

日立機械研
原研東海研

○大城戸忍 日立電力電機 Gr 林眞琴
森井幸生, 皆川宣明, 盛合敦

1 緒 言

ショットピーニングに代表されるピーニング技術は、材料表面の残留応力を圧縮に変化させ、疲労特性や応力腐食割れ(SCC)を改善する技術として、一般産業に多く利用されている。ピーニングによる残留応力の改善効果は表面から数mm以内であり、これを非破壊的に測定する技術として、X線回折法が広く利用されている。X線回折法の利点は、比較的簡易な装置で測定が可能であること、鉄鋼系材料の場合25 μ m深さまでの残留応力を非破壊的に測定可能なことである。一方、X線回折法の欠点は、深さ方向の残留応力分布を測定する場合、表面を電解研磨で取除く必要がある。深さ方向の残留応力分布を非破壊的に測定する技術として中性子回折法があるが、この技術は中性子遮蔽材に機械的に加工された透過窓で測定領域が決定されるため、X線と比較すると測定領域が大きくなり、特に深さ方向の空間分解能は低いと言われている。

そこで、ピーニング加工した材料表面の残留応力を中性子回折法とX線回折法で測定し、中性子回折法で測定された残留応力の測定精度について検討した。また、表面に限定せず、局所的な残留応力評価に対する中性子回折法の適用性に関して検討することを目的に、き裂周りの残留応力測定も併せて行った。

2 実験方法

供試材はオーステナイトステンレス鋼 SUS304 である。残留応力の測定精度の検討は、300x300x6mmの板材にピーニング加工した試験片を用いた。また、き裂周りの残留応力測定には10x50x5mmの棒材を2本用意し、0.4%のひずみを負荷して溶存酸素濃度が8ppm、温度が289℃の純水中に500時間浸漬することによりき裂を導入した。1本は残留応力測定に供し、もう1本はき裂面をピーニング加工後、残留応力測定に供した。

中性子回折法による残留応力測定は、日本原子力研究所の残留応力測定装置(RESA: Neutron Diffractometer for Residual Stress Analysis)を用いた。中性子回折法による応力測定状況をFig.1に示す。波長 λ が0.20995nmの単色中性子線を用いて111回折の格子ひずみを測定した。測定位置は表面から深さ3.0mmまでの範囲である。測定領域は、板材表面の応力測定では0.5x0.5x13mm³、き裂周りの応力測定では0.3x0.3x8mm³である。直交する3方向の格子ひずみを測定し、Hookeの式を用いて残留応力を計算した。111回折の縦弾性係数 E_{111} は231GPa、ポアソン比 ν_{111} は0.19を用いた。

X線回折法による応力測定では311回折の格子ひずみをCr-K β 線を用いて測定した。測定面積は1x10mm²である。深さ方向の残留応力分布の測定は、試験片表面を電解研磨で逐

次除去して行った。残留応力は $\sin^2\psi$ 法で評価した。 $\sin^2\psi$ 法で用いたX線応力定数は366MPa/degである。

3 実験結果および考察

3.1 中性子回折法による表面近傍の残留応力測定

中性子回折法で表面近傍の残留応力を測定すると、回折に寄与する測定領域の不均一さに起因して回折ピーク位置がずれる。そこで、応力除去焼鈍した試験片の表面近傍における残留応力を、反射回折、透過回折の2条件で測定した結果をFig.2に示す。測定領域を0.3x0.3x8mm³とし、表面から0.1mm間隔で3mmまで測定した。反射回折では、回折角度は表面近傍で測定位置が深くなるに従い高角度側に直線的に変化し、0.7mmではほぼ一定となる。この回折角度のずれは約0.2degである。同様に、透過回折でも回折角度は測定位置が深くなるに従い高角度側に変化し、0.3mmではほぼ一定になる。回折角度のずれは反射測定と同じ0.2degである。これらの結果から、

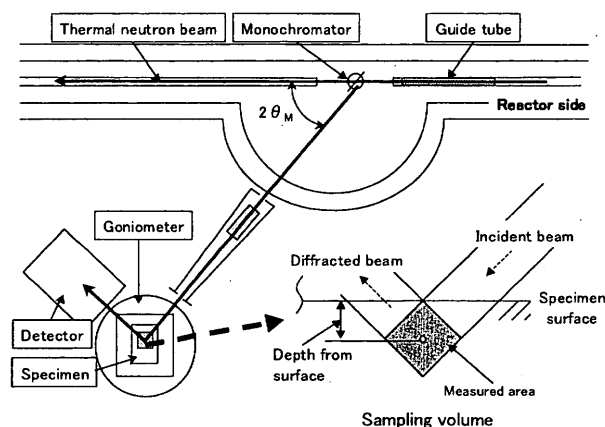


Fig.1 Set-up for residual stress measurement by neutron diffraction method.

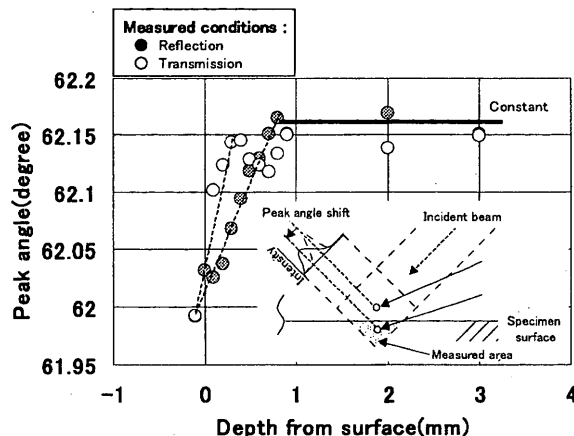


Fig.2 Change of diffraction profile obtained from stress free material surface.

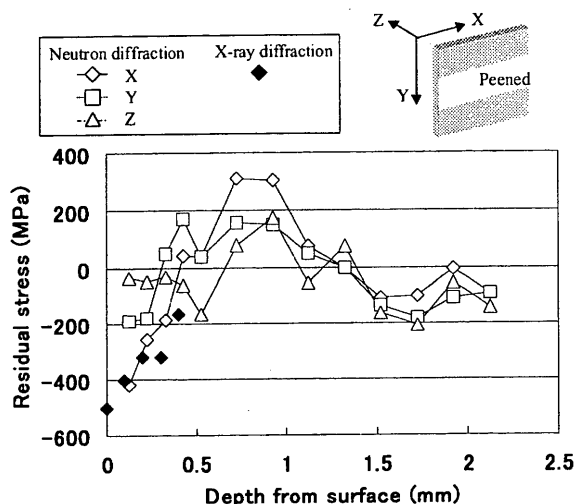


Fig.3 Residual stress distributions near surface of stainless steel plate after peening.

表面近傍を中性子回折で測定する場合、表面から 0.7 mm 以内の測定結果に対しては、測定領域の形状の影響を補正する必要がある。

板材にピーニング加工した試験片の中性子回折法および X 線回折法による残留測定結果を Fig.3 に示す。この残留応力値は、Fig.2 の結果を基に回折角のずれを直線近似して補正した回折角度を用いて計算された結果である。中性子回折法で測定されたピーニング加工におけるノズルの走査方向 (X 方向) および垂直方向 (Y 方向) の残留応力は、いずれも表面で約 400MPa の圧縮である。この残留応力は深さ 0.5mm で引張りとなり、深さ 1mm で約 300MPa の最大値を示し、深さ 1.5mm ではほぼ 0MPa となる。板厚方向 (Z 方向) の残留応力は深さ 0.5mm まではほぼ 0MPa であり、1 mm で約 200MPa の最大引張り応力に、1.5 mm ではほぼ 0MPa となる。X 方向応力について X 線回折法の結果と比較すると、両者はほぼ一致する。X 線回折法で測定される残留応力は、深さ方向 25 μ m の平均であるのに対し、中性子回折法では深さ方向 0.5 mm の平均であるので、表面に急峻な応力勾配を持つような残留応力分布の場合は、測定領域の大きい中性子回折法の残留応力は平均化され、X 線回折法の結果と比較して残留応力が小さくなるのが予想されるが、本測定ではほぼ同じ残留応力値であった。

これらの結果より、表面近傍の残留応力を中性子回折法で測定する場合、測定領域の不均一さを補正することにより X 線回折法とほぼ同じ測定精度で測定することが可能である。

3.2 中性子回折法による局所領域の残留応力測定

ピーニング前後におけるき裂周りの残留応力を中性子回折法で測定した結果を Fig.4 に示す。Fig.4 には測定精度を確認することを目的に、X 線回折法で測定した結果も併せて示した。測定においては深さが 1.5 mm のき裂の周辺を表面から 3 mm の深さまで測定した。

ピーニング前の試験片では試験片幅方向 (X 方向) の残留応力は、表面で約 200MPa の圧縮で、それより深いところでは約 100MPa の圧縮である。試験片長手方向 (Y 方向) の残留応力は深さ 1.5mm まではほぼ 0MPa であり、それより深い

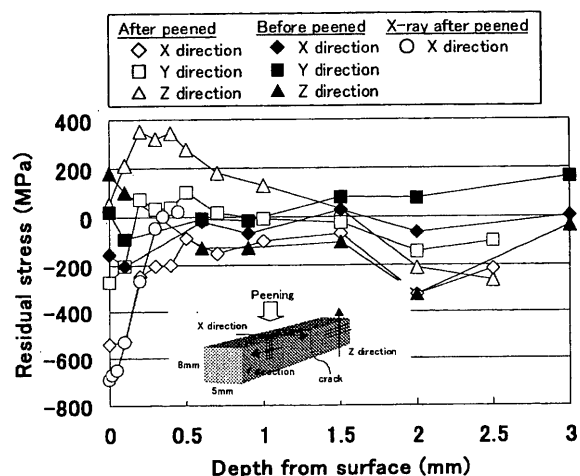


Fig.4 Residual stress distributions vicinity of crack before and after peening.

ところでは 100~200MPa の引張りである。板厚方向 (Z 方向) は、表面で約 200MPa の引張りであり、0.5mm より深いところでは 150~300MPa の圧縮である。ここで、深さ 1.5mm くらいまで Y 方向応力がほぼ 0MPa であるのは、応力腐食割れの進展により残留応力が開放されていることを示している。

ピーニング後の X 方向の残留応力は表面で約 600MPa の圧縮であり、深さ 0.5mm で -100MPa まで減少して、それ以上の深さではほぼ一定である。Y 方向の残留応力は、0.2mm 深さまで約 200MPa の圧縮であり、それ以上の深さではほぼ 0MPa である。Y 方向の残留応力が低いのは、ピーニング時にき裂が開いて拘束が弱くなるためである。Z 方向の残留応力は深さ 0.2mm で約 300MPa の最大引張り応力を示し、それ以上の深さでは漸減する。

ピーニング前後で残留応力の値を比較すると、ピーニングの効果がある表面から 0.5mm の範囲ではピーニング前後で差がみられるが、それ以上の深さでは ± 100 MPa の範囲で一致する。また X 線回折法の結果と比較すると、最大で約 200MPa 程度の差はみられるが、中性子回折法の結果は X 線回折法の結果とほぼ一致する。これらの結果より、中性子回折法はき裂周りのような局所的な残留応力も精度良く測定可能である。

4 結 言

表面近傍およびき裂周辺のような局所領域の残留応力測定に中性子回折法を適用し、その測定精度を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 中性子回折法を用いて表面近傍の残留応力を測定する場合、測定領域の形状に起因する回折プロファイルのピークシフトを補正する必要がある。
- (2) ピーニング加工した試験片の表面近傍の残留応力を中性子回折法で測定した結果は、X 線回折法で測定した結果とほぼ一致する。
- (3) き裂進展により開放された残留応力や、ピーニング加工による残留応力の変化を精度良く測定できたことから、局所領域の残留応力測定に中性子回折法を適用することは可能である。