# NDIS 意見受付

NDIS4404 cos α 法による X 線応力測定通則 --フェライト系鋼材編----原案作成委員会

この NDIS は「日本非破壊検査協会規格(NDIS)制定等に関する規則」に基づき関係者に NDIS の

制定前の意見提出期間を設けるために掲載するものです。

意見は規格原案決定の際の参考として取り扱いさせていただきます。

掲載されている NDIS についての意見提出は次に示すメールアドレスまでお願いいたします。

意見受付締切日:2021年6月30日(水)

意見提出先:Email:bsn@jsndi.or.jp

Ripcolle

NDIS 4404

# NDIS

# cosα法による X 線応力測定通則 —フェライト系鋼材編—

NDIS 4404 : 2021

令和3年6月1日 制定

社団法人 日本非破壊検査協会

目 次

	ベージ
1	適用範囲 ······
2	引用規格 ······
3	用語及び定義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4 1	記号及び略語····································
4.1	記号及び定義
4.2	<b>略語及び説明</b> ····································
5	測定原理
5.1	概要
5.2	原理
5.3	基礎的仮定
6	測定装置
6.1	一般
6.2	X 線発生部 ····································
6.3	X 線検出部 ····································
6.4	コリメータ
6.5	検査
7	測定対象及び測定試料
7.1	測定対象
7.2	測定試料
8	測定条件
8.1	特性 X 線及び回折面····································
8.2	管電圧及び管電流
8.3	Kβ フィルタ
8.4	· X線入射角····································
8.5	X 線照射面積 ·······
8.6	X線検出器の画素配列 ····································
8.7	回折環の測定範囲 ····································
8.8	回折環の中心角に関するデータ数及び測定間隔 ·······
8.9	回折環の半径方向に関する測定範囲及び測定間隔 ····································
9 3	測定手順····································
9.1	概要
9.2	
9.3	X線プロファイル ····································
9.4	バックグラウンドの処理
9.5	回折ピーク位置の決定 ····································

9.6 X線ひずみ	<b>۶の計算 ······</b> 14
9.7 応力値の <b>第</b>	<b>算出</b>
10 報告	16
附属書 A(規定	<b>≧)cosα 法による X 線応力測定理論(平面応力状態)</b> 18
附属書 B(参考	f)ηの影響····································
附属書 C(参考	<b>f)代表的な回折環の例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</b>
附属書 D(参考	f) 種々の鋼材に対する cosa 法の適用事例
附属書 E(参考	f) 一般化 cosα 法による X 線三軸応力測定理論 ····································
附属書 F(参考	i) 一般化 cosα 法による X 線三軸応力測定理論(簡便的方法)
附属書 G(参考	$ f ) \cos lpha$ 線図への三軸応力の影響及び $\sin^2 \psi$ 線図との比較
附属書 H(参考	5) cosa 線図への深さ方向の応力勾配の影響
附属書Ⅰ(参考	) X 線侵入深さ ····································
附属書J(規定	シ 回折 X 線強度の補正 ····································
附属書K(参考	<b>f) 電解研磨</b> ····································
附属書 L(参考	う種々の測定材料に対する X 線条件
附属書 M(参≉	<b>š)t 分布表 ···································</b>
参考文献	
解説・・・・・	
R <sup>1</sup>	

## まえがき

この規格は、日本非破壊検査協会規格(NDIS)制定等に関する規則に基づき、標準化委員会の審議を 経て、日本非破壊検査協会が制定したものである。

この規格は、著作権法で保護対象となっている著作物である。

この規格の一部が,技術的性質をもつ特許権,出願公開後の特許出願,実用新案権又は出願公開後の実 用新案登録出願に抵触する可能性があることに注意を喚起する。日本非破壊検査協会は,このような技術 的性質をもつ特許権,出願公開後の特許出願,実用新案権又は出願公開後の実用新案登録出願にかかわる 確認について,責任はもたない。

1	日本非破壊検査規格
2	
3	NDIS 4404 : 2021
4	
5	cosα 法による X 線応力測定通則
6	―フェライト系鋼材編―
7	X-ray stress measurement method by using the $\cos \alpha$ method
8	-Edition for ferritic steel-
9	

#### 10 1 適用範囲

この規格は、多結晶集合体でできた被測定物に特性 X 線ビームを照射した際に、X 線回折現象によって
 X 線照射部から発生する回折環を二次元 X 線検出器で測定し、cosα 法でデータ解析することによって、被
 測定物に生じた応力を決定する方法について規定する。対象とする被測定物は、フェライト系鋼材とする。

14 この規格を適用する責任は、この規格の使用者に帰する。また、この規格を適用した場合に生じるかも

15 しれない安全上又は衛生上の諸問題に関しては、この規格の適用範囲外である。この規格の適用に際して、

16 安全上又は衛生上の規定が必要な場合は、この規格の使用者の責任で、安全又は衛生に関する規定又は指

17 針などを併用しなければならない。

#### 18 2 引用規格

19 次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの20 引用規格は、その最新版(追補を含む)を適用する。

- 21 **JIS Z 2300** 非破壊試験用語
- 22 NDIS 4001 応力・ひずみ測定標準用語

#### 23 3 用語及び定義

- 24 この規格で用いる主な用語及び定義は, JIS Z 2300 及び NDIS 4001 によるほか, 次による。
- 25 **3.1**
- 26 KB フィルタ
- 27 X線管球から発生する Kα線と Kβ線に対し, Kα線に比べて Kβ線をより大きく減衰させることが可能
   28 な箔状の物質
- 29 注釈1 X線管球のターゲット金属より原子番号が1~2小さい物質が用いられる。

NDIS 4404 : 2021

30 **3.2** 

#### 31 X 線侵入深さ, T

- 32 X線応力測定における測定深さ(附属書 I 参照)
- 33 **3.3**

#### 34 X 線的ポアソン比, v

35 X 線応力測定法の基礎式に基づいて、X 線ひずみと材料に与えた負荷応力との関係から導出されるポア
 36 ソン比

37 **3.4** 

#### 38 X線的ヤング率, E

39 X線応力測定法の基礎式に基づいて、X線ひずみと材料に与えた負荷応力との関係から導出されるヤン
 40 グ率

- 41 **3.5**
- 42 X 線入射角, ψ<sub>0</sub>
- 43 測定試料の表面の法線方向からの傾斜角
- 44 注釈1 図1による。



二次元 X 線検出器による回折環の測定の状況を表す。 回折環の中心角 αの取り方はこの図によって定義する。

図1-多結晶の場合のX線回折

- 45 **3.6**
- 46 X線ひずみ, ε<sub>α</sub>
- 47 X線回折法によって決定されるひずみ
- 48 **3.7**

#### 49 X線プロファイル

- 50 代替用語:回折 X 線プロファイル,回折プロファイル,回折強度曲線
- 51 回折 X線の強度分布を回折角 20 又は回折環の半径 R に対して表した場合に得られるグラフ
- 52 注釈1 cosa 法の場合には、二次元 X 線検出器によって測定される回折環に対して、その中心から半径

方向に対する X 線の強度分布を X 線プロファイルとする。

54 **3.8** 

53

- 55 **応力勾配**
- 56 応力が物体の位置(座標)によって変化している場合における応力の変化率(附属書 H 参照)
- 57 **3.9**
- 58 **応力定数**
- 59 cosa 法で用いられる X 線的ヤング率(E), X 線的ポアソン比(v), 無ひずみ状態におけるブラッグ角
   60 (θ<sub>0</sub>) 又は θ<sub>0</sub>の余角(η<sub>0</sub>) 及び X 線入射角(ψ<sub>0</sub>) から決定される定数
- 61 注釈1 NDIS 4001 に定義されている用語であるが、この規格では cosα 法に対して定義し用いる。
- 62 **3.10**
- 63 **回折環**
- 64 代替用語:回折リング,デバイ環,デバイリング,デバイ・シェラー環,デバイ・シェラーリング
- 65 多結晶材料からの回折 X 線によって形成される円すい状の回折パターンにおいて、その断面となる円
- 66 環(図1及び図2参照)



**IP** を使用して測定した,機械構造用炭素鋼 S55C 受け入れ材の CrKα線による(211)回折の場合の回折環。

#### 図 2-回折環

- 67 **3.11**
- 68 回折斑点
- 69 単結晶に X 線を照射したときに二次元 X 線検出器上にて観察される複数の斑点
- 70 注釈1 多結晶材料及び粉末材料から得られる回折環は、この回折斑点が多数の結晶格子面から発生す
   71 ることによって形成される。
- 72 **3.12**
- 73 巨視的応力
- 74 X線測定領域内の平均的な応力
- 75 注釈1 NDIS 4001 で定義されている"マクロ応力"と同意語である。

NDIS 4404 : 2021

- 76 **3.13**
- 77 **コリメータ**
- 78 X線管球から発生する X線の発散を抑え X線ビームとして進行方向及び平行度を整える目的,又は X
   79 線照射面積を調整する目的で使用する筒状の部品
- 80 **3.14**

#### 81 三軸応力,三軸応力状態

- 82 3個の主応力が全て存在するような応力状態(附属書 E 及び附属書 F 参照)
- 83 **3.15**

#### 84 (**残留応力の**)再分布

- 85 (電解)研磨又は腐食によって材料の一部分が失われたり、除去されたりすると、材料内における残留
   86 応力のつり合いを保つため、その部分に存在していた残留応力の変化に対応して残りの部分の応力分布が
   87 変化すること
- 88 3.16

#### 89 多結晶集合体

- 90 一般的な工業材料のように、無数の微細な結晶粒が固く結合してできている状態
- 91 **3.17**
- 92 転位密度
- 93 単位体積当たりの転位の数又は長さ
- 94 **3.18**

#### 95 二次元 X 線検出器

- 96 面状に X線を測定することが可能な検出器
- 97 **3.19**
- 98 バックグラウンド
- 99 X線プロファイルのピーク部分の両側に広がる裾野部分
- 100 **3.20**
- 101 ピーク位置決定法
- 102 X線プロファイルからブラッグの法則を満足する回折角 20 を求める際に用いる方法 (9.5 参照)
- 103 **3.21**

#### 104 平面応力,平面応力状態

- 105 二次元的な応力状態
- 106
- 107
- 108
- 109 110
- 111
- 112
- 113

#### 114 **4 記号及び略語**

#### 115 4.1 記号及び定義

#### 116 この規格で用いる記号は次による。

117

記号 定義 a 格子定数のうち、単位胞のa軸の長さ。  $a_1$ cosa に対して直線関係を示す性質をもつ, cosa 法で導入するパラメータ。  $a_2$ sina に対して直線関係を示す性質をもつ, cosa 法で導入するパラメータ。 附属書 F の式(F.9)で定義されるパラメータ。  $a_3$  $B_1$ 附属書 F の式(F.14)で定義される,三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。  $B_2$ 附属書 F の式(F.15)で定義される、三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。 附属書 F の式(F.16)で定義される、三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。  $B_3$  $B_4$ 附属書 F の式(F.17)で定義される、三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。 b 格子定数のうち,単位胞の b 軸の長さ。  $b_1$ 附属書 F の式(F.1)で定義される,三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。  $b_2$ 附属書 F の式(F.2)で定義される,三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。  $b_3$ 附属書 F の式(F.3)で定義される、三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。  $b_4$ 附属書 F の式(F.4)で定義される,三軸応力成分を求める際に用いるパラメータ。 CLX線測定部とX線検出器との距離(カメラ長)。 с 格子定数のうち、単位胞のc軸の長さ。 格子面間隔。図3による。 d  $d \sin \theta$ 図 3-単結晶の X 線回折  $d_0$ 無ひずみ状態における d 値。  $\Lambda d$  $\Delta d = d - d_0$  で表される,応力による格子面間隔の変化量。 Ε X線的ヤング率(縦弾性係数)。 ネーピアの数又はネイピア数と呼ばれる、数学定数の一つ。 e e=2.71828 18284 59045 23536 02874 71352 ... hkl ミラー指数。

記号	定義
Ι	X線の強度。
$I_0$	入射X線の強度。
Κσ	$\cos \alpha$ 法による $\sigma_x$ 決定用の応力定数。
Κτ	cosa法によるτ <sub>xy</sub> 決定用の応力定数。
k	回折時のX線強度の減衰率。
L	L=l/zの関係をもつ,X線が物質を通過した距離(1)に関する係数。
l	X線が物質の内部を通過した距離。
$l_1$	入射 X線が回折位置までの間に物質内部を通過した距離。
$l_2$	回折 X線が物質内部を通過した距離。
$M_c$	<i>a</i> 1対 cosa 線図の傾き。
Ms	<i>a</i> 2対 sinα 線図の傾き。
$\Delta M_c$	a1対 cosa 線図の傾きにおける近似誤差。
$\Delta M_s$	<i>a</i> <sub>2</sub> 対 sin <i>a</i> 線図の傾きにおける近似誤差。
n	ブラッグの法則で用いられる回折次数。又は測定データの個数。
<i>n</i> <sub>1</sub>	εαの作用方向に対する方向余弦の第1成分。
<i>n</i> <sub>2</sub>	εαの作用方向に対する方向余弦の第2成分。
<i>n</i> <sub>3</sub>	εαの作用方向に対する方向余弦の第3成分。
R	回折環の半径。
Т	X 線侵入深さ。
t	t分布に従う確率変数の値。
z	測定試料の表面からの距離(深さ)。
α	図1によって定義される回折環の中心角。又は単位胞のb軸とc軸との角度。
1- <i>a</i> '	信頼率又は信頼係数( <b>附属書 M</b> 参照)。
β	単位胞のa軸とc軸との角度。
γ	単位胞のa軸とb軸との角度。
3	縦ひずみ。
εα	回折環の中心角 a に対応する X 線ひずみ。
$\mathcal{E}\pi+lpha$	回折環の中心角 π+αに対応する X 線ひずみ。
ε_α	回折環の中心角-aに対応する X 線ひずみ。
επ-α	回折環の中心角 π-αに対応する X 線ひずみ。
η	$\theta$ の余角 ( $\eta = \pi/2 - \theta$ )。
θ	ブラッグ角。図3による。

記号	定義
$ heta_0$	無ひずみ状態における θ 値。
$\Delta \theta$	$\Delta \theta = \theta - \theta_0$ で表される,応力によるブラッグ角の変化量。
λ	X線の波長。
μ	線吸収係数。
v	X線的ポアソン比。
$\sigma_x$	x軸方向に作用する垂直応力。
$\sigma_y$	y 軸方向に作用する垂直応力。
$\sigma_z$	z軸方向に作用する垂直応力。
$\Delta \sigma$	測定される垂直応力の信頼区間。
$ au_{xy}$	xy 面に作用するせん断応力。
$ au_{xz}$	xz 面に作用するせん断応力。
$ au_{yz}$	yz 面に作用するせん断応力。
$\Delta \tau$	測定されるせん断応力の信頼区間。
Φ	附属書 Fの式(F.11)で定義される、回折環から得られる4か所のX線ひずみを組み合わせたパラ
$arphi_0$	x軸と応力測定方向とのなす角。
Ψ	附属書 F の式(F.12)で定義される,回折環から得られる4か所のX線ひずみを組み合わせたパラ メータの一つ
$\psi_0$	X 線入射角。

#### 118 **4.2 略語及び説明**

120

略語	説明
BCC	体心立方格子(body centered cubic)の略語。
Co	元素の一種であるコバルトの略語。
Cr	元素の一種であるクロムの略語。
Cu	「一元素の一種である銅の略語。
FCC	面心立方格子(face centered cubic)の略語。
НСР	最密六方格子(hexagonal close-packed)の略語。
IP	イメージングプレート(imaging plate)の略語。
Mn	元素の一種であるマンガンの略語。
V	元素の一種であるバナジウムの略語。

<sup>119</sup> この規格で用いる略語は次による。

#### 121 5 測定原理

#### 122 5.1 概要

cosa 法は、X線応力測定法におけるデータ解析理論の一種であり、測定試料から発生する回折環全体又 123 はその大部分の測定結果から応力を決定する方法である。従来の X 線応力測定理論である sin<sup>2</sup> W 法では, 124 数種類の入射 X 線方向において、それぞれ回折環の一か所だけを測定することによって応力を決定してい 125 る(図4のa)参照)。これに対し, cosα 法は1種類の入射 X線方向について回折環を測定し,得られた回 126 折環の種々の中心角における多数の X 線データを用いて応力を決定する (図 4 の b)参照)。sin<sup>2</sup> y 法では複 127 数の X 線入射角について X 線測定を必要とするが, cosa 法では1種類の X 線入射角だけでよい(単一入 128 射法)。また, sin<sup>2</sup> W 法では, sin<sup>2</sup> W 線図を利用してデータ解析するのに対して, cosa 法では cosa 線図及び 129 sina 線図を利用する。 130





b) cosa 法

図 4-従来技術  $\sin^2 \psi$  法と  $\cos \alpha$  法との比較

- 131 5.2 原理
- 132 cosa 法の測定原理は, 附属書 A による。
- 133 5.3 基礎的仮定
- 134 cosα 法の適用には、次の基礎的仮定が成立していることを前提とする。
- 135 a) 測定領域が平面応力状態である。
- 136 b) 測定領域内に応力勾配がない。
- 137 c) 測定領域内が巨視的に均質であると共に、力学的に等方性を有する。
- 138 d) 角ηが一定値である(附属書 B 参照)。
- 139 6 測定装置
- 140 6.1 一般

141 X線管球と二次元X線検出器とを組み合わせた, cosα法に対応した装置を使用する。

#### 142 6.2 X 線発生部

#### 143 6.2.1 X 線管球

144 CrKα線を発生することが可能な X線管球を用いる。管電圧 20 kV 以上,管電流 1 mA 以上として出力可
 145 能なものが望ましい。

- 146 6.2.2 高圧電源
- 147 励起電圧<sup>1)</sup>以上かつ 6.2.1 の管電圧及び管電流を供給することが可能な電源を使用する。
- 148 **注**<sup>1)</sup> CrKα線発生の場合は、約5.98 kV となる。

#### 149 6.2.3 X線管球の冷却

- 150 X線管球の冷却方法は、水冷又は空冷のどちらでもよい。
- 151 6.3 X 線検出部

#### 152 6.3.1 X 線検出器

IP,半導体検出器などのX線強度を測定することのできる二次元X線検出器を使用する。可能な限り回
 折環の広い部分を測定できることが望ましい。また、検出器の位置分解能は 100 μm 以下とするのがよい
 <sup>2)</sup>。

 156
 注<sup>2)</sup> X 線測定部と二次元 X 線検出器との距離 CL によって角度分解能が異なるので、CL が小さい場合には注意を要する。

#### 158 **6.3.2 読み出し**

159 X線強度の読み出しには、使用する二次元X線検出器に対応した機器を使用する。

#### 160 6.4 コリメータ

161 測定試料に照射する入射 X 線をビーム状に細く絞るために、コリメータを使用する。コリメータの内径
 162 は 1 mm を推奨するが、試料の結晶状態又は目的とする測定面積に応じて適宜選択してもよい。

163 6.5 検査

#### 164 6.5.1 ゼロ応力の検定

165 マクロ応力の値がゼロと考えられる粉末(以下,ゼロ応力試験片)に対して  $\cos \alpha$  法を用いて応力測定を 166 行い,得られた応力値( $\sigma_x$ )が 0 MPa±25 MPa であることを確認する。

#### 167 6.5.2 応力の検定

168 ゼロ応力以外で検定を行う場合は、応力が既知である応力付与試験片に対して cosα 法を用いて応力測定
 169 を行い、得られた応力値(σ<sub>x</sub>)が公称応力値の±25 MPa 又は公称応力値の 10 %以内であることを確認す
 170 る。応力付与試験片の材質は、フェライト系鋼材とする。

#### 171 6.5.3 試験片の保管

NDIS 4404 : 2021

172 ゼロ応力試験片及び応力付与試験片の保管は、表面に汚れ又はさびが生じないように留意して行う。

#### 173 7 測定対象及び測定試料

#### 174 7.1 **測定対象**

- 175 フェライト系鋼材を測定対象とする。
- 176 7.2 測定試料

#### 177 7.2.1 結晶粒

- 178 測定試料の結晶粒が粗大な場合には、回折環上のX線強度の分布が不連続又は不均一になり(斑点状又
- 179 はスポッティともいう,附属書C及び附属書D参照),測定誤差を招く可能性があるため,測定試料の結
   180 晶粒は粗大ではないことが望ましい。
- 181 注記 結晶粒の大きさが適正であっても、X線ビームの照射径が小さい場合には同様の測定誤差を招く
   182 可能性があることに注意が必要である。

#### 183 7.2.2 集合組織

184 集合組織は回折環上の位置によって X 線強度分布が大きく変動し(附属書 C 参照), X 線ひずみの決定
 185 精度に悪影響を及ぼす場合があるため,注意しなければならない。

#### 186 7.2.3 さび・汚れ・異物

187 入射 X 線及び回折 X 線の減衰を招く可能性があるので,測定試料表面のさび・汚れ・異物はできるだけ
 188 取り除くことが望ましい。除去方法は,電解研磨等の応力を生じさせない方法とする。

#### 189 7.2.4 平たんさ

190 測定試料の測定部は、できるだけ平たんで滑らかであることが望ましい。曲面又は粗さが大きい場合に191 は測定誤差が発生する可能性がある。

192 **注記** 曲面の影響に関しては参考文献[2]を参照。粗さの影響に関しては参考文献[3]を参照。

#### 193 7.2.5 変形及び加工

194 残留応力を発生させるおそれがあるので、測定試料の測定部への不用意な変形及び加工の付与は避けな195 ければならない。

#### 196 7.2.6 **電解研磨・化学研磨**

197 内部の応力を評価する場合,又は深さ方向の応力変化を調べる場合に行う処理であるが,極力,残留応
198 力状態に影響を及ぼさないように行う。この処理によって応力が付与されない場合であっても,表面層の
199 除去に伴って応力のつり合いが失われるため,残留応力が再分布し<sup>3</sup>,処理前の応力状態とは完全に一致
200 しなくなることに留意しなければならない(この場合の補正方法は参考文献[4]を参照)。

201 注<sup>3</sup> 残留応力は材料内でつり合っており、全ての残留応力の合計はゼロでなければならない。

202 使用する電解研磨液は、この規格では特に定めないこととし、市販品又は自作したものを使用してもよ
 203 い(**附属書** K 参照)。

- 205 8 測定条件
- 206 8.1 特性 X 線及び回折面
- 207 特性 X 線は CrKα線(波長 λ=0.2291 nm)を使用し,(211)面からの回折 X 線を測定する。
- 208 8.2 管電圧及び管電流
- 209 管電圧 20 kV 以上,管電流 1 mA 以上を推奨する。
- 210 **8.3 Kβフィルタ**
- 211 Kβフィルタは使用しなくてもよい。
- 212 8.4 X 線入射角
- 213 X線入射角 ψ₀は 25°~45°の範囲を推奨し、ψ₀≠0°とする。
- 214 σ<sub>x</sub>及び τ<sub>xy</sub>を測定する場合には,入射 X 線を測定試料面の法線方向から σ<sub>x</sub>の作用する方向(この場合, x

215 軸方向)に角度 ψo だけ傾斜させて応力測定部に照射する(図5のa)参照)。σyを測定する場合には、入射

216 X線をy軸方向に ψ₀だけ傾斜させ照射する (図5のb)参照)。



#### 217 8.5 X 線照射面積

218 X線照射面積は、測定試料の状態に応じて決定することが望ましい。X線照射面積の変更は、入射X線

219 用のコリメータを内径の異なるものに交換して調整する方法を推奨する。

#### 220 8.6 X線検出器の画素配列

221 二次元 X 線検出器の画素配列は次のどちらかとする。

NDIS 4404 : 2021

222 • 直交座標状

223 • 極座標状

#### 224 8.7 回折環の測定範囲

225 回折環の全体又はなるべく広範囲の部分から有効な回折データが得られ、応力解析に利用できることが 226 望ましい。 $\cos \alpha$ 法の測定原理上、回折環の中心角 $\alpha$ に対し、 $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$ について図6に示す4区間全てで 227 1/2以上の範囲から有効な回折データを得ることが望ましい。回折環全体が測定できない場合には、 $\cos \alpha$ 法 228 の測定原理を考慮した上で必要な範囲を測定できるようにするか、この規格の規定内でデータを取捨選択 してもよい。

230 注記 cosa 法では、図6に示す α, π+α, -α, π-αの4種類の部分に位置しているデータを1組とし
 231 て利用している。4種類の内の一部分でも欠落すると、他のデータも応力解析に利用できなくな
 232 る。



二次元 X 線検出器の裏面側から見た場合の関係。入射 X 線は紙面に垂直に,奥側に向かって進む。

#### 図 6-回折環から得られる X 線ひずみ εαの説明図

#### 233 8.8 回折環の中心角に関するデータ数及び測定間隔

234  $\alpha$ の測定間隔は、一定間隔又は  $\cos \alpha$  に関して一定間隔のどちらかとする。解析に使用する  $\alpha$ は、  $\cos \alpha$  線

235 図上の範囲が 0.6 以上あり,かつ,できるだけ均等に分布していることが望ましい。cosa 線図上の測定点
 236 数は 10 点以上 (αの測定数は合計 40 点以上<sup>4</sup>)を推奨する。

- 237 **注**<sup>4</sup> 回折環上の α の点数は, cosa 線図のプロット点数の 4 倍になる。

#### 238 8.9 回折環の半径方向に関する測定範囲及び測定間隔

239 回折環半径又は回折ピーク位置の決定精度を確保するために、回折ピーク位置を中心として、半価幅の

240 3 倍程度の範囲について有効な X 線プロファイルを得ることが望ましい。X 線プロファイルを構成する各

- 241 データの測定間隔は、半価幅に対して 0.05 倍以上かつ 0.17 倍以下の範囲を推奨する。
- 242 9 測定手順
- 243 9.1 概要

13

cosa 法における通常の X 線応力測定手順は **図 7** による。



**a**)8.4 に規定した X 線入射角によって測定試料に X 線を照射し,回折環を測定する。b)回折環の中心から半径方 向への X 線プロファイルを求め,同様の作業を種々の中心角に対して行う。c)得られた X 線プロファイルから回 折ピーク位置(2*θ*)を求める。d)及び e)回折環の中心角ごとの X 線ひずみ(ε<sub>α</sub>)を求める。f)cosa 線図の直線の傾 きから応力 σ<sub>x</sub>を決定する。

#### 図 $7-\sigma_x$ を求める場合の $\cos\alpha$ 法の測定手順

#### 245 9.2 回折環の中心位置の決定

246 回折環の中心位置の決定方法は、次のどちらの方法を用いても差し支えない。

247 ・ ゼロ応力試験片から回折環の中心位置をあらかじめ取得して測定装置に記録しておく方法

248 ・ 機械的に二次元 X 線検出器の中心位置を決めて測定装置に記録しておく方法

249 決定した回折環の中心位置に対して、ゼロ応力試験片の応力測定結果が0MPa±25MPaとなることが望
 250 ましい。応力の検定方法は6.5.1による。

#### 251 9.3 X線プロファイル

252 二次元 X 線検出器の画素を直交座標状として測定した場合には、画像解析を行って半径方向の X 線プ
253 ロファイルを求める(参考文献[5][6]を参照)。一方、画素を極座標状として測定した場合には、画像解析
254 を経ずに測定データから直接 X 線プロファイルを得る。得られた X 線プロファイルは、附属書 J による
255 各種の補正処理(ローレンツ補正,偏り補正,吸収補正,幾何学的補正,空気補正)を施さなければなら
256 ない。

#### 257 9.4 バックグラウンドの処理

258 通常,測定される回折 X 線強度にはバックグラウンドが重畳しているので,除去することが望ましい。

#### NDIS 4404 : 2021

259 X線プロファイル上において、回折ピーク位置を挟む両側の裾野部分を結ぶ直線を求め、その直線から与

260 えられる X 線強度を, 測定した回折 X 線強度から差し引けばよい。なお, 目的の回折ピーク位置の周辺に

261 他の回折ピークがないことを確認しておく。

#### 262 9.5 回折ピーク位置の決定

- 263 ピーク位置決定法は、次のいずれかを用いることを推奨する。
- 264 ・ ガウス関数近似法
- 265 ・ ローレンツ関数近似法
- 266 半価幅中点法

#### 267 9.6 X線ひずみの計算

268 回折環の中心角 α ごとの回折環半径 R に対して,式(1)を用いてブラッグ角(θ, 単位:rad)を求める。

$$\theta = \frac{1}{2} \left[ \pi - \tan^{-1} \left( \frac{R}{CL} \right) \right] \qquad \cdots \qquad (1)$$

269 ブラッグの法則から導かれる式(2)を利用して, X線ひずみ (ε<sub>α</sub>)を求める。

$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\Delta d}{d} = -\Delta \theta$	· cot $ heta$ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••(	(2)
$\Delta d = d - d_0$		••••(	(3)
$\Delta \theta = \theta - \theta_0$		••••(	(4)

- 270 *d*<sub>0</sub>, *θ*<sub>0</sub>は, 測定試料の格子定数 <sup>5</sup>及びブラッグの式から式(5)及び式(6)によって計算する。この規格にお
   271 ける *θ*<sub>0</sub>の推奨値は 156.4°である。
- 272 **注**<sup>5</sup> フェライト系鋼材の場合, a=b=c,  $\alpha=\beta=\gamma=90^{\circ}$ となる。

$$\theta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d_0}\right) \qquad (5)$$

$$d_0 = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \qquad (6)$$

273 9.7 応力値の算出

#### 274 9.7.1 σ<sub>x</sub> の計算

275 図 5 の a)によって測定した回折データを使用する。式(2)によって求めた X 線ひずみに対して,図 6 の 276 ように  $\varepsilon_{a}$ ,  $\varepsilon_{\pi-a}$ ,  $\varepsilon_{\pi+a}$ ,  $\varepsilon_{-a}$  と表し,式(7)のパラメータ  $a_1$  を求める。

$$a_{1} \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \qquad \cdots \qquad (7)$$

277 a1対 cosaの関係を直線近似して直線の傾き Mcを求める。得られた傾きを式(8)に代入することで垂直応

278 力  $\sigma_x$ を決定する ( $\psi_0 \neq 0^\circ$ )。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left( \frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right) = K_\sigma \cdot M_c \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (8)$$

$$K_{\sigma} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (9)$$

279 **9.7.2** σ<sub>y</sub>の計算

280 図 5 の b)によって測定した回折データを使用する。計算方法は 9.7.1 による。

#### 281 **9.7.3** *τ<sub>xy</sub>*の計算

282 図 5 の a)又は b)によって測定した回折データを使用する(A.3.3 参照)。式(2)によって求めた X 線ひず 283 みに対して,図6のように  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_{\pi-a}$ ,  $\varepsilon_{\pi+a}$ ,  $\varepsilon_{-a}$ と表し,式(11)のパラメータ  $a_2$ を求める。

$$a_{2} \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad \cdots \quad (11)$$

284  $a_2$ 対 sina の関係を直線近似して直線の傾き  $M_s$ を求める。得られた傾きを式(12)に代入することで、せん 285 断応力  $\tau_{xy}$ を得る ( $\psi_0 \neq 0^\circ$ )。

$$M_s = \left(\frac{\partial a_2}{\partial \sin \alpha}\right) \qquad (14)$$

#### 286 9.7.4 信頼限界

287 測定した応力値 σx 及び τxy の信頼区間 Δσx 及び Δτxy は,式(15)による[9][10]。

$$\begin{cases} \sigma_x \pm \Delta \sigma_x = K_\sigma M_c \pm K_\sigma \Delta M_c \\ \tau_{xy} \pm \Delta \tau_{xy} = K_\tau M_s \pm K_\tau \Delta M_s \end{cases}$$
(15)

288 ΔM<sub>c</sub>及び ΔM<sub>s</sub>は式(16)によって計算する。

$$\begin{cases} \Delta M_c = t(n-1,1-\alpha') \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{1i} - M_c \cos \alpha_i)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i}} \\ \Delta M_s = t(n-1,1-\alpha') \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{2i} - M_s \sin \alpha_i)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i}} \end{cases}$$
 (16)

NDIS 4404 : 2021

290 σyに対する信頼区間は、σyの測定結果から式(15)及び式(16)を計算する。

#### 291 9.7.5 応力定数

応力定数は、200=156.4°として計算した次の値を使用することを推奨する。 292

$$\frac{E}{1+\nu} = 175 \text{ GPa} \qquad (17)$$

$$\frac{1}{\sin 2\eta} = 2.498 \qquad (17)$$

$$K_{\sigma} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} = -437000 \left(\frac{1}{\sin 2\psi_0}\right) \text{ GPa} \qquad (19)$$

$$K_{\tau} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} = 219000 \left(\frac{1}{\sin \psi_0}\right) \text{ GPa} \qquad (20)$$

-112

#### 293 10 報告

- 294 測定結果を報告する場合には、次の事項を提示しなければならない。
- a) 測定面 295
- 1) 測定位置 296
- 電解研磨処理の有無,除去した厚さなど) 2) 測定面の処理方法(例えば, 297
- **b)** 測定条件 298
- 1) 使用した X 線装置 299
- 2) 応力の測定方向 300
- 3) X 線入射角 301
- 4) X 線照射時間 302
- 5) 特性X線の種類 303
- 6) X線管電圧及び管電流 304
- 7) 回折面 (hkl) 305
- 8) コリメータの内径 306
- 307 9) 応力定数 (E/(1+ν), 2η)
- c) 測定データ 308
- 1) 応力値及び信頼限界 309
- 2) 回折環全体の半価幅\*\*)の平均値 310

- 311 **注\*\***) 単位には,度(°)を用いる。
- 312 d) データ処理条件
- 313 1) X線プロファイルに対するピーク位置決定法
- 314

some

- 315
- 316

317

#### 附属書 A

(規定)

# cosq 法による X 線応力測定理論(平面応力状態)

#### 318 A.1 X線によるひずみの測定

319 金属を中心とする一般的な工業材料では、内部に無数の微細な結晶粒が存在しており、それらの各結晶
320 粒は互いに無秩序な方位を取っている場合が多い。また、同時に、図3に示すように、個々の結晶粒を構
321 成している原子は格子状に規則的に配列し特定の結晶構造をもっている(附属書L参照)。このような材
322 料に対してX線を照射すると、結晶格子における原子によって散乱されるとともに、それらの散乱X線は
323 互いに干渉し合う。このとき、原子配列の規則性のため、それらの散乱X線の一部は互いに強め合う場合
324 がある(X線回折)。このようなX線の強め合いは、式(A.1)の関係を満足する場合に起こることが知られ
325 ている[11]。

326 式(A.1)は、ブラッグの法則(回折条件式)などと呼ばれ、X線応力測定の根幹をなすものである。

327 **注**<sup>の</sup> X線応力測定では,通常, n=1を用いる。

328 測定試料に対して, X 線照射面積が数 mm<sup>2</sup>程度以上となるように X 線を当てると, 図 1 及び図 2 に示 329 すような回折環が形成される。これは、回折 X 線が多数の回折面から三次元的に発生することによって生 330 じるものである。このとき、回折環上の各点では、入射 X 線ビームと回折 X 線ビームとを含む面内におい 331 て,図3の場合と同様の関係がいずれの場合も成立している。なお、式(A.1)の回折条件は、図3 における 332 格子面の法線を中心とし、任意に回転させた場合においても成立する。そのため、9.6 の式(2)によって与 333 えられる X 線ひずみ  $\varepsilon_{\alpha}$ は、それらの複数の結晶格子に対するひずみの平均値である。

334 ひずみの発生に伴う θの変化を、ブラッグの法則から導く。9.6の式(2)を変形すると、式(A.2)を得る。

335 式(A.2)を変形すると、式(A.3)を得る。

#### 336 A.2 基礎式

337 図 A.1 に示すように, X 線照射点を原点とした試料座標系 xyz を設定し, X 線照射点の応力成分を式(A.4)
 338 のように表す。





この図では、回折環の中心角  $\alpha$ の方向に、入射 X 線ビームの方向 から角  $\eta$  だけ半径方向に傾斜させた方向を z'と定義する。z'の方向は  $\varepsilon_{\alpha}$ の方向とも一致する。

#### 図 A.1-実験座標系における z'軸の方向

- 340 回折環の各部分からは、9.6の式(1)及び式(2)を用いて X線ひずみ <sup>7)</sup>が得られるが、回折環上の中心角が a
- 341 の位置から得られる X線ひずみを εaと表すと,等方性材料の場合には応力に対して式(A.5)の関係が成り
- 342 立つ[1][7]。
- 343 注 っ このようにして得られるひずみは、垂直ひずみである。

$$\varepsilon_{\alpha} = \sigma_x \frac{1}{E} [n_1^2 - \nu (n_2^2 + n_3^2)] + \sigma_y \frac{1}{E} [n_2^2 - \nu (n_3^2 + n_1^2)] + \tau_{xy} \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2$$
(A.5)

- 344 右辺の n<sub>1</sub>~n<sub>3</sub>は, 試料座標系と実験座標系(ε<sub>α</sub>の方位を z 軸方向とするように回転した座標, 図 A.1 及び
   345 図 A.2 参照)との間の方向余弦の一部であり<sup>8)</sup>, 二次元 X 線検出器方式の場合には式(A.6)となる[7]。
- 346 **注**<sup>8</sup> 試料座標系の z 軸を中心に φ<sub>0</sub> 回転し, さらに, 新しい y 軸を中心に ψ<sub>0</sub> 回転してできる新座標系
   347 (実験座標系)に対する関係。

$$n_1 = \cos\eta \sin\psi_0 \cos\phi_0 - \sin\eta \cos\psi_0 \cos\phi_0 \cos\alpha - \sin\eta \sin\phi_0 \sin\alpha$$

 $n_2 = \cos\eta \sin\psi_0 \sin\phi_0 - \sin\eta \cos\psi_0 \sin\phi_0 \cos\alpha + \sin\eta \cos\phi_0 \sin\alpha \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (A.6)$ 

 $n_3 = \cos\eta\cos\psi_0 + \sin\eta\sin\psi_0\cos\alpha$ 

348



#### 350 A.3.1 ox の決定

入射 X 線を測定試料面の法線から傾斜させた場合に測定される回折環からは、応力計算に十分な数の X 351 線ひずみ Eaが得られる。まず、図 A.3 に示すように、入射 X線を試料法線方向から x 軸方向に傾斜させた 352 状態(φ0=0°)で回折環を測定し、図6に示したように、回折環上の4箇所のX線ひずみから式(A.7)のパ 353 ラメータ *a*1を求める[1]。 354

$$a_1(\phi_0) \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.7)$$

355

349



図 A.3-cosa 法による垂直応力 σx 及びせん断応力 τxy の測定(平面応力)

式(A.7)に、式(A.5)及び式(A.6)を代入すると、 φ0=0°のとき式(A.8)の関係が得られる[1][5]。 356

$$a_1(0) = -\frac{1+\nu}{E}\sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cos \alpha \cdot \sigma_x \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.8)$$

357 式(A.8)の右辺に含まれる *v*, *E*,  $\psi_0$ ,  $\sigma_x$ は,いずれも定数として扱うことができる。また, $\eta$ の変化は小さ 358 いので定数として扱うことにすると(**附属書** B 参照),  $a_1$ は cosa に関して直線的な関係となる。式(A.8)か 359 ら,この直線の傾きは次のように表すことができる。

360 式(A.9)で与えられる直線の傾きを測定によって決定できれば、式(A.10)から応力  $\sigma_x$ を決定することが可能 361 になる。ただし、 $\psi_0 \neq 0^\circ$ とする。

$$\sigma_{x} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_{0}} \left( \frac{\partial a_{1}(0)}{\partial \cos \alpha} \right) \qquad (A.10)$$

362 このように,  $\cos \alpha$  法では1個の回折環から $\sigma_x$ を得ることができる。

#### 363 A.3.2 σyの決定

364 応力  $\sigma_y$ を得る場合には、図 A.4 に示すように入射 X 線を試料法線方向から y 軸方向に傾斜させた状態 365 ( $\varphi_0 = 90^\circ$ )で回折環を測定し、 $\sigma_x$ の場合と同様なデータ処理を行えばよい。すなわち、式(A.9)の左辺は 366  $a_1(90)$ となり、式(A.11)が得られる。

367 **注記** 理論式上では、 $\sigma_x$ 及び  $\tau_{xy}$ を決定した回折環から  $\sigma_y$ も決定可能であるが、測定精度の面では  $\varphi_0$ = 368 90°における回折環を使用することがよいとされる。詳細については参考文献[7][5]を参照。

 $\left(\frac{\partial a_1(90)}{\partial \cos\alpha}\right) = -\frac{1+\nu}{E}\sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cdot \sigma_y \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.11)$ 

369



図 A.4-cosa 法による垂直応力 σy 及びせん断応力 τxyの測定(平面応力)

#### NDIS 4404 : 2021

370 式(A.11)のように,  $a_1(90)$ も cosa に対して直線的な関係をもち,このときの直線の傾きには応力  $\sigma_y$ が含ま 371 れる。この関係を利用することで,式(A.12)のように  $\sigma_y$ が決定できる。ただし, $\psi_0 \neq 0^\circ$ とする。

$$\sigma_{y} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_{0}} \left( \frac{\partial a_{1}(90)}{\partial \cos \alpha} \right) \qquad (A.12)$$

#### 372 A.3.3 *τ*<sub>xy</sub>の決定

#### 373 A.3.3.1 概要

374  $\sigma_x$ を決定した同じ回折環及び  $\sigma_y$ を決定した同じ回折環のどちらからも  $\tau_{xy}$ を決定することができる。両 375 者は同等であり、一致するはずである。ただし、平面応力状態の場合の性質に限定され、三軸応力状態で 376 は当てはまらなくなることに注意する。測定に起因する誤差を考慮すると、両者の平均値を使用すること 377 で信頼性が向上すると考えられる。

378 注記 実際には, 測定試料による X 線強度の吸収減衰の影響も現れるので, 総合的な判断が必要である。

#### 379 A.3.3.2 σ<sub>x</sub> と同じ回折環から τ<sub>xy</sub> を決定する場合

380 式(A.7)に代わって,式(A.13)によって与えられる新たなパラメータ a2を導入する[1][5]。

$$a_{2}(\phi_{0}) \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.13)$$

381 式(A.13)の右辺を式(A.5)及び式(A.6)から求めると、式(A.14)が導出できる。

$$a_2(0) = \frac{2(1+\nu)}{E} \sin\psi_0 \sin 2\eta \sin \alpha \cdot \tau_{xy} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.14)^{(9)}$$

#### 382 **注**<sup>9</sup> $\psi_0$ の項は sin $\psi_0$ であり, sin $2\psi_0$ ではないことに注意されたい。

383 式(A.14)から, *a*<sub>2</sub>は sinα に対して原点を通る直線関係を示し、その傾きにτ<sub>xy</sub>成分が含まれることが分かる
 384 (図 A.3)。すなわち、式(A.15)となる。

$$\left(\frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha}\right) = \frac{2(1+\nu)}{E} \sin \psi_0 \sin 2\eta \cdot \tau_{xy} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.15)$$

385 式(A.9)と同様に,右辺に含まれる v, E,  $\psi_0$ ,  $\tau_{xy}$ は定数として扱うことができ, $\eta$ も定数として扱うと,式 386 (A.16)が導出できる。

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin\psi_0} \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right) \qquad (A.16)$$

387 以上によって, *a*<sub>2</sub>対 sinaの関係における直線近似式の傾きからせん断応力 *t*<sub>xv</sub>が決定できる。

#### 388 A.3.3.3 σy と同じ回折環から τ<sub>xy</sub> を決定する場合

389 式(A.13)に示したパラメータ a<sub>2</sub>を式(A.5)及び式(A.6)から φ<sub>0</sub>=90°の場合について求めると,式(A.14)と同
 390 様に式(A.17)が導出できる。

$$a_2(90) = -\frac{2(1+\nu)}{E}\sin\psi_0\sin 2\eta\sin\alpha \cdot \tau_{xy} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.17)$$

391 式(A.17)から,  $a_2$ は sina に対して原点を通る直線となり、その傾きに  $\tau_{xy}$ 成分が含まれることが分かる。こ 392 のとき、符合は式(A.14)とは逆になり式(A.18)で表される。

$$\left(\frac{\partial a_2(90)}{\partial \sin \alpha}\right) = -\frac{2(1+\nu)}{E} \sin \psi_0 \sin 2\eta \cdot \tau_{xy} \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.18)$$

393 右辺に含まれる各パラメータは定数として扱うことができ、 $\eta$ も定数として扱うと、式(A.19)が導出でき、 394  $a_2$ 対 sinaの関係に対する直線近似式の傾きからせん断応力  $\tau_{xy}$ が決定できる。

<u>,</u>

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin\psi_0} \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_2(90)}{\partial \sin \alpha} \right) \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (A.19)$$

395

396	附属書 B
397	(参考)
398	ηの影響

#### 399 B.1 一般

400 cosa 法の応力測定理論では η を一定値と仮定して扱っているが,正しくは応力によって変化するため,

401 ηを一定値と仮定することによる測定精度への影響について示す。

#### 402 B.2 応力による η の変化量の推定

- 403 推定のため、最初に次の仮定を行った。
- 404 a) フェライト系の鋼の 211 回折線を、CrKα 線を用いて測定するものとする
- 405 b) 応力は、 $\sigma_x$ のみが作用しているものとする ( $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$ )。
- 406 c) 応力状態下にある回折 X 線の方向余弦は,  $\sigma_x=0$  のときの  $\eta$  の値 ( $\eta_0$ ) を用いて計算することができ 407 るものとする。
- 408 また, 次の関係式を用いた。

$$2\eta = \pi - 2\theta \qquad (B.1)$$
  
$$\theta = -\varepsilon \cdot \tan \theta_0 + \theta_0 \qquad (B.2)$$

$$\varepsilon = N_x \sigma_x + N_y \sigma_y + N_{xy} \tau_{xy} \qquad \cdots \qquad (B.3)$$

$$N_x = \frac{1}{E} \{ n_1^2 - \nu (n_2^2 + n_3^2) \}$$
 (B.4)

$$N_y = \frac{1}{E} \{ n_2^2 - \nu (n_3^2 + n_1^2) \}$$
 (B.5)

$$N_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} n_1 n_2 \qquad \cdots \qquad (B.6)$$

 $n_1 = \cos\eta \sin\psi_0 - \sin\eta \cos\psi_0 \cos\alpha$ 

 $n_3 = \cos\eta \cos\psi_0 + \sin\eta \sin\psi_0 \cos\alpha$ 

409 仮定 a)から,表 B.1 に示す数値を用いた。

表 B.1ー計算に用いた各因子に対する値			
因子	単位	値	
$2 heta_0$	(deg)	156.4	
$\psi_0$	(deg)	35	
Ε	(GPa)	206	
v		0.28	
$\sigma_x$	(MPa)	0 - 2000	
$\sigma_y$	(MPa)	0	
$ au_{xy}$	(MPa)	2	

411 **図 B.1** に応力  $\sigma_x$  が 0 から 2000MPa まで変化するときのひずみ  $\varepsilon$  を,回折環の中心角  $\alpha$  が 0° から 360° 412 の範囲について求めた結果を示す。



応力  $\sigma_x$ は 0 から 2000MPa までの間で変化させ、応力は  $\sigma_x$  のみが作用する場合を仮定した ( $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$ )。

#### 図 B.1 – $\sigma_x$ の変化に伴う回折環中心角 $\alpha$ における $\varepsilon$ の変化

413 次に,図B.1の場合に対し,回折環上の複数のαにおける2ηの値を求め,その最大値,最小値,平均値 を応力  $\sigma_x$ に対して求めた結果を図 B.2 に示す。また、 $\cos \alpha$  法による応力の計算に影響する  $\sin 2\eta$  の値に変 414 換した場合について図 B.3 に示す。図 B.2 及び図 B.3 から,応力の増加によってηが変化すると共に,そ 415 の変化量は回折環上の $\alpha$ によっても異なることが判明する。一例として, $\sigma_x = 500$  MPa の場合における sin $\eta$ 416 の値は, σ<sub>x</sub>=0のときの sinn に対して 0.996 から 1.02 倍の範囲で変化する。sinn の値の変化は cos α 法によ 417 る応力値に影響するが、その影響は実用上大きな問題とはならない程度であることが判明する.なお、以 418 419 上の結果は前述の仮定が成立することを前提としており、より一般性のある結論を得るためにはさらなる 検討を要する。 420

NDIS 4404 : 2021

26 NDIS 4404 : 2021



応力  $\sigma_x \ge 0$  から 2000MPa までの間で変化させた場合について示す。一点鎖線は最大,破線は最小,実線は 平均を表す。応力は  $\sigma_x$ のみが作用する場合を仮定した ( $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$ )。



応力  $\sigma_x \ge 0$  から 2000MPa までの間で変化させた場合について示す。一点鎖線は最大,破線は最小,実線は 平均を表す。応力は  $\sigma_x$ のみが作用する場合を仮定した ( $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$ )。

図 B.3 –  $\sigma_x$ の変化に伴う回折環中心角  $\alpha$ における sin2 $\eta$  と sin2 $\eta_0$  との比

- 423
- 424
- 425

426

427

428

(参考) 代表的な回折環の例

附属書 C

429 測定試料から発生する回折環は、X線が照射された面積とX線侵入深さで定まる測定領域から発生する
430 多数の回折X線が重なり合って形成される。このため、照射されるX線ビームの径及び強度とともに、測
431 定領域内に存在する結晶の粒径、方位分布状態、転位密度、モザイク構造などの結晶状態に影響を受ける。

図 C.1 に、代表的な4種類の回折環の測定例を示す。図 C.1 の a)は、焼鈍処理後の鋼材 S55C から得ら 432 れた回折環であり、上記の各影響因子が cosa 法の適用に対してそれぞれ適正な範囲にある場合の例であ 433 434 る。図 C.1 の b)は、塑性変形を受けた鋼材の回折環を示しており、回折環の幅が広く、回折 X 線の強度が 減少している。この場合と同様な回折環は、疲労損傷を受けた鋼材、硬度が高い鋼材、炭素含有量が多い 435 鋼材, さらに, 焼き入れによってマルテンサイト変態した鋼材などでも見られる。図 C.1 の c)は, 回折 X 436 437 線の強度が斑点状にまばらになる場合の例であり、結晶粒が粗大な場合、又は結晶粒径が微細であっても X線ビーム径が小さい場合に見られる。このような場合、回折にあずかる結晶(格子)の数が不足するた 438 439 め、回折環全周を形成するために必要な回折斑点の総数が不足するようになる。図C.1のd)は、集合組織 440 をもつ鋼材から得られた回折環であり,回折 X線の強度が高い部分及び低い部分が存在している。それら の間の強度の変化は緩やかであり、図 C.1 の c)のような急激な変化とは異なる。図 C.1 の d)のような回折 441 442 環が発生する原因は、結晶粒の方位分布がランダムではなく、特定の方向に偏るためである。



a) 焼鈍後







b) 塑性変形後c) 結晶が粗大な場合図 C.1-主な回折環の種類

d) **集合組織** 

#### 445

446

447

## 附属書 D

(参考)

#### 種々の鋼材に対する cosα 法の適用事例

#### 448 D.1 一般

449 cosα 法に対応した市販の応力測定装置を使用して, cosα 法を適用した例を示す。

#### 450 D.2 測定の概要

451 7 種類の鋼材を長さ 150 mm,幅 15 mm,厚さ 3 mm に加工したものを試験片とした。各試験片に対して

452 四点曲げ試験を実施し, cosa 法によって X線で測定した応力(σ<sub>x</sub>)とひずみゲージによって測定した負荷

453 応力(σ<sub>APP</sub>)とを比較した。その際,試験片の中央部分について,升目状に 2 mm 間隔ごとに合計 9 点に対

454 して cosa 法による応力測定を行った。また、試験片の中央部分の長さ方向 40 mm、幅方向 8 mm の範囲に

455 対して,間隔 1 mm ごとに  $\cos \alpha$  法を用いて無負荷状態で残留応力 ( $\sigma_x$ ) をマッピング測定した。

#### 456 D.3 測定結果

- 457 七つの試験片に対する次の測定結果について, 図 D.1~図 D.5 に示す。
- 458 a) 回折環 試験片中央位置の測定から得られた回折環を示す。
- 459 b) cosa 線図 四点曲げ負荷試験時の最小負荷時及び最大負荷時の cosa 線図を示す。
- 460 c) 組織写真 試験片を光学顕微鏡で観察した組織写真を示す。
- 461 d) 負荷応力と測定応力との関係 四点曲げ試験における9点の測定点について,最小負荷から最大負荷
   462 までの負荷応力(σ<sub>APP</sub>)と測定応力(σ<sub>x</sub>)の関係を示す。
- 463 e) 40 mm×8 mm の残留応力分布 マッピング測定結果の残留応力分布 (σ<sub>x</sub>)を示す。
- 464 f) 試験片幅中央ラインの残留応力分布 マッピング測定結果のうち,試験片幅方向中央ライン上の残留
   465 応力分布を示す。
- 466

467

#### 470 D.3.1 高精度な応力測定が可能な場合

471 図 D.1 は、いずれの指標も良好で  $\cos \alpha$  法が有効に適用可能な例である。すなわち、回折環が鮮明であ 472 り、回折 X 線強度が均一に得られている。また、シャープな X 線プロファイルが得られるタイプであり、

473 回折ピーク位置決定精度が得られやすい。cosa 線図は全ての範囲に対して直線的である。



476

474

475

NDIS 4404 : 2021



31

#### 481 D.3.2 測定応力と負荷応力との間にやや差がある場合

482 図 D.2 は、おおむね cosa 法が有効であるが、一部において、負荷応力との差及び隣接する測定位置との
483 差がやや大きい傾向がある。すなわち、回折環及び cosa 線図に関しては問題がないが、cosa 法による応力
484 値にやや問題点が見られる。また、図 D.2 (1/2) では、隣接する9点の応力の測定結果において 100 MPa
485 以上の差が見られた。図 D.2 (2/2) では、負荷応力に対して 40%の差が見られた。これらの原因としては、
486 X 線測定領域において回折にあずかる結晶粒の数が十分ではなく、力学的な均質性及び等方性の仮定が完
487 全に満足されていないことが考えられる。よって、改善方法としては、揺動法の適用などによって X 線照
488 射面積を大きくすることが考えられる。



- 489 490
- 491
32 NDIS 4404 : 2021



- 493

COUL

## 495 D.3.3 一部に支障がある場合

496 図 D.3 は、隣接する測定点間の差又は負荷応力に対する差が更に拡大した例を示している。ただし、各
497 指標のうちの一つだけが不良であり、残りの指標に関してはほぼ正常であった。まず、図 D.3 (1/2) は、
498 隣接する 9 点の応力測定結果に 150 MPa 以上の差が見られた。この試験片では、回折環がスポッティであ
9 り、cosa 線図にもややうねりが見られる。2 番目の試験片は、隣接する 9 点の応力測定結果に 300 MPa 以上の差があると同時に、負荷応力に対しても約 20%の差が発生していた。この試験片の回折環は S/N 比が
501 やや悪いが、cosa 線図の直線性は比較的良好な傾向にある。この場合に対する原因及び対策については、
502 図 D.2 の場合と同様である。



504

503

NDIS 4404 : 2021



## 509 D.3.4 複数の支障がある場合

図 D.4 は、上記の指標のいずれに関しても支障がある場合であり、一部の結果では cosα 線図の非線形性 510 が顕著となっている。まず、図 D.4 (1/3) は、隣接する 9 点の応力測定結果に 150 MPa 以上の差が生じて 511 おり、負荷応力に対して約20%の差が見られた。さらに、回折環のS/Nが比較的悪く、スポッティな傾向 512 もみられ, cosa 線図の直線性も両端部分で悪化している。図 D.4 (2/3)は,隣接する9点の応力測定結果 513 に 200 MPa 以上の差があると同時に、負荷応力に対して約 50 %の差が発生した。cosa 線図の直線性は良 514 好であるが、傾きが大きく引張応力が高い可能性がある。残留応力のマッピング結果を見ると、場所によ 515 る変動がやや顕著になっている。図 D.4 (3/3)は cosa 線図の直線性が悪く、うねりが見られている。隣接 516 する 9 点の応力測定結果では約 200 MPa の差があり、同時に負荷応力に対して約 20 %の差が発生してい 517 た。回折環に関してはスポッティな傾向が見られている。この場合に対する原因及び対策については、図 518 **D.2**の場合と同様である。 519



- 520
- 521
- 522

NDIS 4404 : 2021





## 530 D.3.5 全てにおいて支障がある場合

531 図 D.5 は、全ての測定結果において著しく異常があった例である。この場合に対する原因及び対策につ
 532 いても、図 D.2~図 D.4 の場合と同様であるが、その効果はあまり期待できない可能性が高い。



533

536

## 附属書E

(参考)

537

# 538

## 一般化 cosα 法による X 線三軸応力測定理論

## 539 E.1 本附属書の目的

540 本附属書では、本規格の対象範囲外となる三軸応力測定に cosa 法を適用する場合の方法を参考として提
 541 示する。

## 542 E.1 一般

鋼は、フェライト相、セメンタイト相などの結晶構造及び弾性定数が異なる複数の微細な構成相をもっ 543 ている。このような微細複合組織からなる物体に外力が作用すると、各構成相間においては、力学的な相 544 互作用によって、表面近傍であっても三軸応力状態が各構成相に出現する可能性がある[13]。このとき、各 545 構成相に発生する応力は微視的な平衡関係を保ち、それらの応力を体積平均すると、三軸応力成分は消失 546 し平面応力成分だけが残る。この結果、表面の巨視的な応力状態は平面応力状態となり、従来の考えと整 547 合する。一方,X線応力測定法は,X線回折条件に基づく選択的な性質の影響を受けるため,通常,鋼に 548 対してフェライト相だけの格子面のひずみ状態から応力を算出する。このため、表面の測定にもかかわら 549 ず、その測定結果には三軸応力状態がしばしば観察される。このような背景によって、平面応力状態を前 550 提とする標準の cosa 法の測定理論では, 必ずしも応力の正しい評価ができなくなる場合が存在し得ること 551 となる。さらに, cosα 線図への三軸応力状態の影響は, sin<sup>2</sup>ψ 法とはやや異なることも判明している(**附属** 552 **書**G参照)[14][15]。 553

## 554 E.2 三軸応力測定法の基礎式

555 X 線測定の対象となる構成相に発生している応力状態を、3 種類の垂直応力( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ )及び3 種類の 556 せん断応力( $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ )によって表される式(E.1)のような三軸応力状態とする。

557 回折環の中心角が α の位置から得られる X 線ひずみ ε<sub>α</sub>は, 等方性材料の場合,式(E.1)のような応力状態に 558 おいて式(E.2)で与えられる[7]。

$$\varepsilon_{\alpha} = \sigma_{x} \frac{1}{E} [n_{1}^{2} - \nu(n_{2}^{2} + n_{3}^{2})] + \sigma_{y} \frac{1}{E} [n_{2}^{2} - \nu(n_{3}^{2} + n_{1}^{2})] + \sigma_{z} \frac{1}{E} [n_{3}^{2} - \nu(n_{1}^{2} + n_{2}^{2})] + \tau_{xy} \frac{2(1 + \nu)}{E} n_{1}n_{2} + \tau_{yz} \frac{2(1 + \nu)}{E} n_{2}n_{3} + \tau_{xz} \frac{2(1 + \nu)}{E} n_{1}n_{3}$$
 (E.2)

559 右辺の n<sub>1</sub>~n<sub>3</sub>は、式(A.6)と同様である。式(E.2)が cosa 法を拡張した三軸応力測定法(一般化 cosa 法)の
 560 基礎式である。

### 561 E.3 測定方法及び応力計算方法

## NDIS 4404 : 2021

562 **図 E.1** に示す 3 種類の方向から回折環を測定する場合について考える。まず、平面応力測定の場合と同 563 様に、試料の法線方向から x 軸方向に  $\psi_0$  だけ傾けて 1 個目の回折環を測定する(**図 E.2** 参照)。このとき、  $\phi_0=0^\circ$ かつ  $\psi_0\neq 0^\circ$ である。次に、法線方向から y 軸方向に  $\psi_0$  傾けて 2 個目の回折環を測定する(**図 E.3** 参 565 照)。このとき、 $\phi_0=90^\circ$ かつ  $\psi_0\neq 0^\circ$ である。最後に、法線方向から X 線を照射して 3 個目の回折環を測定 566 する(**図 E.4** 参照)。このとき、 $\phi_0=0^\circ$ かつ  $\psi_0=0^\circ$ である。これらの三つの回折環から、全周の X 線ひずみ  $\varepsilon_a$  をそれぞれ求める。

 568
 注記
 cosa 法を一般化した X 線三軸応力測定理論では,この他に 2 方向だけの回折環を使用する場合,

 569
 又は 4 方向の回折環を使用する場合が考案されている[6][7][16]。このうち,2 方向だけの回折環

 570
 を使用する場合については**附属書** F に詳細を記載した。







## 図 E.2-1 個目の回折環を測定するときの二次元 X 線検出器の配置 ( $\varphi_0=0^\circ, \ \psi_0\neq 0^\circ$ )

572



図 E.3-2 個目の回折環を測定するときの二次元 X 線検出器の配置 ( $\varphi_0=90^\circ, \ \psi_0\neq 0^\circ$ )

573



図 E.4-3 個目の回折環を測定するときの二次元 X 線検出器の配置(φ<sub>0</sub>=ψ<sub>0</sub>=0°)

574 得られた各  $\varepsilon_{\alpha}$ に対し、式(E.2)を用いて式(A.7)のパラメータ  $a_1$ を求めると、 $\varphi_0=0^{\circ}$ かつ  $\psi_0\neq 0^{\circ}$ 及び  $\varphi_0=$ 575 90°かつ  $\psi_0\neq 0^{\circ}$ の回折環の場合に対し、それぞれ式(E.3)及び式(E.4)の関係が得られる[7]。

$$a_1(0) = -\frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x - \sigma_z)\sin 2\psi_0 + 2\tau_{xz}\cos 2\psi_0]\sin 2\eta\cos\alpha \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (E.3)$$

$$a_1(90) = -\frac{1+\nu}{E} \left[ \left( \sigma_y - \sigma_z \right) \sin 2\psi_0 + 2\tau_{yz} \cos 2\psi_0 \right] \sin 2\eta \cos \alpha \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (E.4)$$

576 同様に、式(A.13)の a2 については、式(E.5)及び式(E.6)の関係が得られる[7]。

$$a_2(0) = \frac{2(1+\nu)}{E} \left[ \tau_{xy} \sin\psi_0 + \tau_{yz} \cos\psi_0 \right] \sin 2\eta \sin \alpha \qquad \cdot (E.5)$$

$$a_2(90) = -\frac{2(1+\nu)}{E} [\tau_{xy} \sin\psi_0 + \tau_{xz} \cos\psi_0] \sin 2\eta \sin \alpha \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (E.6)$$

577 φ<sub>0</sub>=ψ<sub>0</sub>=0°の回折環の場合に対しては,式(A.7)及び式(A.13)は式(E.7)及び式(E.8)で表される。

$$a_2(0)_{\psi_0=0} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz} \sin 2\eta \sin \alpha \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (E.8)$$

578 以上の関係式から、次に示す各三軸応力成分を決定することができる。

$$(\sigma_x - \sigma_z) = -\frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left( \frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right) - 2\tau_{xz} \cot 2\psi_0 \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (E.9)$$

$$\left(\sigma_{y}-\sigma_{z}\right)=-\frac{E}{1+\nu}\frac{1}{\sin 2\eta}\frac{1}{\sin 2\psi_{0}}\left(\frac{\partial a_{1}(90)}{\partial \cos \alpha}\right)-2\tau_{yz}\cot 2\psi_{0}\qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (E.10)$$

$$x_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \left( \frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 = 0} \qquad (E.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \left( \frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right) - \tau_{yz} \cot \psi_0$$
  
$$= -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \left( \frac{\partial a_2(90)}{\partial \sin \alpha} \right) - \tau_{xz} \cot \psi_0$$
 (E.13)

579 式(E.9)~式(E.13)の応力成分を式(E.2)に代入すると、式(E.14)の関係が得られる。

580 右辺の X は式(E.15)で与えられる。

$$X = \frac{2(1+\nu)}{E} (\tau_{xy}n_1n_2 + \tau_{yz}n_2n_3 + \tau_{xz}n_1n_3) + \frac{1}{E} (\sigma_x - \sigma_z)[n_1^2 - \nu(n_2^2 + n_3^2)] + \frac{1}{E} (\sigma_y - \sigma_z)[n_2^2 - \nu(n_3^2 + n_1^2)]$$

$$\cdot \cdot (E.15)$$

581 式(E.15)の Xは、式(E.9)~式(E.13)で判明した応力成分及び実験定数 (v, *E*,  $\psi_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $\eta$ , *a*) から算出する 582 ことができる。すなわち、回折環の各点  $\alpha$  の X 線ひずみ  $\varepsilon_a$ に対して、それぞれ、 $\sigma_z$ を算出することが可能 583 になる。その結果、式(E.9)及び式(E.10)から得られる ( $\sigma_x - \sigma_z$ )及び ( $\sigma_y - \sigma_z$ )を用いることで、 $\sigma_x$ 及び  $\sigma_y$ が 584 分離して得られる。以上から、6 個の全ての三軸応力成分が判明する。

585

586

587

## 588

589

## 附属書 F

(参考)

## 一般化 cosα 法による X 線三軸応力測定理論(簡便的方法)

## 590 F.1 本附属書の目的

591 本附属書では、本規格の対象範囲外となる三軸応力測定に cosa 法を適用する場合の簡易的な方法を参考
 592 として提示する。

## 593 F.1 一般

594 回折環から得られる X線ひずみによって測定試料の三軸応力成分を求める方法には複数あり, 附属書 E

595 に示した方法のほかに, 図 F.1 及び図 F.2 に示すような 2 個の回折環を使用する方法も考案されている[6]。

596 これらの方法は、 $\varphi_0$ 、 $\psi_0$ 、 $\alpha$ の値及び符号が測定装置の配置方法によって異なるため、応力計算式もそれに 597 対応してそれぞれ異なる。

## 598 F.2 ψ 基準の場合の応力計算式[6]

**299** 図 **F.1** では  $\psi_0$ を基準とし、測定試料又は測定装置を y 軸回りに  $\pm \psi_0$  だけ傾斜させてそれぞれの位置にお 600 いて回折環を測定する。 x 軸の正の方向に傾斜させる場合を  $+\psi_0$  (又は  $\psi_0 > 0^\circ$ )かつ  $\varphi_0 = 0^\circ$ とし、反対側

601 の傾斜を $-\psi_0$ (又は $\psi_0 < 0^\circ$ )かつ $\varphi_0 = 0^\circ$ と定義する。このとき、回折環の中心角  $\alpha$ の定義は**図 F.1**に示す 602 向きになる。



## 図 F.1-ψ<sub>0</sub>基準の場合の光学系

603 2 種類の回折環から全周の X 線ひずみ  $\varepsilon_a$  をそれぞれ求める。ここで、式(A.7)及び式(A.13)で定義した  $a_1$ 604 及び  $a_2$ を求めるため、新たに次のパラメータ  $b_1 \sim b_4$ を導入する。

$$b_{1} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_{1}(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} + \left( \frac{\partial a_{1}(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_{0} < 0} \right] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.1)$$

$$b_{2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_{1}(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} - \left( \frac{\partial a_{1}(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_{0} < 0} \right] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.2)$$

$$b_{3} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_{2}(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} + \left( \frac{\partial a_{2}(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} < 0} \right] \qquad (F.3)$$
$$b_{4} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_{2}(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} - \left( \frac{\partial a_{2}(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} < 0} \right] \qquad (F.4)$$

605 b<sub>1</sub>~b<sub>4</sub>は, cosa 線図又は sina 線図に対する近似直線の傾きから求めることができる。各関係式を整理して
 606 応力成分を求めると,式(F.5)~式(F.7)が得られる。

$$(\sigma_x - \sigma_z) = -\frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \cdot b_2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.5)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos 2\psi_0} \cdot b_1 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.6)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos \psi_0} \cdot b_3 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.7)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \cdot b_4 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.8)$$

607 
$$\sigma_y$$
に関しては、次のパラメータ $a_3$ を新たに導入する。

$$a_{3} \equiv \frac{1}{2} [(\varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} + \varepsilon_{\pi-\alpha})] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.9)$$

608 式(E.2)及び式(F.9)から a3を計算すると、式(F.10)が得られる(このとき回折環は+ψ0 側のものを使用する)。

$$a_3 = \Phi \cos^2 \alpha + \Psi$$
 (F.10)

609 式(F.10)の右辺の Φ 及び Ψ は, それぞれ式(F.11)及び式(F.12)で表される。

$$\Psi = \sigma_x \left(\frac{2}{E}\right) \left[\cos^2\eta \sin^2\psi_0 - \nu(\sin^2\eta + \cos^2\eta \cos^2\psi_0)\right] + \sigma_y \left(\frac{2}{E}\right) \left[\sin^2\eta - \nu\cos^2\eta\right] + \sigma_z \left(\frac{2}{E}\right) \left[\cos^2\eta \cos^2\psi_0 - \nu(\sin^2\eta + \cos^2\eta \sin^2\psi_0)\right] + \tau_{xz} \frac{4(1+\nu)}{E} \cos^2\eta \sin^2\psi_0$$
(F.12)

610 式(F.11)のΦから,式(F.13)が得られる。

$$\left(\sigma_{y}-\sigma_{z}\right)=-\Phi\frac{E}{2(1+\nu)}\frac{1}{\sin^{2}\eta}+\left(\sigma_{x}-\sigma_{z}\right)\cos^{2}\psi_{0}-\tau_{xz}\sin^{2}\psi_{0}\qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (F.13)$$

611 以上から得られる垂直応力成分間の差及び各せん断応力に対し、式(E.14)及び式(E.15)の場合と同様の手続
 612 きを行うと、σ<sub>x</sub>、σ<sub>y</sub>及び σ<sub>z</sub>が決定できる。こうして、6個の三軸応力成分が全て判明する。

## 613 **F.3** *φ*<sup>0</sup> 基準の場合の応力計算式[16]

614 図 F.2 では φ<sub>0</sub>を基準とし, 図 F.1 と同様な光学系によって得られる 1 個目の回折環のほかに, z 軸回り
 615 に φ<sub>0</sub>を 180°回転させた光学系に対して 2 個目の回折環を測定する。この場合の ψ<sub>0</sub>はいずれの場合も正値
 616 となり, 一方が φ<sub>0</sub>=0°, 他方が φ<sub>0</sub>=180°となる。2 個目の回折環の α の定義は, 図 F.2 に示すように図 F.1
 617 とは 180°異なる。



「図 F.2-φω基準の場合の光学系

618 図 F.2 に示す光学系に対し、 $\varphi_0 = 0^\circ$ 及び  $\varphi_0 = 180^\circ$ の 2 種類の回折環を測定し、それらの結果から次の  $B_1$ 619  $\sim B_4$ を求める。

$$B_1 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} + \left( \frac{\partial a_1(180)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.14)$$

$$B_2 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left( \frac{\partial a_1(180)}{\partial \cos \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \qquad (F.15)$$

$$B_{3} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_{2}(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} + \left( \frac{\partial a_{2}(180)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_{0} > 0} \right] \qquad (F.16)$$

$$B_4 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} - \left( \frac{\partial a_2(180)}{\partial \sin \alpha} \right)_{\psi_0 > 0} \right] \qquad (F.17)$$

620 B<sub>1</sub>~B<sub>4</sub>は, cosα 線図又は sinα 線図に対する近似直線の傾きから求めることができる。各関係式を整理して
 621 応力成分を求めると,式(F.18)~式(F.21)が得られる。

$$(\sigma_x - \sigma_z) = -\frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \cdot B_1 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.18)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\cos 2\psi_0} \cdot B_2 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \cdot B_3 \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (F.21)$$

622 式(F.5)~式(F.8)と式(F.18)~式(F.21)とを比較すると分かるように、図 F.1 及び図 F.2 の光学系に対する応力
 623 計算式は、一部が異なるので注意する必要がある。

624 式(F.9)~式(F.13)を $\varphi_0 = 0^\circ$ の場合の回折環に対する $\varepsilon_\alpha$ に適用すると、( $\sigma_y - \sigma_z$ )が決定できる。以上から得 625 られる垂直応力成分間の差及び各せん断応力に対し、式(E.14)及び式(E.15)と同様の手続きを行うと、 $\sigma_x$ 、 626  $\sigma_y$ 及び $\sigma_z$ が決定できる。こうして、6個の三軸応力成分が全て判明する。

627

629

## 630

## 附属書 G

(参考)

# 631 cosα 線図への三軸応力の影響及び sin<sup>2</sup>ψ 線図との比較

## 632 G.1 本附属書の目的

633 本附属書では、本規格の対象範囲外となる三軸応力状態が発生している場合における cosα 法への影響に
 634 ついて概説する。

## 635 G.2 cosa 線図への三軸応力の影響及び sin<sup>2</sup>ψ 線図との比較

636 図 G.1 及び図 G.2 に、三軸応力状態を含む種々の応力状態に対する cosa 線図と sin<sup>2</sup>ψ 線図とを比較して
 637 示す[14]。いずれも、cosa 法及び sin<sup>2</sup>ψ 法の測定理論に従って計算して得られたものである。





 $\varepsilon_{\varphi \psi}: \sin^2 \psi$ 法において測定される X 線ひずみ値。

**a**)は  $\sigma_x$  だけの場合, **b**)は  $\sigma_x$  及び  $\tau_{xz}$  だけの場合 ( $\tau_{xz} > 0$ ), **c**)は  $\sigma_x$  及び  $\tau_{xz}$  だけの場合 ( $\tau_{xz} < 0$ ), **d**)は  $\sigma_x$  及び  $\sigma_z$  だけの場合 ( $\sigma_x = \sigma_z$ ) を示す。実線は X 線入射角  $\psi_0$  が正の場合を表し,破線は X 線入射角  $\psi_0$  が負の場合を表す。

## 図 G.1-種々の応力状態における $\cos \alpha$ 線図と $\sin^2 \psi$ 線図との比較

638 図 G.1 の a)では、いずれの線図も理論どおりの直線関係となっている。なお、cosa 線図は原点を通るの に対して,  $\sin^2 \psi$ 線図は切片をもつ。図 G.1 の b)及び c)では,  $\tau_x$ が存在すると  $\sin^2 \psi$ 線図はだ円状の曲線と 639 640 なりいわゆる ψ スプリットとなっているが, cosa 線図はだ円にはならず直線のままであることが分かる。 641 ただし、Txz が存在すると、Woの正負に対して直線の傾きが異なり、2本の直線に分離する傾向がある<sup>10</sup>。 なお, τ<sub>xz</sub>の符号が変わると,分離した両部分が上下逆に位置するようになる。図 G.1 の d)では,σ<sub>z</sub>が発生 642 643 しても両線図共に直線性は維持されることが分かる。このように、 $\sigma_x = \sigma_z$ であるときには、 $\cos \alpha$ 線図及び 644 sin<sup>2</sup>ψ線図は共に傾きがゼロの直線となる。このため、平面応力測定理論を用いて応力計算を行うと σ<sub>x</sub>は 0 645 MPa と算出され、 $\sigma_x$ 及び  $\sigma_z$ の存在が評価できない結果となる。なお、 $\sin^2 \psi$ 線図においては、切片がゼロ 646 応力状態のときと異なるため、精密な測定が可能であれば σω及び σωの存在が評価できる可能性が残る。し 647 かし、cosa線図に関しては、切片、傾き共にゼロ応力のときと同様で区別が困難であり、σx及びσzの存在 648 を評価することは極めて困難になる。

## 649 **注**<sup>10)</sup> $\psi_0$ の正負によって cosa 線図が直線に分離することから、「 $\psi_0$ リニアスプリット」と呼ぶことがで 650 きると思われる。これは、 $\psi$ の正負によって sin<sup>2</sup> $\psi$ 線図が分離し、だ円を形成する性質に対する

651

ものである。



## 記号説明

 $\varepsilon_{\varphi \psi}: \sin^2 \psi$ 法において測定される X 線ひずみ値。

**a)**は $\sigma_x$ 及び $\sigma_z$ だけが存在している場合 ( $\sigma_x = -\sigma_z$ ), **b**)は $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ 及び $\tau_{xz}$ だけの場合 ( $\sigma_x = \sigma_z$ ), **c**) は $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ 及び $\tau_{xz}$ だけの場合 ( $\sigma_x = -\sigma_z$ )を示す。実線はX線入射角  $\psi_0$ が正の場合を表し、破線は

X線入射角 yo が負の場合を表す。

## 図 G.2-種々の応力状態における cosa 線図と sin<sup>2</sup>ψ 線図との比較 2

- 652 図 G.1 及び図 G.2 から判明する傾向をまとめると次のとおりとなる。
- 653  $\tau_{xz}$ が存在すると sin<sup>2</sup>  $\psi$  線図はだ円状の曲線 ( $\psi$  スプリット)となるが, cosa 線図は直線のままである。 654 cosa 線図は  $\psi_0$  に依存して傾きが異なる直線となり,分離する ( $\psi_0$  リニアスプリット)。
- 655  $(\sigma_x \sigma_z) = 0$ のとき,  $\tau_{xz}$ が存在すると sin<sup>2</sup> $\psi$  線図は横軸に平行なだ円となる。この場合, cosa 線図は直 656 線のままであり,  $\psi_0 > 0^\circ$ 及び  $\psi_0 < 0^\circ$ の分布はいずれも直線分布であり, 傾きの絶対値は等しく, 傾き 657 の符号は正負が逆になる。この傾向は,  $\tau_{yz}$ に関しても基本的に同様である。
- 658  $(\sigma_x \sigma_z) = 0$ かつ  $\tau_{xz} = 0$ のとき,  $\sin^2 \psi$ 線図及び  $\cos \alpha$ 線図は共に傾きがゼロの直線となる。また,  $\cos \alpha$ 線 659 図は常に切片がゼロとなるのに対し,  $\sin^2 \psi$ 線図は,  $\sigma_x = \sigma_z \neq 0$ 以外は切片が有限の値をとる。この傾 660 向は,  $\tau_{yz}$ に関しても基本的に同様である。
- 661

## 附属書 H

## (参考)

## 664 665

## cosa 線図への深さ方向の応力勾配の影響

## 666 H.1 一般

667 sin<sup>2</sup>ψ 法及び cosa 法では,測定領域内に応力勾配がなく,応力が一定であることを前提としている。な
 668 お,応力勾配が存在すると sin<sup>2</sup>ψ 線図が非線形になる場合があり,測定誤差の一因となる。一方, cosa 線
 669 図に対する応力勾配の影響は, sin<sup>2</sup>ψ 線図の場合に比べると小さいことが判明しているが,測定精度への影
 670 響については注意を要する。

## 671 H.2 測定理論による計算結果の比較

672 図 H.1 に、深さ方向に急激な応力勾配が存在する場合に対して、 $\cos \alpha$ 線図と $\sin^2 \psi$ 線図とを比較して示 673 す[14]。ここでは、 $\sigma_x$ だけが存在している場合を取り上げている。また、応力勾配は直線的な変化であると

674 仮定し、表面の応力と深さに関する変化率(応力勾配)の2種類の値で表すことができる場合を対象とし 675 ている。



### 記号説明

σ<sub>110</sub>:表面応力を表す。単位は MPa。

An: 応力勾配を表す。単位は MPa/µm。

a)は深さ方向に負の応力勾配が存在する場合,b)は応力勾配がない場合,c)は正の応力勾配が存在する場合の結果 を示す。(1列目:表面の応力及び深さ方向の応力勾配,2列目:深さ方向に関するオリジナルの分布図,3列目: cosa線図,4列目:sin<sup>2</sup>w線図)

## 図 H.1-深さ方向に応力勾配が存在する場合の cosα 線図及び sin<sup>2</sup>ψ 線図

676 図 H.1 から,  $\sin^2 \psi$ 線図では応力勾配の正又は負に応じて凸又は凹の形状の湾曲が生じる傾向があるが, 677  $\cos \alpha$ 線図に関してはいずれの場合もほぼ直線的であることが分かる。このことから,深さ方向の応力勾配 678 の発生の有無及びその大小を  $\cos \alpha$ 線図から評価することは困難である。また,図 H.1 の a)における点線 679 で示したケース ( $\sigma_{110}$ =500 MPa かつ  $A_{11}$ = -100 MPa/µm の場合)では,  $\cos \alpha$ 線図は横軸とほぼ重なる分布

52

680 となり、ゼロ応力状態のときと同様な cosα 線図となる。換言すると、表面に 500 MPa の応力が存在し、深
 681 さ方向に対して 1 μm 当たり-100 MPa (A<sub>11</sub>=-100 MPa/μm)の応力勾配が存在するにもかかわらず、標準
 682 の cosα 法理論からは、ほぼゼロ応力が算出される結果となる。同様に、図 H.1 の c)の点線のケースにおい
 683 ても類似した傾向が見られている。

685	附属書

686

## 687

(参考) X線侵入深さ

## 688 I.1 一般

689 X 線は測定試料内で吸収されるため、表面から深い位置で回折した場合ほど回折 X 線の強度が弱くな 690 る。また、 $\cos a$  法による応力測定では、通常、X 線入射角によって回折環上の各点における X 線侵入深さ 691 が異なり、その他に回折角及び線吸収係数にも依存する。X 線によって測定される応力値が測定試料のい 692 かなる深さまでの範囲であるかについては厳密には未解明であるが、一つの目安として、最表面における 693 回折 X 線強度に対して 1/e に減衰する深さを X 線侵入深さとみなす場合が多い<sup>11)</sup>。このような深さは、測 定試料の板厚全体から得られる回折強度に対して、1-1/e ( $\Rightarrow 0.632$ )の回折強度が得られる深さとも等しい 695 <sup>12)</sup>。

696 **注記** 通常, X 線応力測定における X 線侵入深さは,数 μm から数+μm 程度とされている。

697 注 1) 単に、数学上の簡潔さの理由で採用されているに過ぎない。

698 注<sup>12)</sup> 分野によって, 0.9 倍又は 0.99 倍を採用している分野も存在する。

## 699 I.2 計算方法

700 回折環の中心角 α の部分に到達する回折 X 線について考え、それが測定試料の深さ z の位置で回折した
 701 場合に対し、測定試料の内部を通過した距離 *l* は式(I.1)によって計算できる[12]。

702

- こで、
   *l*<sub>1</sub>: 入射 X 線の通過距離

   *l*<sub>2</sub>: 回折 X 線の通過距離
- 703 Lは,式(I.2)で表される。

$$L = \left(\frac{1}{\cos\psi_0} + \frac{1}{\cos2\eta\cos\psi_0 + \sin2\eta\sin\psi_0\cos\alpha}\right) \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad \cdots \qquad (I.2)$$

704 入射 X 線の強度を I<sub>0</sub>,回折時の X 線強度の減衰率を k,線吸収係数を µ とすると,式(I.1)の距離 l を通
 705 過した回折 X 線の強度は式(I.3)で表される[11]。

706 X線侵入深さの定義から,

707 となり、式(I.4)が成立するときのzがX線侵入深さである。これをTで表すと式(I.5)となる。

$$T = \frac{1}{\mu} \left( \frac{1}{\cos\psi_0} + \frac{1}{\cos 2\eta \cos\psi_0 + \sin 2\eta \sin\psi_0 \cos\alpha} \right)^{-1} \qquad (I.5)$$

708 種々の X 線入射角に対して,鉄の測定試料の(211)回折面を CrKα 線によって測定した場合の X 線侵入
 709 深さを式(I.5)によって計算した結果を図 I.1 に示す。この条件では、X 線侵入深さはおおむね 2 μm~6 μm
 710 となることが分かる。



Central angle  $\alpha$  (deg)

測定試料:鉄,特性X線:CrKa,回折面:(211),X線入射角 $\psi_0$ :0°,15°,30°,45°,60°,線吸収係数: $\mu$ =0.085 $\mu$ m<sup>-1</sup>,回折角2 $\theta$ :156.4°,2 $\eta$ :23.6°の条件による計算値を示す。

図 I.1-種々の X 線入射角に対する cosa 法における X 線侵入深さ

714 (規定)

# 715

# 回折 X 線強度の補正

## 716 J.1 一般

717 測定によって得られた X 線プロファイルは, J.2 による補正式を用いて補正する。

## 718 J.2 補正式

719二次元 X 線検出器上の点(x, y)において測定される回折 X 線の強度 po(x, y)は、式(J.1)によって補正する720[17]。

721

722

		$n_{c}(x \ y)$	補正後の回折 X 線(	の強度	
	22()	L:	ローレンツ補正因子	A[18]	
		P:	偏り補正因子[17]		
		A:	吸収補正因子[12]		
		G :	幾何学的補正因子[]	19]	
		Ar:	空気補正因子[20]		
各補正因子は次の式に。	よる。	6			
	$L(\theta) = \frac{1}{\sin^2 \theta}$	•••			•••••(J.2)
	$P(\theta) = \frac{1 + \cos^2}{2}$	2 <u>0</u> .		· · · · · · · · ·	••••••(J.3)
	$A(\psi_0,\eta,\alpha)=\frac{1}{\left(\frac{1}{c}\right)}$	$\frac{1}{\cos\psi_0} + \frac{1}{\cos\psi_0}$	$\frac{1}{s\eta\cos\psi_0 + \sin\eta\sin\psi_0 c}$	$\frac{1}{\cos \alpha}$	•••••(J.4)
	$G(\theta) = \cos^2 2\theta$			•••••	•••••(J.5)
×.	$A_r(x,y) = \exp\left[\right.$	$\mu_{Air} \cdot \left(\sqrt{C}\right)$	$\overline{L^2 + x^2 + y^2} - CL\Big)\Big]$		•••••(J.6)

723 なお、 $\mu_{Air}$ は空気の吸収係数を表し、CrKa線の場合、 $\mu_{Air}=0.032$  cm<sup>-1</sup>である[20]。

726	附属書 K
727	(参考)
728	電解研磨

## 729 K.1 一般

730 電解研磨を施す際には、測定試料の材質又は実施条件によって、表面及び粒界の状態が変化し、回折環
731 が変化する場合(例えば、結晶粒界を優先的に侵食するような条件の場合など)があることに注意して行
732 う。

## 733 K.2 電解研磨液の例

734 電解研磨液の一例を次に示す[20]。

- 735 ・ 蒸留水及び塩化ナトリウムの混合液
- 736 ・ 酢酸, 過塩素酸及び蒸留水の混合液
- 737 ・ 塩化アンモニウム飽和水溶液及びグリセリンの混合液
- 738
- 739
- Ripcoule

NDIS	4404	•	2021	

740	附属書L
741	(参考)

## 種々の測定材料に対するX線条件一覧

743

742

表L.1-主な工業材料に対するX線応力測定条件の一覧

本測 会社 約	<b> <u> </u> </b>	格子定数	時州 V 綽	同拆声	回折角 <sup>a)</sup>	X 線的	E	
1汉(则)(三小) 14	和阳阳中卫	(nm)	竹主人称	凹게面	(°)	弾性定数	(GPa)	
			CrKa	211	156.4	175 <sup>b)</sup>	224	0.280
フェライト系鋼材	BCC	0.2866	<b>CoK</b> α	310	161.9	137 <sup>c)</sup>		
			νκβ	211	154.9	175	224	0.280
オーステナイト区			CrKβ	311	148.5	148 <sup>b)</sup>	193	0.300
マテンレフィ	FCC	0.3592	MnKα	311	152.3	148	193	0.300
ハノンレヘ剄			VKα	220	160.9			
	FCC	0.4049	CrKa	222	157.0	54	72	0.341
アルミニウム			CuKa	422	137.7			
			CoKα	331	149.0			
			CuKa	420	145.0			
銅	FCC	0.3615	CrKβ	311	146.0			
			VKα	220	156.9			
			CrKβ	311	158.3	164	215	0.305
ニッケル	FCC	0.352	CuKa	331	145.0			
			CuKa	420	156.2			
チタン(α 相)		a:0.205	CuKa	213	139.6	84	111 <sup>d)</sup>	0.320 <sup>d</sup> )
	HCP	a.0.295	CuKa	302	148.8			
		2.0.4080	VKα	103	140.0			
注記 空欄は値が不	「明なもの。							

注記 空欄は値が不明なもの。

注 <sup>a)</sup> パルステック工業株式会社製 μ-X360の計測ソフトウェアで計算された値。

注<sup>b)</sup> パルステック工業株式会社製μ-X360の標準測定条件。

注: 田中, 鈴木, 秋庭, "残留応力の X 線評価", p.284, 養賢堂, (2006).

注<sup>d)</sup>株式会社 IHI の標準測定条件。

# 附属書 M (参考) *t* 分布表

748

746

747

749

750

## 表 M.1-t 分布表

				信頼	<b>〔率 1-α'</b>		
		0.500	0.683	0.900	0.950	0.990	0.999
	1	1.0000	1.8395	6.3138	12.7062	63.6567	636.6192
	10	0.6998	1.0533	1.8125	2.2281	3.1693	4.5869
	20	0.6870	1.0263	1.7247	2.0860	2.8453	3.8495
	40	0.6807	1.0133	1.6839	2.0211	2.7045	3.5510
	60	0.6786	1.0091	1.6706	2.0003	2.6603	3.4602
	80	0.6776	1.0069	1.6641	1.9901	2.6387	3.4163
	100	0.6770	1.0057	1.6602	1.9840	2.6259	3.3905
	105	0.6768	1.0054	1.6595	1.9828	2.6235	3.3856
	110	0.6767	1.0052	1.6588	1.9818	2.6213	3.3812
	115	0.6766	1.0050	1.6582	1.9808	2.6193	3.3771
	120	0.6765	1.0048	1.6577	1.9799	2.6174	3.3735
	125	0.6765	1.0047	1.6571	1.9791	2.6157	3.3701
I-n	130	0.6764	1.0045	1.6567	1.9784	2.6142	3.3669
奥	135	0.6763	1.0044	1.6562	1.9777	2.6127	3.3641
Ē	140	0.6762	1.0042	1.6558	1.9771	2.6114	3.3614
	145	0.6762	1.0041	1.6554	1.9765	2.6102	3.3589
	150	0.6761	1.0040	1.6551	1.9759	2.6090	3.3566
	155	0.6761	1.0039	1.6547	1.9754	2.6079	3.3544
	160	0.6760	1.0038	1.6544	1.9749	2.6069	3.3524
	165	0.6760	1.0037	1.6541	1.9744	2.6060	3.3505
$\sim$	170	0.6759	1.0036	1.6539	1.9740	2.6051	3.3487
	175	0.6759	1.0035	1.6536	1.9736	2.6042	3.3470
	180	0.6759	1.0034	1.6534	1.9732	2.6034	3.3454
	185	0.6758	1.0034	1.6531	1.9729	2.6027	3.3439
	190	0.6758	1.0033	1.6529	1.9725	2.6020	3.3425
	195	0.6757	1.0032	1.6527	1.9722	2.6013	3.3411
	200	0.6757	1.0032	1.6525	1.9719	2.6006	3.3398

記号説明

α':有意水準又は危険率

n:測定データの数

## 751 参考文献

- 752 [1] 平,田中,山崎,材料, vol.27, No.294, pp.251-256, (1978).
- 753 [2] 小栗,田中,岡野,村田,川上,佐藤,材料, vol.66, No.7, pp.488-494, (2017).
- 754 [3] 日本材料学会,改著X線応力測定法,養賢堂,(1981).
- [4] SAE, Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction, 2003 Edition, SAE International, (2003).
- 756 [5] 佐々木, 広瀬, 材料, vol.44, No.504, pp.1138-1143, (1995).
- 757 [6] 佐々木, 広瀬, 日本機械学会論文集 A, 第 61 巻, 第 590 号, pp.2288-2295, (1995)
- 758 [7] 佐々木, 高橋, 佐々木, 小林, 日本機械学会論文集 A, 第 75 巻, 第 750 号, pp.219-227, (2009).
- 759 [8] D. Delbergue, D. Texier, M. Levesque and P. Bocher, J. Appl. Cryst., 52, pp.828-843, (2019).
- [9] S. Ejiri, H. Ohba and T. Sasaki, Study on the Statistical Errors in X-ray Stress Measurement with Two Dimensional Detector, Materials Science Forum, vol.941, pp.2373-2377, (2018).
- 762 [10] 江尻,大場,佐々木: cosa 法による応力値の信頼区間推定,第1回 cosa 法方式 X 線残留応力測定
   763 法研究会,日本非破壊検査協会,2018 年 8 月.
- 764 [11] B. D. カリティ(村松訳),新版 X 線回折要論,アグネ承風社,(1999).
- 765 [12] 佐々木敏彦,広瀬幸雄:イメージングプレートを用いた a 基準法による X 線三軸応力測定,日本材
   766 料学会,第 31 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集,(1995), pp.20-25.,及び,佐々
   767 木,広瀬,日本機械学会論文集 A,第 71 巻,第 704 号, pp.670-676,(2005).
- [13] I. C. Noyan, J. B. Cohen, Residual Stress Measurement by Diffraction and interpretation, Springer Verlag,
   (1987) .
- 770 [14] 佐々木,三井,柳,幸田,江尻,日本材料学会・第51回X線材料強度に関するシンポジウム,(2017).
- [15] T. Sasaki, Y. Maruyama, H. Ohba and S. Ejiri, The Journal of Instrumentation, vol.9, No.7, C07006, (2014).
- 772 [16] 田中, 材料, vol.67, No.7, pp.686-693, (2018).
- [17] B. D. Cullity and S. R. Stock, Elements of X-Ray Diffraction, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, Inc., (2001).
- [18] W. Yinghua, J. Appl. Cryst. 20, pp.258-259, (1987).
- [19] A.Kömpfe, B. Kömpfe, S. Goldenbogen, B. Eigenmann, E. Macherauch and D.Löbe, Advances in X-ray
   Analysis, vol.43, pp.54-65, (2000) .
- [20] B.B. He, Two-Dimensional X-Ray Diffraction, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2018).
- 778[21] 松尾,秋田,黒田,日本材料学会・第50回X線材料強度に関するシンポジウム,pp.117-119,(2017796).

783

784

## NDIS 4404 : 2021

# cosα 法による X 線応力測定通則 解 説

785

786 この解説は、規格に規定・記載した事柄を説明するもので、規格の一部ではない。

787 この解説は、日本非破壊検査協会が編集・発行するものであり、これに関する問合せ先は日本非破壊検788 査協会である。

### 789 1 **制定の趣旨**

790 非破壊かつ非接触で残留応力を測定できる手法の一つである X 線応力測定法は,測定対象が結晶性の材
791 料であることを前提とし, X 線回折現象を利用する方法である。X 線ビームの照射によって測定部から発
792 生する回折 X 線を計測して分析し,ひずみから応力状態を求める。このような X 線応力測定理論におい
793 て,最近,日本を中心として従来法の sin<sup>2</sup> W 法とは異なる cosa 法の使用が普及してきており,測定時間の
794 短縮,装置の小型化に伴う可搬性の向上等が進み,製造現場,屋外の実機及び実構造物への適用が可能に
795 なった。

r96 sin<sup>2</sup>ψ 法は、元々、ドイツ、アメリカにおける研究がその起源とされているのに対し、cosa 法は日本の平
 r97 らの研究によるものである。また、その装置化においても日本の企業が世界に先駆けて実現している。ま
 r98 た、現在までに cosa 法の海外製の装置は皆無である。さらに、cosa 法の基礎研究に関しても日本の研究者
 r99 による貢献が大である。このように、我が国がこの分野の発展に広くかつ大きく貢献してきていると言っ
 r00 ても過言ではない。

801 しかし, sin<sup>2</sup>ψ 法に関しては日本国内外に測定標準が制定されて久しいのに対し, cosa 法は 2012 年以降
 802 に普及が拡がった比較的新しい X 線応力測定技術であるため,まだ標準化がなされておらず,遅れている
 803 と言わざるを得ない状況である。このことから, cosa 法を一層工業的に有効なものとするため,測定装置,
 804 測定条件において一定の基準を与えることを目的として制定した。

#### 805 2 制定の経緯

806 日本非破壊検査協会では、cosa 法の普及促進のため規格の制定を目標に 2014 年 4 月に保守検査部門に
807 現場指向 X 線残留応力測定法研究委員会を設立し活動を行ってきた。さらに、2020 年 4 月から cosa 法及
808 び二次元検出器による X 線応力測定法研究会に発展的に継承した。同年には cosa 法による X 線応力測定
809 通則原案作成委員会を設置し、原案を作成した。

## 810 3 審議中に特に問題となった事項

811 今回のこの規格の審議において問題となった主な事項及び審議結果は、次のとおりである。

812 **3.1 Kβフィルタ (8.3**)

#### NDIS 4404:2021 解説

813 従来法である sin<sup>2</sup> $\psi$  法では K $\beta$  フィルタを使用して X 線を測定サンプルに照射することが一般的となっ 814 ている。しかし、二次元検出器を用いる cosa 法では K $\beta$  フィルタが大型になる問題が発生し、また、X 線 815 強度が低下することでその特長である測定時間の短縮化が失われることとなる。検証データを基に吟味し 816 た結果、K $\beta$  フィルタを取り付けない条件の場合でもほとんど測定結果に支障はないことを確認し、この規 817 格では K $\beta$  フィルタの使用を要求しないこととした。

### 818 3.2 X 線入射角 (8.4)

819 測定理論上,X線入射角は45°が最適となるが、実際の測定においては材料によるX線強度の減衰の影
 820 響が生じるため、25°~45°の範囲を許容することとした。

### 821 3.3 ピーク位置決定法 (9.5)

822 従来法である sin<sup>2</sup>ψ 法では半価幅中点法を使用することが推奨されていたが, cosα 法では半価幅中点法
 823 に加え,ガウス関数近似法及びローレンツ関数近似法を許容した。

### 824 3.4 パラメータ *a*1 及び *a*2 の表記(9.7)

825 これらのパラメータは幾つかの表記方法があり統一がなされていない。この規格では,実用性を考慮し,
826 より簡潔な表記を用いることとした。

### 827 **3.5 報告**(10)

828 次の各事項については,実用的観点からとくに異常が無い限り提示しなくともよいこととした。

829 すなわち,測定面積(X線照射面積),二次元X線検出器の画素サイズ,測定試料と二次元X線検出器

830 との距離,  $\alpha$ の個数又は  $\cos \alpha$  の範囲及び間隔, 応力定数 ( $K_{\sigma}$ ,  $K_{\tau}$ ), 回折環画像, X線プロファイル,  $\cos \alpha$ 

831 線図, sina 線図, a ごとの最大 X 線回折強度, a ごとの半価幅, ゼロ応力試験片及び応力付与試験片の検

832 定結果,回折環画像データに対する平滑化処理条件,回折X線強度に対する補正処理方法。

### 833 4 特許権などに関する事項

834 この規格に基づき平面応力状態の応力を測定する上で実施が必須となる特許権等を,国立大学法人金沢835 大学は所有していない。

836 金沢大学が保有している特許 5339253 号は、この規格の対象範囲外となる三軸方向の応力測定に cosa 法

837 を適用する場合に実施する可能性のある特許であり、本規格に従うにあたり実施必須の特許ではないこと838 を確認した。

#### 839 5 構成要素について

## 840 5.1 適用範囲

841 この規格は、マルテンサイト系鋼材、フェライト系ステンレス鋼材、マルテンサイト系ステンレス鋼材
842 にも適用可能と考えられる。ただし、現時点では実証データが十分ではないためこの通則に含める段階に
843 はないと判断した。

## 844 **5.2 結晶粒**(7.2.1)

#### NDIS 4404:2021 解説

3

845 回折環がスポッティになる場合には、X線入射角又はX線照射面積を増やすことが可能な揺動法の適用
846 が有効となる場合がある。X線入射角に関する揺動は、集合組織の影響に対しても一定の効果が期待でき
847 るが、回折環の斑点状の改善効果には限界もある。一方、X線照射面積に関する揺動は、集合組織に対す
848 る改善効果は期待できないが、X線照射面積の増加量に対してより自由度がある。ただし、その場合に測
849 定される応力値は、X線照射面積全体に対する平均値となることに注意する。

## 850 5.3 **電解研磨・化学研磨**(7.2.6)

851 電解研磨については、研磨液の種類、電流・電圧等の設定条件、研磨する面積及び深さの選択に関する
852 判断が必要である。これに対して、現状では統一的な推奨範囲を指定するための明確な根拠が不足してい
853 るため、この規格での規定は見送ることとした。

## 854 **5.4 Kβフィルタ (8.3)**

855 古くから物質の結晶構造を調べるために使われている X 線回折法(XRD)では、測定対象試料に特性 X
856 線を照射し、透過<u>又は</u>反射する回折角を測定し、ブラッグの法則を適用することで格子面間隔を求めるこ
857 とができる。この XRD の技術を応用し、回折角を測定して残留応力を評価できるようにした技術が sin<sup>2</sup>ψ
858 法である。XRD で回折角を測定する場合、X 線管球から複数の特性 X 線が出力されるため、試料の種類や
859 格子面によっては回折角が互いに接近し、時には重なってしまう問題がある。X 線管球から出力される特
860 性 X 線の種類は、X 線管球のターゲット(陽極)に依存して種々のエネルギーを有する X 線が出力され
861 る。特に Ka、Kβ と呼ばれる特性 X 線は比較的強度が高い。

862 鉄鋼材料の残留応力測定でよく用いられるターゲットを Cr とした X 線管球 (Cr 管球)を例に挙げると, 863 Kβ線は Ka線の 1/10 程度の出力があり,測定を行う上で,対象試料によっては回折角が重なってしまい障 864 害が生ずる。そのため Kβ線を優先的に減衰させるフィルタを用いている。これを一般的に Kβフィルタと 865 いう。フェライト鋼を sin<sup>2</sup> $\psi$  法を適用して応力測定する場合においては, Cr 管球を用い, X 線検出器の手 866 前に Kβフィルタを用いることが一般的であるが, cosa 法を用いた残留応力測定における Kβフィルタの 867 必要性について検討を行った。

868 Kβ線を優先的に減衰させるために広く用いられるのは、X線の吸収端を用いた物質であり、Kα線を透
869 過させ Kβ線を吸収させるためには、X線ターゲットより1つ低い原子番号の材料をX線光路上に挿入す
870 ればよい。X線ターゲットが Cr の場合を例にとると、Kβフィルタに用いられる材料はV(バナジウム)
871 である。Vの質量吸収係数は、CrKα線 74.7 cm<sup>2</sup>/g、CrKβ線 479 cm<sup>2</sup>/g と6倍近い減衰比が得られる。
872 図1は、Vの厚みに対するKα線及びKβ線の減衰率を比較した結果である。



破線は CrKα線の減衰率を表し、実線は CrKβ線の減衰率を表す。

解 3

4 NDIS 4404:2021 解説

## 解説図1-Vの厚みと特性X線の減衰率

cosa 法を用いて鉄鋼材料の残留応力測定を行う際に用いられる特性 X 線とミラー指数との関係を解説 873 表1及び解説表2に示す。なお cosa 法を用いる場合,原理上,回折角が120°以下は取得できないので省略 874 875 した。解説表1からターゲットが Crの場合、フェライト・オーステナイトの混相である2相ステンレスの 測定時において、オーステナイト相の(220)回折面における Kα線の128.9°を用いて残留応力測定を行う 876 と、フェライト相の(211)回折面における Kβ線の 125.9°が重なり、回折角の測定に影響を与えるため Kβ 877 878 線をカットする必要がある。さらにターゲットを Co にした場合,フェライト相の(310)回折面における Kα線の162.4°とフェライト相の(222)回折面における Kβ線の156.7°は比較的近く、さらにフェライト相 879 880 の(220)回折面における Ka線の 124.2°と,フェライト相の(310)回折面における Kβ線の 126.8°は,回 折角が互いに近くなるため Kβ線をカットする必要が生じてくる。 881

882

特性X線	鉄鋼材の種類	ミラー指数 hkl	回折角(°)
C+V x 纳	フェライト系	211	156.4
CrKa 禄	オーステナイト系	220	128.9
C K0 始	フェライト系	211	125.9
Сткр ҡ	オーステナイト系	311	148.5

883

解説表 2-鉄鋼材料の回折角(X 線管球 Co)

特性 X 線	鉄鋼材の種類	ミラー指数 hkl	回折角(°)
	フェライトズ	310	162.4
CoKa 線	ノエノイド示	220	124.2
	オーステナイト系	400	171.9
СоКβ 線	7,5/17	222	156.7
	ノエノイト糸	310	26.8
	オーフテナイトズ	331	159.1
		400	129.0

884 次に回折角が重ならないフェライト相の(211)回折面における CrKα 線の測定時においても Kβ フィル

885 タが必要か,実際に測定して検証する。**解説図1**から Kβフィルタの厚みは 0.015 mm 程度で Kβ が十分減

886 衰することが見て取れるので, Kβ フィルタとして厚み 0.015 mm の V を X 線光路上に挿入することにし
 887 た。供試材として次の 3 つを用意した(解説図 2 参照)。

888 a) パルステック工業株式会社製キャリブレーション用粉末 E0103000137

889 b) 新東工業株式会社製ショットピーニング品 (SM490 材) Lot.15019

890 c) 新東工業株式会社製ショットピーニング品 (SUP9 材) Lot.15012



891 Kβ フィルタの挿入有無で測定を行い、X線プロファイルを比較した。Kβ フィルタを挿入すると、解説
 892 図1に示すように Kα線も半分程度に減衰してしまうため、回折ピークの最大強度が等しくなるよう X線

893 照射時間を調整して X線プロファイルを比較した。解説図3に X線プロファイルの比較結果を示す。いず

894 れも Kβ フィルタを挿入した方が Kβ 線からの散乱が少なくなり, バックグラウンドが減少していること

895 が見て取れる。一般的に,

896 (回折ピーク強度)=(回折ピークの最大強度)-(バックグラウンド)

897 と定義したとき,回折ピーク強度の増加に伴い測定精度が向上するので,Kβフィルタを挿入すると測定精

898 度が向上すると言える。



点線は Kβ フィルタなしの場合,実線は Kβ フィルタありの場合を表す。X 線照射時間はそれぞれ次のとおり である。a)Kβ フィルタなし:15 秒, a)Kβ フィルタあり:30 秒, b)Kβ フィルタなし:17 秒, b)Kβ フィルタあり:40 秒, c)Kβ フィルタなし:19 秒, c)Kβ フィルタあり:40 秒。

## 解説図 3-X線プロファイルの比較

899 次に、Kβフィルタの有無で100回繰返測定を行った結果を解説図4に示す。Kβフィルタの有無では、
 900 測定値及び繰返測定精度ともに差は見て取れない結果となった。本実験結果から、Kβフィルタを挿入した

901



100回全ての応力測定結果について、●は Kβ フィルタなしの場合、×は Kβ フィルタありの場合としてそれぞれの応力値を表す。

解 5

6 NDIS 4404:2021 解説

## 解説図 4-100 回の応力測定結果

902 しかしながら本実験では、Kβフィルタを挿入した際に X 線照射時間を倍程度にしていることを考察し
903 てみる。解説図5に X 線照射時間を変えて 100 回繰返測定を行い、その標準偏差を計算した結果を示す。
904 X 線照射時間と回折ピーク強度は正の線形相関があり、X 線照射時間を長くすると回折ピーク強度が増加
905 し繰返精度が向上していくことが見て取れる。このことから、Kβフィルタを挿入したときの回折ピーク強
906 度の増加は、X 線照射時間を長くしたときのピーク強度の増加に比べて極めて小さいと言える。



●及び実線はX線照射時間と100回測定結果の応力値標準偏差との関係,×及び点線はX線照射時間とピーク強度との関係を表す。

#### 解説図 5-X 線照射時間と繰返精度の関係

907 Kα線と Kβ線からの回折が互いに干渉しないことが明らかな場合においては、Kβフィルタを用いない

908 ことで, Kβフィルタを用いた場合のほぼ半分の X 線照射時間でほぼ同等なピーク強度を得ることができ, 909 その結果,測定精度もほぼ同等になる。したがって, Kβフィルタを用いない方が X 線照射時間を半分程

910 度にでき実用的である。

## 911 5.5 X 線照射面積(8.5)

912 X線照射面積を制限するには、次の2通りがある。

913 a) ビニールテープ又は薄い鉛のシートを測定部に取り付ける方法(以下,マスキングという)

914 b) 入射 X線用のコリメータの内径の異なるものを選択して調整する方法

915 従来の sin<sup>2</sup>ψ 法では両者の採用が可能であったが, cosa 法の適用では b)を推奨することとした。cosa 法
916 では回折環の中心位置の精度が重要であるが, a)では中心位置の信頼性が損なわれ, 測定される応力値に
917 誤差が生じるおそれがあるため不採用とした。また, a)では入射 X 線ビームとマスキング範囲との位置関
918 係も測定結果に影響することが考えられ,実用的ではないことも懸念点であった。

## 919 5.6 回折環の中心角に関するデータ数及び測定間隔(8.8)

920 cosa 法によって応力を決定するためには cosa 線図を測定データから作成し,直線近似式から得られる
 921 傾きの値を知る必要がある。cosa 線図は原点を通る直線となることが測定理論から明らかになっているの
 922 で, cosa 線図上に最低1点のデータがプロットできれば必要な傾きが判明する。また,データのプロット
 923 点数を増やすことで測定精度の信頼性が向上する。一方,最適なプロット点の個数や cosa 線図の横軸の最
 924 適な範囲については明確な根拠が不足しており,この規格での規定は見送ることとした。

925 5.7 応力定数(9.7.5)

X線的弾性定数については、E/(1+v)、-E/vとして表される。いずれも  $\sin^2 \psi$  法の測定理論に基づいて 926 927 導出されたものである。なお、cosa 法の測定理論においては-E/ν は導出できないため、X 線的弾性定数 として E/(1+y)を用いる。回折面依存性によって、機械的な方法で求めた結果と一致しない場合がある。 928

#### 929 5.8 試験片の保管(6.5.3)

930 測定装置の測定精度を検定するために使用する残留応力値が既知である応力試験片に対する保管方法と

して、表面のさび及び汚れを考慮して新規購入後3年程度を限界とすべきとの意見も出されたが、コスト 931 面での負担、根拠となるデータが十分とはいえない状況を考慮して、この規格での規定は見送ることとし 932

た。

933

#### 6 懸案事項 934

#### 6.1 測定サンプルの結晶状態及び入射 X 線ビームの照射面積 935

影響因子が多く検証を要する課題であるので、現在、標準的に使用されている一般的な条件を適用可能 936 とするとした。今後、研究が進んで実態が解明された段階で再吟味して判断することとした。 937

#### 938 6.2 集合組織の発達状態による測定理論の適用限界

集合組織の発達の程度に差があり、また、集合組織の形成原因に依存して種々の形態があるため、これ 939

らを一律に扱うことは困難である。このため、今回は測定データから得られる応力値の信頼限界が±25 940

MPa の範囲であれば集合組織の影響は実用上問題ないと判断することとした。今後,研究が進展し明確な 941 結論が判明した時点で個々の集合組織ごとに判断することとした。

942

#### 943 6.3 測定面の汚れ又はさびによる適用限界

測定面の汚れには水、油、ほこりなど種々のものが考えられるが、現時点では汚れの種類やその程度に 944 945 関して明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は簡便的に測定された応力値の信頼限界で判 946 断し、その値が±25 MPaの範囲であれば問題ないとすることとした。さびに関しても同様とした。今後、 各影響が明確になった時点で再吟味することとした。 947

#### 948 測定面の表面粗さ及び曲面状態に関する適用限界 6.4

測定面の表面粗さに関する cosa 法の適用限界については, 現時点では明確な根拠のある指定が困難な状 949 況であるので、今回は簡便的に測定された応力値の信頼限界で判断し、その値が±25 MPaの範囲であれば 950 問題ないとした。曲面状態に関しては研究例があるが検討の余地が残ると考えられるため、表面粗さと同 951 様に今回は簡便的に測定された応力値の信頼限界で判断し,その値が±25 MPaの範囲であれば問題ないと 952 した。今後、各影響が明確になった時点で再吟味することとした。 953

#### 954 電解研磨に関する適正条件 6.5

印加する電流及び電圧,表面状態,電解研磨液が cosa 法による測定応力値に対し複雑に影響するため, 955 現時点ではそれぞれの影響に関して明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は電解研磨液の 956 種類の記述までに留め、適正条件には触れないこととした。今後、適正条件が明確になった時点で再吟味 957 することとした。 958

#### 959 6.6 X線の発生及び計測に関する適正範囲

#### NDIS 4404:2021 解説

960 この適正範囲に関しては、入射あるいは回折 X 線強度、X 線計測装置の感度及び処理条件の影響等が現
961 れる。また、計測後のデータの平滑化の条件も影響する。しかし、現時点では cosα 法の測定応力に対する
962 それらの適正な範囲に関して明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は簡便的に測定された
963 応力値の信頼限界で判断し、その値が±25 MPa の範囲であれば問題ないとすることとした。今後、各影響
964 が明確になった時点で再吟味することとした。

## 965 6.7 X線入射角の設定条件に関する適正範囲

966 測定原理上は X 線入射角が 0°又は 90°以外であれば cosa 法による応力測定が可能であり、45°が最も高
967 精度となるが、実際には回折環の各部における X 線侵入深さの差による影響が加わる。しかし、現時点で
968 は X 線入射角に関する明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は一般的に標準条件となって
969 きている X 線入射角 35°を中心に、その前後 10°となる 25°から 45°の範囲を適正範囲とした。今後、X 線
970 入射角範囲の限界値が明確になった時点で再吟味することとした。

### 971 6.8 回折ピーク強度に関する適正範囲

972 cosa 法による応力の測定精度を確保するためには、必要な回折 X 線強度を計測する必要があり、不十分
973 な強度の場合には測定精度が不十分となる。一方、回折 X 線強度の計測値は、入射 X 線ビームの状態、サ
974 ンプルの状態、X 線検出器の種類及び計測条件の影響を受ける。このため、炭素含有量を始めとする種々
975 の合金成分量、結晶状態及び表面状態をもつ実用鋼材に対して、現状では明確な根拠が不足しており基準
976 を設けることが難しく、この規格での規定は見送ることとした。今後、検証データが蓄積できた段階で再
977 検討することとした。

## 978 6.9 回折環の計測範囲及びデータ取得範囲・個数に関する適正範囲

979 回折環の計測範囲及びデータ取得範囲・個数に関しては、回折環の欠落がある場合の許容範囲、回折環
 980 上のデータ取得範囲・個数などの影響が考えられるが、現時点では明確な根拠のある指定が困難な状況で
 981 あるので、今回は簡便的に測定された応力値の信頼限界で判断し、その値が±25 MPa の範囲であれば問題
 982 ないとした。今後、各影響が明確になった時点で再吟味することとした。

## 983 6.10 回折 X 線プロファイルからのデータ取得条件の適正範囲

984 バックグラウンドの計測範囲又はデータのステップ幅が cosα 法による応力測定精度に影響を及ぼすこ
 985 とが考えられるが、現時点ではバックグラウンドの計測範囲又はデータのステップ幅の適正範囲に関する
 986 明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は簡便的に測定された応力値の信頼限界で判断し、
 987 その値が±25 MPa の範囲であれば問題ないとした。今後、各影響が明確になった時点で再吟味することと
 988 した。

## 989 6.11 回折環中心位置の精度の適正範囲

990 回折環中心位置の精度は cosα 法による応力測定精度に影響を及ぼすことが考えられるが,現時点では回
 991 折環中心位置の精度に関して明確な根拠のある指定が困難な状況であるので,今回は簡便的にゼロ応力試
 992 験片から測定された応力値の信頼限界で判断し,その値が±25 MPa の範囲であれば問題ないとした。今後,
 993 各影響が明確になった時点で再吟味することとした。

### 994 **6.12 無ひずみ状態における回折角の適正値**

995 無ひずみ状態における回折角は、cosa法によるひずみの値、応力定数の値、応力値に影響するが、その996 測定に関しては測定装置及び測定サンプルの影響を受けることが予想されるため、現時点では無ひずみ状

解 8
9

997 態における回折角の適正値について明確な根拠のある指定が困難な状況であるので、今回は簡便的に測定
998 された応力値の信頼限界で判断し、その値が±25 MPa の範囲であれば問題ないとした。今後、各影響が明
999 確になった時点で再吟味することとした。

## 1000 6.13 回折環中心角のステップ幅の適正値

1001 回折環中心角のステップ幅に対し,過度に細かく設定すると回折に寄与する結晶格子の数が減少し,巨
1002 視的な変形挙動を反映しなくなる可能性があるとの研究報告がある。しかし,回折環中心角のステップ幅
1003 に関する適正値に関しては現時点では明確な根拠のある指定が困難な状況であるので,今回は簡便的に測
1004 定された応力値の信頼限界で判断し,その値が±25 MPa の範囲であれば問題ないとした。今後,各影響が
1005 明確になった時点で再吟味することとした。

## 1006 6.14 ゼロ応力試験片の管理方法

1007 ゼロ応力試験片の管理方法に関して、硬さ試験片の場合に準じて3年間以内とすべきという意見があっ
1008 たが、ユーザーの負担増になる可能性があるとともに、現時点では明確な根拠のあるゼロ応力試験片の管
1009 理方法に関する指定が困難な状況であるので、今回は簡便的にゼロ応力試験片から測定された応力値の信
1010 頼限界で判断し、その値が±25 MPaの範囲であればその管理に問題ないとみなすこととした。今後、管理
1011 方法が各影響が明確になった時点で再吟味することとした。

- 1012
- 1013
- 1014
- 1015

cor