



X 線応力測定と X 線透過試験

X-ray stress measurement and X-ray radiography

一色貞文*

筆者は昭和 11 年以来、X 線の工学的利用に関する研究を行ってきたが、本稿はそのうち X 線応力測定と X 線透過試験について、昭和 49 年 3 月 27 日に開かれた退官記念講演会において述べた原稿である。

永くお世話になった生研を停年退官するに当って、講演の機会を与えられたことを有難く思っています。本日は私が手掛けてきた仕事のうち、X 線応力測定と X 線透過試験について、関係の薄い方にも判って頂けるようにお話しする積りである。

X 線応力測定

まず X 線応力測定についてお話しします。金属のような結晶性の物体が弾性的に変形すると、結晶の格子面の間隔 d が変化します。したがって X 線回折法でその変化量 Δd 、すなわち格子ひずみ ε を測定すれば、これに弾性率 E を掛けて応力に換算することができます。この方法の可能性については、1930 年に Sachs と Weerts が発表していますが、金属材料の応力測定方法としてまとまった形で発表したのは、1935 年、Glocker と Osswald で、私が東大冶金の志村繁隆先生の研究室で卒業論文の研究をしていた時でした。当時はまだ電気抵抗ひずみ計が存在しなかったため、非破壊的に実際の材料について応力を測定する唯一の方法として、私はこの方法に興味を持ちました。また志村先生のお奨めもあったので、卒業後研究室に残って、冶金屋の立場で X 線応力測定に関する実験的研究を致しました。以下スライドを使ってお話しします。

金属結晶の弾性的な変形量は極めて小さいので、 d の測定は精密に行う必要があります。X 線回折に関する Bragg の式

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

(λ は波長、 θ は入射角) を λ が一定として θ について微分すると

$$\Delta \theta = -\frac{\Delta d}{d} \tan \theta = -\varepsilon \tan \theta$$

という関係が得られ、一定の格子ひずみ ε が存在する場合の入射角の変化 $\Delta \theta$ は θ が大きくなるにつれて急速に増大します。つまり θ がなるべく 90° に近くなるように回折条件を設定すると、 d の測定精度が上がります。これが背面反射法の原理です。

しかしこのような回折実験には特性 X 線を使うので、 λ はとびとびの値をもち、連続的に変化させることはで

表 1

被測定物質	特性 X 線	回折面	θ
α -Fe	Co $K\alpha_1$	(310)	$80^\circ 40'$
α -Fe	Cr $K\alpha_1$	(211)	$78^\circ 0'$
Al	Cu $K\alpha_1$	(333)	$81^\circ 15'$
α -Brass (Cu 70%)	Co $K\alpha_1$	(400)	$75^\circ 30'$

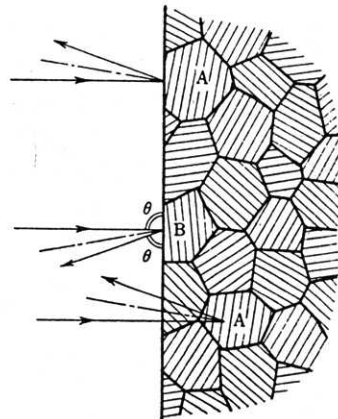


図 1

きないので、対象とする材料に応じて、特性 X 線の種類を選ばねばなりません。適当な組み合わせの一例を表 1 に示します。

図 1 は金属の表面部分の断面の顕微鏡組織の模式図です。表面に垂直に X 線を入射させると、沢山の結晶粒のうち、Bragg の条件を満たす向きにある格子面だけが回折を起させます。X 線を照射する面積は、一方向の長さにして数 mm ないし 10 mm ですが、X 線が照射される部分で応力が一様であると考えます。回折 X 線の強度を増すためには照射面積を大きくすることが望ましいが、応力集中が起こる場合のように、応力分布の変化が著しい場合は、照射面積を小さくすることが必要です。

X 線はすべて金属をよく透過するように思われ勝ちですが、応力測定の場合、波長が 2\AA 前後の軟かい特性 X 線を使うので、測定にかかる回折は、鉄の場合には表面の $20\sim 30\mu$ 程度、アルミニウムのように透過性の良い金属でもただかだか表面の 100μ 程度の薄層に限られます。したがって表面に垂直な方向には応力が存在しない

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

と考えてよいこととなります。つまり2次元応力を測定する問題になり、応力の主軸は物体表面に平行し、互に直交すると考えます。

応力が存在しない場合は、どの結晶粒でも同じ面指数をもつ格子面の間隔 d は等しいのですが、応力が存在する場合は、その応力の大きさと方向によって、ある向きの格子面では d が伸び、他の向きの格子面では d が縮むこととなりますが、応力が一樣である場合には、同じ方向に回折するすべての格子面は、応力主軸と等しい傾きをもつので、伸びるにしても縮むにしても、その量は等しくなります。これがX線応力測定の一つの基本的な点であります。

結晶の弾性的性質には異方性がありますが、多結晶体を弾性的に変形させたとき、個々の結晶粒の変形に結晶粒界がどのように影響するかについて、両極端の仮定をしてみます。第1は結晶粒界が非常に固く結合されていて、隣り合わせの結晶が相対変位を起こさないという仮定で、この場合は、ひずみは一樣になりますが、結晶粒の向きによってヤング率が違うので、応力は一樣でなくなります。第2は結晶粒の結びつきが極めて弱く、周囲に結晶粒が存在しない場合に等しいという仮定で、この場合はどの結晶の応力も等しいと考えてよろしいが、逆にひずみには差がでることとなります。実際には両者の中間の状態にあると考えますが、ここでは第1の仮定を置き、どの結晶粒でもひずみが一樣になると考え、すべての方向について、多結晶体から得られたヤング率を使うことにします。つまり弾性的には等方体であると考えます。

図2のように、表面の主応力を σ_1, σ_2 とし、それぞれの方向のひずみを $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 、表面に垂直の方向のひずみを ε_1 とすると、2次元主応力と3次元主ひずみの間に次の関係があります。(E はヤング率、 ν はポアソン比)

$$\begin{cases} E\varepsilon_1 = \sigma_1 - \nu\sigma_2 \\ E\varepsilon_2 = \sigma_2 - \nu\sigma_1 \\ E\varepsilon_1 = -\nu(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (1)$$

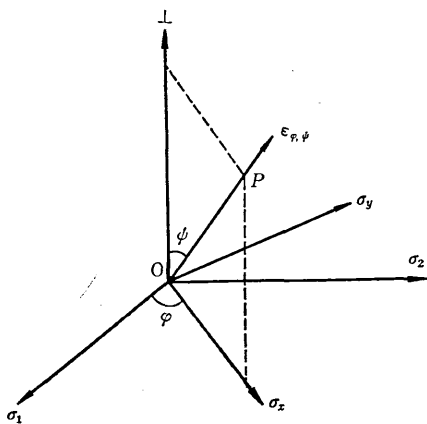


図 2

もし主応力の和の値さえ求めればよいという場合であれば、X線的に ε_1 を測定し、既知の E と ν を使うことによって (1) 式から $(\sigma_1 + \sigma_2)$ が求まります。

次にこの表面内で σ_1 から任意の角 φ だけ傾いた方向を x 、それに直交する方向を y としますと、次の関係が存在します。

$$\begin{cases} E\varepsilon_x = \sigma_x - \nu\sigma_y \\ E\varepsilon_y = \sigma_y - \nu\sigma_x \\ E\varepsilon_1 = -\nu(\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (2)$$

また ε_x を ε_1 と ε_2 で表わしますと

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \quad (4)$$

偏角 φ の垂直面内で任意の方向 \overline{OP} を考え、その傾角を ψ 、 \overline{OP} 方向のひずみを $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ で表せば、(2), (3), (4) の関係を使って

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\varphi, \psi} &= \varepsilon_1 \cos^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_1 \cos^2 \psi \\ &= (\varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + \varepsilon_1 (1 - \sin^2 \psi) \\ &= \varepsilon_x \sin^2 \psi + \varepsilon_1 (1 - \sin^2 \psi) \\ &= \sigma_x \left(\frac{1 + \nu}{E} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} \right) - \frac{\nu}{E} \sigma_y \\ &\equiv \varepsilon_{\psi} \end{aligned} \quad (5)$$

この式の最後の形には φ が含まれませんので、記号を簡単にして、 $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ を ε_{ψ} と表わすことにします。

φ が等しく ψ が異なる2方向を ψ_1 および ψ_2 で表わし、それぞれの方向ひずみ ε_{ψ_1} と ε_{ψ_2} の差をとりますと

$$\varepsilon_{\psi_1} - \varepsilon_{\psi_2} = \sigma_x \frac{1 + \nu}{E} (\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2) \quad (6)$$

となり、同一垂直面内の2方向のひずみをX線的に測定すれば、その面と表面の交線の方向の応力が求まります。

また $\psi_2 = 0$ 、すなわち一方を垂直方向のひずみ ε_1 とすれば、次の形が得られます。

$$\varepsilon_{\psi} - \varepsilon_1 = \sigma_x \frac{1 + \nu}{E} \sin^2 \psi \quad (7)$$

実際の応力測定には、(1)式、(6)式、(7)式の3つの方法が行なわれます。

次にX線で格子ひずみを測定する方法をお話しします。回折角 θ を測定するのに写真フィルムを使う方法と、計数管を用いたX線回折計を使う方法がありますが、私が実験していた頃はまだ計数管が発達していませんでしたので、もっぱら写真法でやりました。そこでその方法を説明します。

図3のようにフィルムをセットしてX線回折をさせると、フィルム上には円形の回折像が得られますので、その半径 l とフィルム—試料間の距離 R を測定すれば θ が求まり、最初に示したブラッグの式 (1) を用いて d を計算することができます。

図4aは実際の写真で、内側の2本が応力を測定する α -Fe の $K\alpha_1$ (強い方) と $K\alpha_2$ の回折線、外側の2本は標準物質としての金の $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ の回折線です。つま

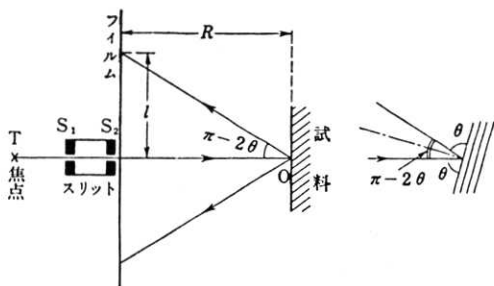


図 3

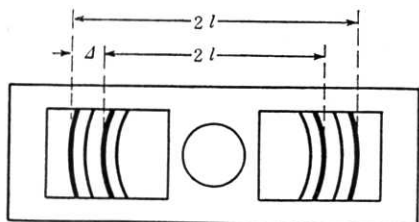
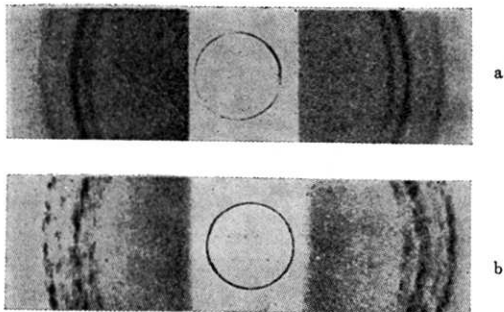


図 4

(下の $2l$ は $2l'$ に訂正)

り測定部分の表面に金箱をはりつけておいて写真を撮ります。金の回折角 θ は一定していますので、その l を測定すれば R が求まります。この R を使って上に述べた手順をふめば α -Fe の d が求まります。

結晶粒が粗いと図 4 b のように回折写真は斑点状となり、コンパレータで距離を測るのが困難になります。このような場合は、X線の入射方向を軸として赤道方向から両側に $10^\circ \sim 20^\circ$ 揺動させると滑らかな回折像が得られます。図 4 a はこのようにして写したものです。

図 4 c は模式化したもので、 l と l' を測定すればよいのですが、後にお話するように、斜め方向から X 線を入射させる場合には、ひずみのない金の回折線は左右対称になりますが、鉄の方は右と左で回折した格子面のひずみ量が異なるため、 θ の値も異なり、非対称となります。そこで l' の代わりに金の回折線と鉄の回折線の間隔 $d (=l-l')$ を測ります。これは左右でちがった値になります。1枚の回折写真の左右の d の差を利用して応力測定をする場合は、写真の下半分を鉛板で覆って上半分だけ露出させ、次に 180° 回転して未露出の部分に

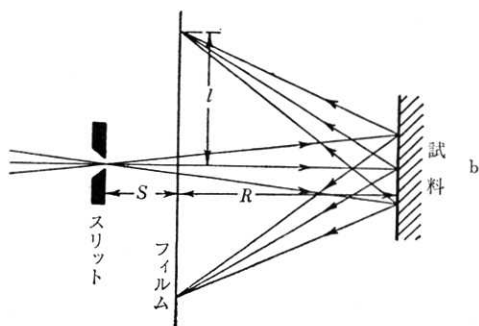
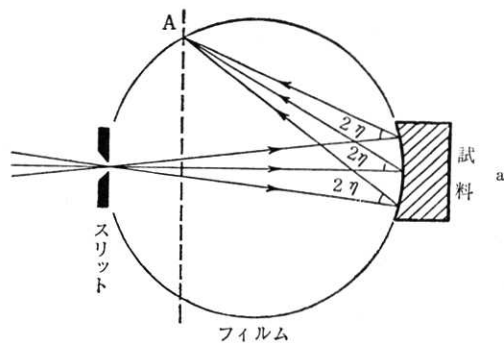


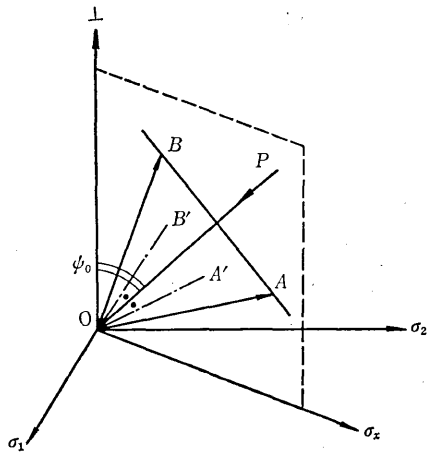
図 5

もう一度露出させると、上下の回折線が少しズレてうつりますので、このズレの距離を測定すればよいことになります。

図 3 のようにスリットで平行にした細い X 線ビームを使いますと、露出時間が長くかかるうえに、結晶粒の粗さの影響も著しくなります。そこで図 5 a のように円筒形にまげたフィルムを使い、1 箇のスリットを通して発散する X 線を試料にあて、フィルムとスリットと試料面が同一円周上にあるようにすると、等しい θ で回折した X 線はフィルム上の 1 点に集まり、露出時間を短くし、かつ粒状の少ない回折写真が得られることになります。これが集注法の原理ですが、 θ の変化する範囲が狭い場合は、図 5 b のように、 $SR=l^2$ の関係を満たしておく、平面フィルムにも集注法を適用することができます。図 4 a, b はこのようにして写したものです。

このようにして d を測定しますが、まず応力を測定すべき物体の、応力が存在しない状態の d を任意の方法で求めて、これを d_0 と表わします。次に応力の存在する状態で垂直写真を写して d を求め、これを d_1 と表わします。さらに図 6 のように垂線と ϕ_0 だけ傾いた方向から X 線を入射させて回折写真をうつし、A および B に相当する回折線から d を求めますと、これらは OA' および OB' の方向の d を測ったこととなります。図 2 の場合の ϕ は、前者では $\phi_+ = \phi_0 + \eta$ 、後者では $\phi_- = \phi_0 - \eta$ となります。 η は θ の余角です。これらの d を d_+ および d_- で表わします。

垂直方向の格子ひずみ ϵ_1 は、ひずみの定義から



• $\eta = 90^\circ - \theta$

図 6

$$\epsilon_{\perp} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}$$

と表わされます。したがって (1) 式は次のようになります。

$$\epsilon_{\perp} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (8)$$

また垂直写真と傾斜写真を使いますと

$$\begin{aligned} \epsilon_{+} - \epsilon_{\perp} &= \frac{d_{+} - d_0}{d_0} - \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} \\ &= \frac{d_{+} - d_{\perp}}{d_0} = \frac{d_{+} - d_{\perp}}{d_{\perp}} \end{aligned}$$

したがって (7) 式の代りに

$$\epsilon_{+} - \epsilon_{\perp} = \frac{d_{+} - d_{\perp}}{d_{\perp}} = \sigma_x \frac{1 + \nu}{E} \sin^2(\phi_0 + \eta) \quad (9)$$

つまり d_0 が判らなくても、2 方向の d を測定すれば、任意の方向の応力 σ_x を求めることができます。これは X 線応力測定法の長所のひとつです。

また垂直写真を使わないで、1 枚の傾斜写真の両側の回折線から d_{+} と d_{-} を求めて応力を出すこともできます。この場合は (6) 式に入れて

$$\begin{aligned} \epsilon_{+} - \epsilon_{-} &= \frac{d_{+} - d_{-}}{d_{+}} \\ &= \sigma_x \frac{1 + \nu}{E} [\sin^2(\phi_0 + \eta) - \sin^2(\phi_0 - \eta)] \end{aligned} \quad (10)$$

によって σ_x が求まります。

d を計算するためには三角関数を使わねばなりません。が、もともと d の変化は小さいので、直接 d を求めることはせず、図 4c の l (標準物質の回折円の半径) と Δ (測定物質と標準物質の回折線の間隔) を測れば、単純な算術計算で応力を求めることができます。式の出し方は省略しますが、一例について述べます。 α -Fe の応力を求める場合、標準物質を金、特性 X 線は $\text{Co K}\alpha_1$ と

し、金の $2l = 50.00 \text{ mm}$ になるように撮影条件を定めると、(8), (9), (10) 式の代りに

$$\begin{aligned} \sigma_1 + \sigma_2 &= (\Delta_{\perp} - \Delta_0) \times 92 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_x &= (\Delta_{\perp} - \Delta_{+}) \times 30 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_x &= (\Delta_{-} - \Delta_{+}) \times 63 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

となります。ただし Δ_{+} と Δ_{-} を求める傾斜写真は $\phi_0 = 45^\circ$ でうつした場合です。実際の写真では $2l$ が標準値 50.00 mm から多少ズレますから、次の式で Δ の換算を行ないます。

$$\Delta (\text{換算値}) = \Delta (\text{測定値}) \times \frac{50.00}{2l (\text{測定値})}$$

上の 3 式の係数を比較すると、2 番目の式を使い、 Δ_{\perp} と Δ_{+} から σ_x を求めると、最も良い精度が期待されることが判ります。

主応力 σ_1 と σ_2 の大きさと方向を求めたい場合は、図 7 のように、直交する任意の方向の応力成分 σ_x, σ_y と、 σ_x から $\alpha = 45^\circ$ だけ傾いた他の直交する応力成分 $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$ を求めますと、主応力の方向 φ は

$$\tan 2\varphi = \frac{\sigma_{x'} - \sigma_{y'}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

で計算されます。この φ を使って、 σ_1 と σ_2 の大きさは次の式で求まります。

$$\begin{aligned} \sigma_x(1 + \cos 2\varphi) - \sigma_y(1 - \cos 2\varphi) &= 2\sigma_1 \cos 2\varphi \\ -\sigma_x(1 - \cos 2\varphi) + \sigma_y(1 + \cos 2\varphi) &= 2\sigma_2 \cos 2\varphi \end{aligned}$$

ただし

$$\sigma_x + \sigma_y = \sigma_{x'} + \sigma_{y'}$$

の関係がありますので、3 つの方向の応力を測定すればよいわけです。そのためには 3 つの方向のそれぞれを含む垂直面内の傾斜写真を 1 枚ずつ都合 3 枚と、1 枚の垂直写真をとれば主応力の解析ができるわけです。

次に C 0.2% の炭素鋼の試験片 (断面 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) を小型の引張装置で荷重を与えながら、垂直写真と傾斜写真から d を求めた結果を図 8A に示します。 d_{\perp} は

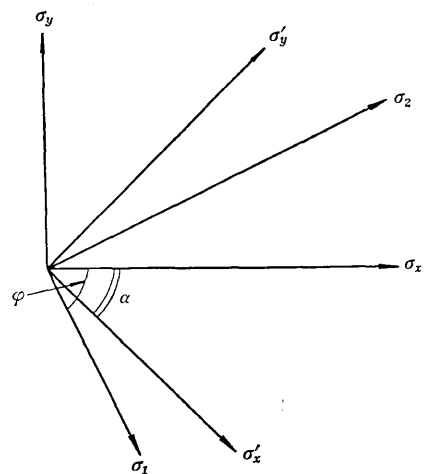


図 7

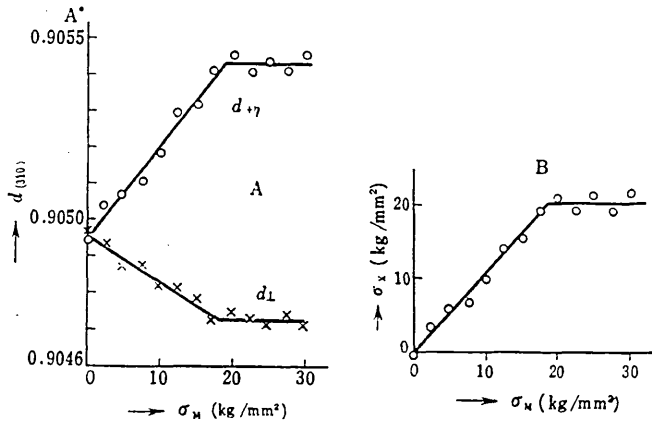


図 8

荷重とともに直線的に減少し、 d_+ は増大しますが、18 kg/mm^2 で飽和し、それからは荷重を増しても d の値は変わりません。これは 18 kg/mm^2 以上になるとフェライト ($\alpha\text{-Fe}$) の結晶が塑性変形することを意味します。18 kg/mm^2 という値はこの鋼の降伏点より低いので、この値から降伏点までの間は、パーライト ($\alpha\text{-Fe}$ と Fe_3C の共折混合物) の部分がまだ弾性的に変形していると考えられます。

図 8B はこれらの d_+ と d_+ を使って、(9) 式から求めた σ_x を縦軸に、機械的に与えた応力 σ_M を横軸に示したもので、弾性限以下では 45° に近い直線になっていることが判ります。

図 9 は垂直写真だけで同様の実験をし、塑性域まで変形した後、破壊する前に一度外力を減らして元に戻し、さらに破壊するまで引張った結果です。破壊後は外力が作用していないのに、圧縮応力が残ることを示しています。X 線的に求められるのは、 $\alpha\text{-Fe}$ だけの応力でありまして、測定にかからないパーライトや $\alpha\text{-Fe}$ の滑り面に沿う乱れた組織に引張応力が残っていて、全体として

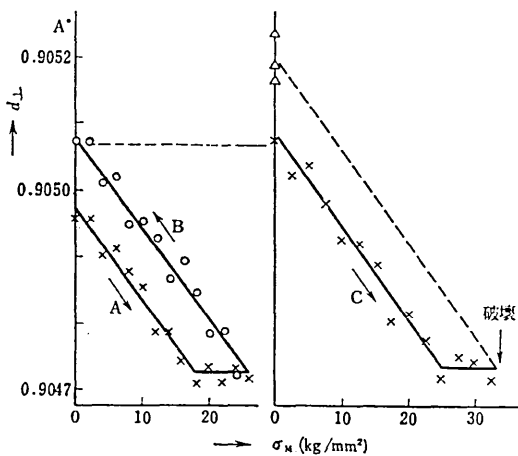


図 9

は釣合いを保ち、マクロ的には無応力の状態にあるものと推測されますが、これを確証する実験をした訳ではありません。

このような実験の場合、 $\alpha\text{-Fe}$ の弾性限以下では回折線の幅が細く、 $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ がよく分離しますが、弾性限を越すと幅が大きくなり、 $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ の分離が悪くなります。図 10 はマイクロフォトメータで回折線のプロファイルを両かせたもので、上の図は分離の良い場合、下の図は悪い場合です。図のようにして半価幅を求め、荷重に対してプロットすると図 11 のようになり、塑性変形が進むにつれて半価幅が大きくなっていきます。

d の変形を来たすような応力を第 1 種の応力といい、半価幅が広がるような応力を第 2 種の応力ということがありますが、第 2 種応力のことは省略します。

以上お話ししたように、第 1 種応力の X 線的測定の長所は、ひとつには無応力時の d_0 が判らなくても応力が測定できることであり、もうひとつには露出時間の長引きを我慢すれば、かなり小さい部分の応力が測れるので、応力集中の状態を知り得る点にあります。反面短所としては、表面応力しか測定できないことと、ひとつたび塑性変形を起してしまった後は、目的に副った応力測定ができないということでもあります。

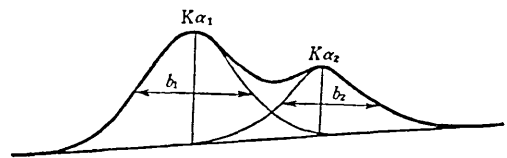
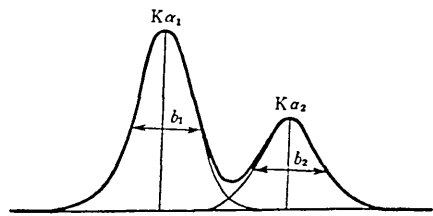


図 10

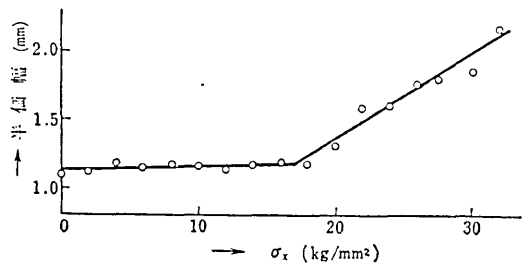


図 11

X線透過試験

次にX線透過試験についてお話しします。RöntgenがX線を発見したのは1895年で、約80年前のことですが、Laueが結晶でX線を回折させて、X線が電磁波の一種であることを確証したのは、私の生れる前年の1912年で、Röntgenの発見から17年かかっています。しかしこの間にも、X線が物質をよく透過するという性質は生物、無生物の別なく利用されまして、X線装置の進歩とともにその利用度も拡がっていきました。

X線透過試験というのは、物体にX線をあててこれを透過したX線を写真フィルムに写し、その像を見て内部構造や内部の欠陥などを知るのが目的で、主として欠陥検査の手段として行なわれます。この目的にはX線のほかγ線や熱中性子線なども使われますので、総称して放射線透過試験と呼んでおりますが、実際に使用する物体を傷つけることなく検査することができますので、非破壊検査の一つの重要な方法であります。非破壊検査にはいろいろの手段を用いますが、表面欠陥の検査には磁気探傷、滲透探傷、電磁誘導試験などが有効であり、内部欠陥の検査には主として放射線透過試験と超音波探傷が行なわれます。

わが国ではこれらの非破壊検査技術の調査、研究、普及を目的として、昭和27年に非破壊検査法研究会が発足し、3年後の昭和30年にはこれが発展して文部省が認可した社団法人日本非破壊検査協会が設立されました。この協会は略称してNDI (non-destructive inspection) と呼んでおりますが、非破壊検査に関する学術団体としては世界でもアメリカに次いで2番目に生れたもので、その実力は世界的にも高く評価され、昭和35年には第3回の国際非破壊試験会議が日本で開かれたほどです。NDIの設立には、当時工学部教授で溶接をしておられた木原博先生や当時生研で超音波のこともしておられた高木昇先生等が中心となられました。私も放射線の関係で当初からこれに参画してきました。このNDIでは非破壊検査と非破壊試験という言葉とを区別しております。

X線の場合を例にとりますと、X線透過写真をうつし、その画像を見てどのような種類の欠陥が、どの程度、どの位置に存在するかを調べる段階をX線透過試験といい、この結果から透過させた材料や製品が使用目的に適するか否かを判断し、合格、不合格をきめる段階まで含めたものをX線透過検査と呼んでいます。

医師が診断用にX線写真を使う場合と対比してみますと、まずX線技師が透過写真をうつしますが、この場合X線に関する知識が必要なことはもちろん

です。次に医師がこの写真をみて診断し、病気が否か、さらに病気の場合はその位置や病気の程度を判断して、適切な治療を施す訳で、それには基礎医学から臨床医学にわたる広範な知識と経験を必要とします。X線を非破壊検査に使う場合も同様で、試験の段階では対象となる材料なり製品なりの製造工程についての知識と冶金学的な知識を必要とします。検査の段階まで進むと、これに加えて使用時の応力状態や破壊強度に関して十分な知識と経験を必要とします。

X線透過試験には、蛍光増倍管を使って蛍光像を観察する方法や、これを工業用テレビの画像にかえて観察する方法もありますが、欠陥の検出感度は写真フィルムを使う方法が最も勝れています。ここでは写真法によってX線透過試験を行なう場合に、欠陥の検出感度を支配する要因について簡単にお話しします。

厚さ x の物体に I_0 という強さのX線を照射し、透過したX線の強さを I とすれば

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \tag{11}$$

と表わされます。 μ は吸収係数と呼ばれ、図12のように、物質の種類とX線の光子エネルギーによって変化します。実際には白色X線、つまり連続スペクトルをもつX線を使いますので、 μ は x に関係することとなり、 x が大きくなるほど μ は小さくなるという複雑な関係になります。しかし一般的にいて、X線のエネルギーが大きくなるほど、換言すると波長が短くなるほど、

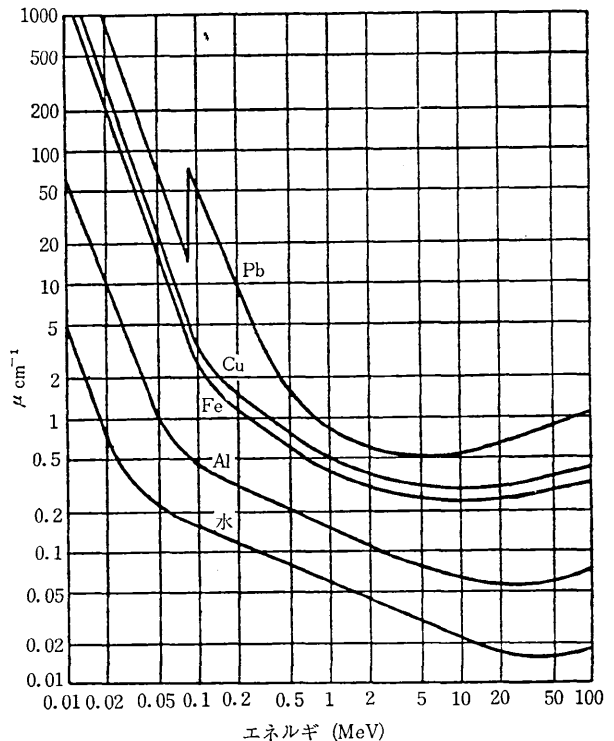


図 12

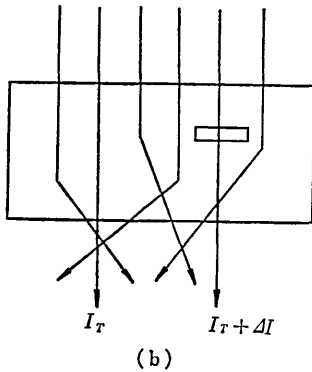
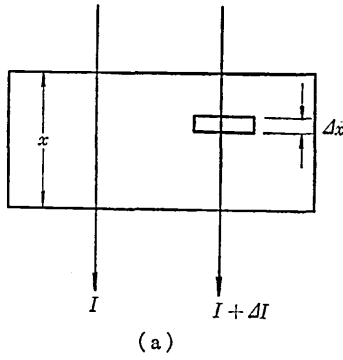


図 13

X線の透過性がよいこととなります。

(11) 式を微分すると次の関係が得られます。

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I_0 \exp(-\mu x) = -\mu I$$

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu \Delta x \quad (12)$$

すなわち図 13 a のように厚さ x の物体に厚さ Δx の空隙が存在する場合、この部分を透過した X線の強さを $I + \Delta I$ とすれば、 I が増加する割合 $\Delta I/I$ は (12) 式で与えられ、これは欠陥による X線強度のコントラストを表わすもので、 μ が大きいほど、つまり透過性の悪い X線を使うほど、コントラストが大きくなります。

(11) 式や (12) 式は直進した透過 X線だけを考えた場合のもので、図 13 b のように、X線は物体で吸収されると同時に、散乱も起します。したがって写真フィルムには透過 X線と同時に散乱 X線も感光します。フィルムの一点に照射される透過 X線の強さを I 、散乱 X線の強さを I_s とし、 $n = I_s/I$ とおけば、合計の X線の強さ I_T は次のように表わされます。

$$I_T = I + I_s = (1+n)I$$

n は散乱の程度を表わすもので、 x が小さいときは n も小さいのですが、 x が厚くなると n も大きくなり、4 とか 5 とかいう値になります。したがって散乱 X線を考えたときのコントラストは次のようになります。

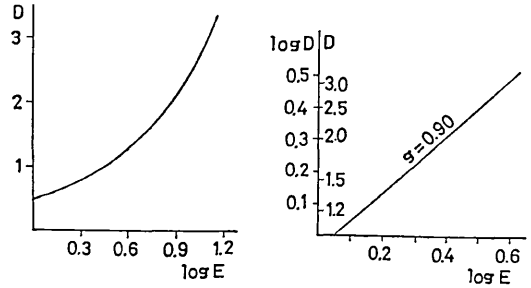


図 14

$$\frac{(I_T + \Delta I) - I_T}{I_T} = \frac{\Delta I}{I_T} = \frac{\Delta I}{(1+n)I} = \frac{\mu}{1+n} \Delta x \quad (13)$$

次に写真フィルムの特性についてお話しします。われわれが使用するのは工業用 Xレーフィルムという種類のもので、感光材料としてハロゲン化銀を使っていることは普通の写真フィルムと変わりません。このフィルムに X線を感光させたときの特性曲線は図 14 a のような形となります。縦軸は写真濃度 D を表わし、 $D = \log(L_0/L)$ で定義されます。 L は黒化したフィルムを透過した光の強さ、 L_0 はフィルムを置かないときの光の強さで、その比の常用対数をとったものです。対数をとるのは、人間の視覚が眼を刺激する光の強さの対数に比例するという経験に基くものです。横軸は露出量の相対値 E の常用対数を表わします。 E は X線の強さ I と露出時間 t の積で表わすことができます。

$$E = It \quad (14)$$

特性曲線の勾配をグラジエント G 、またはガンマ値 γ と呼んでおり、これはフィルムのコントラストを表わすもので、 D が高くなるほど G が大きくなります。フィルムの種類が変わると特性曲線の相対位置が変わり、左に移動するほど感度が高くなり、また曲線の勾配が急なほどコントラスト特性が良いことを意味します。

感度を高めるため蛍光増感紙を使うことがあります。この場合は光に感光するため、特性曲線は $D=2.0$ 付近から横に寝る形となり、コントラストは悪くなります。蛍光増感紙を使うと感度は上りますがコントラストが低下するばかりでなく、現像された銀の粒子が粗くなるため、欠陥の検出感度が悪くなります。したがって工業用の透過試験では、特に露出時間を短縮する必要のある場合のほかは、蛍光増感紙を使うことは好ましくありません。

一昨年ふとした動機で、特性曲線を作るため、一連の実験を私自身行ってみました。そのうちのひとつの銘柄のフィルムのデータを普通の形の特性曲線にプロットしたのが図 14 a です。ところが縦軸に $\log D$ をとって表わすと、 $D > 1.0$ の範囲では図 14 b のようなきれいな直線が得られることが判りました。 $D < 0.9$ では直線からズレて横に寝ますが、実用域は $1.0 \leq D \leq 3.5$ ですか

ら、この範囲では直線となります。他の銘柄のフィルムについても、勾配が違うだけで、同様の直線が得られます。この関係は次のような式で表わされます。

$$D = \left(\frac{E}{E_0} \right)^g \quad (15)$$

E_0 は $D=1.0$ に対する露出量で、 $1/E_0$ がフィルムの感度特性を表わす係数になります。 g はコントラスト特性を表わす係数です。したがって (15) 式は X 線フィルムの特性式といえることができます。つまり $1.0 \leq D \leq 3.5$ という実用域では、図 14 a のような特性曲線を使わなくても、(15) 式の E_0 と g の値さえ知れば十分であることが判りました。同一のメーカーの銘柄を異にする 5 種類の工業用 X 線フィルムについて実験した結果、コントラストが最高といわれるフィルムで $g=0.95$ 。最低といわれるフィルムで $g=0.65$ が得られ、他の 3 種のフィルムの g はその中間で、メーカーのいう順に並んでいました。

感度を問題にせず、コントラスト特性だけを考える場合は $E_0=1$ として

$$D = E^g$$

と書けます。また通常 1 枚のフィルムの露出をするとき、場所によって露出時間を変えることはありませんので、(14) 式から露出量 E は照射する X 線の強さ I に比例することが判ります。 E は元来相対値でありますから、 $D=1$ のとき $I=1$ となるようにすれば、 E の代りに I を使ってもよいことになります。

$$D = I^g$$

この式を I で微分すれば

$$\frac{dD}{dI} = gI^{g-1} = g \frac{D}{I}$$

となります。したがって I の微小変化 ΔI によって生ずる濃度の微小変化 ΔD は次のように表わされます。

$$\Delta D = g D \frac{\Delta I}{I}$$

この式の $\Delta I/I$ に (13) 式の関係を入れますと

$$\Delta D = -\frac{\mu g D}{1+n} \Delta x \quad (16)$$

となります。これは Δx という微小厚さの欠陥に基くフィルムの濃度差 ΔD 、つまり欠陥像のコントラストを表わすものです。われわれの肉眼が識別しうる最小の濃度差は $0.02 \sim 0.03$ といわれますが、(16) 式の右辺の係数が大きいほど ΔD が大きくなって、欠陥を識別しやすくなります。

そのためには、 μ 、 g 、 D のそれぞれをできるだけ大きくし、 n をできるだけ小さくするように撮影条件を決めればよいことになります。 μ を大きくするには X 線管電圧を下げて、光量子エネルギーの小さい X 線を使えばよいことになりますが、吸収が多くて透過 X 線は弱くなります。 g を大きくすることはコントラスト特性の良いフィルム銘柄を選ぶことですが、その場合必然的に感度は低くなります。 D を大きくすることは露出時間を長くして黒いフィルムを作ることです。 n を小さくするには適当なフィルターを入れる方法がありますが、これも散乱 X 線だけを吸収してくれる訳ではありませんので、透過 X 線も弱くなります。このように、 μ 、 g 、 D を大きくし、 n を小さくするようにしますと、いずれも露出時間を長くすることに繋がります。現場で透過写真を写す場合は、経済的な理由から露出時間の短いことを要求されますので、限られた露出時間で撮影するのに、(16) 式の関係をも十分頭に入れて、どのような撮影条件にするかということが技術者の腕の見せどころであります。

以上は X 線の伝播方向の微小厚さの欠陥に基くコントラストに関するものですが、欠陥の横方向の大きさ、X 線管焦点の大きさも、欠陥の識別度に影響を及ぼしま

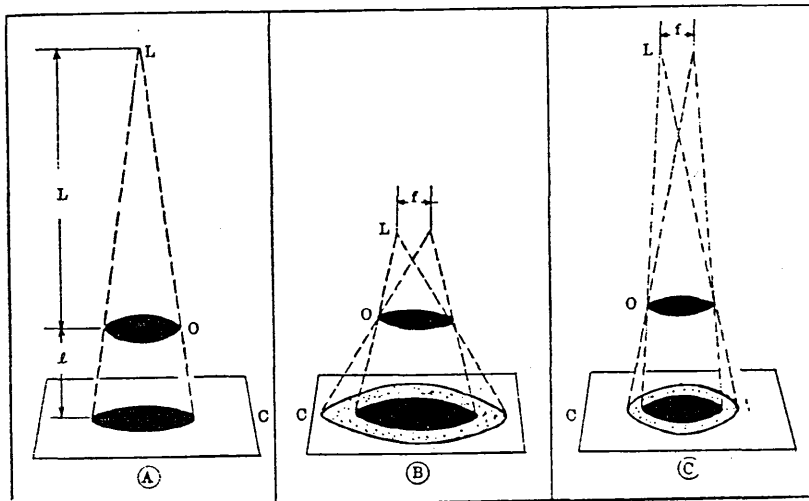


図 15

す。図 15 A のように、X線管の焦点が幾何学的な点であれば、欠陥像の縁はシャープに出ます。しかし実際のX線管焦点はある大きさをもっていますので、図 15 B, C のような半影ができます。欠陥像の濃度と無欠陥部の濃度にある程度の差があっても、半影部分では濃度が連続的に変化することになります。肉眼で見る場合、同じ濃度差があっても、その変化が急なほど識別しやすく、変化が緩やかなほど識別が困難になります。したがって焦点と欠陥との距離を L 、欠陥とフィルムの距離を l とするとき、 L/l の値を大きくし、また焦点の大きさを小さくするほど、半影部分の幅が狭くなって識別しやすくなります。焦点の大きさに比して欠陥の大きさが小さくなると、本影がなくなって半影ばかりになってしまうことがあります。このような場合には、コントラスト ΔD は (16) 式で与えられる値よりも小さくなって、欠陥の検出が一層困難になります。

このようにして、欠陥の検出感度は、前にお話したコントラストと、いまお話した幾何学的な関係から生ずる像の鮮鋭度の2つによって支配されることとなります。これらを総合して欠陥の検出感度を表わす目安として透過度計を使います。X線透過試験に関する JIS 規格では、図 16 のような、太さの異なる針金を何本か並べた透過度計を使い、試験する物体の上（フィルムを置く側と反対の側において撮影することを規定しています。左の図は針金の直径が $\sqrt{2}$ の公比で異なるように等比級数的に並べたものであり、右の図は直径が等差級数になるようにしたもので、どちらを使ってもよいことになっています。針金の材質は試験体と同じような吸収係数をもつことが望ましいのですが、鉄鋼類の場合はピアノ線で作った透過度計を使用すれば十分です。そして透過写真の上で、試験する物体の厚さの2%に相当する太さの針金が見分けられるような写真でないと、検査に使用してはならないことになっています。しかし厚さ1%に相当する針金が見分けられるような写真を作るとはそれほど困難ではありませんので、2% という数字はかなり甘いものです。

最後に、鋳物に生じやすい欠陥と、溶接部に生じやすい欠陥の透過写真を5枚ずつお目に掛けます。これは NDI が教育用に作ったもので、わざわざ欠陥を多く含

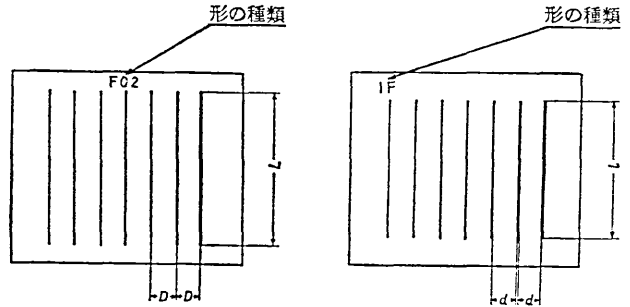


図 16

むような試料を製作し、その透過写真を写したあと、欠陥の多い部分の断面を切り出して、そのマクロ組織と対比したものです。実際の品物にはこのようなひどい欠陥が現われることは極めて稀ですから、その点ではご安心下さい。(本稿では写真を省略します)

おわりに

以上で本題のお話しを終わります。本日はご多用のところ、お差し繰りご出席を頂き、ご清聴を煩わせましたにも拘らず、お粗末な内容で恐縮でございました。

私は来月から茨城大学工学部に勤務する予定でありまして、生研で学び得た多くのものを学部学生の人達に還元してやりたいと思っております。現在の私は峠の坂道を登りつめて頂上に立っているような心境にありまして、これからは下り道に差しかかる訳ではありますが、転び落ちることがないよう、足元を見定めながら、できるだけゆっくり降りるように心掛けて参る所存でございませう。

私の今後の人生において、生研が心の故里になることは間違いないと思います。皆様、特に若い方々は、ご自身のために立派な業績を挙げるよう一層奮励され、そのことを通じて生研の礎をさらに強固なものにして下さるよう念願する次第であります。また4半世紀に及ぶ長い間の生研での生活において、研究面では無論のこと、その他の公的ならびに私的の面でも、数多くの方々のお世話になりました。殊に先般所長を勤めておりました折は、管理運営の面でもいろいろご協力を頂きました。この席を借りて厚く御礼申し上げます。

(1974年3月27日受理)