X線応力測定法の精度向上に関する研究*

(回折線ピーク位置測定法とローレンツ片寄り因子
および吸収因子の補正について)

平 修 二** 吉 岡 靖 夫*** 坂 田 敏 行****

A Contribution to the Improvement of the Accuracy of X-Ray Stress Measurement

(On the Measuring Method of Peak Position and on the Correction
of Lorentz Polarization and Absorption Factors)

by

Shuji TAIRA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Yasuo YOSHIOKA

(Musashi Institute of Technology, Tokyo)

Toshiyuki SAKATA

(Okuma Machinery Works Ltd., Nagoya)

The authors have carried out fundamental studies on the stress measurement by means of X-rays for the purpose of extending their application to practical engineering problems. One of them is for the improvement of the accuracy of stress measurement. In place of taking the shift of the peak position of diffraction profile for measuring lattice strain, the authors had previously proposed a new method of separation of $K\alpha_1$ component from $K\alpha$ doublet using Fourier analysis for the improvement of accuracy of X-ray stress measurement for a sample with a broad diffraction profile. This method is characterized as being applicable to the measurement of peak position of diffraction profiles with various shapes including broad ones.

However, the numerical calculation of this method is exceedingly complicated because the Fourier analysis is introduced in the measuring process. For this reason, a convenient method has been devised for the measurement of stress, which is by measuring the center of gravity of $K\alpha$ doublet without use of Fourier series, keeping on the advantages of above mentioned method, was proposed. The calculation of the center of gravity can be easily and quickly performed as compared with the previous case.

Moreover the effect of Lorentz polarization and the absorption factors on the measured stress should be also discussed in the case of the measuring sample which has a large amount of residual stress and shows a broad diffraction profile. From this point of view, the authors previously discussed the effect of both factors (LPA factor) and reported that these effects on the measured stress are remarkable when the specimen has a broad diffraction profile and a large amount of residual stress. However, the quantitative effect of LPA factor on the stress value should be known because the calculation at each measurement are very complicated.

In the present study, the authors discussed on the quantitative effect of LPA factor on the stress value by using the half-value breadth of $K\alpha$ doublet as a parameter.

The following assumptions were used; (1) The intensity distribution curves $\phi_1(x)_{LPA}$ and $\phi_2(x)_{LPA}$, which are corrected by LPA factor, obtained from $K\alpha_1$ and $K\alpha_2$ radiations, respectively, are represented by Gaussian distribution curves. (2) The following relation holds between $\phi_1(x)_{LPA}$

* 原稿受理 昭和41年9月3日

*** 正 会 員 武蔵工業大学 東京都世田谷区玉川等々力町

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

**** 正 会 員 大隈鉄工所 名古屋市北区辻町

and $\phi_2(x)_{LPA}$.

$$\phi(x)_{LPA} = \phi_1(x)_{LPA} + \phi_2(x)_{LPA}, \quad \phi_2(x)_{LPA} = k\phi_1(x - \Delta x)_{LPA},$$

where k is a constant, Δx is the distance between the peak position of the intensity curves diffracted from $K\alpha_1$ and $K\alpha_2$ radiations, and $\phi(x)_{LPA}$ is the intensity curve which is corrected $\phi(x)$ diffraction curve by using LPA factor.

If the intensity distribution curve $\phi_1(x)_{LPA}$, the value of peak position and the half-value breadth are given, $\phi(x)$ curve can be composed. The relation between the gravitation center of $\phi(x)$ and the peak position of $\phi_1(x)_{LPA}$, and between the half-value breadths of $\phi(x)$ and $\phi_1(x)_{LPA}$ are obtained. Furthermore, when the stress value $\sigma_{1,LPA}$ measured from $\phi_1(x)_{LPA}$ is given, Bragg's angle (peak position of $\phi_1(x)_{LPA}$) can be calculated from the fundamental equation of stress measurement by means of X-rays and Bragg's equation. Therefore, the gravitation center of $\phi(x)$ is calculated and then stress σ determined from $\phi(x)$ is obtained.

As the practical example, the residual stresses on the some samples were taken. $\sigma_{1,LPA}$ determined from σ by using the above $\sigma - \sigma_{1,LPA}$ relation was compared with that calculated from actually observed profile. Both $\sigma_{1,LPA}$ agree within measurable error. In a similar way, half-value breadths of the same sample were compared, that is, the half-value breadth of $\phi_1(x)_{LPA}$ calculated from that of diffraction profile $\phi(x)$ and that calculated by Fourier method were compared. The results show good agreement.

(Received Sep. 3, 1966)

1 緒 言

著者らは前にX線応力測定を行なう際、とくにFig. 1に示すようなX線回折線幅が非常に広く $K\alpha_1$ および $K\alpha_2$ 線による回折強度曲線が分離せず、しかも回折強度の小さい材料の応力測定値の精度を向上させる目的で、 $K\alpha$ 二重線による回折強度曲線（以下簡単のため $K\alpha$ 回折線と記す）より $K\alpha_1$ 回折線を Fourier 解析を用いて分離して、このピーク位置を放物線近似法で求める方法を報告した¹⁾。この方法は、近時、高周波焼入れや強度の加工を施した材料のX線による応力測定²⁾の必要性が高まっているおりから、有効なものとする。

Fig. 1. An example of very diffused diffraction profile (Schematic).

しかしながら、 $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置によって応力測定を行なっても、 $K\alpha$ 回折線のピーク位置によっても応力値そのものの差は実用上無視でき、この点から考えると上述の方法は精度のよい測定が可能とはいえず、計算過程に Fourier 級数を解く過程がはいりはん雑であるので、さらに簡単に精度よく応力を求める方法の開発が望まれる。

そこで、 $K\alpha$ 回折線の重心位置を測定することで応力測定を行なうことを検討した。重心は簡単な計算でいかなる形状の回折線のものでも測定可能である。そこで、本報告ではまずこの重心測定によって求めた応力と従来の図式法で求めた応力との比較を試み、実用

的であることを確認したので報告する。

また、この $K\alpha$ 回折線の重心を測定することによって簡単に $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置が求められ、これを使用することで $K\alpha$ 回折線より $K\alpha_1$ 回折線を分離することが簡単に行なえるのでその方法もあわせて報告する。

しかしながら、応力測定の精度を向上させるためには、測定法の合理化とともに本質的に回折線形状に影響を与えるローレンツ片寄り因子および吸収因子（以下まとめて LPA 因子とする）についても検討しなければならない。これについては前報で実際例につき検討し回折線の広がり³⁾の程度と応力値の大小によってその影響度が異なることを明らかにした。同様な結果は他にも報告されているが、この補正を応力測定のために行なうことは、かなり手間がかかり実用的でなく、簡単な補正法が望まれる。

そこで、前記 $K\alpha$ 回折線の重心測定による $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置決定法の採用と $K\alpha_1$ 回折線および $K\alpha_2$ 回折線に LPA 因子を補正した回折強度曲線を正規分布曲線とおくことにより、これら因子の影響をあらかじめ知り、 $K\alpha$ 回折線より求めた応力と $K\alpha$ 回折線の半価幅より補正値を求めるための図を作成し、実際例との比較検討を行なったので報告する。

同時に、回折線半価幅を精密に求める際に、 $K\alpha$ 回折線の積分半価幅を求めるのみで $K\alpha_1$ 回折線に LPA 因子を補正した回折線の積分半価幅を求める計算を行ない応力の場合と同様に図示することを試みたのであわせて報告する。

2 回折線重心測定による応力測定法

まず、Fig. 2 に示すように $\phi(x)$ を $K\alpha$ 二重線による回折強度曲線とする。横軸 x は角度である。そして回折線と back ground によって囲まれた部分の x

Fig. 2. Diffraction intensity curve $\phi(x)$ from $K\alpha$ radiation and its center of gravity P (Schematic).

方向の重心位置を求める。一般に重心 P は次式によって求められる。

$$P = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot \phi(x) \cdot dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \cdot dx} \quad (1)$$

実際には Fig. 2 に示すように x 方向を N 等分して区分求積法によって簡単に求められる。すなわち、

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \phi(x_i) \cdot \Delta x}{\sum_{i=1}^N \phi(x_i) \cdot \Delta x} \quad (2)$$

によって求めればよい。この方法は回折線形状がいかなるものでも一定の方法で P が測定可能であり、また回折線形状のほとんど全部を使用するので精度もよく、一般の応力測定の場合はこの P を用いて応力測定をすればよい。

しかしながら、 $K\alpha$ 回折線より $K\alpha_1$ 回折線を取り出して回折線形状や半幅測定を用いた研究を行ないたい場合には、著者らが開発した $K\alpha$ 回折線分離法では、 $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置を求めておく必要がある。このことは後で述べる LPA 因子の補正をする上でも必要であるので次にこの方法を述べる。

いま、 $K\alpha_1$ および $K\alpha_2$ 回折線をそれぞれ $\phi_1(x)$ 、 $\phi_2(x)$ とし、 $\phi(x)$ との間に次の関係が成立するとすれば、 $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置が簡単に導かれる。すなわち、

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \phi_1(x) + \phi_2(x) \\ \phi_2(x) &= k \cdot \phi_1(x - \Delta x) \end{aligned} \quad (3)$$

k : 定数、 Δx ; $\phi_1(x)$ と $\phi_2(x)$ のピーク間距離とおき、 P_1 を $\phi_1(x)$ の重心位置 ($\phi_1(x)$ はほぼ対称形と考えられるのでピーク位置に相当すると考える) とすれば次式が得られる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{\int x \cdot \phi(x) \cdot dx}{\int \phi(x) \cdot dx} = \frac{\int x [\phi_1(x) + k\phi_1(x - \Delta x)] dx}{\int [\phi_1(x) + k\phi_1(x - \Delta x)] dx} \\ &= \frac{\int x \cdot \phi_1(x) \cdot dx}{\int \phi_1(x) \cdot dx} + \frac{k}{1+k} \Delta x = P_1 + \frac{k}{1+k} \Delta x \end{aligned} \quad (4)$$

この(4)式で Δx は P_1 の値に関係する量で次式が成立

する。

$$\sin \left[\frac{P_1 + \Delta x}{2} \right] = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sin \frac{P_1}{2} \quad (5)$$

したがって、 Δx の値を最初に与えて P_1 を求め(4)式の右辺に入れ P を求め、実際に求めた P と比較していく逐次近似法によって P_1 を求める必要があるが、実際には次の方法で簡単に求められる。例を Co- $K\alpha$ 線で鉄系材料の (310) 面の回折線ピーク位置を求める場合にとって考える。 $\ast$ の値が 156° より 163° まで、すなわち (310) 回折線ピーク位置の存在する範囲では Fig. 3

Fig. 3. Relation between Δx and P_1 .

に示すように Δx と P_1 の関係はほぼ直線であり次式が近似的に成立する。

$$\Delta x = 0.0396 P_1 - 4.8688 = a P_1 - b \quad (6)$$

よって(4)式にこの関係を代入すると、

$$P_1 = \left[\frac{1+k}{1+k+ka} \right] \left[P + \frac{k}{1+k} b \right] \quad (7)$$

上記 Co- $K\alpha$ 線の場合、 $k=0.5$ とすると、

$$P_1 = 0.987 P + 1.602 \quad (8)$$

となり、 $K\alpha$ 回折線の重心 P を求めることより容易に $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置 P_1 が求まる。

この P と P_1 の関係を用いることにより、前述のように、 $K\alpha$ 二重線による回折線 $\phi(x)$ より $K\alpha_1$ 回折線 $\phi_1(x)$ を Fourier 解析法を用いて分離することが可能である。また、LPA 因子の補正も簡単に行なえるので次節以下にそれらの方法について述べる。

3 $K\alpha_1$ 回折線の分離法

$\phi(x)$ および $\phi_1(x)$ をそれぞれ Fourier 級数に分解し、その係数を A_0 , A_p (cos 項), B_p (sin 項) および a_0 , a_p (cos 項), b_p (sin 項) とし $\phi(x)$ と $\phi_1(x)$ の間には(3)式の関係が成立すれば、 $\phi_1(x)$ の係数 a_0 , a_p , b_p が次のように A_0 , A_p , B_p によって表わされる。

$$\begin{aligned} a_0 &= A_0 / (1+k) \\ a_p &= \frac{A_p \left(1 + k \cdot \cos \frac{2\pi P}{2N+1} \Delta x \right) + B_p \cdot k \cdot \sin \frac{2\pi P}{2N+1} \Delta x}{1 + 2k \cdot \cos \frac{2\pi P}{2N+1} \Delta x + k^2} \end{aligned} \quad (9)$$

*1 厳密には Δx の値は回折線の位置 (たとえばピーク付近とその部分) によって異なるがその量は小さいものとして Δx は一定と仮定している

$$b_p = \frac{B_p \left(1 + k \cdot \cos \frac{2\pi p}{2N+1} \Delta x \right) + A_p \cdot k \cdot \sin \frac{2\pi p}{2N+1} \Delta x}{1 + 2k \cdot \cos \frac{2\pi p}{2N+1} \Delta x + k^2}$$

したがって, $\phi_1(x)$ は次式により求められる.

$$\phi_1(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^N \left[a_p \cdot \cos \frac{2\pi p}{2N+1} x + b_p \cdot \sin \frac{2\pi p}{2N+1} x \right] \quad (10)$$

実際の計算では(1)および(7)式より P_1 を求め, これを(6)式に代入, Δx を求めてから(9)式を計算, さらに(10)式によって $\phi_1(x)$ を求める. 前報の場合には Δx を逐次近似法で求めねばならなかったために, $\phi_1(x)$ も逐次近似法によって求める必要があり, 演算時間が多くかかる欠点があったが, Δx が P より簡単に求まるので, $\phi_1(x)$ も1回の計算で求めることができる.

後述の実測例で求めた $K\alpha_1$ 回折線の積分半価幅はこの方法によって求めた $\phi_1(x)$ より測定したものである.

4 LPA 因子の定量的補正法

4・1 LPA 因子の補正

2, 3 では LPA 因子については何の考慮もしなかったが, 次にここではこの因子を考えて, $K\alpha$ 回折線より求めた応力にどれだけの補正を行なうべきかについて定量的な検討を行なった. まず, $\theta(x)$ に LPA 因子を補正した回折線 $\theta(x)_{LPA}$ と $\theta(x)$ の間には次の関係が存在する.

$$\theta(x)_{LPA} = \frac{\theta(x)}{LPA(x)}, \quad LPA(x) = \frac{1 + \cos^2 x}{\sin^2 \frac{x}{2} \cdot \cot \frac{x}{2}} \cdot \left[1 - \tan(\psi_0 + \eta) \cdot \cot \frac{x}{2} \right] \quad (11)$$

そうして次に $\theta(x)$ と $\phi_1(x)$ および $\phi_2(x)$ の間に仮定した関係 (11) 式が, $\theta(x)_{LPA}$ と $\phi_1(x)$ および $\phi_2(x)$ に LPA 因子を補正した回折線 $\phi_1(x)_{LPA}$ と $\phi_2(x)_{LPA}$ の間に存在するものとする. すなわち,

$$\theta(x)_{LPA} = \phi_1(x)_{LPA} + k\phi_1(x - \Delta x)_{LPA} \quad (12)$$

が成立するものとする.

(11) および (12) 式と $\phi_1(x)_{LPA}$ が正規分布曲線であると仮定し, LPA 因子の応力値に及ぼす影響について次に検討した.

4・2 ピーク位置の補正法

まず最初に, $\phi_1(x)_{LPA}$ が正規分布曲線であるとする. すなわち,

$$\phi_1(x)_{LPA} = \exp[-\alpha(x - P_{1,LPA})^2] \quad (13)$$

とおく. すると $\theta(x)_{LPA}$ は次のようになる.

$$\theta(x)_{LPA} = \exp[-\alpha(x - P_{1,LPA})^2] + k \cdot \exp[-\alpha(x - P_{1,LPA} - \Delta x)^2] \quad (14)$$

$P_{1,LPA}$ と Δx の間には(5)式の関係がある. したがって, $P_{1,LPA}$ に適当な値を代入し, (6)式より Δx を決定する. そうして $P_{1,LPA}$, Δx および α を(14)式に代入すると $\theta(x)_{LPA}$ が求まる. よってこの $\theta(x)_{LPA}$ を(11)式に代

入すれば $\theta(x)$ が求まり(1)式により P が求まる. この過程を flow chart に示すと Fig. 4 のようになる. したがって, α , $P_{1,LPA}$ の値を順次変えて同様の計算を繰り返すことにより半価幅 β をパラメータとした $P - P_{1,LPA}$ 曲線が描ける.

Fig. 4. Flow chart for the calculation of P and β .

次に計算例を示す. $CoK\alpha$ 線を用い (310) 面の回折線ピーク位置を測定する場合である. この場合, α と積分半価幅 $\beta_{1,LPA}$ の間には $\beta_{1,LPA} = \sqrt{\pi/\alpha}$ なる関係が存在するからこれを利用する.

いま, $\alpha = 7.075$, $P_{1,LPA} = 160.895^\circ$, $k = 0.5$, $\lambda_2/\lambda_1 = 1.00217$ とおくと(6)式より $\Delta x = 1.503^\circ$ が求まる. したがって,

$$\begin{aligned} \phi_1(x)_{LPA} &= \exp[-7.075(x - 160.895^\circ)^2] \\ \theta(x)_{LPA} &= \exp[-7.075(x - 160.895^\circ)^2] \\ &\quad + 0.5 \exp[-7.075(x - 162.398^\circ)^2] \quad (15) \\ \theta(x) &= \theta(x)_{LPA} \cdot LPA(x) / LPA(160^\circ) \end{aligned}$$

で $\theta(x)$ が求められる. この場合 LPA 因子は 160° を基準として計算した. $\psi_0 = 45^\circ$ では $P = 161.484^\circ$ となる. 同様に $\beta_{1,LPA}$, β を計算するとそれぞれ 0.666° , 1.072° となり β をパラメータとして $P - P_{1,LPA}$ の関係が計算できる.

しかしながら, ここで必要なのはピーク位置の補正ではなく応力値の補正である. そこでこの方法を基礎として次に応力値そのものの補正法について述べる.

4・3 応力値の補正法

X線応力測定法の基本式は次式で示される.

$$\frac{d_\phi - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{1,LPA} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (16)$$

この式で $\sigma_{1,LPA}$, ψ , $(\sigma_1 + \sigma_2)$ を決めると d_ϕ が求まる. この d_ϕ を Bragg の条件式に代入すると $P_{1,LPA}$ が決定される. そうすればあとは4・2のピーク位置補正

法を応用して $\phi_1(\kappa)_{LPA}$ から $\theta(\kappa)$ が求まり、 $\theta(\kappa)$ の重心位置 P を求めその値を用いて応力 σ を求める。したがって、 $\sigma - \sigma_{1.LPA}$ の関係が $\theta(\kappa)$ の積分半価幅 β をパラメータとして表わせる。

次に計算の一例を示す。Co-K α 線で鉄系材料の(310)面の応力測定の場合、

$$d_0 = 0.90643 \text{ \AA}, E = 21.000 \text{ kg/mm}^2, \nu = 0.28, \alpha = 1.74$$

$$\sigma_{1.LPA} = -5.0 \text{ kg/mm}^2, (\sigma_1 + \sigma_2) = -50.0 \text{ kg/mm}^2 \text{ としたとき } \phi_0 = 45^\circ \text{ では,}$$

$$P_{1.LPA} = 161.051^\circ, P = 161.665^\circ, \beta_{1.LPA} = 1.340^\circ, \beta = 2.145^\circ$$

一方 $\phi_0 = 0^\circ$ では、

$$P_{1.LPA} = 160.918^\circ, P = 161.513^\circ, \beta_{1.LPA} = 1.340^\circ, \beta = 2.109^\circ$$

となり、これから応力を計算すると $\sigma = -5.64 \text{ kg/mm}^2$ となる。

この $\sigma - \sigma_{1.LPA}$ の関係を β をパラメータとして表わしたものが Fig. 5 であり、K α 回折線によって求めた応力値と積分半価幅 β よりただちに K α_1 回折線に LPA 因子を補正した回折線より求めた応力 $\sigma_{1.LPA}$ が求まる。図より明かなように、 β が大きくかつ応力の大きい場合には相当量の補正が必要である。たとえば、 σ が -50 kg/mm^2 で β が 4.94° の場合には $\sigma_{1.LPA}$ は -40.8 kg/mm^2 で、 9.2 kg/mm^2 もの補正が必要であるが、 β が 2.47° の場合には $\sigma_{1.LPA}$ は -45.2 kg/mm^2 で補正量は 4.8 kg/mm^2 で済む。

Fig. 5. Relation between σ and $\sigma_{1.LPA}$.

4.4 半価幅の補正

4.2で述べたピーク位置補正法と同様な計算によって $\beta - \beta_{1.LPA}$ の関係が求められる。すなわち Fig. 4の flow chart によれば、 $P_{1.LPA}$ と α を与えれば K α 回折線の積分半価幅 β が求まる。ここで $\phi_1(\kappa)_{LPA}$ の半価幅 $\beta_{1.LPA}$ は、 $\sqrt{\pi/\alpha}$ によって表わされるから種々の α について計算を行えば $\beta - \beta_{1.LPA}$ の関係が図に表わせる。厳密にいうと、 $P_{1.LPA}$ の値によって上の関係は多少変化するが実用上は無視できる値である。Fig. 6は Co-K α 線を用いて (310) 面の半価幅を測定した場

合の $\beta - \beta_{1.LPA}$ 線図である。この場合の β の測定法は回折線形状のいかにかわらず回折線と back ground の内部の面積 S を測定、次いで $\theta(\kappa)_{max}$ すなわち回折線のピーク高さを測定、 $\beta = S/\theta(\kappa)_{max}$ を求めればよい。この部分において従来使用されていた図式的 K α 二重線分離法などはいっさい用いる必要がない。

Fig. 6. Relation between β and $\beta_{1.LPA}$.

5 実 測 例

5.1 実験方法

材料はいずれも炭素鋼で、一つは0.16%炭素鋼の冷間引拔鋼管、他は SK5 炭素鋼に焼入焼もどしを行なったものである。前者は回折線幅の狭いものの例として、後者は回折線幅が広くかつ残留応力の大きい例として用いた。

実験は平行ビーム型自動記録式X線応力測定装置を用い、自動記録された回折強度曲線上で、鋼管の場合は 0.2° おきに、SK5 材の場合は 0.4° おきに強度を測定した。測定点は45点である。X線は Co-K α 線を用い、(310) 面よりの回折線について測定を行なった。

5.2 重心測定による応力測定結果

Fig. 7に冷間引拔鋼管で半価幅 β が 3.3° のものにつ

Fig. 7. $\text{Sin}^2\psi$ diagram for stress measurement.

いての残留応力測定結果を示す。図中黒丸が $K\alpha$ 回折線の重心測定より求めたもの、白丸が従来より使われている半価幅法による結果である。この例では回折線幅が狭く、半価幅法で精度の高い測定が可能であるため、 $\sin^2\psi$ に対するばらつきも少なく、重心法と比較する上で好都合である。そうして重心法による測定もきわめて精度よく行なわれていて、測定法の違いによる応力差はほとんど見られない。また、 $K\alpha_1$ 回折線のピーク位置を(8)式によって求めて応力を求めても変化がないことも示されている。このため、回折線幅の狭いものに対して本重心法を用いる意義は少ないが、回折線幅が非常に大きい場合には、半価幅法ではばらつきが大きくなり客観性のあるデータが得られにくいので、この方法によって応力測定を行なう意義は大きいと考える。とくに回折線幅の広いものでは、定時計数法などの採用によって簡単に重心を求めることが可能と考える。

5・3 LPA 因子の補正結果

Fig. 8, 9 の $\sin^2\psi$ 線図は、 $K\alpha$ 回折線の積分半価幅がそれぞれ 2.7° , 4.4° の材料について残留応力測定を行なった例である。両図とも黒丸は $K\alpha$ 回折線の重心位置で(1)式によって求めたものである。また、白丸は $\Phi(x)$ を(11)式によって補正し $\Phi(x)_{LPA}$ としてさらに(6)式によって求めた $\phi_1(x)_{LPA}$ のピーク位置 $P_{1,LPA}$ である。

まず Fig. 8 において、 σ は -25.8kg/mm^2 と測定された。次に $\sigma_{1,LPA}$ は -22.9kg/mm^2 という値が実測値として求められた。次いで $K\alpha$ 回折線の積分半価幅 $\beta=2.7^\circ$ と $\sigma=-25.8\text{kg/mm}^2$ を用いて Fig. 5 の $\sigma-\sigma_{1,LPA}$ 線図より $\sigma_{1,LPA}$ を求めたのが図中の $\sigma_{1,LPA}'$ でありこの値は -23.4kg/mm^2 となり実測値との差は 0.5kg/mm^2 とほぼよい一致をみている。

Fig. 8. $\sin^2\psi$ diagram for stress measurement (Cold drawn tube).

Fig. 9. $\sin^2\psi$ diagram for stress measurement (SK 5).

同様に Fig. 9 の例でも、 $\sigma=-50.7\text{kg/mm}^2$, $\sigma_{1,LPA}=-41.4\text{kg/mm}^2$ となり、 $\sigma_{1,LPA}'$ は -42.1kg/mm^2 で $\sigma_{1,LPA}$ と $\sigma_{1,LPA}'$ との差は 0.7kg/mm^2 とこの場合もよい一致をみている。

この例から考えて、Fig. 5 のような $\sigma-\sigma_{1,LPA}$ 線図を使用して、実測した応力 σ と積分半価幅より LPA 因子を補正した応力 $\sigma_{1,LPA}$ を求めてさしつかえないものとする。本例では σ は重心法によって求めたものを使用したが、5・2で述べたように、半価幅法によっても充分精度の高い値が得られる場合はこれを用いて補正を行なってもさしつかえない。

5・4 LPA 因子を補正した半価幅測定

Fig. 10および11に $\beta=2.9^\circ$ および $\beta=4.4^\circ$ の回折線半価幅をもつ回折強度曲線を示す。図中、 $\Phi(x)$ は実験によって求めたもの、 $\Phi(x)_{LPA}$ は(11)式で $\Phi(x)$ を補

Fig. 10. Diffraction intensity curves of the cold drawn tube.

Fig. 11. Diffraction intensity curves of SK 5 quenched and tempered specimen.

正したもの、 $\phi_1(x)_{LPA}$ は 3 の $K\alpha_1$ 回折線分離法によって $\Phi(x)_{LPA}$ より分離した $K\alpha_1$ 回折線である。

Fig. 10 において、 $\phi_1(x)_{LPA}$ の積分半価幅 $\beta_{1,LPA}$ を求めると 2.0° となった。さらに $K\alpha$ 回折線 $\Phi(x)$ の積分半価幅 $\beta = 2.9^\circ$ を用いて Fig. 6 の $\beta - \beta_{1,LPA}$ 線図より $\beta_{1,LPA}$ を求めるとこれも 2.0° となった。図中の $\beta'_{1,LPA}$ がこの値である。

同様に Fig. 11 における結果でも $\beta_{1,LPA} = 3.7^\circ$ 、 $\beta'_{1,LPA} = 3.8^\circ$ と比較的良好一致をみている。

このように半価幅測定においても $\phi_1(x)_{LPA}$ を正規分布曲線と仮定して求めた $\beta - \beta_{1,LPA}$ の関係と実測値の間にはよい一致がみられ、この方法の採用によって容易に、 $K\alpha_1$ 回折線に LPA 因子を補正した回折線の積分半価幅が求められる。

さらに、この $\beta - \beta_{1,LPA}$ 線図の使用によって、Instrumental Broadening⁸⁾ を取り除いた材料よりの真の回折強度曲線の積分半価幅が容易に求められる。すなわち、実験により求めた回折線の半価幅を $\beta_{1,LPA}$ 、ひずみのない材料のそれを β_{INS} および真の回折強度曲線の半価幅を β_{real} とするとき、もし回折線がすべて

正規分布曲線であれば次の関係が成立する。

$$\beta_{1,LPA}^2 = \beta_{INS}^2 + \beta_{real}^2 \quad (17)$$

実際に β_{real} を求めるには、回折線を $K\alpha_1$ および $K\alpha_2$ 回折線になんらかの方法で分離しなければならず、その手続が複雑であり実用に供されていないが、この線図によって容易に $\beta_{1,LPA}$ と β_{INS} が求められるので β_{real} も簡単に求められる。

6 結 論

X線応力測定の精度向上を図る目的で、 $K\alpha$ 回折線の重心測定によって応力測定を行なう方法を述べ、さらにこの方法を応用して、ローレンツ片寄り因子および吸収因子の応力値への影響度を定量的にかつ簡単に補正する方法について述べた。また、これに関連して $K\alpha_1$ 回折線にローレンツ片寄り因子および吸収因子を補正した回折線の積分半価幅を $K\alpha$ 回折線の積分半価幅より求めるための図を作成した。

これらの補正法によって求めた値と、実際に求めた値との比較を試みたところ、実用上充分の精度で一致することが明らかになった。

今後、高周波焼入材や浸炭材のように残留応力が大きくかつ回折線幅の広い材料の応力測定の必要度が高まるにつれて、本論文で報告した重心測定による応力測定や LPA 因子の補正の必要度が大きくなることが考えられ、一つの寄与をなすものとする。

計算には、京都大学計算センター KDC-II 型電子計算機を使用した。

(昭和41年7月13日 日本材料学会第5回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 平修二, 吉岡靖夫, 坂田敏行, 材料, **14**, 940 (1965).
- 2) 福良二郎, 藤原晴夫, 材料, **14**, 956 (1965).
- 3) Stokes, A.R., Proc. Phys. Soc., **61**, 382 (1948).