

表面層における残留応力分布の測定技術の開発

Development of technique for residual stress measurement in sub-surface of components

利用者 林 眞琴¹⁾、鈴木 裕士²⁾、秋田 貢一²⁾
 Makoto HAYASHI Hiroshi SUZUKI Koichi Akita

所属 1) 茨城県企画部、2) 原子力機構

概要

放射光X線の侵入深さは鋼では1.5mm程度で、ラボX線と中性子の侵入深さの中間にあり、相補的に利用できるとされてきた。しかし、3軸応力場で表面に平行な2軸方向の応力を測定するのは困難である。そこで、中性子により表面近傍の応力を測定するため、ゲージ体積が測定試料から外れた場合に生じるみかけのピークシフトを評価した。RESA2では入射中性子強度が低いために、精度よく定量的に評価することはできなかったが、みかけのピークシフト量は試料表面の曲率の影響を受けないことが分かった。引き続き2011AでRESA1を利用して検討を継続する。

キーワード 残留応力, 表面層応力, ゲージ体積

1. 目的

試料の表面下1mm程度の浅い領域における残留応力測定技術を確立する。

2. 実験方法

ラボX線(Cr-K α 線)は波長が $\lambda=2.29032\text{\AA}$ ($E=4.27\text{keV}$)で有効侵入深さ(強度が入射強度の1/eとなる深さ)は炭素鋼では $d=7\mu\text{m}$ に過ぎない。放射光は高いエネルギーのX線の利用が可能である。例えば $E=70\text{keV}$ の放射光を用いると鋼では侵入深さは $d=1.4\text{mm}$ となる。一方、波長が $\lambda=2\text{\AA}$ 程度の熱中性子を用いると鋼での侵入深さは $d=85\text{mm}$ と非常に深くなる。このように3種類の線源によって材料への侵入深さが異なるために相補的に使用することが行われている。ラボX線では $\sin^2\psi$ 法により試料の法面内において数点測定して応力を決定することができる。放射光や中性子では基本的には3軸方向のひずみを測定してHookeの式により各方向応力を算出する。このため、侵入深さの極めて大きい中性子では容易に3軸方向ひずみを測定できるが、放射光は侵入深さが1mm程度であるため、表面法線方向ひずみの測定は比較的容易であり、ひずみスキャン法による測定が行われている。しかし、表面方向のひずみに対しては、回折角度 2θ が角度で経路が極端に長くなるため測定が困難である。

以上のことから、3軸応力状態にある試料の表面近傍の応力も中性子に依らざるを得ない。ところが、中性子は強度が低いため、比較的大きいゲージ体積を必要とする。入射中性子強度の高い原子炉中性子源では、一般的にはゲージ体積を $V=1\text{mm}\times 1\text{mm}\times 3\text{mm}$ くらいにしている。ここで3mmと大きく取っている方向は応力分布がほぼ等しい方向で、応力分布を測定したい方向では1mmである。このように中性子回折ではゲージ体積が大きいため、試料の深さ1mm程度の表面層を測定することには必ずしも適切とは言えない。その理由は、0.1mmオーダーの浅い領域を測定する場合、ゲージ体積が測定試料から外れることにより、ゲージ体積中心とディフラクトメーターの中心がずれて、回折ピークにみかけ上のずれが生じるためである。したがって、中性子を用いて表面近傍の応力を測定するためには、みかけのピークシフトを評価しなければならない。しかしながら、測定のために、みかけのピークシフトを測定するのは時間の無駄である。そこで、ピークシフト量に及ぼす試料表面の曲率の影響を明らかにすることを本研究の目的とする。

測定試料は一般機械構造用炭素鋼SM400とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304である。試料の形状は、板状試料が $50\text{mm}\times 25\text{mm}\times 10\text{mm}$ で、丸棒試料は長さが50mmで直径が $\Phi=10\text{mm}, 20\text{mm}, 50\text{mm}$ の3種類である。みかけのピークシフトを求めるための試料はひずみ取りの熱処理を施した。SM400では 625°C 2時間保持後炉冷、SUS304では 850°C 2時間保持後炉冷である。残留応力はショットピーニングにより導入した。ショット径は $d=0.4\text{mm}$ と $d=1.0\text{mm}$ の2種類で、5気圧の圧縮空気により300%フルカバレージの施工とした。

測定にはRESA2を使用した。なお、測定精度の悪い200回折を避け、211回折を回折角度を極力 $2\theta=90\text{deg}$ 付近で測定できるようにモノクロメータの設定を行ったが、所定の角度に211回折を得ることができなかった。そのため、実験の前半では止むを得ず、200回折での測定を行った。これは最終的には、モノクロメータの制御系のケーブルが外れていたことが原因であることが判明し、後半の実験では211回折の測定も一部実施した。なお、ゲージ体積は $1\text{mm}\times 1\text{mm}\times 10\text{mm}$ である。

3. 実験結果と考察

焼鈍した炭素鋼SM400の平板と3種類の丸棒における200回折のピーク位置とゲージ体積中心との関係を図1に示す。ゲージ体積中心は回折角度が $2\theta=90\text{deg}$ として求めた。ゲージ体積中心が表面から $x=0.707\text{mm}$ 以上になればゲージ体積は全て試料内部となる。そのため、深さ0.8mm以上のところから得られた回折ピークはほぼ一定となる。なお、平板においては深さ $x=1.2\text{mm}$ 以上のところでやや回折ピークが高い側となっているが理由は不明である。3種類の丸棒においてもゲージ体積が試料内部にある位置でも若干回折ピーク位置に差が生じている。全て同じ素材から切り出して、同じ熱処理を施しており、何故差が生じているかは不明である。内部の回折ピーク位置は同じであるはずであるため、その差を

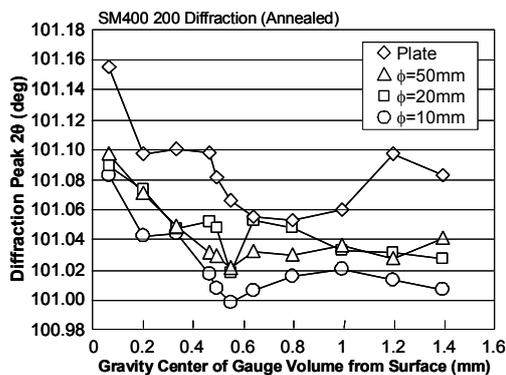


図1 炭素鋼における回折ピーク位置の分布

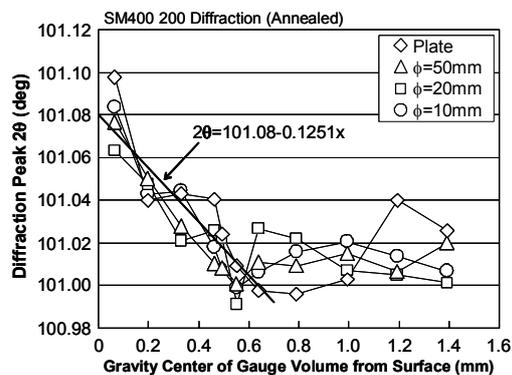


図2 補正した回折ピーク位置の分布

補正した結果を図2に示す。図2から分かるように、表面層のゲージ体積が試料から外れている部分の回折ピーク位置はほぼ一致する。なお、 $\Phi=20\text{mm}$ の試料については若干のずれがある。それを含めて、ゲージ体積が試料から外れる深さ $x=0.707\text{mm}$ 以内の回折ピーク位置と深さ x の関係を求めると図中にも示したように $2\theta=101.08-0.1251x$ となる。したがって、ゲージ体積が試料から外れる部分における回折ピークは次式により補正すればよいことになる。

$$\Delta 2\theta = 0.08845 - 0.1251x \quad (x < 0.707\text{mm})$$

なお、図1と図2から分かるようにみかけの回折ピーク位置のずれには試料表面の曲率は余り影響しないように見受けられるが、RESA1を利用しての追試が必要である。

次に、211回折によるショットピーニング材の表面層における残留応力分布を測定した結果を示す。図3に炭素鋼の焼鈍材と直径が0.4mmと1.0mmのショットを用いてピーニングした試料における表面近傍の回折ピーク位置を示す。ゲージ体積が完浴する深さが $x=0.7\text{mm}$ 以上では、多少ばらつきが大きいが生ずるが回折ピーク位置はほぼ一定である。表面近傍の回折ピーク位置を見ると、直径が0.4mmのショットを用いてピーニングした試料のピーク位置は、焼鈍材とほぼ同じようなところである。直径が1.0mmのショットを用いてピーニングした試料のピーク位置は、焼鈍材よりもかなり低角度側である。このピーニング材の回折ピーク角度から焼鈍材の回折ピーク角度を直接差し引いて求めた残留応力分布を図4に示す。通常、直径が1.0mmのショットを用いてピーニングした場合、表面の残留応力は -400MPa 程度の圧縮残留応力で、深さ0.3mmほどで最大圧縮応力を示し、その後、漸増して深さ0.5~0.6mmで引張り応力となる。図4をみると測定値のばらつきが大きく、定量的な評価が難しい結果といえる。

表面層近傍ではゲージ体積が 0.1mm^3 以下の非常に厳しい条件での測定となる。このような場合、RESA2では入射中性子束密度が低いと、精度を確保できるような測定結果を得ることができない。図2の結果は偶然得られたものと言える。深さが1mm以下の表面層であっても放射線では測定できないため、中性子に依らざるを得ないことは明らかであり、RESA1を用いて更に精度を上げた実験を行い、ゲージ体積が試料から外れることによるみかけのピークシフト量に及ぼす試料表面の曲率や回折角度の影響を定量的に評価することが必要である。

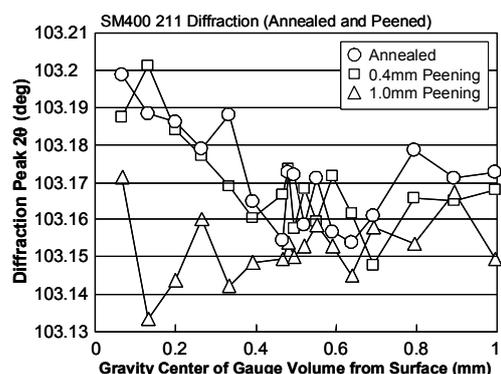


図3 炭素鋼焼鈍材とピーニング材の回折ピーク位置

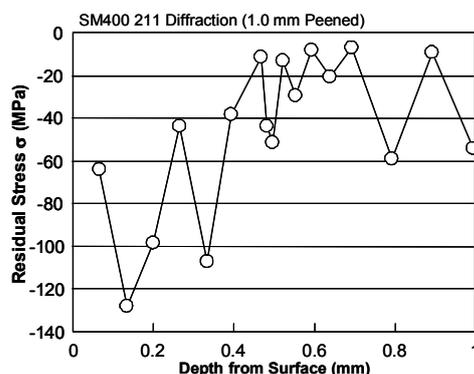


図4 ピーニング材の表面近傍の残留応力

4. 結論

試料表面近傍の残留応力は中性子に依らざるを得ないため、その場合にゲージ体積が試料から外れることに起因するみかけのピークシフトに及ぼす試料表面の曲率の影響を検討した。装置設定の不手際もあり、十分な結果を得ることができなかったが、炭素鋼の200回折の結果では、試料表面の曲率はみかけのピークシフトに影響を及ぼさず、1つの式で補正できることが分かった。しかしながら、RESA2では入射中性子束密度が低いと、精度が十分とは言えず、RESA1を用いて実験を行い、曲率や回折角度の影響をより定量的に評価することが必要である。