

X線による応力測定について

大阪大学工学部 山田朝治

1. 緒言

X線による応力測定は、はじめドイツにおいてその可能性が発表¹⁾されて以来、現在までに唯一の非破壊的測定法として多数の研究者により、各種金属材料について基礎、応用両面にわたって研究成果が発表され、測定方法等については、ほとんど完成された観がある。しかし最近の著書²⁾、文献³⁾等を読むまでもなく、この方法を研究室または工場現場等で実際に応用する場合、今なお面倒な問題が解決されていないということは、この測定に従事する人びとの一致した見解であろうと思われる。

面倒なこととは、まず第一に測定精度の問題であり、第二に測定された応力の意義が材料によってはそれほど簡単明瞭でない点にある。測定精度の点に関しては、比較的巾広く、かつ黒化度が必ずしも一様でない回折線の微小移動を測定しなければならないので、たとえば鋼材等において残留応力を測定する場合、比較的鮮鋭な回折線を与える材料であっても、 $\pm 5 \text{ kg/mm}^2$ 程度の誤差は認めなければならず、とくに主応力の方向決定の精度については、ほとんど評価されていないようである。

つぎに応力の意義については、普通の巨視的応力の他に相応力や微小応力等がからみあい、とくに塑性変形後の残留応力についてはこれらの吟味が必要であるが、問題は複雑であり、かつ測定精度が十分でないので明確な説明を与えることは容易ではない。

そもそもX線応力測定法が、一方で連続、均質かつ等方性の材料を仮定している弾性論に基礎をおきながら、他方では不連続で異方性をもつ結晶粒の集合体の中から、ある特定方位の結晶粒をえらんで測定しなければならないという矛盾が、測定結果の中にあらわれてくるわけである。このように、抵抗線ひずみ計等とは異なり、被測定材料そのものの結晶学的性質を直接利用するために、単に巨視的弾性ひずみのみでなく、むしろ他の結晶学的情報量の方が多い場合が普通であって、これらが回折線の中を広げたりして応力測定の目的に対する著しい雑音となってくるのである。したがって抵抗線ひずみ計等の場合は、測定器そのものの詳しい知識をもたなくて

も、単に使用法さえよく理解すれば、一般技術者がすぐに応用できるものであるが、X線の場合は残念ながら現在のところ、金属結晶学およびX線回折に関するある程度の知識がなければ、この測定法に対して誤った価値判断をする恐れが多分に考えられるようである。

X線応力測定法については、X線結晶学に関するほとんどの著書が、その一部をさいて説明しているのので、ここでは、最近の文献や著者の経験等から考えて、とくに留意すべき点について述べてみたい。

2. 測定原理

この測定法の特徴を理解するために、まず測定原理から説明する。

X線回折に寄与する表面層の厚さは、たとえば鉄の場合ではあとで述べるように、たかだか 10μ 程度を考慮すれば十分であるから、図1に示すように主応力 σ_1, σ_2

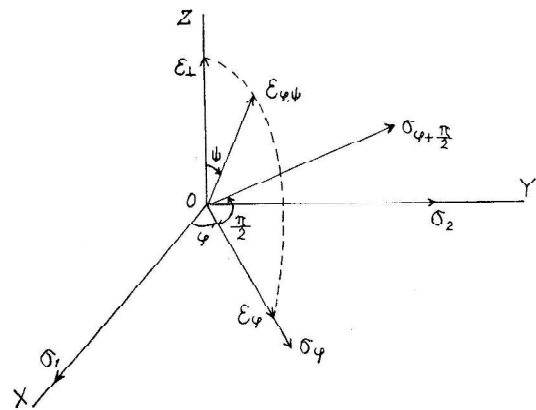


図1 試料表面における応力とひずみとの関係

を試料表面内で考え、 σ_3 を無視する。いまヤング率を E 、ポアソン比を ν とすると、任意の方向の応力 σ_φ 、ひずみ ε_φ についてつぎの(1)、(2)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{E} \left(\sigma_\varphi - \nu \sigma_{\varphi+\frac{\pi}{2}} \right) \\ \varepsilon_{\perp} &= \frac{\nu}{E} \left(\sigma_\varphi + \sigma_{\varphi+\frac{\pi}{2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \varepsilon_\varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_{\perp} \cos^2 \psi \quad (2)$$

ここに、 ε_{\perp} は試料表面に垂直な方向のひずみ、 $\varepsilon_{\varphi,\psi}$

は $Z-0-\sigma_\varphi$ 面内にあるひずみである。さらに(2)式を変形して(1)式を代入すると、つぎの応力測定基礎式が得られる。

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} - \varepsilon_\perp = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_\varphi \sin^2 \psi \quad (3)$$

すなわち σ_φ を求めるためには、 $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ および ε_\perp を測定すればよい。また ε_\perp の代わりに ψ を順次変えて $\varepsilon_{\varphi,\psi_1}$, $\varepsilon_{\varphi,\psi_2}$ 等の任意の二方向のひずみを測定しても σ_φ は求められる。

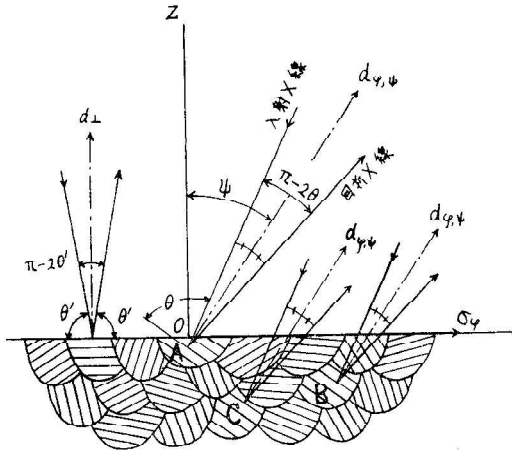


図2 Z-0- σ_φ 面内における格子面間隔の測定原理

これらのひずみをX線回折によって求めるのであるが図2にその測定原理を示している。ある特定のX線入射方向に対して、多数の結晶粒の中からブラッグの反射条件を満足する方位をもつ結晶粒がえらびだされて回折にあずかる。無応力状態の結晶の格子面間隔を d_0 とすると、 $\varepsilon_{\varphi,\psi}$, ε_\perp はそれぞれ $(d_{\varphi,\psi} - d_0)/d_0$, $(d_\perp - d_0)/d_0$ であらわされるから、応力による d の変化は小さいと考

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} - \varepsilon_\perp = \frac{d_{\varphi,\psi} - d_\perp}{d_0} = \frac{d_{\varphi,\psi} - d_\perp}{d_\perp} = \frac{\Delta d_{\varphi,\psi}}{d_\perp} \quad (4)$$

とあらわすことができる。一方ブラッグの反射条件から

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \Delta \theta \quad (5)$$

の関係式がみちびかれる。 θ はいわゆるブラッグ角である。したがって(3), (4), (5)式より

$$\Delta \theta_{\varphi,\psi} = -\frac{(1+\nu)}{E} \sigma_\varphi \tan \theta \sin^2 \psi \quad (6)$$

となる。ここに $\Delta \theta_{\varphi,\psi}$ は図2で説明すれば、 $(\theta - \theta')$ の意味である。(6)式からわかるように、 ψ を順次変えて $\Delta \theta$ を測定し $\sin^2 \psi$ を横軸に、 $\Delta \theta$ を縦軸にとると直線関係が得られるはずであり、その勾配から σ_φ が求められる。 $\tan \theta$ は厳密に測定する必要はなく、 E または ν と同じくらい有効数字で十分であり、一定と考えてよ

い。もちろんX線の波長や格子面が変われば大きく変化するが、この値が大なるほど測定感度が高いから、 θ の大きい回折線が得られるようなX線をえらぶわけである。

実験技術上の点から ψ は $\pi/4$ ぐらいまでであり、 $0 \sim \pi/4$ の間で4点ぐらいをとるのが普通である。すなわち多数のデータから弾性論に従うような応力値を見出す方法であり、多重露出法⁴⁾ または $\sin^2 \psi$ 法⁵⁾ とよばれている。また $\Delta \theta$ のみを測定して σ_φ が求められるから、残留応力測定等の場合にも非破壊的に測定できるわけである。

3. 試料表面の問題

以上の測定原理からもわかるように、試料を順次傾けて回折線の相対的な微小移動を測定するわけであるが、試料と検出器(フィルムまたは計数管等)との距離が変わると誤差の原因になるため、適当な標準試料をうすく試料面に塗布して、この両者の回折線の距離を測定するのが普通である。いずれにしても鮮鋭で、かつ一様な強度分布をもつ回折線が得られないと測定が困難になってくる。測定試料そのものにゲージの役目をさせるわけであるから、いかに非破壊検査といえども表面が黒皮のままでは論外である。したがってX線の応力測定法を行なう場合、できる限りこの測定に適した表面状態にしなければならぬ。このことは多くの研究者によって指摘されているが、この表面処理は最も重要な測定技術の一つといふべきである。

いま鉄を例にとって回折にあずかるX線の侵入深さについて考えてみる。これは吸収係数から見積ることができ、鉄の応力測定には $C_0 K_\alpha$ による(310)面および $C_r K_\alpha$ による(211)面からの回折線がよく使用されるので、これらのX線についての計算例⁶⁾を図3に示している。縦軸は回折線の強度を1としたとき、 t なる厚

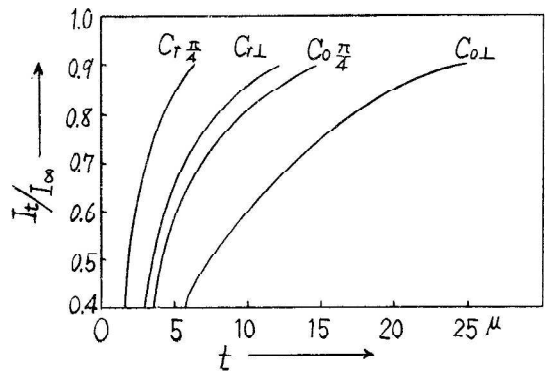


図3 回折線に寄与する表面厚さ(鉄の場合)

さまでの有効強度を示している。当然のことながら、X線の垂直入射のときと斜入射のときとは、大きな相違がみられることは注意を要する問題である。C_Kαの場合の有効厚さは、垂直入射のときでも10μぐらいを考えればよく、45°の斜入射ならば5μぐらいで十分である。

したがって測定面は凹凸の少ない(1μ以下)相当良好な仕上面であり、かつ仕上げ加工による格子ひずみを生じさせない注意が必要である。このために電解研磨が適当であるとした報告例が多いが、化学腐食または化学研磨法も利用されている。もっとも、粒界近傍が腐食されやすい材料では腐食法も注意を要する。これは数μの厚さといえば、材料によっては平均の結晶粒の大きさより小さい、すなわちX線回折にあずかる表面層は、ほとんど one grain 層と考えなければならないからである。たとえば図2では、B、Cの結晶粒はもはや回折に寄与しないと考えるべきである。また除去すべき表面加工層は、材料によってまちまちであり、筆者の経験によれば、比較的近接した領域においても加工層の厚さが異なるという場合もあり、もし鮮鋭な回折線が得られないときは、非破壊検査として許される範囲内で表面層を取り除く努力はしなければならないであろう。しかし、適当に表面処理をしても、とくに残留応力測定の実用性が多いと思われる熱処理したものや、冷間加工した材料に適切な回折線の得られないものが多く、そのためにX線測定法の応用性がせばめられているのが現実のようである。

4. 連続測定法について

一般にX線応力測定法にとって最も困難な問題は、前節で述べたように良好な回折線が得られない場合が多いということであるが、測定技術の点に関しても原理は簡単でありながら、応力による回折線の位置の変化は僅かであるために、かなりの習熟を必要とするようである。また測定値のばらつきも多いが、弾性論による規則性を利用する sin²ψ 法等によって、少しでも測定精度をたかめようとしているわけである。この多数のデータから応力を求めようとする考えは非常に重要であり、たとえ測定時間が長くなっても、X線以外に非破壊的測定法のないことを考えるとき、当然はらうべき努力であろう。

つぎに筆者は、主応力の方向決定の精度をたかめるとともに、測定技術上いろいろの利点を含むX線斜入射のままの連続測定法⁷⁾について述べてみたい。図1は、図1、2におけるψなる角をもつ斜入射の場合を示しているが、sin²ψ法と異なる点は斜入射のまま、すなわちψを一定にしてφのみを変化させるのである。図4に示し

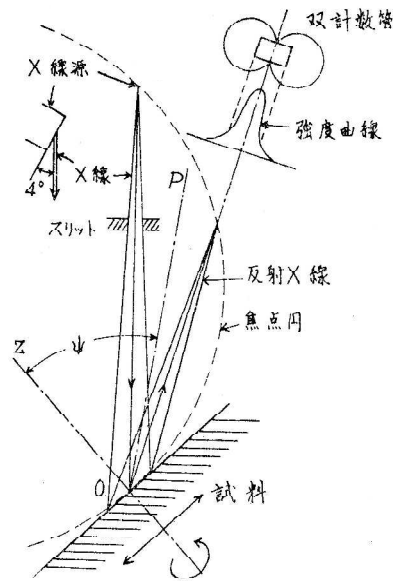


図4 双計数管による連続測定法の原理

ているように、O-Z軸のまわりに試料かまたは装置を回転させるのである。この測定法の説明の前に図4における双計数管と焦点円について述べておく。双計数管は回折線の微小移動の測定精度をあげるために、筆者の研究室で試作研究してきた⁸⁾が、この原理はうすい隔壁で接する二個のG-M計数管に、隔壁で二分されるように回折線を入射し、二個の計数管の出力の差をとると、回折線がどちらか一方へ移動すれば出力の差が増大するから、回折線の相対的移動量を直読できるわけである。この測定法については、小島⁹⁾の研究によって実用的な装置にまで発展させられているが、ここに述べる連続測定法は、必ずしも双計数管法に限ることはなく、ただ回折線の微小移動を直読できるから有利であり、連続記録されれば個人誤差の入る余地は少なくなるであろう。つぎに図4ではブラッグ角θの測定に、いわゆる集中法を利用しX線源を第一スリットに兼用している。この方法は測定面とX線源および検出器の位置が、同一円(焦点円)上にあれば、発散するX線を照射してもよく、したがって回折線の強度が増大する利点のほか、測定面におけるX線照射面積を大きくとれるので、結晶粒が比較的粗大であっても一様な強度分布をもつ回折線が得られやすいのである。結晶粒粗大のために、なおかつ一様な強度分布が得られないときは、図の矢印で示すように測定面内で平行移動して測定し平均をとる。もちろん、それらの領域において応力分布は変化しないと仮定してのことである。

さて本論にもどるが、いまφをφ₁、φ₂と変えてそれぞれの方向に相当するひずみの差をとってみると、(3)、(4)式から計算してつぎのようになる。

$$\sigma_{\varphi_1} - \sigma_{\varphi_2} = \frac{d_{\varphi_1, \psi} - d_{\varphi_2, \psi}}{d} \cdot \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (7)$$

したがって連続測定によりO-P方向の格子面間隔の最大と最小、すなわち(d_{φ₁, ψ} - d_{φ₂, ψ})が最大になるようなφ₁、φ₂を求めれば、それが主応力方向と一致する¹⁰⁾わけで、図1においては0とπ/2になる筈であり、実験に

よって直接主応力方向が決定できる。さらに σ_2 が無視できて、かつ引張りまたは圧縮のいずれかが予測されるときには、(7)式のみで主応力が決定されるが、このことはかなり重要な意味をもってくる。すなわちX線の試料面に対する入射角 ψ は、常に一定であるため、照射面積およびX線の有効侵入深さはともに一定であり、また集中法を採用しても焦点円は一定であり、入射角 ψ を変えるために生ずる焦点円変化による誤差を考慮する必要はない。

さらに重要なことは、照射面積およびX線の侵入深さが変われば、回折線の強度曲線の形を変化させる可能性があることであり、一層 ψ 一定の測定方法が望ましく、実用的な装置としても技術的にとくに困難な点はないと筆者は考えている。もし σ_2 が無視できない場合でも、主応力の差と方向が実験的に決定できるわけであり、 $\sin^2\psi$ 法と併用すれば測定精度を一層たかめることが期待される。

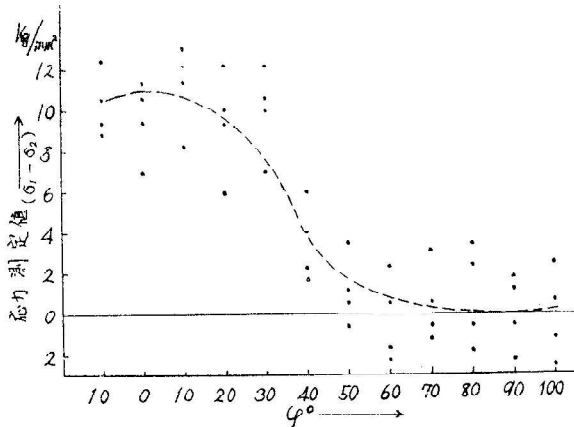


図5 図4の原理による応力測定の一例

X線: $C\alpha, K\alpha$
 試料: 軟鋼 (0.2% C), (310) 面,
 平均結晶粒の大きさ $50\sim 60\mu$
 照射面積: $8\times 8\text{mm}^2, \psi=45^\circ$

図5は軟鋼に曲げ変形を与えておいて、入射角 ψ を 45° にしたまま、 ϕ を 10° ごとに変えてゆき、図4に示す原理で測定したものである。結晶粒が比較的粗大のため、回折線の強度が一律でなく、各 ϕ に対してそれぞれ測定面に平行に試料を少し摺動させたときのデータのばらつきも示してある。また図6は、同じ連続測定法において双計数管の出力(回折線の位置に相当)を、試料の回転すなわち ϕ の変化に応じて連続記録させたもので、曲げ塑性変形後の軟鋼の表面の残留応力測定例である。X線は $C\alpha, K\alpha$ 、回折線の半価巾は約 1° であり、入射角

ψ を 45° にしたまま連続測定を行い、 ϕ とともにその出力の変化をみると、明らかに周期性が認められ、AB間が主応力差 5kg/mm^2 に相当している。

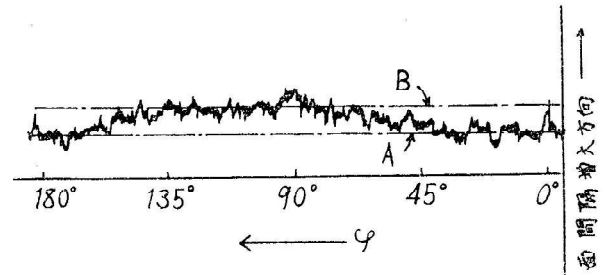


図6 連続測定による残留応力測定例

5. 結 言

X線応力測定に対する筆者の考えを簡単に述べてきたが、一般技術者としては精度が悪くても非破壊測定として唯一の方法であることを考え、測定技術の向上につとめるべきであろう。

また測定技術としては、それほど新しくないにもかかわらず、いまだに信頼できる規格、たとえばJIS規格のようなものができていないのが現状である。主としてこの研究に従事するものにとっては、材料の組織または回折線の状態から、その具体的な測定法およびそれによる測定誤差をあらかじめ見積ることのできるような信頼できる規格または便覧などを作製する責務があると思うがどうであろうか。

文 献

- 1) G. Sachs and J. Weents : Z. f. Phys., **64**, 344 (1930)
- 2) 仁田 勇鑑修 : X線結晶学, p. 362~376 (1959)
- 3) R. I. Garrod and G. A. Hawkes : Brit. J. Appl. Phys., **14**, 422 (1963)
- 4) G. A. Hawkes : Brit. J. Appl. Phys., **8**, 229 (1957)
- 5) E. Macherauch : Proc. 3rd Inter. Conf. Non-destruct. Test., 720 (1960)
- 6) 石井勇五郎 : X線による応力測定 p. 10 (1959) 運輸技研
- 7) T. Yamada and Y. Soezima : Tech. Repts. Osaka Univ., **11**, 91 (1961)
- 8) 田中, 那須, 山田 : 応用物理, **22**, 317 (1953)
S. Tanaka, T. Nasu and T. Yamada : Tech. Repts. Osaka Univ., **5**, 245 (1955)
- 9) 小島, 田丸ほか : Proc. 3rd Inter. Conf. Non-destruct. Test., 737 (1960)
小島, 田丸 : 材料試験, **11**, 637, (1962)