

NDIS 意見受付

フェライト系鉄鋼材料の $\cos\alpha$ 法に依る X 線応力測定方法
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
改正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：2025 年 6 月 30 日（月）

意見提出先：Email：bsn@jsndi.or.jp

目次

1	適用範囲	1
2	引用規格	1
3	用語及び定義	1
4	試験方法の種類	2
5	試料	2
5.1	測定対象	2
5.2	結晶粒	2
5.3	集合組織	3
5.4	履歴	3
5.5	表面状態	3
6	測定条件	3
6.1	X線入射角	3
6.2	回折面, 及び, 無応力時の回折角	3
7	装置及び器具	3
8	応力測定	4
8.1	デバイ・シェラー環の回折角の算出	4
8.2	ひずみパラメータ $\epsilon_{\alpha 1}$ の算出	5
8.3	$\epsilon_{\alpha 1} \cdot \cos\alpha$ 線図の作成	5
8.4	応力の算出	6
8.5	測定結果の信頼区間	7
8.6	応力の評価と平面応力状態の確認	7
9	報告事項	8
	解説	9

Pubcome 2025/06/30迄

フェライト系鉄鋼材料の cos α 法による X 線応力測定方法

X-ray stress measurement of ferritic steels by the cos α method

1 適用範囲

この規格は、単一斜入射した特性 X 線を用いて、機械部品などに使用するフェライト系鉄鋼材料の表面層に存在又は残留する応力を非破壊測定する“cos α 法”による X 線応力測定方法について規定する。

“cos α 法”は、X 線回折を利用して多結晶体の表面層の応力を非破壊で測定する X 線応力測定方法の一つである。表層に対して X 線を斜め入射し、二次元検出器を用いて得られるデバイ・シェラー環（回折環）の形状変化から格子ひずみを測定し、負荷応力又は残留応力を算出する手法に適用する。

警告 この規格に基づいて X 線応力測定を行う者は、エックス線装置の取扱等業務に従事する者（“エックス線業務従事者”又は“放射線業務従事者”）であってエックス線作業に精通していること。加えて、測定作業はエックス線を取り扱うので、(1) 管理区域に立ち入る前にエックス線作業主任者より、“電離放射線障害防止規則第 52 条の 5”に制定されている“特別の教育”に準じた教育を受けること。(2) X 線装置を使用する人は、管理区域内に立入る前に、“電離放射線障害防止規則第 8 条”に制定されている放射線測定器（ポケット線量計など）を装着すること。(3) X 線装置を使用する人は、定期的（6 ヶ月に 1 回）に、“電離放射線障害防止規則第 56 条”に制定されている“健康診断”を受けること。(4) X 線装置を管理する人は、X 線検出器を使用する人に対して、“電離放射線障害防止規則第 9 条”に制定されている“ポケット線量計等の測定結果の確認、記録等”を行うこと。(5) 労働安全衛生法、労働安全衛生施行令、労働安全衛生規則、電離放射線障害防止規則、エックス線装置構造規格、日本分析機器工業規則 JAIMAS0101-2001、その他の法令を遵守すること。

2 引用規格

この規格は、次に掲げる日本材料学会標準に基づき作成されている。

JSMS-SD-14-20 cos α 法による X 線応力測定法標準 —フェライト系鉄鋼編—

また、次に掲げる引用規格は、この規格に引用されることによって、その一部又は全部がこの規格の要求事項を構成している。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む）を適用する。

JIS Z 2300 非破壊試験用語

JIS Z 8101-1 統計—用語及び記号—第 1 部：一般統計用語及び確率で用いられる用語

3 用語及び定義

この規格で用いる主な用語及び定義は、**JIS Z 2300** によるほか、次による。

3.1

cos α 法

33 X線応力測定法の一つで、単一斜入射したX線を試料表面に照射し、試料から回折するX線を二次元
34 検出器で計測したデバイ・シェラー環から求めた格子ひずみを利用して残留応力、負荷応力を非破壊測定
35 する方法

36 3.2

37 フェライト系鉄鋼材料

38 主な金属組織が体心立方格子構造のフェライト相である鋼

39 3.3

40 二次元検出器

41 回折X線を二次元的に計数する検出器。X線フィルムなどを含む

42 3.4

43 デバイ・シェラー環（回折環）

44 多結晶体表面にX線を入射すると回折X線は入射X線を軸として中心角 θ ($=2\eta$) が異なる多数の円
45 すい（錐）を形成する。形成した円すい（錐）を平板のX線フィルム、二次元検出器で受けたときの円
46 環

47 3.5

48 回折計

49 単一の入射角 ψ_0 で斜め入射したX線を表面層に照射し、後方散乱したデバイ・シェラー環の全体像を二
50 次元検出器で計測する装置

51 **注釈1** 回折計の入射角は、二次元検出器が試料面と干渉しない限り極力広範囲に可動でき、任意の角
52 度で固定する。なお、入射角は、試料面法線に対して $\pm 0.4^\circ$ の角度の精度で設定可能である
53 ことが推奨される。

54 3.6

55 フィルタ

56 コリメータの前後にバナジウム箔を装着し、Crターゲットから放出されるK β 線を吸収する装置

57 4 試験方法の種類

58 この規格で用いる試験方法の種類はcos α 法とする（3.1参照）。

59 5 試料

60 5.1 測定対象

61 測定対象は、フェライト系鉄鋼材料である。

62 5.2 結晶粒

63 コリメータで制限したCr-K α 線の照射域に対し、試料を構成するフェライト結晶粒の粒径は十分小さく、
64 回折現象を起こす結晶粒の数が十分であることが望ましい。

67 **5.3 集合組織**

68 測定対象には強い優先方位がないことが望ましい。強い優先方位がある場合、均質等方体の仮定が成立
69 しなくなるため、得られる応力値が適応外となる可能性が高い。

70 **5.4 履歴**

71 測定対象の加工又は熱処理などの履歴は、試料表面近傍の応力状態に強い影響を及ぼすことがあるので、
72 明確になっていることが望ましい。

73 **5.5 表面状態**

74 測定対象の表面粗さなどの表面状態は、平滑で、酸化膜のような測定対象以外の物質の付着及び生成の
75 ないことが望ましい。また、切削、研削などの有向性加工が表面に施され、表層に塑性流動などの加工変
76 質層が残留している場合は、面外せん断応力が残留して平面応力の仮定が崩れている可能性が高い。平面
77 応力状態が崩れている場合は、得られる応力値が適用外となる。

78 **6 測定条件**

79 **6.1 X線入射角**

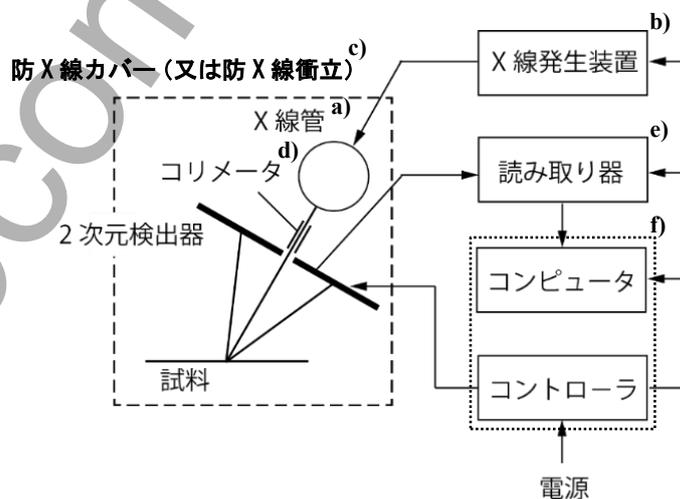
80 X線応力測定に用いるX線入射角 θ_0 の推奨値は、 35° である。 35° 以外の入射角を用いる場合は、報
81 告書に明記する。

82 **6.2 回折面、及び、無応力時の回折角**

83 X線応力測定にはフェライト相の211回折を用いる。無応力時の回折角は $2\theta_0=156.4^\circ$ である。

84 **7 装置及び器具**

85 測定装置は、基本的には図1に示すデバイ・シェラー環を二次元検出器で計測する回折計と機器から構
86 成されている。



87 **注記** この図は cosa 法による X線応力測定装置基本構成図を表す。

- 88 注^{a)} **X線管** Cr-K α 線の特性X線を発生させることができ、20kV以上の管電圧
 89 がかけられるクロムターゲットのX線管を用いる。
- 90
- 91 注^{b)} **X線発生装置（電源）** 二次元検出器に十分な回折強度が得られるX線が
 92 発生できるX線発生装置（電源）を用いる。
- 93
- 94 注^{c)} **防X線カバー（又は防X線衝立）** 直接X線又は間接X線から人体を護
 95 るため、X線を通さない防X線カバー、防X線衝立を用い、測定者へのX
 96 線の漏洩を防止する。屋外などで使用する場合はエックス線作業主任者の
 97 指示に従い、防X線衝立などのろ過板を用い管理区域を設定する必要がある。
 98
- 99
- 100 注^{d)} **コリメータ** X線管から発生するCr-K α 線の照射域を制限するため、ピン
 101 ホールコリメータを用いる。コリメータによるX線の発散角は開示するこ
 102 とが望ましい。
- 103
- 104 注^{e)} **読み取り器** デバイ・シェラー環の回折強度は、ピーク位置の角度を中心
 105 に $\pm 12^\circ$ 又はそれ以上の測角範囲でデバイ・シェラー環の全周に渡ってS/N
 106 比の高い回折強度曲線が計測できることが望ましい。そのため、読み取り
 107 器は、測角範囲で512分割の角度分解能、すなわち、 $\Delta 2\theta = 24^\circ/512 \approx 0.05^\circ$
 108 の角度分解能で読み取れるものを基準とする。
- 109
- 110 注^{f)} **コンピュータ及びコントローラ** 回折計と読み取り器との操作は、コンピ
 111 ュータで自動制御できることが望ましい。
- 112

図1-cos α 法によるX線応力測定装置基本構成図

8 応力測定

8.1 デバイ・シェラー環の回折角の算出

図2は、cos α 法によって試料上の原点Oから後方散乱したデバイ・シェラー環を二次元検出器で計測した模式図を示す。ここで、デバイ・シェラー環の最上点の $-\eta$ 側を起点として、時計回り方向に回転角 α を定義する。このとき、デバイ・シェラー環の回転角 α に対応する回折角 $2\theta_\alpha$ は、次の式によって算出する。

$$2\theta_\alpha = \left\{ \pi - \arctan \left(\frac{r_\alpha}{L} \right) \right\} \frac{180}{\pi} \text{ (deg)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 r_α : デバイ・シェラー環の半径¹⁾(mm)

L : 試料と二次元検出器との距離(mm)

注¹⁾ X線応力測定で計測したデバイ・シェラー環から複数の回転角 α を抽出し、図2に示す $\pm\alpha$ とその対角の合計4か所の回折強度曲線を基に半価幅法などを利用してピークの位置の半径から回折角を求める。

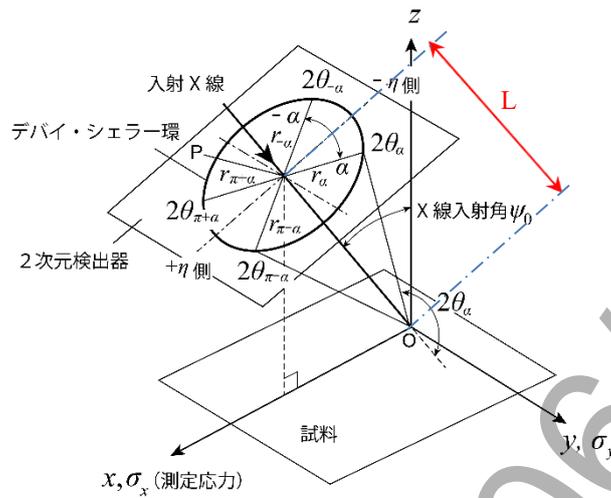


図2-cosa 法によるデバイ・シェラー環と回折角の関係

126

127 **8.2 ひずみパラメータ ϵ_{a1} の算出**

128 デバイ・シェラー環の回転角 α における回折角 $2\theta_\alpha$ から、次式の格子ひずみ ϵ_α を求める。

129
$$\epsilon_\alpha = -(\theta_\alpha - \theta_0) \cdot \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \dots\dots\dots(2)$$

130 次に、回転角 α に対し、三つの回転角 ($\pi+\alpha$, $-\alpha$, $\pi-\alpha$) における回折角 ($2\theta_{\pi+\alpha}$, $2\theta_{-\alpha}$, $2\theta_{\pi-\alpha}$) から、
 131 三つの関連する格子ひずみを上式から求め、次式から、デバイ・シェラー環の対角線上の2対のひずみの
 132 和の平均値である“ひずみパラメータ ϵ_{a1} ”を算出する。

133
$$\epsilon_{a1} = \frac{(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi+\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha})}{2} \dots\dots\dots(3)$$

134 ここで、 ϵ_α : 回転角 α に対する格子ひずみ

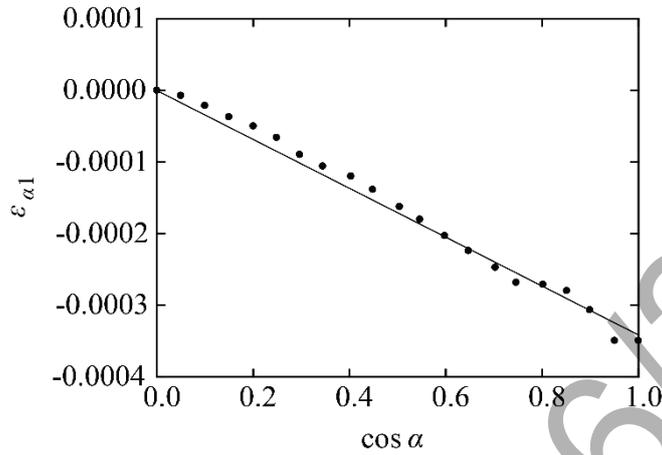
135 **8.3 ϵ_{a1} -cosa 線図の作成**

136 試料の表層に働く x 軸方向の垂直応力 σ_x と cosa に対するひずみパラメータ ϵ_{a1} の変化率との間に、次
 137 式の関係がある。

138
$$\sigma_x = \frac{E_x}{1+\nu_x} \frac{1}{\sin 2\theta_0 \sin 2\psi_0} \frac{\partial \epsilon_{a1}}{\partial \text{cosa}} \dots\dots\dots(4)$$

139 ここで、 ψ_0 は X 線入射角 (deg) であり、この規格における推奨値は 35°

140 そこで、原点を除き、 $\Delta \text{cosa} = 0.05$ の均等間隔¹⁾で、式(3)で算出した20点の (cosa , ϵ_{a1}) のデータ列を
 141 図3に例示するように、“ cosa ”を横軸、“ひずみパラメータ ϵ_{a1} ”を縦軸としてプロットする。



142 **注記** この図は $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 線図と原点を通る回帰直線を表す。

143
 144 **注¹⁾** $\cos\alpha$ 法では、一枚のデバイ・シェラー環から $n > 50$ のデータ列を抽出する
 145 ことは容易である。しかし、データ数を $n > 50$ に増やすと、日本材料学会の
 146 $\sin^2\psi$ 法による X 線応力測定法標準-鉄鋼編 (JSMS-SD-5-02)^[3]とセラミックス
 147 編 (JSMS-SD-1-00)^[4]で採用している $n \geq 5$, $n \geq 7$ のデータ数で測定した結
 148 果と比べて信頼区間が極端に小さく評価される。一方、 $\sin^2\psi$ 法と同程度のデ
 149 ータ数では多数取得したデータが活かされず、また $\cos\alpha$ 線図の直線性の評価
 150 が十分ではない。そこで、この規格では、中間的な値として、 $\cos\alpha$ を 0.05 の
 151 均等間隔でひずみパラメータ $\varepsilon_{\alpha 1}$ をプロットする $n=20$ を採用する。この場合、
 152 $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 線図のデータ点の直線性の把握が十分可能となる。
 153

図 3— $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 線図と原点を通る回帰直線

154
 155

156 **8.4 応力の算出**

157 **図 3** の $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 線図に対し、 $\cos\alpha$ と $\varepsilon_{\alpha 1}$ の関係を原点を通る直線で最小二乗近似し、 $\cos\alpha$ に対する回帰直
 158 線の傾き $M_1 = \partial\varepsilon_{\alpha 1} / \partial \cos\alpha$ を求める。

159 測定対象の表面層に存在又は残留する応力 σ_x は、次式によって算出し、有効数字 3 桁で示す。

160
$$\sigma_x = K_1 \cdot M_1 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(5)$$

161 ここで、
$$K_1 = -\frac{E_x}{1+\nu_x} \frac{1}{\sin^2 \theta_0 \sin^2 \psi_0} \dots\dots\dots(6)$$

- 162 K_1 : 回折面の応力定数 (MPa)
 163 M_1 : $\varepsilon_{\alpha 1}$ - $\cos\alpha$ 線図の原点を通る直線の傾き
 164 $\frac{E_x}{1+\nu_x}$: 回折面の X 線的弾性定数¹⁾ (MPa)

165
 166 **注 1)** 回折面の X 線の弾性定数は、日本材料学会 X 線材料強度部門委員会の二次元検出器小
 167 委員会で行ったラウンドロビン試験の結果^{[1][2]}から、 $E_X/(1+\nu_X)=1.75 \times 10^5$ (MPa) を用い
 168 る。なお、この応力定数は、 $\sin^2\psi$ 法による X 線応力測定で用いる X 線の弾性定数と同
 169 値であり、このとき、 K_1 は、次の式となる。

170
$$K_1 = -\frac{4.37 \times 10^5}{\sin^2 \psi_0} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(7)$$

171 **8.5 測定結果の信頼区間**

172 **8.4** で求めた応力 σ_x の信頼区間は次の式によって求まる。応力 σ_x の信頼区間の有効数字の最小値は、平
 173 均値の有効数字の最小値と一致させる。

174
$$\Delta\sigma_x = K_1 \cdot \Delta M_1 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(8)$$

175 ここで、

176
$$\Delta M_1 = t(n-1, \gamma) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(\varepsilon_{\alpha 1})_i - M_1(\cos \alpha_i)\}^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i}} \dots\dots\dots(9)$$

177 $t(n-1, \gamma)$: 自由度 $n-1$ で信頼率¹⁾ $(1-\gamma)$ の t 分布の値

178 n : $\varepsilon_{\alpha 1} - \cos\alpha$ 線図の作図に用いたデータ数²⁾ で $n = 20$

179 ここでは、信頼率 $(1-\gamma) = 0.683$ を採用する。 $n = 20$ での t 値は、 $t(19, 0.317) = 1.0277$ である。

180
 181 **注 1)** **JIS Z 8101-1** では信頼率は $1-\alpha$ で定義されているが、この規格では α は回転角であるた
 182 め、 γ という記号で置き換えた。

183
 184 **注 2)** $\varepsilon_{\alpha 1} - \cos\alpha$ 線図は理論的に如何なる場合も原点を通る。よって、データ列の点数 n は、
 185 $\varepsilon_{\alpha 1} - \cos\alpha$ 線図の原点(0,0)を除く数であることを注意する。

186 **8.6 応力の評価と平面応力状態の確認**

187 **8.6.1 応力の評価**

188 **8.5** で求めた応力の信頼区間が、応力の 10 %以上である場合は、応力測定を複数回行い、 σ_x の応力の変
 189 動幅を把握する必要がある。複数回測定をした場合は、測定ごとの応力と信頼区間の値及び応力の平均値
 190 を報告書に記載する。

191
 192 **8.6.2 平面応力状態の確認**

193 cos α 法による X 線応力測定は、表層に存在又は残留する応力が平面状態である場合に限り適用可能であ
194 る。

195 表層に存在する残留応力の多くは、平面応力状態であるので、基本的には、平面応力状態の確認は不要
196 な場合が多い。

197 一方、有向性のある加工が表面に施され、表層に塑性流動などの加工変質層が残留している場合は、面
198 外せん断応力が残留して平面応力の仮定が崩れている可能性が高い。測定対象の応力に面外せん断応力が
199 存在するかどうか不明な場合は、cos α 法で、**図 2** の-x 方向からも応力測定を行い、測定応力値が一致する、
200 又は**図 3** の ϵ_{a1} -cos α 線図を同一グラフ上にプロットし、両者の ϵ_{a1} -cos α 線図が信頼区間の範囲内で重なれ
201 ば、平面応力状態であるとみなせる。平面応力状態が崩れている場合は、得られる応力値が適用外となる。
202 面外せん断応力の有無の確認を要請された時は、報告書に cos α 法による測定での ϵ_{a1} -cos α 線図の重なりを
203 記載するか、又は sin² ψ 法などを用いて面外せん断応力の有無を評価した結果を報告する。

204 9 報告事項

205 測定結果の報告には、次の事項を記載する。

- 206 a) 規格番号及び試験方法の種類 (cos α 法)
- 207 b) 測定条件 (入射角, 試料と二次元検出器との距離, 回折面, X 線照射時間, X 線管電圧及び管電流,
208 コリメータの内径, K β カットフィルタの有無)
- 209 c) ϵ_{a1} -cos α 線図の作図結果 (データ点及び最小二乗法による回帰直線を明示)
- 210 d) 応力値と信頼区間, 及び多数回測定の場合はその平均値
- 211 e) デバイ・シェラー環の二次元画像
- 212 f) 平面応力状態を確認した場合はその結果

213

214

215

216

217

218

219

220

221 参考文献

222 [1] Y. Sakaida, K. Suzuki and K. Tanaka, Standardization of X-ray stress measurements by the method using two-
223 dimensional detector, Advances in X-ray Analysis, Vol. 65, pp. 10-17 (2022)

224 [2] Y. Sakaida, K. Suzuki and K. Tanaka, Standard of the method for X-ray stress measurement using two-
225 dimensional detector, The 11th International Conference on Residual Stresses 2022, HAL Id: hal-04015069,
226 pp. 1-9 (2023)

227 [3] sin² ψ 法による X 線応力測定法標準-鉄鋼編 (JSMS-SD-5-02)

228 [4] sin² ψ 法による X 線応力測定法標準-セラミックス編 (JSMS-SD-1-00)

229

フェライト系鉄鋼材料の cos α 法による X 線応力測定方法

解 説

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。

この解説は、一般社団法人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一般社団法人日本非破壊検査協会である。

1 今回の改正の趣旨

cos α 法は通常用いられる X 線応力測定法である $\sin^2\psi$ 法と異なり、より測定時間の短縮化、測定装置の軽量・小型化、現場測定などを可能とする将来性のある日本発の X 線応力測定法である。作成目的は、日本非破壊検査協会及び日本材料学会が協力することによって、規格の使用者が混乱を招かず有益となること、そして cos α 法の普及促進のため将来の JIS 化を見据えた改正をすることにある。

2 審議中に特に問題となった事項

審議中に問題となった事項は、次のとおりである。

2.1 規格の方針及び内容

日本非破壊検査協会及び日本材料学会が協力して JIS 化を見据えた改正を行った。

2.2 適用範囲（箇条 1）

この規格の cos α 法はマルテンサイトに適用不可能であるため、どの材料にも適用可能と誤認しないように規格名を“フェライト系鉄鋼材料の cos α 法による X 線応力測定方法”として限定的に記すこととした。

エックス線を取り扱うことから“エックス線作業従事者”、“放射線業務従事者”であることは大前提であるという認識から“警告”を記載した。

2.3 二次元検出器（3.3）

二次元検出器はデジタルが主流であるが、アナログ使用も可能であるとの意図で“X 線フィルム”を記載した。

2.4 履歴（5.4）

測定対象の加工、熱処理などの履歴が明確にならなくても測定は可能であるものの、試料表面近傍の応力状態に強い影響を及ぼすことがあり、履歴を明確にすることが重要であるため、これを記載した。

257 **2.5 表面状態 (5.5)**

258 表面の状態が異なることで測定値に対し多大な影響を与えるため、注意を要する旨を記載した。

259 **2.6 装置及び器具 (箇条 7)**

260 詳細記載せず、JIS として最低限必要となる記載に留めた。但し、“**図 1 注** 防 X 線カバー (又は防 X 線
261 衝立)”については、適用事例の検討を行い、ユーザーにとってわかりやすいものとなるような記載をする
262 こととした。

263 **2.7 応力の評価 (8.6.1)**

264 応力の信頼区間が、応力の 10 % 以上である場合は、応力測定を複数回行い、 σ_x の応力の変動幅を把握
265 する必要がある。このときの応力の 10 % 以上の根拠が明確でなく、経験値となっているため、今後の検討
266 が必要であること議論し、暫定値として記載した。

267 **2.8 報告事項 (箇条 9)**

268 通常の X 線応力測定においてはフィルタを用いられていることを検討し、報告に“K β カットフィルタの
269 有無”を測定条件に加えることとした。

270 cos α 法の測定条件として、デバイ・シュラー環が連続であることが必須であることから、報告書にはデ
271 バイ・シュラー環の二次元画像を入れることとした。

272 **3 主な改正点**

273 日本非破壊検査協会と日本材料学会とが協力して JIS 化を見据えた改正を行うことによって、JIS の様式
274 に沿うよう全面的な改正を行った。

275