切欠き先端に接する $8 \times 8 \text{ mm}^2$ の正方形領域をCT再構成領域とし、Fig. 6に示すような線上の回折環を撮影し応力分布の測定を行った。このときのX線測定条件をTable IIに示す。

また、このとき本来ならばFig. 6に示すように測定ラインをとらなければならないが試料平面運動法の性質上、運動長さが5mm以下のものは応力値に大きなばらつきが生じるために、CT測定条件をTable IIIのように設定し測定を行った。また、Fig. 6の全ての図において切欠きの位置は上部の中央である。

#### 4. 実験結果と考察

CT理論による応力分布の再構成を行う際、重要なのが実験値に運動長さを乗じたプロジェクションと呼ばれるものである。そこで、代表的なプロジェクションデータである $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ のものについて検証を行った。

X線応力測定によって得られる応力値は相応力であり、複合則を用いることによりマクロ・ミクロ応力の分布が算出可能である。Fig. 7はマクロ応力のプロジェクションデータである。また、この時の体積率 $f$ は標準値である0.5とした。

これを見ると、 $0^\circ$ の場合はX軸が4mmに近づくにつれ値が大きくなっているが、 $90^\circ$ のときはX軸が0mmに近づくにつれ値が大きくなっている。つまり、切欠き近傍に応力集中していることがわかる。

これにより本測定方法の妥当性が証明されたと考えられる。

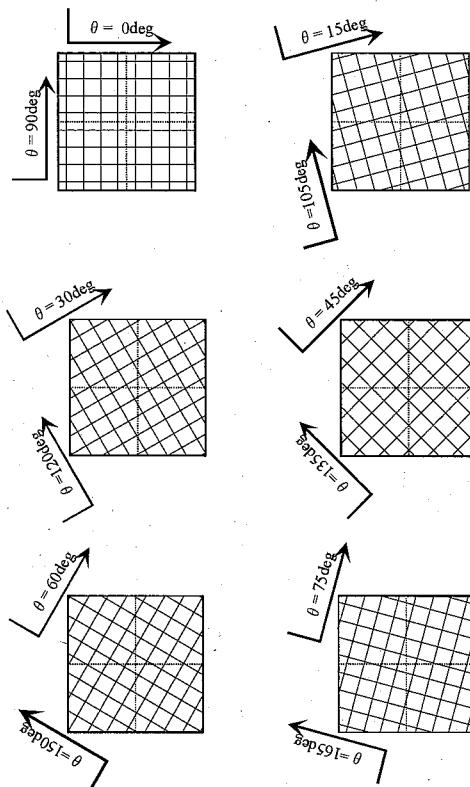


Fig. 6 Relation between scanning line length

Table II X-ray diffraction conditions.

Characteristic X-ray Diffraction line, $hkl$	Cr-K $\alpha$	Cr-K $\beta$
Mechanical Young's modulus E, GPa	$\alpha 211$ 206	$\gamma 311$ 187
Mechanical Poisson's ratio	0.28	0.30
Tube voltage, kV	40	
Tube current, mA	200	
Collimator $\phi$ , mm	1	
Incidence angle $\psi_0$ , deg	Specimen Fe-powder	30 0
Camera length, mm	Specimen Fe-powder	75 45

Table III X-ray computerized tomography conditions.

Number of X-line $X_n$	8 ( $\Delta X=1\text{mm}$ )
Number of $\theta$ angle	8 ( $\Delta \theta=15^\circ$ )
$\theta$ angle, deg	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165

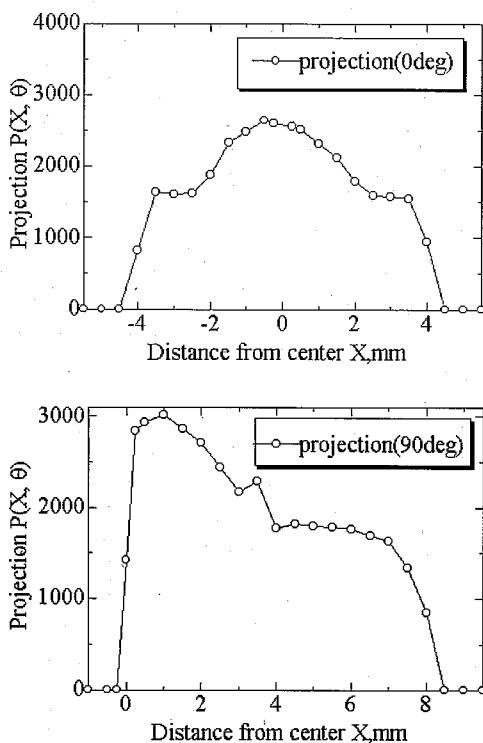


Fig. 7 Projection  $p(X, \theta)$  obtained by the present method

Fig. 7 のようなプロジェクションを各任意  $\theta$  方向全てにおいて求め、そこから再構成を行ったものが Fig. 8 である。

Fig. 8 を見ると切欠き近傍での応力集中を確認することができる。これにより粗大結晶粒においても IP-CT 法の適用が可能であることが明らかになった。

また、不均一な応力分布をもつ二相材料の急激な面内応力勾配を有する場合においても妥当な結果が得られ、二相材料においても IP-CT 法が適用可能であることが確認された。

周辺部分についてはデータのばらつきを確認することができる。これは試料平面揺動の際、周辺部分については揺動長さが 5 mm 以下と短く、通常試料平面揺動法に必要とされる 2000 個程度の結晶粒からの回折が得られないため、こ

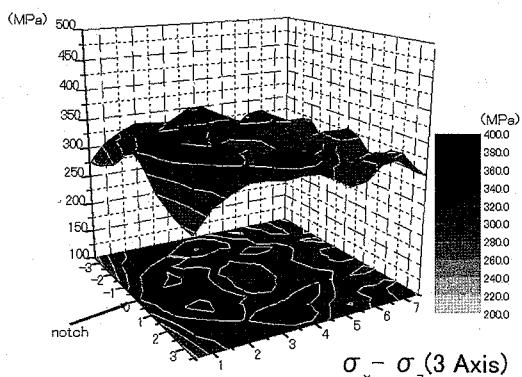


Fig. 8 Distribution of stress obtained by experiment

の部分のデータを除外した。そのためこのようになっていると考えられる。

## 6. 参考文献

- 1) Amemiya.Y., Kamiya.N. and Satow. Y., *Nucl.Instr. and Meth.*, A, 246, 572(1986).
- 2) 平, 田中, 山崎, 材料, 27, 251 (1978).
- 3) 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, 122 (1989).
- 4) 吉岡, 大谷, 新開, 非破壊検査, 39, 666 (1990).
- 5) 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, 98 (1990).
- 6) 吉岡, 新開, 大谷, 第22回応力ひずみ測定シンポジウム, 95 (1990).
- 7) 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, 1 (1992).
- 8) Y.Yoshioka,S.Ohya,K.Hasegawa and M.Sasano, *Residual Stress* 3, 985(1992).
- 9) 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, 167 (1993).
- 10) 佐々木, 広瀬, 材料, 44, 1138 (1995).
- 11) 佐々木, 広瀬, 機論 (A 編), 61, 394 (1995).
- 12) 佐々木, 広瀬, 機論 (A 編), 62, 2741 (1996).
- 13) 佐々木, 後藤, 田畑, 広瀬, 材料, 46, 756(1997).
- 14) 後藤, 佐々木, 広瀬, 長嶋, 機論 (A 編), 64, 1120 (1998).
- 15) 後藤, 佐々木, 丸山, 広瀬, 材料, 47, (1998).
- 16) 佐々木, 広瀬, 安川, 機論 (A 編), 63, 533

- (1997).
- 17) Cormack,A.M.,J.Appl.Phys., 34, 2722(1963).
  - 18) 佐々木, 広瀬, 機論 (A 編), 63, 2196 (1997).
  - 19) 広瀬, 佐々木, 矢澤, 第34回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 87 (1998).
  - 20) 森, 矢沢, 佐々木, 広瀬, 第35回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 48(1999).
  - 21) 佐々木, 矢沢, 廣瀬, 材料, 48, 1431 (1999).
  - 22) 佐々木, 廣瀬, 加藤, 坂真, 第36回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 207 (2000).
  - 23) 佐々木, 広瀬, 機論 (A 編), 61, 590 (1995)
  - 24) 田中, 峰, 鈴木, 材料, 39-444, 1235, (1990)
  - 25) I.Noyan,C.,Met.Trans., A 14,1907,(1983)
  - 26) V.Hauk and R.Oudelhoven, Z. Metallkde, 79, 41, (1988)