X線応力測定における吸収因子と照射面積因子†

栗田政則*

Absorption and Irradiated Area Factors in X-Ray Stress Measurement

by

Masanori KURITA*

Key words:

X-Ray stress measurement, Residual stress, X-Ray diffraction, LPA factor, Polycrystalline materials, Diffracted x-ray intensity

1 緒 言

残留応力測定に有効なX線応力測定において、試験片表面に照射されたX線は物質内を通過する過程で物質に吸収されるので、回折X線強度は試験片内の入射および回折X線の経路によって変わる。これを補正する因子が吸収因子(absorption factor)である¹⁾³⁾。このように入射・回折X線方向によって回折X線強度が変わる影響を補正する因子には、このほかにローレンツ因子(Lorentz factor)および偏り因子(polarization factor)があり³⁾⁶⁾、これらをまとめてLPA因子(Lorentz-polarization and absorption factor)とよんでいる。これらの3つの因子のうちで、吸収因子は測定法によって値が異なるのみならず、ローレンツ因子および偏り因子よりも回折角によって大きく変化するので、応力値に与える影響も大きい。

X線回折装置を用いた回折線の測定のように、回折面法線の方向を固定して測定する θ - 2θ 法(ψ 一定法)に対する回折線の吸収因子は、すでに多くの教科書^{1)3),7)9)}に書かれており、この方法を用いたX線応力測定に対する吸収因子は最初にKoistinenら¹⁰⁾によって求められた。X線応力測定に対する吸収因子に関する上記の文献は、すべてこのKoistinenらのものを引用しており、またこのKoistinenの論文は一般のX線回折における吸収因子を求めたCullity¹⁾の教科書を参考にしており、上記の文献の内容はこれらの2つの論文とほとんど同じである。

しかし、X線応力測定では光学系の異なる種々の測定法があり、それによって吸収因子も異なる。すなわち、試験片表面法線の向きに対する入射および回折X線の向きの違いによって、並傾法と側傾法がある。さらにこれらの各二つの方法には、回折装置による回折線の測定のように、一つの回折線の測定中に回折面法線の向きを一定に保って測定する θ - 2θ 法(ψ 一定法)と、多くのX線応力測定装置で用いているように、固定した方向からX線を入射し回折線を測定する方法がある。そこで本研究では、各測定法に対する値を簡潔に求めるために、試料面法線からとった回折面法線の向きである ψ 角と同様に、試料面法線と入射X線および回折X線のなす角 α と β で表した吸収因子の一般式を導き、これを用いて種々の測定法の吸収因子を系統的に求めた。また、Koistinenらの式¹⁰⁾とは異なる吸収因子の式を提案している研究¹¹⁾もあるので、その正否について検討した。

なお吸収因子は、入射および回折X線方向によって変わる試料内でのX線の経路から求まる。従来のすべて

の研究では、吸収因子を求めるのに必要な回折強度 I を、X線が照射される微小体積 dV からの回折強度 dI を試験片の深さ z 方向に積分することによって求めている。しかしX線が照射される物質は、X線の侵入方向 ζ に存在するので、回折強度 I は dV からの回折強度 dI を直接に侵入方向 ζ に沿って積分して求めることもできる。

そこでここでは、従来とは異なった計算方法を紹介するために、両者の方法で吸収因子を求め結果を比較した。

さらに、応力が急激に変化する試験片などでは測定箇所を制限するために、照射面積をビニールテープなどで囲んでX線照射面積を一定にして測定することがある。このとき、回折面法線の方向を固定して回折線を測定する ψ 一定法(θ - 2θ 法)では、回折線の測定中に制限された照射面積に入射するX線強度は回折角 2θ とともに変化するので回折強度もその影響を受け、応力値の算出に用いる回折線のピーク位置が変わる。従来X線応力測定においては、この影響は全く考慮されていなかった。ここでは、この影響を表す因子を照射面積因子(irradiated area factor)と名づけ、この因子を求めるとともに、これが応力値に及ぼす影響を明らかにした^{12),13)}。

2. ζ 法による吸収因子の算出

吸収因子を求めた従来の研究^{1)3),7)15)}はすべて、X線に照射される微小体積 dV からの回折強度 dI を試験片表面からの深さ z に関して積分することによって回折強度 I を求めている。しかし、この体積 dV はX線の侵入方向 ζ に存在するので、ここでは dV からの回折強度 dI を直接に ζ で積分して回折強度 I を求め、その結果を従来の方法による結果と比較した。なお、ここでは簡便のために従来から用いられてきた前者の方法を z 法、後者を ζ 法と名付け、まず ζ 法による吸収因子を求めた。

図1は並傾法によるX線応力測定において、試験片表面からの深さ z にある微小体積 dV からのX線回折を示す。また、試験片の表面からのX線の入射方向の深さを ζ にとる。ここで試験片は、結晶粉末の試験片のように完全にランダムな結晶方位をもつ無数の結晶粒から成る理想的な板状の多結晶体であるとする。

まず、一般的な場合を扱うために入射X線の横断面は任意の形状とし、その面積を R 、試験片表面上のX線照射面積を S とする。吸収因子を求めた従来の多くの研究^{1)3),7),10),11)}では、入射X線強度 I_0 を単位横断面積当たりの強度にとっているが、一般的なX線応力測定では後に

† 原稿受理 平成28年 12月 13日 Received Dec. 13, 2016 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 長岡技術科学大学 名誉教授 〒940-2142 長岡市長峰町513-67
Namine-machi, Nagaoka, 940-2142

$$A = \frac{2}{D} = \frac{2 \cos \beta}{\cos \alpha + \cos \beta} = \frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}} \quad (16)$$

となる¹³⁾。

並傾法を用いた ψ 一定法の場合には図1から

$$\alpha = \psi - \eta \quad (17)$$

$$\beta = \psi + \eta \quad (18)$$

となる。これを式(16)に代入すると

$$A = \frac{\cos(\psi + \eta)}{\cos \psi \cos \eta} = \frac{\cos(\psi + 90 - \theta)}{\cos \psi \cos(90 - \theta)} = 1 - \tan \psi \cot \theta \quad (19)$$

となり、Koistinen ら¹⁰⁾が導いた式に一致する。これがその後多くの文献^{3),7)-9),12)-15)}に引用されている式である。

並傾法を用いた ψ_0 一定法の場合には

$$\alpha = \psi_0 \quad (20)$$

$$\beta = \alpha + 2\eta = \psi_0 + 180 - 2\theta \quad (21)$$

となるので、これを式(16)に代入すると

$$\begin{aligned} A &= \frac{\cos(180 + \psi_0 - 2\theta)}{\cos(90 + \psi_0 - \theta) \cos(90 - \theta)} \\ &= \frac{\cos[(\psi_0 - \theta) - \theta]}{\sin(\psi_0 - \theta) \sin \theta} \\ &= 1 - \cot(\theta - \psi_0) \cot \theta \end{aligned} \quad (22)$$

3. z 法による吸収因子の算出

前節の ζ 法では、X線が照射される微小体積 dV からの回折強度 dI をX線の侵入方向 ζ に積分することによって回折強度 I を求めたのに対して、ここで述べる z 法では、これを図3のように z 座標と dz をとり試験片の深さ z 方向に積分することによって求める。従来の研究^{1)-3),7)-15)}ではすべてこの方法で吸収因子を求めている。図3はこのために ζ 法の図1と同様に、並傾法における試験片表面層での入射・回折X線の経路を示した。

ζ 法の場合と同様に、試験片表面から z の深さにある薄層 dV による回折強度 dI は、試験片内のX線の経路BA, BCによるX線の減衰率である式(8)を式(7)に掛けて式(5)を代入すると

$$dI = aI_i \exp[-\mu(BA + BC)] S dz \quad (23)$$

となる。

図3から

図3 並傾法における試験片表面から深さ z にある微小体積 dV からの回折強度 dI

$$BA = \frac{z}{\cos \alpha}, \quad BC = \frac{z}{\cos \beta} \quad (24)$$

となる。ここで

$$D' = \frac{BA + BC}{z} \quad (25)$$

とおきこれに式(24)を代入し式(12)を使うと

$$D' = \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{\cos \beta} = \frac{D}{\cos \alpha} \quad (26)$$

式(25)を式(23)に代入し積分すると

$$I = \int_0^\infty dI = aI_i \int_0^\infty \exp(-\mu D' z) S dz = \frac{aI_i S}{\mu D'} \quad (27)$$

これに式(1)と(26)を代入すると

$$I = \frac{aI_i R}{\mu D} \quad (28)$$

となり、先に求めた ζ 法に対する式(13)と一致する。

なお前節で述べた ζ 法では、X線で照射される微小体積 dV からの回折強度 dI をX線の侵入方向 ζ に積分することによって回折強度 I を求めたが、この ζ を式(3),(4)で z に変換して積分しても、これは単に座標変換の問題であるので、結果は変わらないはずである。すなわち、式(6)を用いて式(9)の $Rd\zeta$ を Sdz に置き換えれば式(9)は z 法の式(23)と一致するので、 ζ 法でも z 法の場合と同様に式(23)~(28)が成り立つ。

しかし ζ 法は単に z 法の座標 z を座標 ζ に変換したものではなく、両法ではX線に照射される微小体積 dV の決め方(定義)が異なる。すなわち、図1と2に示した ζ 法の z , ζ 両座標は式(3),(4)で結ばれており、一定の侵入深さ $d\zeta$ に対する微小体積 dV の厚み dz は入射角 α とともに変化し、 dV は式(6)が示すように入射角 α に無関係に一定となる。これに対して図3の z 法にはこのような制約はなく、一定の深さ dz に対する微小体積 $dV(=Sdz)$ は入射角 α が増加すると照射面積 S とともに大きくなる。

4. 側傾法における吸収因子¹³⁾

図4と図5は、側傾法で試料表面から z の深さにある薄層 Sdz への入射および回折X線の経路BAおよびBCを示した。図1と図3に示した並傾法では、入射・回折X線の方角、試料面法線、および回折面法線がすべて同一面内にあり、試料面法線と回折面法線のなす ψ 面と、X線検出器の走査面である入射および回折X線のなす 2θ 面も同一平面上にある。これに対して側傾法では図4と5のように、入射と回折X線の方角および試料面法線は同一面内にはなく、 ψ 面と 2θ 面は直交する。

しかしいずれの方法にせよ、吸収因子の計算に必要な値は、試料内でX線が吸収される入射X線と回折X線の経路の長さBAとBCである。したがって図4と5のように、図1の並傾法の場合と同様に、試料表面からの深さを z に、入射X線の方に長さ ζ をとり、入射X線と回折X線が試料面法線となす角をそれぞれ α と β にとれば、側傾法の場合もX線の経路の長さBAとBCを与える式(10)と(24)はそのまま成り立つ。さらに、並傾法の場合の式(1)~(16)および式(23)~(28)は側傾法の場合でも成り立つ。

図4は並傾法の ψ 一定法に相当する方法、すなわち回折線の測定中に回折面法線BDの方角を固定する方法である。回折面法線の方角は入射X線と回折X線のなす角の二等分線であるので、この方法では並傾法の ψ 一定法と同様に、入射X線と回折X線が回折面法線となす角は等しく $\eta(=90-\theta)$ となる。このようにするためには、回折線の測定中にX線管とX線検出器は同じ角度だけ

に入射した場合よりも照射される X 線強度が $\cos\alpha$ 倍だけ小さくなる。回折 X 線強度は入射 X 線強度に比例するから、X 線の照射面積を制限した場合と制限しない場合の回折 X 線強度をそれぞれ I' および I とすれば

$$I' = I \cos\alpha \quad (38)$$

となる。ここでは、この $\cos\alpha$ を照射面積因子 (IA 因子) と呼ぶことにすると

$$IA = \cos\alpha \quad (39)$$

ψ_0 一定法や η_0 一定法のように一つの回折線の測定中に入射 X 線の方向 α が固定されている測定法では、照射面の入射 X 線強度も一定となり、照射面積の制限は回折線ピーク位置 p には影響しないが、入射角 α の増加とともに X 線照射面が受ける X 線強度は低下するので、回折強度も低下し回折線は低くなる。

並傾法による ψ 一定法の IA 因子は、式(39)の α に式(17)と(2)を代入して

$$\begin{aligned} IA &= \cos\alpha = \cos(\psi - \eta) \\ &= \cos(\psi - 90 + \theta) \\ &= \sin(\psi + \theta) \end{aligned} \quad (40)$$

また、 ψ_0 一定法の IA 因子は、式(39)の α に式(20)を代入して

$$IA = \cos\alpha = \cos\psi_0 \quad (41)$$

側傾法による η 法の IA 因子は、図 4 と式(39)、(2)から

$$\begin{aligned} IA &= \cos\alpha = \cos\psi \cos\eta \\ &= \cos\psi \cos(90 - \theta) \\ &= \cos\psi \sin\theta \end{aligned} \quad (42)$$

また、 η_0 一定法の IA 因子は式(33)で与えられる。

表 1 には、吸収(A)因子と照射面積 (IA) 因子をまとめて示した¹³⁾。

なお福良・藤原¹¹⁾は X 線応力測定における吸収因子を求め、Koistinen ら¹⁰⁾の計算式は誤りであるとして、これとは別の式を提案している。Koistinen らの式はこれまでに国内外で長年使われてきた式であるにも関わらず、福良らがこれを否定して機械学会論文集で提案している吸収因子の式の正否について長年の間わが国の学会で詳しく議論したことがないので、ここではこれを検討してみたい。

両者ともに、試料表面の X 線照射面積 S は長さ l 、幅 1 の長方形にとっているの

$$S = l \times 1 = l \quad (43)$$

である。Koistinen らは一般的な X 線回折の測定で用いているように、X 線入射角 α に関わらず一定の入射 X 線強度 I_0 を用いて試料の回折に寄与する微小体積 dV からの回折強度 dI の式(23)を積分することによって回折強度 I を求めている。これに対して、福良らはこの入射 X 線強度 I_0 に単位面積当たりの入射 X 線強度 I_0/l を用いて、Koistinen らが用いた式(23)の代わりに次式

表 1 吸収因子 (A 因子) と照射面積因子 (IA 因子)

Method		A factor	IA factor
Iso-inclination	Fixed- ψ	$1 - \tan\psi \cot\theta$	$\sin(\psi + \theta)$
	Fixed- ψ_0	$1 - \cot(\theta - \psi_0) \cot\theta$	$\cos\psi_0$
Side-inclination	Fixed- η	1	$\cos\psi \sin\theta$
	Fixed- η_0	$1 + \tan(\theta - \theta_0) \cot\theta$	$\cos\gamma \sin\theta_0$

$$dI = aI_0 \exp[-\mu(BA + BC)] dz \quad (44)$$

から回折強度を求めている。しかし、なぜこのように入射 X 線強度 I_0 の代わりに単位面積当たりの入射 X 線強度 I_0/l を用いたのかは説明されていない。なお、両者の論文では、本論文で用いている入射 X 線強度 I は記号 I_0 を用いている。

式(44)から福良らが求めた吸収因子 A' は次式となる。

$$A' = \frac{\sin(\theta + \psi) \sin(\theta - \psi)}{\sin(\theta + \psi) + \sin(\theta - \psi)} \quad (45)$$

福良らは、この式が Koistinen らが導いた式(19)の吸収因子と異なるので、Koistinen らの式は誤っているとしている。これら両論文ともに X 線回折装置を用いた θ - 2θ 法すなわち並傾法を用いた ψ 一定法の場合である。また、一般の X 線応力測定では試料面の照射面積は制限しないので、X 線の入射角 α に関わらず入射 X 線強度 I_0 は一定であり、試料面上の X 線照射面積は入射角 α とともに大きくなる。Koistinen らの計算はこのような条件に基づいて求めた吸収因子である。この値と比較した福良らの計算も当然のことながら、同一の条件における測定を想定しているものと考えられる。ところがすでに述べたように、Koistinen らが X 線の入射角 α に関わらず同一の入射 X 線強度 I_0 を用いているのに対して、福良らは単位面積当たりの強度 I_0/l を用いている。これは試料表面の X 線照射面積を単位面積に限定したことになるので、照射面を制限しない一般の測定ではこの値を用いるのは誤っている。

式(45)を変形すると、福良らの吸収因子は

$$A' = (1 - \cot\theta \tan\psi) \sin(\theta + \psi) \quad (46)$$

となる。この式は、表 1 で示した並傾法を用いた ψ 一定法に対する A 因子と AI 因子の積となっており、この A 因子は、Koistinen らが導いた式(19)と同じである。これらの両式が一致しないのは、回折強度の計算に Koistinen らは入射 X 線強度 I_0 を用いているのに対して、福良らは単位面積当たりの強度 I_0/l を用いており、照射面積を制限した場合の吸収因子となっているためである。

6. LP 因子

これまでに述べたように、回折 X 線強度は入射および回折 X 線の方向・経路の影響を受けるので、この影響を補正する因子が吸収因子である。同様にブラッグ角 θ とともに回折強度が受ける影響を補正する因子にはローレンツ因子 (Lorentz factor, L 因子) と偏り因子 (polarization factor, P 因子) がある。これらの因子の式の詳細な誘導は文献[3-6,14,15]に譲り、ここでは主として X 線応力測定に必要な要点のみを述べる。

L 因子は回折線の方向が回折強度に影響するいくつかの因子をまとめたもので、次式で表される^{5),6),15)}。

$$L \text{ 因子} = \frac{1}{\sin^2\theta \cos\theta} \quad (47)$$

回折方向に依存する回折 X 線強度の影響を表すもう一つの因子である P 因子は、入射 X 線によって原子から散乱する X 線強度が受ける散乱方向の影響を補正する因子で、次式で表される⁴⁾⁻⁶⁾。

$$P \text{ 因子} = \frac{1}{2} (1 + \cos^2 2\theta) \quad (48)$$

式(47)の L 因子と式(48)の P 因子をまとめて係数を取り除くと、ローレンツ・偏り因子 (Lorentz-polarization factor, LP 因子) が次式のように得られる^{5),6),15)}。

$$\text{LP 因子} = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad (49)$$

これがX線回折で通常用いられている LP 因子で、従来 X 線応力測定にもこの式が用いられていた^{3),14)}。

ところで、回折線の幅 B は $1/\cos\theta$ に比例する^{5),15)}。式 (49) の $\cos\theta$ はこれを補正する項で、他の項は回折強度 I の補正項である。すなわち式 (49) は、最大回折強度 $I_{\max}$ と回折線幅 B の積である積分強度に対する補正因子で、回折装置で測定されるような種々の回折角に現れる回折線の積分強度を補正する場合には適用できる。しかし X 線応力測定では、個々の回折線から応力値を計算するピーク位置を決定するので、個々の回折線の各回折角度位置 2θ に対する回折強度の補正は必要であるが、積分強度の補正は必要ない。したがって X 線応力測定に対する補正因子は、式(47)および式(49)から回折線幅 B の補正項である $\cos\theta$ を取り除いて

$$\text{L 因子} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad (50)$$

$$\text{LP 因子} = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta} \quad (51)$$

となる¹²⁾⁻¹⁵⁾。なお式(51)を変形すると、LP 因子は次式で表せる¹³⁾。

$$\text{LP 因子} = \frac{3 + \cos 4\theta}{1 - \cos 2\theta} \quad (52)$$

LP 因子は、すべての測定方法に共通である。

図 6~8 には、これまでに述べた並傾法を用いた ψ_0 一定法と ψ 一定法および側傾法を用いた η 法の LPA 因子と回折角 2θ の関係を示した。側傾法を用いた η 一定法の A 因子を計算するには、式(35)が示すように測定する試験片の無応力状態のブラッグ角 θ_0 が必要なのでここでは省略したが、式(32)と(36)が示すように両方法の A 因子には大差はないので、LPA 因子にも大差はない。

なお、 η 法の A 因子は式(32)から 1 となるので、この方法の LPA 因子は LP 因子と一致する。図 6~8 からわかるように、側傾法の LPA 因子の回折角 2θ に対する変化は、並傾法に比べてかなり小さい。また、図 6 と 7 からわかるように、並傾法では回折面法線の傾き角 ψ または ψ_0 が大きくなるほど LPA 因子の回折角 2θ に対する変化が大きくなる。さらに、並傾法では ψ_0 一定法よりも ψ 一定法の方が、回折角 2θ に対する LPA 因子の変化が小さい。

Cullity による X 線回折の著書の初版および Klug らの本³⁾では、X 線応力測定に対する LP 因子として、式(49)が用いられている。この因子には式(51)が正しいとした著者の論文¹⁶⁾が出版されたのは 1977 年であるが、初めて式(49)の誤りを指摘し式(51)を用いたのは、Jatczak の論文¹⁷⁾であると思われる。その後、1978 年に出版された Cullity の著書の第 2 版¹⁴⁾では、式(49)を訂正し式(51)が用いられている。しかし、さらにその後もわが国では X 線応力測定に従来の誤った式(49)が長年の間使われていた¹⁸⁾。

7. 実験方法¹³⁾

LPA および IA 因子補正が応力値に及ぼす影響を調べるために、機械構造用炭素鋼 S50C の $27 \times 27 \times 75 \text{ mm}$ の試験片を 820°C から水焼入れ後、200, 300, 400, 500 および 600°C の各温度で焼戻して種々の広がり回折線をもつ試験片を製作した。試験片表面は研削し研磨紙で研磨した後、電解研磨で約 $30 \mu\text{m}$ 表面層を除去した。試験片

図 6 並傾法を用いた ψ_0 一定法における LPA 因子の回折角 2θ に対する変化

図 7 並傾法を用いた ψ 一定法における LPA 因子の回折角 2θ に対する変化

図 8 側傾法を用いた η 法における LPA 因子の回折角 2θ に対する変化

表2 測定条件

Characteristic x-rays	Cr K α
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	10
Filter	Vanadium
Diffraction plane	α -Fe(211)
ψ angles (deg)	0, 30, 45, 60
Irradiated area (mm ²)	6 $\times$ 10

の長方形の側面の中央部の残留応力を表2の条件で長手方向に測定した。回折線ピーク位置はバックグラウンド (BG) 補正したガウス曲線法¹⁹⁾で求めた。

回折線の広がり α は、GCP α を用いて評価した。GCP (Gaussian curve parameter)は、著者が提案した回折線の広がり α を評価する値で、回折線ピークを近似したガウス関数の標準偏差である。この GCP α と半価幅 B との間には、次式の関係がある²⁰⁾。

$$B = 2.35\alpha \quad (53)$$

8. 実験結果と考察¹³⁾

図9は、回折線幅によって異なる LPA 因子補正が応力測定値に及ぼす影響を調べるために、並傾法の ψ 一定法および側傾法の η 法を用いて、LPA 因子補正をした場合の応力値と、この補正をしない応力値との差を回折線幅 GCP α に対して示した結果である。 ψ 一定法による応力値の差は回折線が広がるほど大きくなり、GCP α が約 3 deg の最も回折線幅の広い焼入れ鋼では約 80 MPa となる。LPA 因子は回折角 2θ の関数であるので、このように回折線が広がるほど LPA 因子補正が応力値に及ぼす影響が大きくなる。 η 法では、前節で述べたよう LPA 因子の回折角 2θ に対する変化は小さいのでこの差はほぼ 0 で、LPA 因子補正は応力値にほとんど影響しないことがわかる。

図10は照射面積の制限が最大回折強度 $z_{\max}$ に及ぼす影響を調べた結果である。この図で、補正した最大計数値 (corrected maximum counts) $z_{\max}$ とは、BG(background)強度を差し引いた回折強度 I を LPA 因子で、または LPA 因子と IA 因子の両方で補正した値 (X 線計数値, counts) の最大値である。照射面積を制限しない場合には、BG および LPA 因子補正した最大強度 $z_{\max}$ は ψ 角に依存せずほぼ一定値になるはずである。ところが、照射面積を制限すると図10で黒塗りの印で示したように、 $z_{\max}$ は ψ 角が大きくなるとともに低下する。しかし、回折線をさらに IA 因子で補正すると、最大強度は ψ 角に依存せずほぼ一定値になることが図10からわかる。

図11は、IA 因子補正が応力測定値に及ぼす影響を調べるために、IA 因子補正しない応力値と補正した応力値との差 ΔS を GCP α に対して示した結果である。並傾法では GCP α が大きくなる、すなわち回折線が広がるほどこの差は大きくなり、GCP α が約 3 deg の最も回折線幅の広い試験片では応力値の差は約 30 MPa となる。側傾法では IA 因子補正は応力値にほとんど影響しないことが図11からわかる。

9. 結言

X 線応力測定では光学系の異なる種々の測定法がある。この中で回折装置で測定する並傾法を用いた ψ 一定法に対する吸収因子は、すでに多くの著書に掲載されている。本研究では、各測定法に対する吸収因子を試料面法線と入射 X 線および回折 X 線とのなす角 α と β で表した一般

図9 LPA 因子が応力値に及ぼす影響の回折線幅に対する変化

図10 ψ 一定法における最大回折 X 線強度 $z_{\max}$ の $\sin^2\psi$ に対する変化

図11 IA 因子が応力値に及ぼす影響の回折線幅 GCP α に対する変化

式を導き、これを用いて種々の測定法の吸収因子を系統的に求め、結果を表1にまとめた。

また従来の研究ではすべて、吸収因子(A因子)を求めるのに必要な回折強度 I は、X線が照射される物質内の微小体積 dV からの回折強度 dI を試験片の深さ z 方向に積分することによって求めていた。しかし、X線が照射される微小体積 dV はX線の侵入方向 ζ に存在するので、 dV からの回折強度 dI を直接に ζ で積分し回折強度 I を求めることもできる。そこでここではA因子を、 dI をX線の侵入方向 ζ に積分する ζ 法と、従来の深さ z 方向に積分する z 法の両法によって求めた結果、両方法によるA因子は一致した。

さらに、応力が急激に変化する試験片などでは測定箇所を制限するために、照射面積をビニールテープなどで囲んでX線照射面積を一定にして測定することがある。このとき、回折面法線の方向を固定して回折線を測定する ψ 一定法や η 法では、回折線の測定中に制限された照射面積に入射するX線強度は回折角 2θ とともに変化するので回折強度もその影響を受け、応力値の算出に用いる回折線のピーク位置が変わる。従来X線応力測定においては、この影響は全く考慮されていなかった。ここでは、この影響を表す因子を照射面積因子(irradiated area factor)と名づけ、この因子を求めるとともに、これが応力値に及ぼす影響を明らかにした。

さらに、Koistinenらの吸収因子の計算式は誤りであるとする福良らの論文の正否を検討した結果、前者が一般的に用いられている試料表面のX線照射面積を制限しない場合の計算結果であるのに対して、後者はこのX線照射面積を制限した場合の値であることを明らかにした。

参考文献

- 1) B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction (second edition), pp.132-135 (1978), Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- 2) B.D. Cullity, and Stock, S.R., Elements of X-Ray Diffraction (3rd edition), pp.150-154 (2001), Prentice-Hall, Inc.
- 3) H.P. Klug and L.E. Alexander, X-Ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials, pp.772-773 (1974), John Wiley & Sons, Inc.
- 4) B.D. Cullity, and Stock, S.R., Elements of X-Ray Diffraction (3rd edition), pp.124-127 (2001), Prentice-Hall, Inc.
- 5) B.D. Cullity, and Stock, S.R., Elements of X-Ray Diffraction (3rd edition), pp.145-149 (2001), Prentice-Hall, Inc.
- 6) H.P. Klug and L.E. Alexander, X-Ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials, pp.142-144 (1974), John Wiley & Sons, Inc.
- 7) Edited by the Society of Materials Science, Japan, X-ray stress measurement, new edition, pp.46-47 (1990), Yokendou.
- 8) The Society of Materials Science, Japan, Standard method of x-ray stress measurement for steels (JSMS-SD-5-02), pp.9-10, 39-40 (2002), JSMS.
- 9) K. Tanaka, K. Suzuki and Y. Akiniwa, Evaluation of residual stresses by x-ray diffraction -fundamentals and applications -, pp.112-113(2006), Yokendou.
- 10) D.P. Koistinen, and R.E. Marburger, "A simplified procedure for calculating peak position in x-ray residual stress measurements on hardened steel", Transactions of the ASM, Vol.51, pp.537-555(1959).
- 11) J. Hukura and H. Fujiwara, "X-Ray stress measurement for very broad diffraction line with diffractometer", Transactions of JSME, Vol.32, No.243, pp.1597-1604(1966).
- 12) L.C. Cuong and M. Kurita, "Absorption factor and influence of LPA factor on stress and diffraction line width in x-ray stress measurement with and without restriction of x-ray diffraction area", Journal of JSEM, Vol.4, No.1, pp.37-43 (2004).
- 13) M. Kurita, "Absorption and irradiated area factors in x-ray stress measurement", Proceedings of 36th Symposium on Stress-Strain Measurement and Strength Evaluation, pp.85-90(2005), The Japanese Society for Non-Destructive Inspection.
- 14) B.D. Cullity, Elements of X-Ray Diffraction (second edition), p.463 (1978), Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- 15) B.D. Cullity, and Stock, S.R., Elements of X-Ray Diffraction (3rd edition), pp.454-455 (2001), Prentice-Hall, Inc.
- 16) M. Kurita, "A statistical study on improving precision of x-ray stress measurement by the fixed time method", Transactions of JSME, Vol.43, No.374, pp.3627-3635(1977).
- 17) C.F. Jatzak in "Residual stress measurement by x-ray diffraction, SAE J 784a", edited by M.E. Hilley, J.A. Larson, C.F. Jatzak, and R.E. Ricklefs, p.38(1971), Society of Automotive Engineers.
- 18) M. Kurita and L.C. Cuong, "LPA factor in x-ray stress measurement and effect of its correction on stress value", Proceedings of the 36th Symposium on X-Ray Studies on Mechanical Behavior of Materials, pp.125-129(2000).
- 19) M. Kurita, "A statistical analysis of x-ray stress measurement by the Gaussian curve-fitting method", The Journal of Testing & Evaluation, pp.285-291(1981), American Society for Testing and Materials.
- 20) M. Kurita, "A New Method for Evaluating Diffraction Line Broadness with Its Engineering Applications", Advances in X-Ray Analysis, Vol.31, pp.277-286(1988).