

304

急激な応力勾配のあるときのX線的残留応力解析

(第2報 重み付き平均解析法の実験的検討)

徳島大学工学部 英 栄次 藤原晴夫

1. 緒言 第1報で表面層に急激な応力勾配のある場合のX線的残留応力解析法として、 $\sin^2\psi$ 法に代る重み付き平均解析法を提案した。本報ではこの方法の有効性を確認するための実験的検討を行った。SUJ2の焼なまし材をラッピング加工すると、表面層には無方位で急激な応力勾配を有する残留応力状態が得られ、本解析法を検討するのに適した試料となった。測定された $\alpha\psi$ - $\sin^2\psi$ 線図が直線ではなく法曲化すること、さらにピーク法、半価幅中点法、重心法に差のあることを確認した。また試料表面を逐次電解研磨することによりその精度を不み測定を行い、重み付き平均解析法で深さ方向への応力分布を調るとともに $\sin^2\psi$ 法による解析結果と比較検討した。

2. 試験片の準備とX線測定条件 大きな残留応力の発生することを目的としてSUJ2を試験片に選んだ。形状は直径30mm、厚さ10mmの円板であらかじめ850℃、30分間真空焼鈍し初期残留応力を零にした。次にこの試料に即注の条件でラッピング加工を施した。ラップ表面のあらさは2.4 μm 、また逐次電解研磨後の表面あらさは約0.6 μm であった。X線測定には側傾法を採用し回折面は(211)面を用いた。また $K\alpha$ 二重線分離の手続きの煩雑さを回避するために強度を多少犠牲にして $\text{CrK}\beta$ 線を用いた。回折角は $2\theta \approx 126^\circ$ である。fixed count法によりbackgroundからピークを含めて回折線回折を掃いた。

3. 残留応力の解析理論 図1においてx軸y軸を試料表面上にとりz軸を表面法線方向にとる。主応力軸の一つがz軸方向で、 $\sigma_z = 0$ 、かつ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_y$ などが深さによらず一定であると仮定すると

$$\varepsilon_\psi = \frac{1+\nu}{E} \sigma_\psi \sin^2\psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (1)$$

となる。これが従来使用されてくる $\sin^2\psi$ 法の基本式である。

しかし、 σ_y が深さ方向に応力勾配を有する場合この式の適用は好ましくなく、重み付き平均解析法を用いなければならぬ。等z軸応力で表面から直線的に変化するような状態($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0 + \alpha z$)かつ $\sigma_z = 0$ と仮定すると次式が得られる。

$$\bar{\varepsilon}_\psi = -\frac{2\nu}{E} \sigma_0 + \frac{1+\nu}{E} \sigma_0 \sin^2\psi - \frac{1}{E} \{2\nu - (1+\nu)\sin^2\psi\} \frac{\sin\theta}{2\mu} \cdot \alpha \sqrt{1 - \sin^2\psi} \quad (2)$$

また後の右標で問題になるが $\sigma_z = \text{const.} \neq 0$ と仮定して(2)式を書き換えると次式になる。

$$\bar{\varepsilon}_\psi = \frac{1}{E} (\sigma_z - 2\nu\sigma_0) + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_z) \sin^2\psi - \frac{1}{E} \{2\nu - (1+\nu)\sin^2\psi\} \frac{\sin\theta}{2\mu} \cdot \alpha \sqrt{1 - \sin^2\psi} \quad (3)$$

以上の式中Eはヤング率、 ν はポアソン比、 σ_0 は表面での応力値、 α は応力勾配、 μ は線吸収係数、 θ は回折角である。

ラッピング条件: と粒GC#600, ラップ速度0.44m/s, ラップ圧力0.015MPa, ラップ液 マシン油, ラップ時間30min

図2は回折線位置決定における3種の方法を图示した。ピーク法には最大強度付近の数点を放物線近似する方法、重心法には前報で述べたように $1/5 I_{max}$ 法を用いた。

4. 実験結果と考察

図3は焼鈍材より得られた $\sin^2\psi$ 中線図である。各ピーク位置決定法ともほぼ直線かつ水平な関係が得られ初期残留応力の無いことが確認された。理由はよくわからないが $\text{CuK}\alpha$ 線の (211) 回折線は焼鈍状態においてすでに非対称回折を示し、各ピーク位置決定法で差が認められる。しかし ψ が長、それもこれらの間の差はほぼ一定であり、以後系統的な差として処理した。

図4はラッピング加工した表面から得られた $\sin^2\psi$ 中線図である(ピーク法によった。試料表面図で図示された4つの方位に対して測定を行ったが、各 ψ 方向に対する $\sin^2\psi$ 中線図は完全に一致し、残留応力状態が無方位であることが確認された。このことにより単純化したモデルによる(2)式あるいは(3)式が適用され得る。

図5は同じくラッピング加工した表面および $2\mu\text{m}$ 研磨した面における $\sin^2\psi$ 中線図の例で、回折線位置決定法による差を示したものであり、位置決定法の違いにより明らかに差のあることが認められる。また ψ と $\sin^2\psi$ との間には直線関係が認められず、湾曲化していることが図4とともに明白である。これらの事実はX線浸入深さの範囲内で急激な応力勾配が存在するとの確かな表われであると居えられる。3種類の回折線位置決定法で差が認められたが、前報で述べたように(2)式あるいは(3)式で表わされる重み付き平均解析法への適用に意味があるのは、回折線の重心より求めた値であるから、以下の計算にはすべて重心法で整理した。

図6は逐次電解研磨した表面での測定結果を(1)式、(2)式および(3)式により最小二乗法で計算して求めた応力分布を表わす。重み付き平均解析法はX線測定した表面での

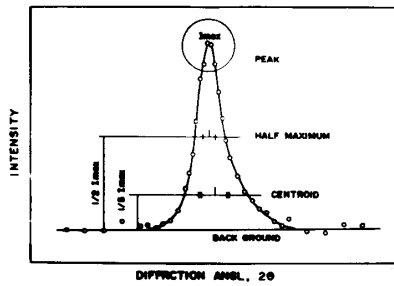


図2 ピーク位置決定法

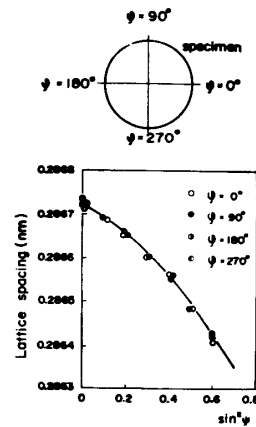


図4 ラッピング加工表面

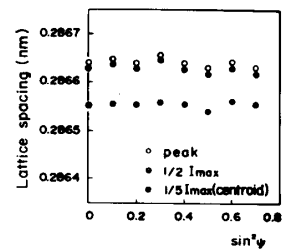


図3 焼鈍材 SJSZ

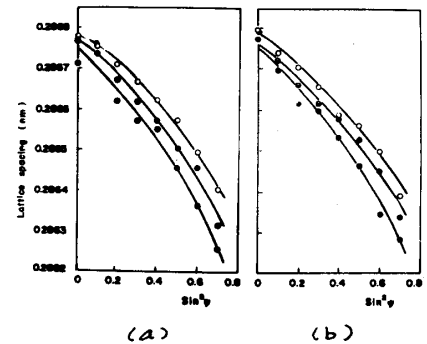


図5 ラッピング加工層 回折線位置決定法による研削 (a) $t=0\mu\text{m}$ (b) $t=2\mu\text{m}$

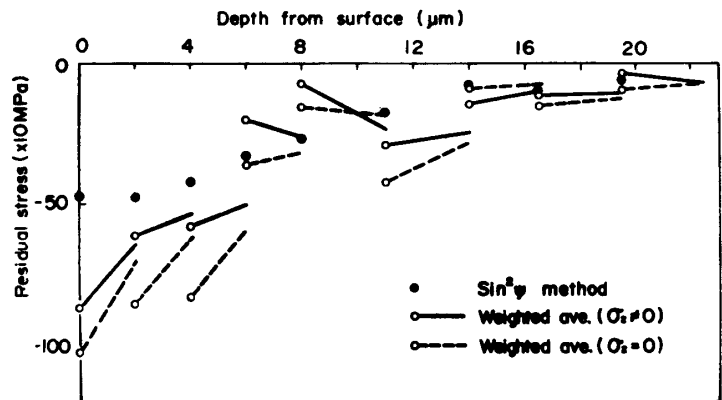


図6 ラッピング加工層の残留応力分布の解析結果

応力値と深さ方向への応力勾配を同時に求める方法であるから、逐次電解研磨した面での測定値から解析した結果は連続な折れ線になるべきである。表面層除去による応力の再配列があると当然不連続になるが、試験片の初期厚さ t_0 に比べ2層除去の厚さが非常に小さいため、再配列の影響は無視できることを確認している。図4において2つの重み付き平均解析法の式を用いた結果を比較すると、 $\sigma_z = 0$ と仮定したものは連続性が悪く、 $\sigma_z \neq 0$ と仮定したものが連続性の良いことがわかる。なお $6\mu\text{m}$ および $8\mu\text{m}$ の深さにおける不連続性は回折強度分布曲線の測定に誤差が入ったためと解釈している。当然のことながら応力勾配の存在する場合、 $\sin^2\psi$ 法による解析は表面での応力値を与えるものではなく、X線侵入深さの応力分布のある平均値を与えるものであるから、表面での値は重み付き平均解析法で求めた値より小さい値になっている。しかし、表面下約 $16\mu\text{m}$ 以上の応力勾配が認められなくなる深さでは $\sin^2\psi$ 法による結果と重み付き平均解析法による結果は一致してくる。

最後に、重み付き平均解析法により求められた結果が真の応力分布を示しているか否かを検討する必要がある。これは従来の $\sin^2\psi$ 法による解析法(1)式と利用可能となることである。青山ら²⁾が紹介したように、表面から深さ方向に線形に変化する応力分布モデルを仮定し、(2)式あるいは(3)式を用いて $\sin^2\psi$ 線回を掃く。これを(1)式の $\sin^2\psi$ 解析法によってその平均勾配 α より、2応力値を算出する。そしてその応力値が仮定した応力分布モデルで何 μm の深さに相当する応力値であるかを調べる(この深さを有効深さ t_e と呼ぶことができる)。本実験条件に一致させて $\sin^2\psi$ の値を

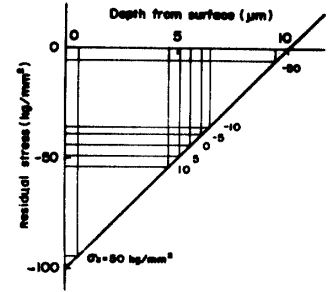


図7 有効深さ

0.0 から 0.1 および 0.7 までの8点を採用すると、 $\sigma_z = 0$ としたときは表面における応力値 σ_0 、また応力勾配 α を知らず有効深さはほぼ $t_e = 5.6\mu\text{m}$ であるが、 $\sigma_z \neq 0$ と仮定したときは図7に示されるように σ_z が -50kg/mm^2 から 50kg/mm^2 に変化するにしたがい、有効深さは $t_e = 9.3\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ に変化する。一方、図5などの実験結果をもとにして重み付き平均解析法(3)式を用いた場合、 $t = 0 \sim 10\mu\text{m}$ の深さの範囲で $\sigma_z \approx -5\text{kg/mm}^2$ が得られた。このときの有効深さは図7によると $t_e = 6.1\mu\text{m}$ となる。図6の実験結果を見ると、表面($t = 0$)での $\sin^2\psi$ 法による応力値は約 -50kg/mm^2 であり、この応力値は重み付き平均解析法(3)式($\sigma_z \neq 0$)の応力分布に当てはめて約 $6 \sim 7\mu\text{m}$ の深さの応力値と一致している。また重み付き平均解析法(2)式($\sigma_z = 0$)の場合には約 $10\mu\text{m}$ の深さの応力値との対応が見られ、図7の $t_e \approx 5.6\mu\text{m}$ とは相違しない。これらのことから、重み付き平均解析法(3)式は表面の応力値 σ_0 と表面下の応力勾配 α をより正確に与えるものと考えられる。しかも、 σ_z を考慮した方がより精度の良いことから、加工層のX線的残留応力を求めるに際して3軸状態の応力解析を導入する必要性のあることを示唆していると言えよう。

参考文献 1) M. G. Moore, W. R. Evans, SAE Transactions, **66**, 740 (1958).
 2) 若水, 並川, 青山, 材料, **21**, 1106 (S. 47).