

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 X線ではかる

August 1994 ■ No.9

エネルギー分散回析法による
非破壊的内部方向応力評価装置の開発

Development of Non-Destructive Internal
Directional Stress Evaluation Apparatus by
Energy Dispersive Diffractometry

三好良夫・大澤澄人

Yoshio MIYOSHI, Sumito OZAWA

(Pages 13-22)

株式会社 堀場製作所

エネルギー分散回折法による非破壊的内部方向応力評価装置の開発

Development of Non-Destructive Internal Directional Stress Evaluation Apparatus by Energy Dispersive Diffractometry

三好 良夫*・大澤 澄人
Yoshio MIYOSHI*, Sumito OZAWA

【要旨】

エネルギー分散X線回折法を用いた応力解析装置を開発して、側傾法により鋼材中の4点曲げ応力の測定を試みた。

その結果、側傾法を用いて測定したエネルギー $\sin^2\psi$ 線図は、従来の $2\theta - \sin^2\psi$ 線図と同等の直線関係と精度が得られ、機械的応力とX線応力との間に直線関係が見いだされた。そして、表面から $80\mu\text{m}$ の深さまでの内部応力の分布を測定することができた。この方法は、非破壊内部応力測定法として有効な方法として結論づけられる。

Abstract

Stress Analyzing Instrument was developed with Energy Dispersive X-ray Diffractometry 4-point bending stress in steel material was tried to measure using Side-Inclination method As a result, Energy- $\sin^2\psi$ (En- $\sin^2\psi$) diagram which correspond to $2\theta - \sin^2\psi$ as Side-Inclination method was given good linearity and accuracy as same as conventional method It was found that relationship between mechanical stress and X-ray stress was linear And this method could be measured inner stress distribution depth from surface to $80\mu\text{m}$ In conclusion, this method is useful to non-destructive internal stress measurements

1. 何故、内部方向応力か？

近年の科学技術の進歩に伴い、各種機械構造物や機器に対する高速化・高性能化・高機能化の要求はますます高まりつつある。しかし、これらの要求を満たすためには、各種機構の改良・改善は勿論のこと、耐熱・耐食・耐摩耗特性などに優れた、新素材や材料改質技術の開発が重要課題となる。

このような現状に鑑み、構造部材に関しては、ファインセラミックス、金属系・セラミックス系複合材料などの各種先進材料が、また異種接合やCVD・PVD法などの被覆技術から、各種溶射膜の生成のための溶射技術といった傾斜機能材料開発のための先進技術の開発が進められている。一方、各種材料表面に圧縮残留応力を導入して、疲労強度を始めとする各種強度の改善を図る方法として用いられているショットピーニングは最も古い表面改質技術であるが、今日も各種分

* 大阪大学基礎工学部助教授

野で広く利用されていることを考えると、この技術も古くて新しい技術といえる。

これら先進材料や先進技術による傾斜機能材料はそれぞれに多くの優れた機能や特性を有している。しかし、これらの材料がそれらの機能や特性を十分に発揮するには、その製造や処理過程に導入されるひずみ、いわゆる残留応力をいかに制御するかが重要課題なる。

特に、セラミックスと鋼材との異種接合材、TiCやTiNなどの被覆処理材、またセラミックス溶射材などのような傾斜機能材料では、互いに熱膨張係数の異なる材料を高温下で接合するために、材料間の膨張係数の差による熱応力に起因して残留応力が発生する。それらの応力がすべて圧縮である場合には、強度的には問題はないが、力学的バランスにより、いずれかの材料には引張残留応力が導入されることになる。したがって、基本的には、いずれの材料にも残留応力が導入されない各種処理プロセスがあれば、より有効であるが、現実には、材料間に緩和材を置くことにより、残留応力の発生を緩和するなどの手段が講じられている。

しかしながら、より有効な処理プロセスを開発するためには、それらのプロセスで発生する残留応力をいかに評価するかが、それにも増して重要課題となるが、現在、最も有効な手法として、非破壊的に残留応力が評価できることからX線応力測定法の適用が検討されている。

X線応力測定法は材料の疲労損傷評価を始め、材質劣化など材料の強度評価手段として、各種工業分野で広く利用されている。従来のこの方法では、X線源として特性X線を用いるために、得られるX線情報は測定対象物の極表面層に限定される。ところが、通常の構造部材を含め、上述の各処理材においても残留応力は材料表面から内部方向に分布しており、工学的には表面の情報のみでは、十分な設計情報とはならない場合が多い。特に、被覆膜や溶射膜のように、基材と膜材の接合強度が接合境界部に生成される化合物によっても支配されようなものにおいては、そこにおけるそれらの生成物を知ることもその強度評価の重要パラメータとなる。従来法で、この要求を満たすためには測定対象物表面を逐次除去する必要があり、X線法といえども、非破壊法とは言えなくなる。そのため、X線分野においても、表面から内部に至るひずみを始め、合金元素や化合物を含めた情報を得ることの重要性が叫ばれている。しかし、これらのうち、ひずみに関しては、最近、中性子回折や放射光を用いた応力測定法が提案され、成果を挙げつつある。確かに、これらの手段も有用であるが、これらの線源を用いた現場の装置を開発することはほとんど不可能に近い。

このような現状から、筆者らは、内部方向の残留応力分布や元素ならびに化合物分析が可能な手法を模索してきた。その結果、線源として、従来の特性X線ではなく、加速電圧を変化させることにより、任意にその波長を変化させることが可能な連続X線(白色X線)を利用することに行き着いた。しかし、多結晶体を測定対象とする応力測定において、連続X線を照射して得られる回折X線を捉えるための検出器として、どのようなものが最適であるかが問題となる。この問題は半導体検出器(SSD)を用いれば解決できる。すなわち、測定物にある回折角(θ)で連続X線を入射すると、種々のエネルギーを有するX線はその角で回折条件を満足する格子面を選んで回折するが、半導体検出器ではこれら各種格子面からの回折X線に対応したエネルギーを求めることが可能であるので、ひずみに対応したそのエネルギー変化を知ることにより、応力測定が可能となる。また、この回折X線エネルギーの差異は、材料内部へのX線侵入深さに対応するため、このエネルギー値から異なった深さの情報が得られることになる¹⁻⁶⁾。ここでは、まず、連続X線の特長と半導体検出器のそれを利用して、回折X線のエネルギー値変化から

ひずみ測定を行なう、エネルギー分散回折法(以下EDX法と呼ぶ)を用いたX線応力測定装置の開発とその原理について紹介する。然る後に、それを4点曲げ負荷荷重下の応力測定に適用して、その妥当性を検討するとともに、内部方向応力分布の非破壊的評価の可能性を検討した結果をも合わせて紹介することにする。

2. EDX法によるひずみの測定原理

一般工業材料である多結晶体といえども、それを構成する個々の結晶は、格子面と呼ばれる規則正しく配列した原子の重なった構造となっている。いま、これら多結晶体の1個の結晶粒、すなわち単結晶に波長 λ を有する特性X線を入射した場合を考える。ここで、格子面間隔を d 、X線入射角度を θ とすると、 θ が次式のBragg回折条件式を満足する時に、回折が起こる。

$$2d\sin\theta = \lambda \quad \dots\dots (1)$$

一方、X線のエネルギー E_n はその波長 λ に反比例することから、それらの関係は次式で与えられる。

$$\lambda = hc/E_n = 12.398/E_n \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 h はPlanck定数で、 c は光速である

いま、(1)式に(2)式を代入して、整理するとBraggの回折条件式は、

$$d = 6.199/E_n \sin\theta \quad \dots\dots (3)$$

と、X線のエネルギーの関係式で表される。

EDX法では、試料に対する入射角、すなわち回折角 θ を一定とするため、回折面 hkl は回折X線のエネルギー E_n を測定すれば、格子面間隔 d (以下回折面間隔と呼ぶ)が求められるので、それより決定できる。

ここで、(3)式を E_n について微分し、(3)式に代入して整理すると、

$$\Delta d/d = -\Delta E_n/E_n \quad \dots\dots (4)$$

が得られる。(4)式から、 $\Delta d/d$ 、すなわちひずみ(ϵ)はエネルギーの変化率 $|\Delta E_n/E_n|$ に比例し、エネルギー変化からひずみの測定が可能なることがわかる。また、ひずみはエネルギーレベルの高い回折X線、すなわち高次の回折面ほど高感度で測定できることがわかる。なお、EDX法では、回折角 θ を適切に選べば、測定対象の回折面からの回折X線を高エネルギーレベルに移動させることができる特徴があるが、同じ回折面であっても θ の値によりX線の侵入深さが異なるので、その点の考慮が必要である。

3. EDX法による応力測定の実理

一般に、X線応力測定では、互いに結晶方位を異にする微細結晶粒の集合体である多結晶を測定対象とし、その解析においては等方均質材料であるとして扱われる。また、X線侵入深さが試料の極表面層に限られることから、平面応力状態 ($\sigma_3 = 0$) が仮定される。

いま、図1のように、試料面上の測定位置を0点として、主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 、主ひずみを $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ とすると、応力とひずみの関係は、

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 - \nu \sigma_2) / E \quad \dots\dots (5)$$

$$\varepsilon_2 = (\sigma_2 - \nu \sigma_1) / E \quad \dots\dots (6)$$

$$\varepsilon_3 = -\nu (\sigma_1 + \sigma_2) / E \quad \dots\dots (7)$$

で与えられる。なお、Eはヤング率、 ν はポアソン比である

また、この0点で、互いに直交する2方向の応力を σ_x, σ_y 、ひずみを $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ とすると、(5)、(6)、(7)式は、

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \nu \sigma_y) / E \quad \dots\dots (8)$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu \sigma_x) / E \quad \dots\dots (9)$$

$$\varepsilon_z = -\nu (\sigma_1 + \sigma_2) / E \quad \dots\dots (10)$$

のように表される。

ここで、求めたい応力を σ_x として図1のOP方向のひずみ $\varepsilon_{\phi\psi}$ とすると、それは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi\psi} &= \varepsilon_1 \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_3 \cos^2 \psi \\ &= (\varepsilon_1 \cos^2 \phi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \psi) \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

また、

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \cos^2 \phi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi \quad \dots\dots (12)$$

と書けるので、(11)式は

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \varepsilon_x \sin^2 \psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \psi) \quad \dots\dots (13)$$

となる。(13)式に、(7)、(8)、(10)式を代入して整理すると、

$$\varepsilon_{\phi\psi} = (1 + \nu) / E \cdot \sigma_x \sin^2 \psi - \nu / E (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \dots\dots (14)$$

となる。これらの関係式を図示すると図2のようになり、 $\varepsilon_{\phi\psi}$ が $\sin^2 \psi$ に対する回帰直線で表されることがわかる。この回帰直線の勾配をMとして、応力値 σ_x を表すと次式のようなになる。

$$\begin{aligned} M &= \Delta \varepsilon_{\phi\psi} / \Delta \sin^2 \psi \\ \sigma_x &= E (1 + \nu) \cdot M \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

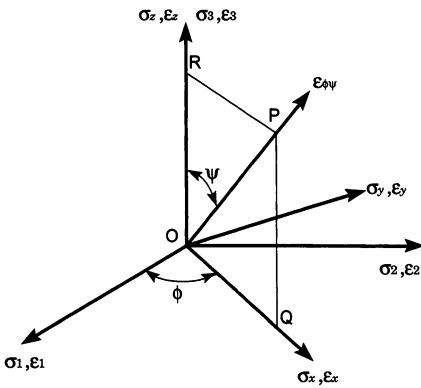


図1 応力とひずみの3次元方位
Three-dimensional orientation of stress and strain

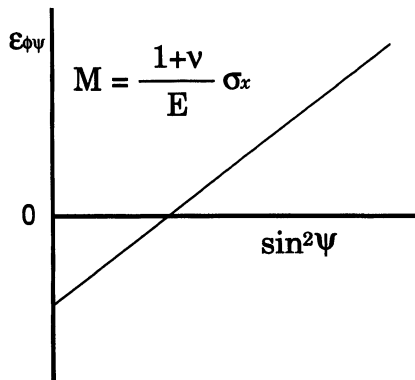


図2 $\varepsilon_{\phi\psi} - \sin^2 \psi$ 線図
 $\varepsilon_{\phi\psi} - \sin^2 \psi$ diagram

この式はX線応力測定法の基礎式で、別名 $\sin^2 \psi$ 法と呼ばれるものである⁷⁾。

一方、EDX法においては、(4)式で E_n を無ひずみ状態の回折X線のエネルギー値 E_{n0} とおき、(15)式に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} M &= -(1/E_{n0}) \cdot \Delta E_n / \Delta \sin^2 \psi \\ \sigma_x &= E_n / (1 + \nu) \cdot M \end{aligned} \quad \dots\dots (16)$$

が得られる。

(16)式より、EDX法による応力測定も $\sin^2 \psi$ 法と同様に、種々の ψ 角についてエネルギーのピーク位置を求め、 $E_n - \sin^2 \psi$ 線図を描き、その勾配 M を求めれば、応力 σ_x が算出できる。なお、EDX法では、回折角 θ を固定する必要があるために、従来法の並傾法は採用できず、側傾法のみしか利用できないが、それも本法の特徴といえる。

4. EDX法による応力の深さ方向分布の測定原理

X線を試料に入射すると、X線は減衰しながら試料内部に侵入・透過するが、その回折を考えると、回折X線として試料表面に還る情報は表面を含めたある深さからのものとなる。

いま、検出される回折X線の全強度 I_0 のうち、 $I_0 \cdot (1 - 1/e)$ の強度が測定される深さを、有効侵入深さ $t_e(E)$ と定義すると、側傾法におけるそれは、次式で表される。

$$t_e(E) = \sin \theta \cdot \cos \psi / 2 \rho \mu(E) \quad \dots\dots (17)$$

ここで、 θ は回折角、 ψ は試料に対する入射角、 ρ は試料の密度、 $\mu(E)$ は試料の質量吸収係数である。

(17)式における質量吸収係数 μ は、試料の材質やエネルギー値によって決まる値であるが、一般には、エネルギー値が高くなるとその値も小さくなる。すなわち、エネルギー値が高くなると、有効侵入深さが深くなり、試料内部からの情報が得られることを示している。いま、質量吸収係数とエネルギー値の関係の1例をFeについて示すと図3のようになる

一方、X線応力測定によって得られる応力値は表面からX線が侵入する深さまでの重みつき平均値であるので、内部方向応力分布を $\sigma(Z)$ 、試料の厚みが有効侵入深さに比べて十分に厚いと仮定すると、測定される応力値 σ は

$$\sigma = \frac{\int_0^\infty \sigma(Z) \cdot \exp(-Z/t_e) dz}{\int_0^\infty \exp(-Z/t_e) dz} \quad \dots\dots (18)$$

で与えられる。いま、応力の内部方向分布を簡単にするために、(19)式のように直線分布であると仮定する。

$$\sigma(Z) = a_0 + a_1 \times Z \quad \dots\dots (19)$$

ここで、(19)式を(18)式に代入し、整理すると

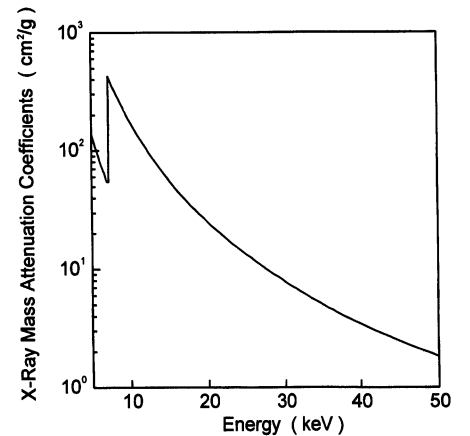


図3 Feの質量吸収係数とエネルギーの関係
Relationship between Fe's mass attenuation coefficient and energy

$$\sigma = a_0 + a_1 \times t_e \quad \dots\dots (20)$$

となる。

(20)式は、応力が内部方向に直線分布する場合の有効侵入深さ位置のそれを示している。したがって、EDX法で、異なるエネルギーを持つ複数の回折X線ピークを用いて求められる各回折面についての応力値は、それらの有効侵入深さ位置のものとなるので、各有効侵入深さに対して各回折面の応力値をプロットしてやれば、応力の内部方向分布を知ることができる。

5. EDX法による応力測定装置の概要

図4はEDX法による応力測定装置の概念図およびX線光学系を示したものである。図からわかるように、本装置は大きく分けて、

- ①連続X線を発生させるX線発生部
- ②平行X線束を得るためのスリット系
- ③応力測定時に試料の ψ 角を変化させるためのクロスタイプゴニオメータ部
- ④試料からの回折X線、蛍光X線を計測するための検出部
- ⑤検出器からの信号を処理するための信号処理部
- ⑥処理信号をさらに解析するための信号解析部

から構成されている。

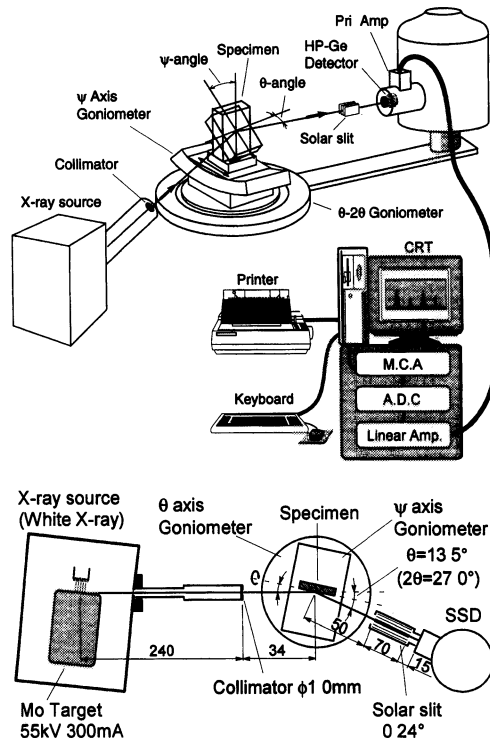


図4 EDX法による応力測定装置の概念
Schematic illustration of stress measuring instrument by EDX method

これらの構成要素のうち、X線発生部には、計数効率を高めるための回転対陰極タイプの強力X線発生器を用い、スリット系としてはX線入射側にコリメータタイプを、検出側に発散角 0.24° のソーラスリットを採用した。また、クロスタイプゴニオメータには、 ψ 角が $\pm 45^\circ$ と大きく採れるものを用い、これを汎用のX線回折用ゴニオメータ上に設置して、回折角 θ を任意に変化できるようにした。こ

これらに加え、試料のセットには、レーザ変位計を用い、入射角 ψ の変化による回転中心やX線照射位置のずれを補正する機構を備えた。さらに、検出器には、ひずみに対するエネルギー変化量を感度良く捉えるために、X線検出効率が高エネルギーまで高感度で検出できるGe半導体検出器を使用し、信号処理部は、これらの構成機器に対する温度の影響を除去するために、その周囲温度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に制御した。

なお、信号解析部は、信号処理により得た各回折面のX線エネルギーのピーク位置を正確に求め、それより $\sin^2\psi$ 線図を作成するとともに、応力値を算出するものであるが、これらの解析にはパーソナルコンピュータを援用した。

以上が本装置の概要であるが、その各部の仕様は一括して表1に示したとおりである。

X線発生部	X-ray tube	Max 60kV 300mA, Mo target, Focus size 1mm×1mm
スリット部	Collimator	$\phi 1.0\text{mm}$ (equivalence 0.24°), $\phi 1.7\text{mm}$ (equivalence 0.30°)
	Solar slit	Divergence angle 0.24
コニオメータ部	ψ angle goniometer	Angle $-45^\circ \sim +45^\circ$, Min step 0.01°
検出器部	SSD	HP-Ge, Resolution 160eV at 5.9keV, 100mm ² ×10mm Crystal
信号処理部	ADC	Differential linearity $\leq \pm 0.75\%$
	MCA	4096ch
信号解析部	Computer	32bit personal computer

表1 解析装置の仕様
Specifications of analyzer

6. EDX法によるX線プロフィールの実際

図5はエネルギー分散回折法(EDX法)により、いかなる回折X線強度分布曲線が得られるか、また回折角 θ 値により、その分布曲線がどのように変化するかを炭素鋼(S50C)を用いて調べた結果である。なお、測定条件は表2に示した通りである。

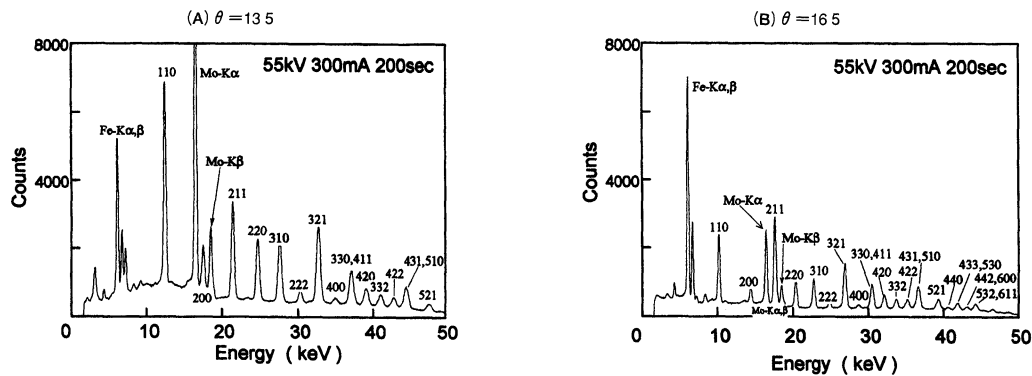


図5 EDX法による回折X線プロフィール
X-ray diffraction profiles obtained by EDX method

Tube voltage	55kV
Tube current	200mA
Filter	Ti (20 μm)
Diffraction plane	110, 200, 211, 220, 310, 222, 321, 431,510, 420, 332, 422, 431,510, 521
Diffraction angle	13.5°, 16.5°
Measure time	1000sec/angle
Strain	0.105, 0.500, 1.00, 1.50, 2.00, 2.26 ($\times 10^{-3}$)
Incident angle ψ	0°, 12.92°, 18.43°, 22.78°, 26.56°, 30.00°, 33.21°, 36.27°, 39.23°

表2 応力測定のためのX線回折条件
X-ray diffraction conditions for stress measurement

図5において、多数のピークプロファイルが観察されるが、それらのピークで面指数を振ったものは回折X線からのものであり、それら以外のピークは試料からの蛍光X線であるFe-K α , β と、X線源の対陰極のMoからの特性X線の散乱線であるMo-K α , β である。このように、EDX法では、1回のX線照射で多数の回折X線ピークを始め、試料成分元素からの情報をも得ることができる。

また、図5(A)と(B)は回折角 θ を変化させて得たピークプロファイルであるが、これらを比較すると、全く同じ試料で、同じ領域からのものであっても、それらのピーク位置は回折角 θ により変化し、 θ が大きくなると、各ピーク位置は低エネルギー側にシフトするとともに、高エネルギーに新しい回折ピークが出現しているのがわかる。また、蛍光X線や特性X線の出現位置は変化しないが、全体的に各ピーク強度が低下しているのが認められる。これは、回折角 θ によりX線の侵入深さが異なり、それが大きくなるとその侵入深さが増すことを示している。したがって、EDX法では、回折角 θ を大きくすれば、より内部情報を得ることが可能なることがわかる。しかし、同時に、回折X線強度も低下するので、それによるピーク位置決定精度の低下をも考慮して回折角 θ を決定する必要がある。また、EDX法で、 $\sin^2\psi$ 法を採用する場合には、 ψ 角を変化させた時に回折角 θ が変化しないようにすることも測定精度を高める重要因子となる。

一方、角度分散法によるX線応力測定では、回折角 2θ の大きい回折面を用いるほど、ひずみの測定感度が上昇するので、測定精度も上昇する。このことは、EDX法においても同様であり、回折X線のエネルギー値が大きいほど測定精度が向上する。それには、図5からわかるように、同じ回折面でも回折角 θ を小さくしてやれば、その回折X線ピークが高エネルギー値に移動するので、これを利用すれば、回折X線強度が増加する効果をも加わるために測定精度も向上する。このことは、できるだけ回折角 θ を小さくして、強度の強い回折X線のピーク位置を高エネルギー側に移動してやれば測定精度が向上することを示している。

7. EDX法による応力測定の実際

上述のように、EDX法は連続X線を試験片に入射し、従来法と同様に、その角度 ψ を種々変化させて、得られた各回折面からの回折X線のピークエネルギー値を求めて、それより $\sin^2\psi$ 線図を作成し、その勾配から応力値を算出するものである。このプロセスからすれば、何ら従来法と異なるところはないが、本方法では、側傾法のみしか利用できない。この点は、その意味で、短所かもしれないが、内部方向応力が非破壊的に測定可能である点を考えると、その欠点を補ってもまだ、余りあるものがあるといえる。

ここでは、本法によるX線応力測定が可能であるか、否かを実証するために、4点曲げ治具により曲げ荷重を負荷し、その時のひずみゲージによる機械的応力とEDX法によるX線の応力の対応関係を調べた結果を述べることにする。

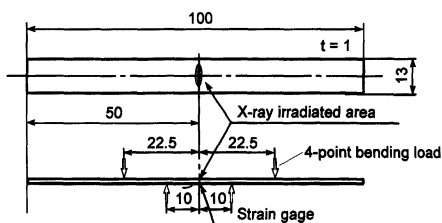


図6 試験片形状・寸法
Shape and size of specimen

7.1 試験片と実験方法

用いた試験片は図6に示すような形状寸法を有するバネ鋼SUP10である。X線応力測定法は $\sin^2\psi$ 法による側傾法で、回折角 θ は 13.5° とした。なおこの角度は、各回折面からの回折X線のスペクトルが分離し、しかも試験片からの蛍光X線やMo対陰極の散乱X線とが重ならない最適条件であったために採用した。また、実験条件は表2にまとめて示した。

7.2 実験結果および考察

従来法では、回折X線プロファイルのピーク位置の決定方法に半値幅法が一般的に用いられている。しかし、EDX法では求められるデータがデジタル量で得られることと、半導体検出器の特性として、回折X線プロファイル形状がガウス分布を示すことから、ピーク値の算出にはガウシアンフィッティング法を採用した。また、EDX法では、1回のX線の照射で多数の回折X線ピークを同時に得ることができるが、ここでは、従来法と比較するために、まず各負荷ひずみについて求めた211面の $E_n - \sin^2 \psi$ 線図について検討した。図7はその結果の一例を示したものである。図7より、 E_n と $\sin^2 \psi$ の間にはよい直線関係が成立しており、ひずみ量の増加とともに、 $E_n - \sin^2 \psi$ 線図の勾配も増大することがわかる。また、これらの結果は、従来の角度分散法を用いて、銅について求められる $\sin^2 \psi$ 線図と全く同じものになっていることから、本法でも $\sin^2 \psi$ 法の適用が可能なることがわかる。

図8は本法により求めた曲げ負荷荷重下のX線の応力 σ_x とひずみゲージにより求めた機械的応力 σ_m の関係を示したものである。ここで、各点の誤差棒は75%信頼限界値である。これらの応力値の算出で、機械的応力 σ_m には機械的弾性定数206GPaを、X線の応力 σ_x には従来法で推奨されている211面についてのX線の弾性定数 $E/(1+\nu)=175\text{GPa}$ を用いた。図8より、 σ_x は σ_m の増大につれて増加し、それらの間により直線関係が成立することがわかる。なお、負荷荷重が零であるにもかかわらず、すでに-98MPaと大きな圧縮の σ_x が測定されている。これは、試験片が何らかの加工を受けたことにより導入された残留応力と考えられる。このことは、EDX法によっても、従来法と同様に残留応力の測定が可能であることを示すものである。しかしながら、図8の結果で σ_x と σ_m の対応関係をみると、残留応力を考慮してもそれらの絶対値は1対1に対応しておらず、EDX法によるものの値が小さく、安全側の値を示している。その原因としては、EDX法のように高エネルギーの回折X線を用いて応力測定を行うと、曲げ負荷のように内部方向に応力分布を持つ場合にはその影響が表れてしまうためと考えられる。

図9は各回折面からの各プロファイルを用いて内部方向応力分布を求めた結果である。一般に、回折面によりX線の弾性定数は異なるが、現在のところ、実験的にそれらの値を計測していないため、ここでは、Krönerのモデルを用いて計算により求めた各回折面ごとのX線の弾性定数を用いた⁹⁾。なお、内部応力分布の測定はその変化を最も大きくするために、ひずみ量 2.26×10^{-3} ストレインの場合について行った。また、残留応力の影響を排除するために、各回折面について求めたX線の応力 σ_x と機械的応力 σ_m の関係から、 $\sigma_x = \sigma_m$ と仮定して、その σ_m が0のときの σ_x が残留応力値になると考え、それを計算値から差し引いた。各回折面の有効侵入深さは式(17)を用いて計算した。図中の縦誤差棒は75%信頼限界値であり、点線は応力分布が直線近似できると仮定してひずみゲージの値から求めた応力分布直線である。

図9から、極表層部においてひずみゲージによる計算値から外れているが、全体的には良く一致していることがわかる。なお、極表層部において応力値が計算値よりも小さくなっているが、これは、試験片表面を機械加工のままで測定していることから、表面あらかさの影響などが考えられる。

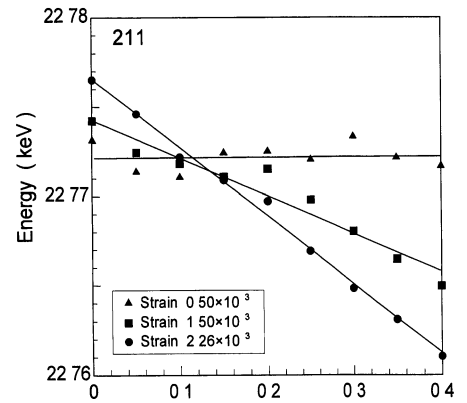


図7 $E_n - \sin^2 \psi$ 線図
 $E_n - \sin^2 \psi$ diagram

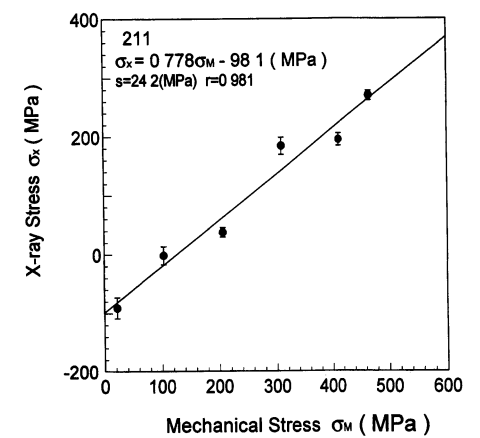


図8 X線応力と機械的応力の関係
Relationship between X-ray stress and mechanical stress

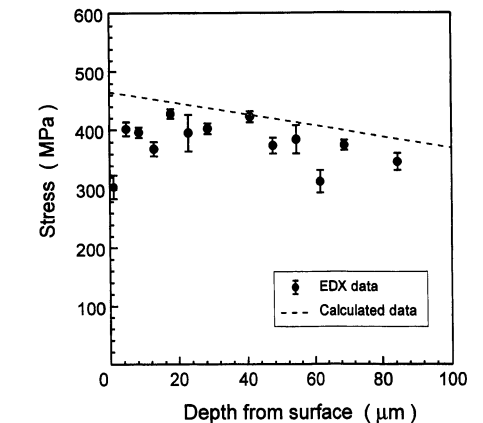


図9 EDX法による非破壊内部方向応力測定
Measurement results for non-destructive internal directional stress by EDX method

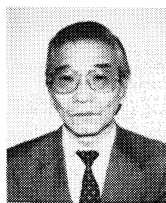
8. 将来への課題と展望

以上の結果から、著者らの開発したEDX法による応力測定装置により、従来の手法と遜色のない測定精度が得られることが、また、内部方向応力分布の非破壊測定への可能性が確認された。しかしながら、将来への課題として、内部方向の測定範囲をどこまで拡大できるか、また、応力分布が非線形であるような場合にその取扱いをいかにするかなどがあげられるが、これらの課題がクリアされるならば、材料の強度を始め、材料評価への展望が開かれるとともに、工学的には下記のような適用が考えられる。

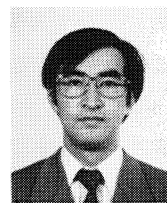
- ①各種材料の加工にともなうひずみの管理
- ②各種被覆膜の密着性の評価やそのメカニズムの解明と品質管理
- ③高周波焼入れ、窒化处理、浸炭処理などの各種熱処理の管理
- ④ショットピーニングを始めとする各種表面改質処理技術の開発や管理
- ⑤各材料の破壊事故原因の解明
- ⑥各種傾斜機能材料の開発技術支援と管理など

参考文献

- 1) 白岩俊男, 阪本喜保, 第21期学術講演会前刷集, 日本材料学会, 179 (1972)
- 2) 長尾真人, 楠本詔, 材料, 26, 576 (1977)
- 3) 細川好則, 大澤澄人, 大谷清兵衛, 阪野明, 三好良夫, 関西支部第68期定時総会講演会前刷集, 日本機械学会, 150 (1993)
- 4) 坂井田喜久, 原田慎太郎, 三好良夫, 田中啓介, 細川好則, 大澤澄人, 第29回X線材料強度に関する講演論文集, 日本材料学会, 80 (1993)
- 5) 細川好則, 大澤澄人, 大谷清兵衛, 阪野明, 三好良夫, 第29回X線材料強度に関する講演論文集, 日本材料学会, 86 (1993)
- 6) 柴田純一, 鶴飼隆好, 但野茂, 第29回X線材料強度に関する講演論文集, 日本材料学会, 92 (1993)
- 7) 日本材料学会編, X線応力測定法 p56, 養賢堂 (1981)
- 8) 日本材料学会編, X線応力測定法 p80, 養賢堂 (1981)
- 9) E Kröner: Zeitschrifts f Phys, Vol 151, 504, (1958)



三好 良夫
Yoshio MIYOSHI, Dr Eng
大阪大学基礎工学部助教授
工学博士



大澤 澄人
Sumito OZAWA
開発センター
1991年入社
X線を利用した分析装置の
開発に従事

