

細径線材の X 線応力測定における測定精度向上法

Improvement of Accuracy in X-ray Stress

Measurement for Thin Wire Rods

小栗 泰造* 村田 一夫**

Taizo Oguri Kazuo Murata

(2000年7月10日 受理)

In the case of applying the X-ray stress measuring technique to a curved surface, a large area of X-ray irradiation causes some errors because the surface is not flat. In this paper, the relation between the errors of measured residual stress and sizes of X-ray irradiated areas was investigated experimentally and analytically to evaluate the true stress in the surface layer of a thin wire rod. In the experiment masking tapes on the thin wire rod were used to vary the size of the irradiated area and the residual stresses of the region were measured using the $\sin^2\psi$ method. In the analysis Bragg's X-ray diffraction in the irradiated regions on the thin wire rod was simulated and residual stresses were calculated according to the $\sin^2\psi$ method.

These results show that (1) the magnitude of measured circumferential residual stress σ is smaller than true stress σ_0 , (2) the ratio between two stresses σ/σ_0 and the difference in those stresses ξ are represented by the following approximate relations $\sigma/\sigma_0 = M \cos\{1.92(\zeta/\rho)\}$, $\xi = \sigma[M^{-1} \sec\{1.92(\zeta/\rho)\} - 1]$, where $M \approx 1.81(t/\rho) + 1$, the X-ray irradiated area 2ξ , the diameter of the wire rod 2ρ , and the thickness of the masking tape t , and (3) the magnitude of the measured axial residual stress is hardly affected by the X-ray irradiated area or by the diameter of the wire rod.

キーワード：X 線応力測定法，線材，円柱，湾曲面，残留応力， $\sin^2\psi$ 法

1. はじめに

残留応力は、外力が作用していないにもかかわらず物体表面ならびに内部に存在する応力であり、熱処理、機械加工、溶接といった製造・加工工程を通じて形成される。残留応力は、製品の疲労破壊や応力腐食割れに大きな影響を及ぼすことが知られており、精密微細加工においては、被加工物の寸法精度を悪化させる要因にもなり得る。^{1), 2)}したがって、製品の品質向上を図る上で、残留応力を適切に評価し、管理することはきわめて重要である。

残留応力の測定において一般的に用いられている X

線応力測定法²⁾⁻⁴⁾は、X 線回折角（または Bragg 角）⁵⁾が格子ひずみによって変化することを利用した方法で、表面層（鉄鋼材料の場合で 10 μ m 程度）の応力を非破壊的に測定できるという特徴を有している。ただし、この方法を適用するためには、その測定原理から、X 線侵入深さ内において深さ方向に応力勾配のない平面応力状態であることが条件となっている。さらに、結晶粒径が小さく、強い優先方位を有しないこと、測定表面は平坦かつ滑らかであることが望まれている。

しかし、実際の測定では、上述の条件を満足しない対象物も多く、とりわけ製品実体の検査においては、湾曲部の応力測定が必要となる場合が少なくない。近年では、X 線束を $\phi 0.1$ mm 程度まで小さくすることにより微小領域の応力測定を可能とした装置が市販されており、細い線材や微小部品の角部など、曲率半径の小

* 評価技術部材料評価グループ

** 生産技術部精密機械グループ

さい湾曲部の応力測定に適用されている。しかし、結晶粒の大きさや回折強度などの材料上の問題から、測定面が平坦とみなせる程度に X 線照射領域を小さくできないこともあり、この場合には、測定応力値に試料の湾曲に基づく誤差が生じると予想される。

そこで、本研究では、円柱形状である線材を取り上げ、X 線照射領域の大きさが円周方向および軸方向の表面残留応力測定値に及ぼす影響を調べた。まず、種々の大きさの X 線照射領域を設定し、並傾法により円周方向および軸方向の残留応力を測定した。ついで、種々の X 線入射角における円柱状試料からの回折強度曲線を、 $\sin^2\psi$ 法²⁾⁻⁴⁾の条件に適合する材料内微小領域からの回折強度曲線を X 線侵入深さ内すべてについて重ね合わせるにより求め、半価幅法と $\sin^2\psi$ 法により応力値を解析的に算出した。さらに、これらの結果をもとに、X 線照射領域の大きさ、線材直径、材料の線吸収係数や回折角、X 線侵入深さ、応力の大きさ、および、マスキングテープ厚さなどが測定応力に及ぼす影響を明らかにし、実在する円周方向残留応力の大きさおよび測定誤差を、測定応力をもとに線材直径と X 線照射領域の大きさなどを用いて推定する実用式を提案した。

2. 実験

(1) 実験方法

種々の X 線照射領域における丸棒表面の円周方向および軸方向残留応力を測定し、X 線照射領域の大きさが残留応力値に及ぼす影響を調べた。

測定装置は、微小部 X 線応力測定装置 (PSPC/RSF システム (理学電機)) を用い、試料には炭素工具鋼の丸棒を選択した。

X 線照射領域は、図 1 に示すように、周囲を十分に遮蔽効果のあるテープで覆うことにより定めた。その大

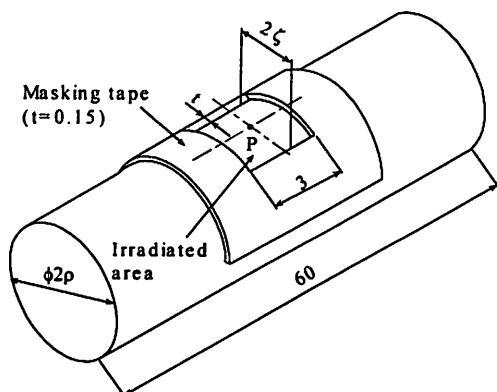


図 1 マスキングテープによる照射領域の設定
Determination of irradiated area with masking tape.

きさは、軸方向長さ (3mm) を一定とし、円周方向長さ (弦長さ 2ζ) を変化させた。試料は、照射領域の中心 P 点がゴニオメータ中心となるようにセットし、丸棒長さ (約 60mm) 中央部付近の円周方向および軸方向の表面残留応力を並傾法により測定した。X 線応力測定条件を表 1 に示す。特性 X 線には $\text{CrK}\alpha$ 線を用い、 αFe211 回折を測定した。回折角は半価幅法により定め、 $\sin^2\psi$ 法により応力値を算出した。なお、測定精度を高くするため、 $2\theta-\sin^2\psi$ 線図の $\sin^2\psi$ の値がほぼ等間隔になるように 7 種の ψ 角を選ぶと共に、応力値は同一箇所 3 回の平均を取った。

(2) 実験結果

図 2 に線径 $\phi 5\text{mm}$, X 線照射領域 $2\zeta=1\text{mm}, 2\text{mm}, 3\text{mm}$ における円周方向残留応力測定時の回折強度曲線を示す。いずれの回折強度曲線にも著しい非対称性は見られず、また ψ 角による極度な強度変化もない。図 3 は、

表 1 X 線応力測定条件

Conditions for X-ray stress measurements.

Characteristic X-ray	$\text{CrK}\alpha$ (Filter: V foil)
Diffraction	$\alpha\text{Fe 211}$
Tube voltage, current	30 kV, 20 mA
Detector	PSPC
Measuring method	Iso Inclination, Fixed ψ .
Peak determination	Half Value Breadth
Correction	Lorentz, Polarity
Linear absorption coefficient	950.5 cm^{-1}
ψ angle	0, 15, 25, 30, 35, 40, 45 deg.
Stress constant	-297 MPa/deg.
Collimator	$\phi 4\text{ mm}$

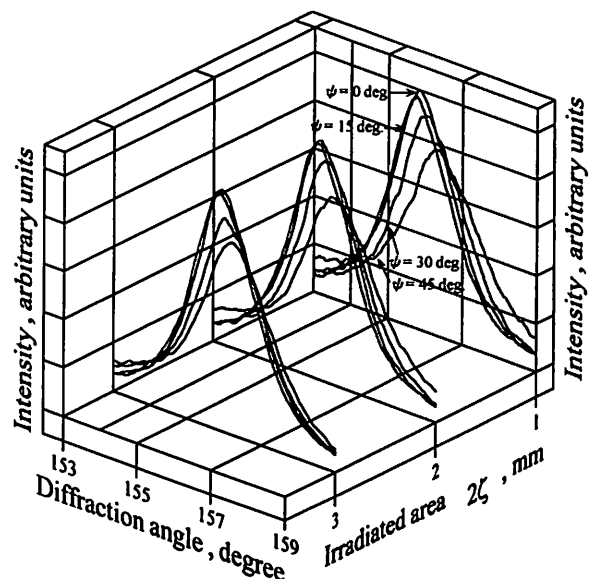


図 2 種々の照射領域の大きさにおける円周方向応力測定時の回折強度曲線 (線径 $\phi 5$)
Diffraction profiles measured from various irradiated areas on $\phi 5$ bar surface for circumferential residual stress.

これらの回折強度曲線から得られた $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 線図である。回帰直線の傾きは、X線照射領域 2ζ が大きくなるにともなって小さくなるともに、その測定点群はやや上に凸の非線形性を呈する傾向が見られる。しかし、 2ζ が小さいときの直線性は非常に良い。また、図4に試料表面の顕微鏡写真を示す。図によると結晶粒の大きさは $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度であると思われる。これらの結果から、X線侵入深さ内において、急激な応力勾配、集合組織や粗大結晶粒はほとんど存在しないと考えられる。

図5に $\phi 5\text{mm}$, $\phi 6\text{mm}$, $\phi 8\text{mm}$ の線材表面における円周方向および軸方向残留応力と X線照射領域 2ζ の関係を示す。なお、図の縦軸は圧縮応力で示している。円周方向残留応力は、X線照射領域を大きくするといずれの径の場合も残留応力は減少し、その減少傾向は小径のものほど大きいことから、円周方向残留応力は X線照射領域と線径に依存すると考えられる。一方、軸方向残留応力は X線照射領域の大きさや線径に関係なく、ほとんど変化していない。

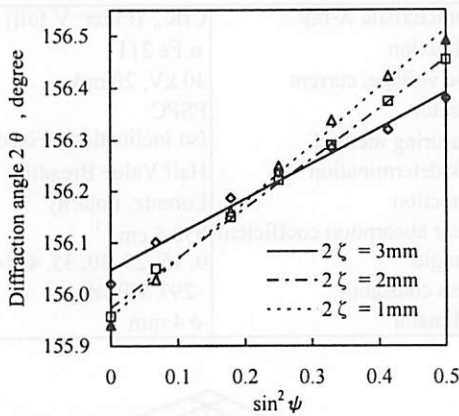


図3 種々の照射領域の大きさにおける円周方向応力測定時の $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 線図 (線径 $\phi 5$)

$2\theta\text{-sin}^2\psi$ diagrams of circumferential residual stress obtained from various irradiated areas on $\phi 5$ bar surface.

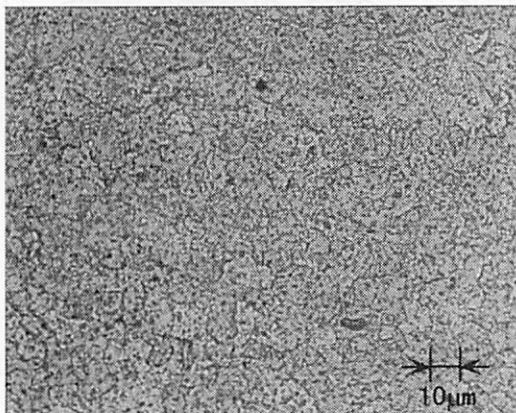


図4 試料表面の顕微鏡写真

Surface appearance of the specimen.

3. 解析

(1) 解析条件

図6, 図7に、実験に対応する円周方向および軸方向残留応力測定時の X線照射状況を模式的に示す。図に示すように、円周方向に σ_ω 、軸方向に σ_L の応力が作用するとして、位置 (r, ω) の微小体積 dV からの X線回折を考える。

ここで、X線侵入深さ内において、円周方向応力 σ_ω は円周方向に、軸方向応力 σ_L は軸方向にそれぞれ一様で半径方向に変化しないものとし、さらに、半径方向

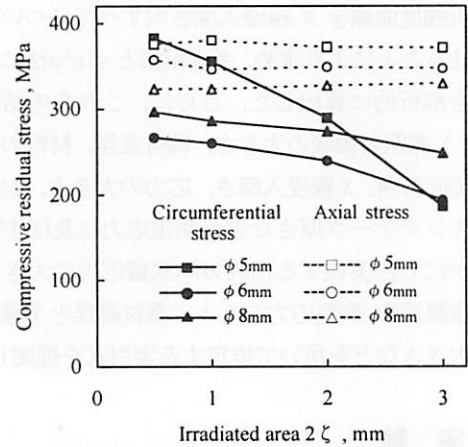


図5 照射領域の大きさと残留応力測定値の関係

Relations between measured residual stresses and sizes of irradiated area.

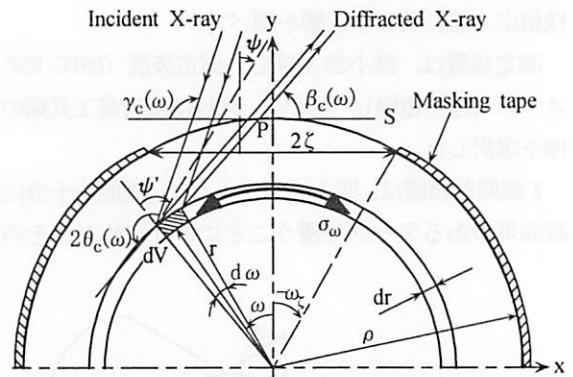


図6 円周方向応力測定時の X線回折の模式図

Schematic illustration for circumferential stress analysis.

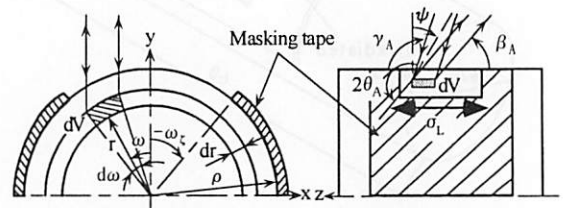


図7 軸方向応力測定時の X線回折の模式図

Schematic illustration for axial stress analysis.

応力は存在しないものとする。また、微小体積には多数の結晶粒がランダムな方位をもって存在すると仮定し、 $\sin^2\psi$ 法が適用できるものとする。なお、記号の添字 C, A は、それぞれ円周方向、軸方向であることを示す。

(2) 解析方法

(A) 円周方向応力測定の場合

図6に示すように、x-y 平面内での X 線照射における X 線回折強度を求める。dV における入射 X 線および回折 X 線が、x-z 平面に平行かつ y 軸上の点 P (ゴニオメータ中心) を通る仮想平面 S に対して、それぞれ $\gamma_c(\omega)$, $\beta_c(\omega)$ の角度をなすとき、dV での回折強度 dI_{dc} は、材料透過時の減衰を考慮して式(1)で表すことができる。

$$dI_{dc} = a b \frac{\sin\{\gamma_c(\omega) + \omega\}}{\sin\gamma_c(0)} I_0 e^{-\mu L_c(r, \omega)} r dr d\omega \quad (1)$$

$$L_c(r, \omega) = \left| \sqrt{\rho^2 - r^2 \cos^2\{\gamma_c(\omega) + \omega\}} - r \sin\{\gamma_c(\omega) + \omega\} \right| + \left| \sqrt{\rho^2 - r^2 \cos^2\{\beta_c(\omega) - \omega\}} - r \sin\{\beta_c(\omega) - \omega\} \right|$$

$$\gamma_c(\omega) = \theta_c(\omega) + \psi, \quad \beta_c(\omega) = \theta_c(\omega) - \psi$$

ここで、a は回折に寄与する結晶の体積比、b は単位体積あたりの回折比、 I_0 は単位面積あたりの入射 X 線強度、 μ は材料の線吸収係数、 $L_c(r, \omega)$ は材料中での X 線透過距離である。また、 $\theta_c(\omega)$ は dV における Bragg 角で、式(2)より求められる。

$$2\theta_c(\omega) = \frac{\sigma_a \sin^2\psi + 2\hat{\theta}_0}{K}, \quad \psi' = \psi + \omega \quad (2)$$

$$2\hat{\theta}_0 = 2\theta_0 - \frac{\nu}{K(1+\nu)}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

ただし、K は応力定数、 $2\theta_0$ は無ひずみ状態の回折角、 ν はポアソン比、 σ_1 , σ_2 は微小平面内の主応力である。 $2\hat{\theta}_0$ は $\psi = \omega = 0^\circ$ 時の回折角であり、実験から求めることとする。なお、a, b および I_0 は定数として取り扱う。

微小部 dV からの回折強度曲線 dI_{dc} をもとに、X 線照射領域内の合成回折強度曲線 I_{dc} を求める。合成回折強度曲線 I_{dc} は、 dI_{dc} を r について積分し、それがガウス分布形状になると仮定して⁶⁾、照射領域内の各 ω の位置

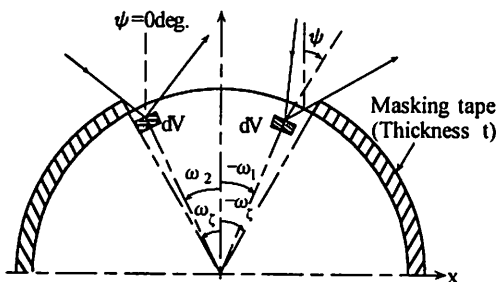


図8 マスキングテープの厚さを考慮したときの照射領域を表す有効角度範囲

Schematic illustration of the effective angles in the diffraction ω_1, ω_2 by taking account of masking tape thickness.

でのガウス分布回折強度を重ね合わせるにより得ることができ、式(3)のように表される。

$$I_{dc}(2\theta) = \int_{-\omega_1}^{\omega_2} \int_{\rho-\delta}^{\rho} e^{-U\{2\theta-2\theta_c(\omega)\}^2} dI_{dc} \quad (3)$$

ここで、 δ は $\psi = \omega = 0^\circ$ のときの X 線有効侵入深さ、U は回折線の広がりを表すパラメーターである。また、 ω_1, ω_2 は回折に寄与する微小部の角度位置 ω の両側最大角を示すもので、図8に示すように、マスキングテープ端部による遮蔽を考慮すれば、次式のように表される。

$$\begin{aligned} &\beta_c(-\omega_1) + \omega_c \leq 90^\circ, \gamma_c(\omega_2) + \omega_c \leq 90^\circ \text{ の場合} \\ &\omega_1 = -\beta_c(-\omega_1) + \cos^{-1}\left\{(\rho/r + t/r)\cos\{\beta_c(-\omega_1) + \omega_c\}\right\} \\ &\omega_2 = -\gamma_c(\omega_2) + \cos^{-1}\left\{(\rho/r + t/r)\cos\{\gamma_c(\omega_2) + \omega_c\}\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\beta_c(-\omega_1) + \omega_c \geq 90^\circ, \gamma_c(\omega_2) + \omega_c \leq 90^\circ \text{ の場合} \\ &\omega_1 = \omega_2 = \omega_c \end{aligned}$$

$$\text{ただし、}\omega_c = \sin^{-1}(t/\rho)$$

なお、 ω_1 および ω_2 は、X 線有効侵入深さは試料半径に比べて十分に小さい ($\delta/\rho \ll 1$) と近似するとともに、 $\gamma_c(\omega_2) \approx \hat{\theta}_0 + \psi$, $\beta_c(-\omega_1) \approx \hat{\theta}_0 - \psi$ とすることにより、 $t/\rho, \hat{\theta}_0, \omega_c, \psi$ から求めうる関数として取り扱った。

さらに、図6に示した円柱形状への X 線照射では、測定面はゴニオメータ中心 P 点より下側になるため、P 点以外の部分では回折角に観測誤差が生じる。その角度誤差は、P. Doig ら⁷⁾ が走査型検出器方式で求めているものを位置敏感型検出器方式の場合に適用すれば、

$$\Delta_{2\theta}(\omega) = \frac{q\rho(1 - \cos\omega)\sin 2\theta_{\tau}(\omega)}{h \sin\{\theta_{\tau}(\omega) + \psi\}} \quad (4)$$

と表される。この場合、観測誤差 $\Delta_{2\theta}(\omega)$ は微小部からの回折角 $2\theta_c(\omega)$ の低角度側に生じることから、 $2\theta_c(\omega)$ を $-\Delta_{2\theta}(\omega)$ だけ補正する。ここで、q は PSPC の測定角度範囲、h は PSPC の有感部長さである。なお、検出器が PSPC の場合、回折強度曲線が見かけ上歪むが、応力測定に関しては補正の必要性はないとされていることから⁸⁾、本解析においても考慮しない。

(B) 軸方向応力測定の場合

図7に示す軸方向 X 線照射における、dV からの X 線回折強度 dI_{dA} は、式(5)で表すことができる。

$$dI_{dA} = A B \cos\omega I_0 e^{-\mu L_A(r, \omega)} r dr d\omega \quad (5)$$

$$L_A(r, \omega) = (\rho - r) \sec\omega (\operatorname{cosec}\gamma_A + \operatorname{cosec}\beta_A)$$

$$\gamma_A = \theta_A + \psi, \quad \beta_A = \theta_A - \psi$$

また、円周方向の回折強度を求めた場合と同様に、微小部 dV での回折角 $2\theta_A$ および合成回折強度曲線 I_{dA} は、式(6)、式(7)から求め得る。

$$2\theta_A = (\sigma_L / K) \sin^2\psi + 2\hat{\theta}_0 \quad (6)$$

$$I_{dA}(2\theta) = \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \int_{\rho-\delta}^{\rho} e^{-U\{2\theta-2\theta_A\}^2} dI_{dA} \quad (7)$$

なお、測定面が仮想平面 S より下になることによる観測誤差は、前節と同様に考慮している。しかし、照射領域端部でのマスキングテープによる入射 X 線および回折 X 線の遮蔽は、この方向の場合、回折強度には影響するが、回折角には影響しないため考慮しない。

(3) 解析結果

式(3)、式(7)から、並傾法における各ψ角の合成回折強度曲線を実験とほぼ同じ条件の下で求めた。そのピーク位置を半価幅法で定め、sin²ψ法を用いて軸方向および円周方向の残留応力を算出した。解析条件を表 2 に示す。この条件は、前述の実験と同じ CrK_α線による αFe211 回折を想定している。また、応力の大きさを示す σ_ω/K、σ_L/K は +1 deg. (圧縮応力) とするとともに、合成回折強度曲線の半価幅は 2°~2.5° となるように U を選択し、いずれも実験結果とほぼ同程度となるようにした。なお、K_{α1} と K_{α2} の分離は行っていない。

図 9 に、線径φ5mm、X 線照射領域 2ζ=1mm, 2mm, 3mm (テープ厚さ t=0.15mm) における円周方向応力に対する

表 2 数値解析条件
Conditions for stress analysis.

Stress factor σ _ω /K, σ _L /K	+1 deg.
Diffraction angle 2θ ₀	155.94 deg.
Linear absorption coeff. μ	950.5 cm ⁻¹
ψ angle	0, 15, 25, 30, 35, 40, 45 deg.
Gaussian parameter U	0.7 deg ⁻²
Angle range of PSPC q	20 deg.
PSPC active length h	100 mm

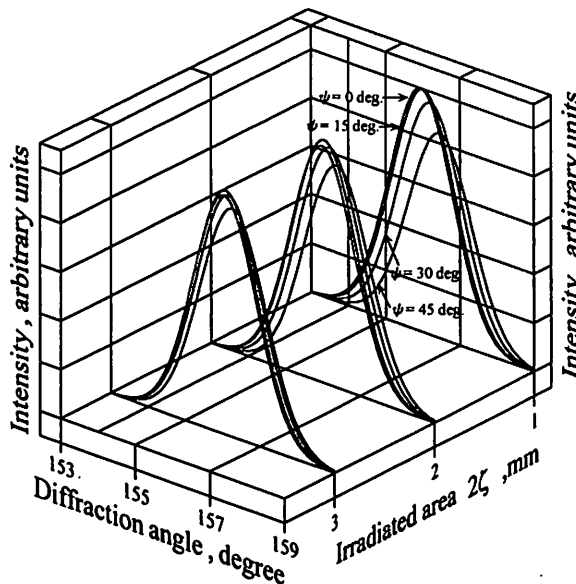


図 9 種々の照射領域の大きさにおける円周方向応力の回折強度曲線 (線径 φ5)
Diffraction profiles of circumferential stress calculated from various irradiated areas on φ5 bar surface.

る合成回折強度曲線を示す。また、図 10 は図 9 の回折強度曲線から得られた 2θ-sin²ψ線図である。図 9、図 10 の解析結果の特徴は、実験結果の特徴とよく一致しており、本解析の妥当性を示すものとなっている。

次に、図 10 の 2θ-sin²ψ線図から求めた残留応力と X 線照射領域の大きさの関係を図 11 に示す。ここで、横軸は X 線照射領域 2ζと線材直径 2ρの比 ζ/ρ、縦軸は各 X 線照射領域における評価応力 σ と設定応力 σ₀ または σ_L の比 σ/σ₀, σ/σ_L であり、X 線照射領域の大きさおよび残留応力を無次元化して表している。図によると、解析により求めた軸方向残留応力 (●) は照射領域の大きさや線径に関係なくほとんど変化しないが、円周方向残留応力 (■) は、ζ/ρの増加に伴って急激に減少する。これらは図 11 に示す曲線で近似的に表すことができる。なお、円周方向応力の解析結果において、ζ/ρの小さい領域で曲線が存在しないのは、マスキングテ

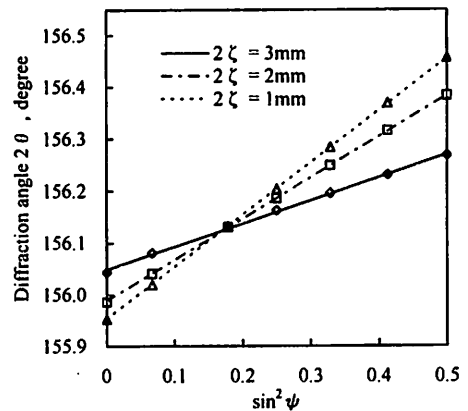


図 10 種々の照射領域の大きさにおける円周方向応力に対する 2θ-sin²ψ線図 (線径 φ5)
2θ-sin²ψ diagrams of circumferential stress calculated from various irradiated areas on φ5 bar surface.

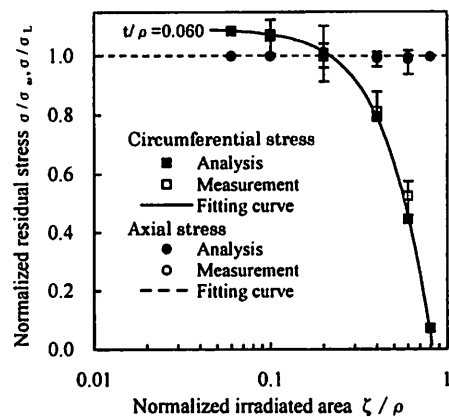


図 11 φ5 線材の規格化照射領域 ζ/ρ と規格化応力 σ/σ₀, σ/σ_L の関係
Relations between normalized irradiated area ζ/ρ and normalized residual stress σ/σ₀, σ/σ_L on φ5 bar surface

一ブ端部の遮蔽により回折が生じないことによる。この円周方向圧縮残留応力の近似曲線は、式(8)で表すことができる。

$$\sigma/\sigma_0 = M \cos\{p(\zeta/\rho)\} \quad (8)$$

$$M \approx 1.09, p \approx 1.90, \zeta/\rho \leq (\pi/2)/p \approx 0.83$$

図11の解析結果に前述の実験結果を重ねてプロットした。ただし、実験結果については、設定応力 σ_0 、 σ_L が不明のため、最も小さいX線照射領域での σ/σ_0 、 σ/σ_L が解析結果と一致するとしたときに求められる σ_0 、 σ_L を用いて残留応力測定値を無次元化した。実験で得た照射領域の大きさに対する軸方向および円周方向応力の関係は解析結果とほぼ一致している。

ここで、線径 $\phi 5\text{mm}$ の場合について求めた図11の結果は、横軸が ζ/ρ と無次元化表示されていることから、すべての径において適合すると見がちである。しかし、実際は図7に示したようにマスキングテープの影響で、式(3)中の ω_1 、 ω_2 の大きさが異なるため、 t/ρ によって円周方向応力にわずかな差異が生じる。図12に、 $\phi 20\text{mm}$ ($t/\rho=0.015$)、 $\phi 8\text{mm}$ ($t/\rho=0.038$)、 $\phi 4\text{mm}$ ($t/\rho=0.075$) について求めた円周方向応力の解析結果および前述と

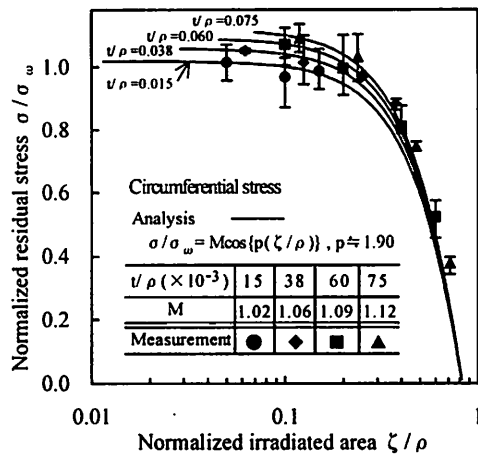


図12 表2の条件下での種々の t/ρ に対する σ/σ_0 - ζ/ρ 近似曲線の変化

Relations between normalized irradiated area ζ/ρ and normalized residual stress σ/σ_0 for various values of t/ρ under the conditions shown in Table 2.

表3 拡大した数値解析条件

Widened conditions of the stress analysis.

Diffraction plane, Characteristic Xray	Diffraction angle $2\theta_0$, degree	Linear absorption coefficient μ , cm^{-1}
α Fe 211, CrK_α	155.94	950.5
γ Fe 311, CrK_β	149.6	682.9
Cu 420, CuK_α	144.7	460.3
Al 420, CoK_α	162.1	209.4
Stress factor σ_0/K	-3, -2, -1, +1, +2, +3 deg.	

同様の方法で無次元化した実験結果を $\phi 5\text{mm}$ のものとともに示す。実験結果はおおむね解析結果の近似曲線に一致している。 t/ρ の違いによる近似曲線の差異は式(8)のMで表すことができ、Mの値はほぼ t/ρ に比例して増大する。なお、 $M > 1$ となり、 σ が σ_0 より大きくなることもあるのは、マスキングテープエッジでの遮蔽により、 ψ 角が大きくなるほど ω_1 が小さくなり、 $0^\circ < \omega \leq \omega_2$ に存在する微小領域の回折寄与分が相対的に大きくなって、圧縮応力の場合、回折角が高角度側にシフトするためである。

ところで、式(8)は、 CrK_α 線による αFe211 回折について求めたものであり、材料やX線の種類(波長)、応力の大きさなどが変われば、 μ 、 δ 、 $2\theta_0$ 、 σ_0/K が異なるため、式(8)とは異なる曲線となることが予想される。そこで、 μ 、 δ 、 $2\theta_0$ が大きく異なるいくつかの材料と特性X線の組み合わせを取り上げ、設定応力の大きさ

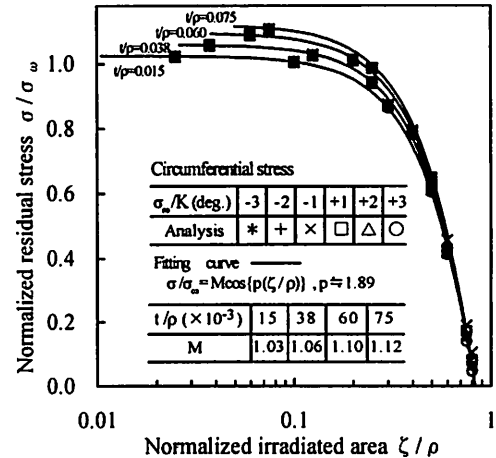


図13 CoK_α -Al420の σ/σ_0 - ζ/ρ 近似曲線

Relations between normalized irradiated area ζ/ρ and normalized residual stress σ/σ_0 for CoK_α -Al420.

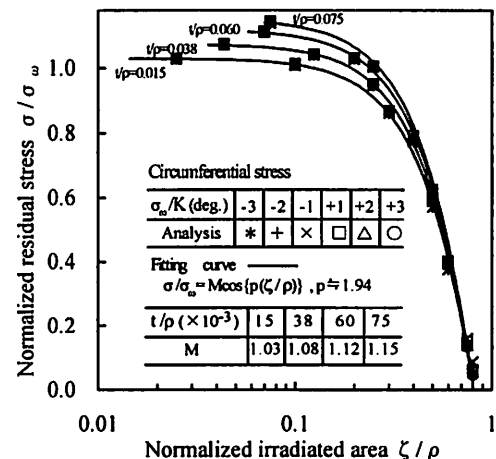


図14 CuK_α -Cu420の σ/σ_0 - ζ/ρ 近似曲線

Relations between normalized irradiated area ζ/ρ and normalized residual stress σ/σ_0 for CuK_α -Cu420.

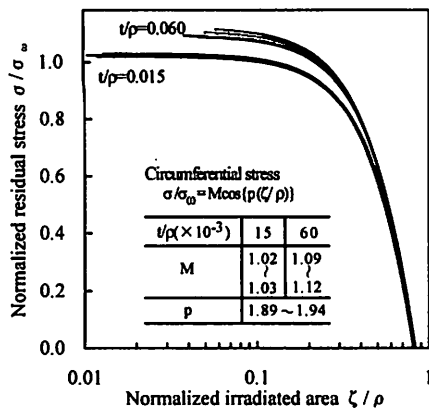


図 15 表 3 に示した種々の材料および応力下での $\sigma/\sigma_0 - \zeta/\rho$ 近似曲線の変化
Variation in the $\sigma/\sigma_0 - \zeta/\rho$ curves fitting in $M \cos\{p(\zeta/\rho)\}$ for different diffraction conditions and stress factors σ_0/K shown in Table 3.

を広範囲に変えた場合について解析を行い、図 12 と同様の円周方向残留応力の近似曲線を求めた。取り扱った材料と使用する特性 X 線、回折面、回折角および線吸収係数を表 3 に示す。ただし、 αFe211 以外については、 $2\theta_0$ として無ひずみ時の回折角を用いた。さらに、応力の大きさに相当する σ_0/K の値 (-3 (引張り応力) ~ +3 (圧縮応力)) も表 3 に合わせて示す。その他の条件は表 2 と同じである。

図 13 および図 14 に、それぞれ Al420 と Cu420 の解析結果を示す。両図における解析結果は、図 12 の場合とほぼ同様の傾向を示しており、したがって、それらの近似曲線はいずれの条件の場合も、式(8)と同様の余弦曲線で表すことができ、それぞれの曲線の違いは M, p の値で表し得ることを示している。

図 15 に、 $t/p=0.015$ および $t/p=0.060$ について、表 3 に示した条件下で解析した結果をまとめて示す。厳密には材料、測定条件、応力の大きさに応じて M および p 値を定める必要があるが、それぞれの M, p 値における σ/σ_0 の差は小さく、実用的には、これらの中間値を用いれば、材料や測定条件、応力の大きさなどの違いによる σ/σ_0 の変動幅をおおむね ± 0.05 以下とすることができる。

実際には、照射領域の設定精度やマスキングテープ端面の形状などにより多少の誤差が生じるが、この結

果を用いれば、実測の残留応力から形状因子 ζ/ρ のみによって、実在する円周方向残留応力を概略推定することができる。

4. 結論

X 線応力測定法標準にしたがって細径線材表面の残留応力を測定する場合の、表面形状に起因した応力値誤差と X 線照射領域の大きさの関係を、実験的および解析的に明らかにした。結果の概要は以下の通りである。

(1) 円周方向残留応力の実測値は、X 線照射領域を大きくすると、実在する残留応力よりも小さく評価される。

(2) 円周方向残留応力の実測値 σ と実在する残留応力値 σ_0 の比および実測残留応力の測定誤差 ξ は、マスキングテープ(厚さ t)による遮蔽の影響を考慮すれば、線材直径 2ρ と円周方向の X 線照射領域 2ζ の比を用いて

$$\sigma/\sigma_0 = M \cos\{p(\zeta/\rho)\}$$

$$\xi = \sigma [M^{-1} \sec\{p(\zeta/\rho)\} - 1]$$

$$M \approx 1.81(t/\rho) + 1, p \approx 1.93, \zeta/\rho \leq (\pi/2)/p \approx 0.81$$

で近似的に表すことができる。これより実在する残留応力や形状に起因する測定誤差を推定することができる。

(3) 軸方向残留応力は、X 線照射領域の大きさや線材直径にほとんど影響されない。

参考文献

- 1) 米谷茂, 残留応力の発生と対策 養賢堂 (1975)
- 2) 日本材料学会編, (改著) X 線応力測定法 養賢堂 (1981)
- 3) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会, X 線応力測定法標準 日本材料学会 (1997)
- 4) 後藤 徹, 大谷真一, 材料, 47, 1188 (1998)
- 5) カリティ, X 線回折要論 アグネ (1980)
- 6) 福良二郎, 藤原晴夫, 日本機械学会論文集(第 1 部), 32, 1597 (1966)
- 7) P. Doig, P. E. J. Flewitt, Phi. Mag., A-37, 749 (1978)
- 8) 大谷真一, 吉岡靖夫, 材料, 38, 617 (1989)