

ウォータージェットピーニングによる残留応力の特性

Characteristics of Residual Stresses of Water Jet Peened Stainless Steel

新潟大学	鈴木 賢治 ¹⁾	Kenji SUZUKI	Member
原子力機構	菖蒲 敬久	Takahisa SHOBU	Non Member
徳島大学	城 鮎美	Ayumi SHIRO	Non Member

The material of the specimen was austenitic stainless steel, SUS316L. The residual stresses in the specimen was introduced by a water jet peening (WJP). The change in the residual stress with thermal aging at 773K was measured by an X-ray stress measurement. The WJP residual stresses were an equi-biaxial stress state, and the compressive residual stress did not decrease against the thermal aging. To investigate dependence of the residual stress on a lattice plane, the WJP residual stresses were measured using hard synchrotron X-rays.

Keywords: Coarse grain, X-Ray Stress Measurement, Synchrotron, Rotating-slit, Area Detector

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼の機械加工や溶接による引張り残留応力は応力腐食割れの原因となり、強度や機器の保全に係わる問題として軽視することはできない。その残留応力の改善法として、ショットピーニング^[1]、レーザーピーニング^[2]、ウォータージェットピーニング(以下、WJP)^[3]などが利用されている。また、オーステナイト系ステンレスは、結晶弾性異方性の大きい材料特性を持ち、残留応力にも回折面依存性がある^[4,5]。弾性異方性の大きい材料が熱時効を受けたとき、ピーニングによる圧縮残留応力が、どのような挙動をするのかについて不明な点が多く、その残留応力の特性を明らかにする必要がある。

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼を対象に、WJPによる残留応力の特性を明らかにするために、残留応力を測定し、高エネルギー放射光および中性子を用いて深さ方向の分布を測定した。また、773Kの高温大気中にて熱時効をさせながら、表面の残留応力状態の変化を明らかにした。さらに、WJP処理したままの残留応力と1000h熱時効した残留応力の回折面依存性についても解析したので報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片の材料は、平均粒径55 μm のオーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lである。試験片の寸法を長さ110mm、幅20mm、厚さ15mmに機械加工により仕上げ、さらに、WJP処理面を#400のエメリーで研磨した。

WJPの施工条件は、噴流速度48 ℓ/min 、施工時間40min/m、施工角度90°とし、ノズルを試験片幅(20mm)の中心に位置して長手方向に移動した。試験片の両端10mmはそれぞれ固定に使用しており、実際の施工範囲は長手方向中心に約80mmとなる。なお、WJP

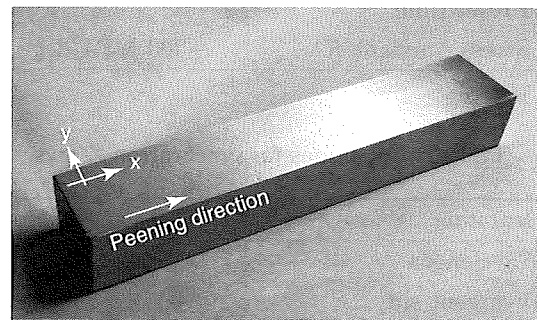


Fig. 1. Water jet peened specimen.

処理は1パスである。試験片の外観を図1に示す。WJPによりややピーニング面に粗さが見られる。

WJPにより形成された圧縮残留応力の熱的安定性を評価するために、試験片の長手方向に長さ20mmで切断して試験片のブロックとした。次に、それらの試験片を大気中にて温度773Kで1, 10, 100および1000hの時間で保持し、熱時効した試験片を用意した。

残留応力の深さ方向分布を測定した試験片は、熱時効と同様に試験片の長手方向に長さ20mmで切断して、放射光および中性子の透過を考慮して放電加工にて厚さをWJP後に8mmにした。

2.2 ラボX線応力測定

ラボX線によりWJP試験片の表面の残留応力を測定した。測定条件の詳細を表1に示す。特性X線はMn-K α を使用し、オーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lの $\gamma\text{-Fe}$ の311回折を利用した。本条件は、回折角 2θ が高回折角かつ回折強度も高く、応力測定の精度および効率がいよ。応力測定は並傾法で、 $\sin^2\psi$ の値は0~0.6、ステップ0.1の7点から $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図を作成した。

平面応力状態を調べるために、応力の測定方向は、0°(σ_x)、45°(σ_{45})、90°(σ_y)の3方向について測定した(図1を参照)。

X線応力測定の領域を制限するために、測定部に塩化ビニルテープにより $4\times 4\text{mm}^2$ のマスキングを施した。

¹⁾連絡先: 鈴木賢治, 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050, 新潟大学教育学部
E-mail: suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

Table 1. Conditions for X-ray stress measurement.

Measuring method	$\sin^2 \psi$ method
Optics	Parallel beam
Divergent angle of slits	0.64 deg
Irradiation area	$4 \times 4 \text{ mm}^2$
Target	Mn- $K\alpha$
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Diffraction	γ -Fe (311)
Diffraction angle $2\theta_0$	152.32 deg
Scanning angle 2θ	144.0 ~ 160.0 deg
Scanning step	0.1 deg/step
$\sin^2 \psi$	0.0 ~ 0.6 (0.1 step)
Preset time	1 sec
Stress constant K	-300 MPa/deg

Table 2. Conditions for synchrotron X-rays.

Beamline	BL02B1 at SPring-8
Wavelength	72.123 keV
Divergent slit	$0.2 \times 2 \text{ mm}^2$
Receiving slit	$0.2 \times 5 \text{ mm}^2$
Method	Constant penetration depth method
Effective depth T	30 μm
Linear absorption factor	5.84 /cm

これにより同一照射領域の応力を測定できる。

2.3 放射光および中性子応力測定

残留応力の回折面依存性を明らかにするには、多数の回折面を用いて残留応力を測定する必要がある。ラボX線では多数の回折面を測定することは困難なので、高エネルギーX線を利用できる大型放射光施設 SPring-8 で応力測定を実施した。なお、放射光による応力測定で利用したビームラインは BL02B1 である。

無ひずみの格子面間隔 d_0 によらない測定法として $\sin^2 \psi$ 法がある。しかし、WJP を施した面は、表面から深さ方向に急激な応力勾配を持つ。高エネルギーX線は侵入深さが大きく、 ψ 角により侵入深さが変化するために、応力勾配の影響を受け $\sin^2 \psi$ 線図が非線形となる^[6]。加えて、多数の回折面を用いる場合、それぞれの回折角 2θ により侵入深さが異なり、応力値をそのまま比較することができない。

その解決策として、本研究では侵入深さ一定法で応力測定を採用した^[7]。ゴニオメータの軸を制御することで、応力測定方向の χ 軸が変化してもX線侵入深さを一定に保つように回折測定方向の ω 軸を設定する。X線侵入深さ T を 30 μm に設定した後、 ω に対して次式

Table 3. Neutron diffraction conditions for stress measurement of WJP specimen.

Nuclear reactor	JRR-3 (Tokai, Japan)
Apparatus	RESA-II
Neutron wavelength	1.835235 Å
Linear detector	256 ch, 0.053614°/ch
Slit sizes	$1 \times 10 \text{ mm}^2$
Diffraction	γ -Fe, 311
Diffraction angle $2\theta_0$	115.7614°
Lattice constant a_0	3.593387 Å
Diffraction elastic constants	$E_{311} = 182.47 \text{ GPa}$ $\nu_{311} = 0.3067$

により χ の値を決定する。

$$\cos \chi = \frac{\sin \omega + \sin(2\theta - \omega)}{\sin \omega \sin(2\theta - \omega)} \mu T \quad (1)$$

ただし、 μ は線吸収係数である。 χ および ω 軸と ψ 角との関係は、

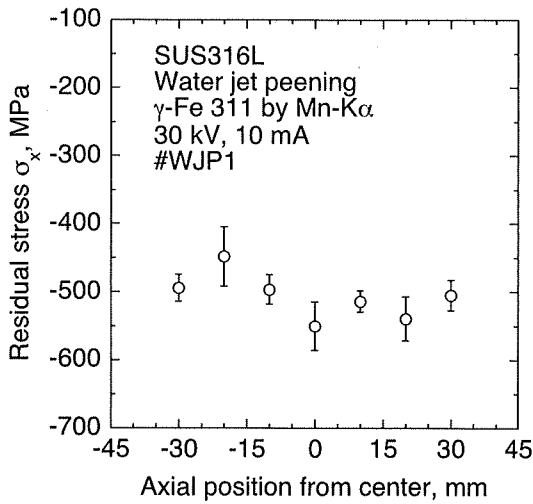
$$\cos \psi = \cos \chi \cos(\theta - \omega) \quad (2)$$

となる。具体的には、 $\sin^2 \psi$ の値の範囲と点数に対応する適当な ω と χ の組み合わせを用意する。

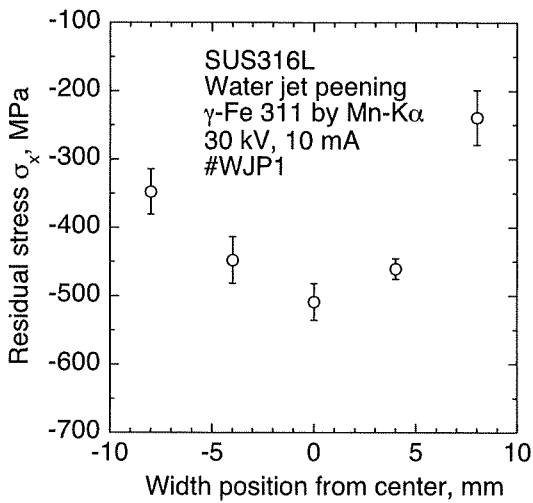
放射光は、粗大粒を持つ材料では回折プロファイルの乱れにより測定精度が低下する。それに対して中性子は、高エネルギーX線よりも深い侵入深さを持ち、ビームの発散があるために粗大粒の影響も少ない利点がある。残留応力の深さ方向の分布については、ひずみスキニング法を用いて非破壊的に測定することができる^[8]。中性子ひずみスキニングは、日本原子力研究開発機構研究炉 JRR-3 の残留応力測定装置 RESA-II を利用した。表 3 に中性子測定条件をまとめた。大凡の目安として、回折ピークを Gauss 関数で近似したときの回折ピーク高さが 150 カウントになるように測定時間を決定した。ひずみスキニングによる測定深さは、ピーニング面から裏側まで透過法で残留応力を測定した。測定位置は、0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 および 7 mm の計 9 点で測定した。

この中性子によるひずみスキニング法とは別に、放射光によるひずみスキニング法による残留応力の深さ方向分布も同一材で測定した。利用したビームラインは、SPring-8 の日本原子力研究開発機構専用ビームライン BL22XU である。

以上の応力測定に使用した回折面 (hkl) の回折弾性定数については、SUS316 の単結晶のステイフネス c_{ij} ^[9] から Kröner モデル^[10] を用いて計算した。なお、Kröner モデルによる回折弾性定数を web から入手できるようになっている¹。



(a) Axial position



(b) Width position

Fig. 2. Distributions of residual stress by WJP.

3. 実験結果および考察

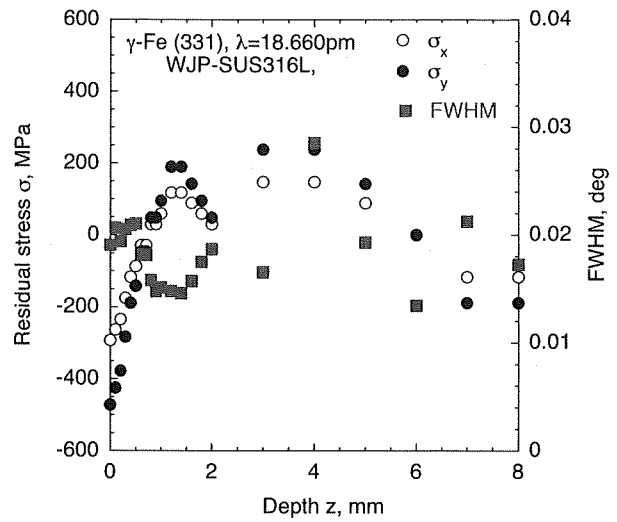
3.1 WJP による残留応力の分布

試験片を切断して熱時効する前に、WJP 試験片のピーニング面の残留応力分布を測定した。試験片中央から長手方向に ± 30 mm の範囲で試験片長手方向の残留応力 σ_x を測定した。その結果を図 2 (a) に示す。図 (a) からわかるように、測定した中心から ± 30 mm の範囲では、ほぼ WJP が安定して施されている。ピーニング面は塑性変形により微細化され粗大粒の影響もなく、精度よく残留応力が測定できた。

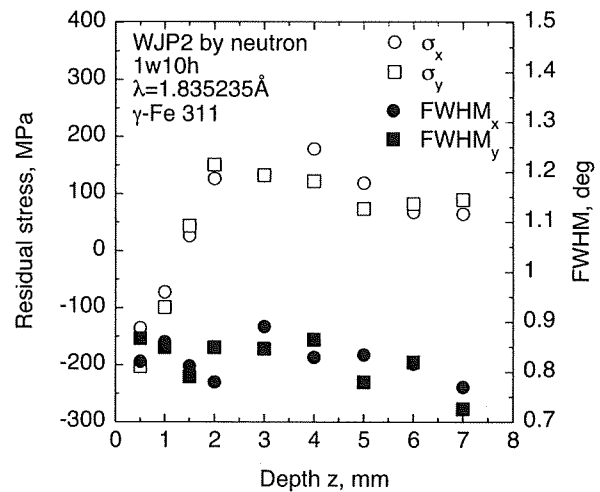
一方、試験片の幅方向の残留応力 σ_x の分布を測定した結果が図 2 (b) である。噴流ノズル直下を頂点として、圧縮残留応力が試験片幅方向に行くに従って低下する。図 (b) からわかるように、ノズル中心から進行方向垂直に ± 4 mm の範囲を超えると WJP の効果は低下する。

以上のことから、WJP による圧縮残留応力の領域がノズル進行方向に形成され、その幅は 8 mm 程度であ

Kroner_model/kroner.c.html



(a) Synchrotron X-rays



(b) Neutrons

Fig. 3. Distribution of residual stress and FWHM in the direction of depth.

る。

放射光によるひずみスキャニング法で測定した WJP 試験片の深さ方向への残留応力分布を図 3 (a) に示す。WJP 面には、約 -500 MPa の圧縮残留応力が導入され、残留応力は内部に向かい急激に増加し、深さ 1 mm から引張り側に変化し、さらに背面に向かい圧縮側へと変化する。放射光による測定では、ゲージ体積が小さく高い空間分解能を持つために、表面近傍の大きい応力勾配にもかかわらず応力を測定でき、図 2 のラポ X 線の測定値と同程度の残留応力が得られている。特に、表面付近は塑性変形により結晶が微細化しており、粗大粒の影響がなく放射光においては有利な領域である。

しかし、WJP による塑性変形の影響を受けない深さになると、放射光による半価幅 (FWHM) は大きくなるとつきが現れ、粗大粒の影響で正確なピーク決定ができていない。図 3 (a) の放射光による半価幅から、表面から深さ 1 mm 程度が WJP による影響層と判断できる。深

さ1.5 mm以降においては、粗大粒の影響から回折プロファイルの乱れがあり、放射光による半価幅は大きく変動する。

一方、中性子回折によりひずみスキニング法で測定したWJP試料の深さ方向の残留応力分布を結果を図3(b)に示す。残留応力の分布を見ると、表面に約-150 MPaの圧縮残留応力が形成され、WJPによる影響層は、応力分布から深さ約1.5 mmと思われる。中性子法による表面付近の圧縮残留応力が、放射光の残留応力分布と比較して小さな値になったのは、中性子法のゲージ体積が大きくて表面付近の大きな応力勾配を測定できなかったためである。また、中性子回折曲線の半価幅の変化では、WJPによる塑性変形層を明瞭に判断することができない。この原因は、中性子ビームの発散が大きいため結晶子の乱れによる回折線の拡がりの変化を捉えにくいと考えられる。WJP試験片の内部応力については急激な応力勾配はないので、中性子ひずみスキニングでは、粗大粒に影響されず十分に安定して残留応力の分布を測定できる。

中性子および放射光による測定を総合すると、ウォータージェットピーニングの残留応力は、表面で約-500 MPaの圧縮があり、圧縮残留応力層は表面から約1.0 mmの深さとなる。内部には150 MPa程度の引張りが生じ、背面に向かい圧縮が生じている。また、ピーニング方向による残留応力の差は小さく、等2軸応力状態に近い。

3.2 残留応力の熱的安定性

WJPの目的は表面に圧縮残留応力を導入して応力腐食割れを防止することであり、最も心配されることは導入した表面圧縮残留応力が設備の使用(熱時効)により圧縮残留応力が緩和されてしまい、圧縮残留応力による応力腐食割れの防止効果が失われてしまうことである。換言すれば、WJPによる圧縮残留応力がどれだけ熱的安定性を持っているかである。

大気中773Kにて0, 1, 10, 100, 1000hの熱時効を施した各WJP試験片の残留応力を測定した。WJP方向を x として、 $0^\circ(x)$ から 45° 方向および $90^\circ(y)$ についてラボX線により応力測定を行い、WJPによる残留応力の平面応力状態を解析した。WJPの方向と応力方向の定義は図1と同じである。なお、測定場所による応力値のバラツキも心配されるので、4箇所の残留応力を測定し平均を求めた。

図4に圧縮残留応力の熱時効による変化を応力楕円で示している。773Kの熱時効によっても残留応力の応力楕円にめばしい変化はなく、ほぼ等2軸応力状態が保たれている。ただし、これは311回折を用いた測定における結果であり、残留応力の回折面依存性を考慮する必要もある。また、実際の原子力発電設備では、773Kよりも低い使用温度になるので、この結果を越える残留応力の緩和は考えられない。ゆえに、WJPによる残留応力は、熱時効を受けても全方位に対して圧縮残留応力が

SUS316L water-jet peened at 773 K
 γ -Fe 311 by Mn-Ka

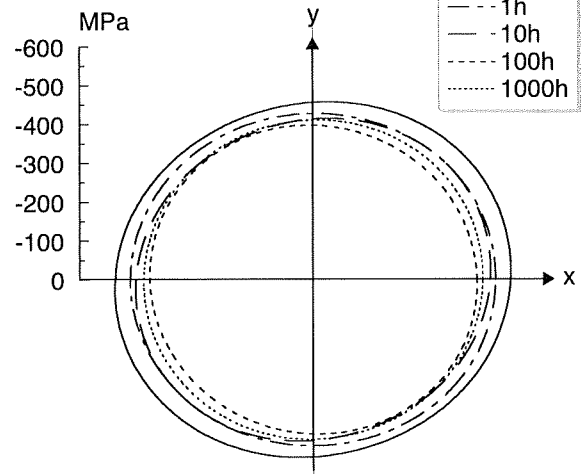


Fig. 4. Change in stress ellipse with thermal aging.

保たれており、ピーニングの効果を発揮できる優れた残留応力改善方法である。

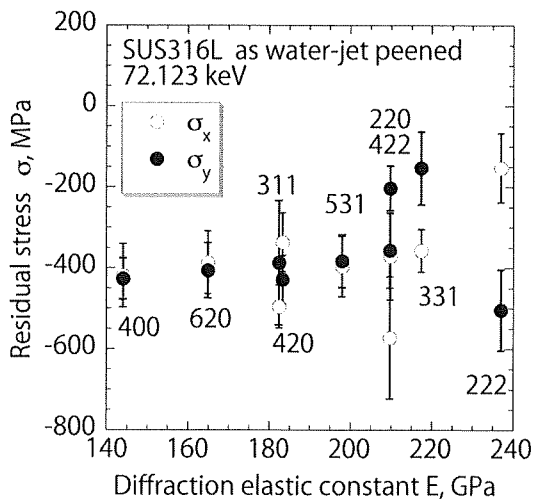
なお、機械加工による引張り残留応力の熱時効について別途に研究を進めているが、その結果を見ると、SUS316Lの機械加工による引張り残留応力の緩和については、本研究の結果よりも大きい速度で引張り残留応力が緩和している。これらのことから、同じSUS316Lであっても残留応力の発生機構、応力状態、粒径などが残留応力の緩和に影響していることも考えられる。

3.3 残留応力の回折面依存性

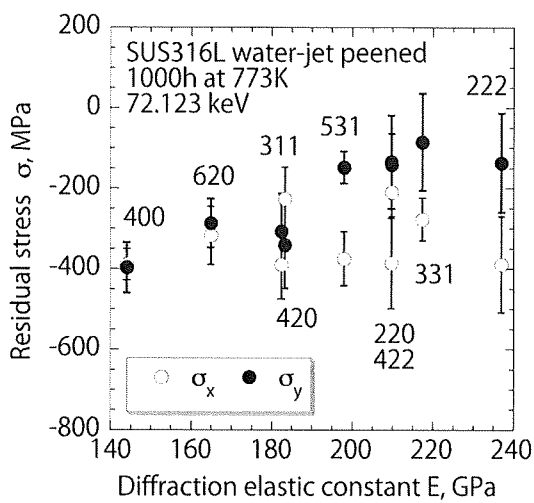
オーステナイト系ステンレス鋼においては、 γ -Feの311回折は粒間ひずみの影響が小さく、機械的応力に近い応力測定ができる利点を持っている^[11]。しかし、弾性異方性の大きいオーステナイト系ステンレス鋼では、回折面によっては残留応力に差が生じることが指摘されている^[4,5]。本研究では、WJPによる残留応力およびそれを熱時効したときの残留応力の挙動を回折面依存性の面から実験的に明らかにすることは意義がある。

前述のことを考察するために、まず、WJPを施したままの残留応力および1000 hの熱時効後の残留応力を各回折を利用して放射光により侵入深さ一定法で測定した結果を図5に示す。残留応力の回折面依存性を検討するために、Krönerモデルで計算した回折弾性定数 E で各回折格子面の残留応力を整理した。

図5(a)に示すWJPをしたままの試験片の結果を見ると、400回折や620回折のように回折弾性定数 E の小さい回折面では、残留応力はピーニング方向およびそれに垂直方向で差がない。この傾向は、機械的回折弾性定数に等しい311, 420回折および531回折まで保たれる。しかし、回折弾性定数 E の大きい220, 422回折からは、測定の誤差も大きくなり、等2軸応力状態から離れる傾向が伺える。回折弾性定数 E の最も大きい222回折で



(a) As WJP



(b) After 1000 h

Fig. 5. Residual stresses measured by each diffraction.

は、ノズル進行方向垂直の方が圧縮残留応力が大きい。これらの応力値はすべて同一の試験片から各回折面の残留応力を測定しているので、試験片による差はない。これまでの研究では、圧縮残留応力については回折弾性定数の大きい回折面を用いて測定した残留応力は、回折弾性定数の小さい回折面による残留応力よりも圧縮が小さく^[6]、本実験の結果もそれとほぼ同様の傾向を示している。

一方、773 Kで1000 hの時効を行ったWJP試験片の残留応力を図5 (b)に示す。回折弾性定数 E が機械的値よりも小さい回折格子面の残留応力はほぼ等2軸応力状態を保ち、回折弾性定数 E の大きい回折格子面の残留応力ではノズル垂直方向の圧縮残留応力に緩和が生じ、等2軸応力状態から外れる。回折格子面ごとの残留応力の傾向はピーニングしたままの試験片の結果とほぼ同じである。ただし、222回折ではノズル進行方向の圧縮残留応力が垂直方向の残留応力よりも大きくなっており、大小関係が0 hの測定値と逆転している。この原因につ

いては、試験片による差なのか、時効によるものかについては不明である。

WJP処理面の残留応力の挙動をまとめるとヤング率の小さい回折面では、等2軸圧縮残留応力の状態となり、機械的ヤング率よりも大きい回折面ではややノズル進行方向垂直の圧縮応力が小さくなる。また、やや回折弾性定数 E の高い方の圧縮残留応力が低い傾向を示す。また、熱時効によりヤング率の高い回折面は、やや緩和傾向が見られるが、ヤング率の低い回折面では緩和はあまり見られない。

4. 結言

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼のWJPによる残留応力の特性を明らかにするために、残留応力の分布、熱時効による変化挙動および回折面依存性について検討した。

(1) WJPによる残留応力は、ノズル進行方向にほぼ一様な圧縮が形成され、残留応力領域の幅は約8 mmである。また、残留応力はほぼ等2軸応力状態を示す。大気中で773Kで保持して残留応力の緩和と応力状態の変化を調べた。311回折においては、明確な圧縮残留応力の減少は見られず、等2軸応力状態を維持していた。(2) 放射光および中性子を用いてWJP試験片の残留応力分布をひずみスキニング法で測定した。表面の応力勾配の大きい領域では、放射光による測定が適しており、内部の粗大粒部では中性子による方法が適していた。ピーニング領域は表面から1.0 mm程度、表面で-500 MPa、深さ1.5 mmで200 MPaの最大応力を示す。内部においてもほぼ等2軸応力状態である。

(3) 高エネルギー放射光を利用して多数の回折面により残留応力を測定した。測定された残留応力をKrönerモデルによる回折弾性定数 E で整理すると、回折弾性定数 E が機械的値よりも大きい回折面ではやや圧縮残留応力が小さくなり、等2軸応力状態から外れる特徴がみられる。また、大気中で773Kに1000hの時効材では、回折弾性定数 E が機械的値よりも小さい回折面では、残留応力の緩和はほとんど見られないが、回折弾性定数が機械的値よりも大きい回折面では、やや緩和がみられる。WJPによる残留応力挙動には、少ないながら結晶の弾塑性異方性の影響が見られる。

謝辞

本研究の中性子応力測定は平成22年度原子力機構施設利用総合共同研究一般共同研究 (No. 10176) の援助によるものであり、中性子回折実験に際して原子力機構施設利用共同研究大学開放研究室の支援をいただいた。また、放射光実験は平成20年度原子力機構施設共用利用課題 (No. 2008A-E12) および高輝度光科学研究センターの一般利用課題 (No. 2011A1048) の援助を得た。本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C) No. 21560081 の支援をいただいた。以上、記して心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Nishikawa, S. Nakata, Y. Horii, I. Komura and A. Yamaguchi, "Stress relaxation behavior during thermal aging of compressive residual stress by shot peening", Technical Review of Japan Power Engineering and Inspection Corporation, Vol. 4, pp.28-32 (2008).
- [2] Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, K. Ogawa and N. Suezono, "Underwater laser shock processing to introduce residual compressive stress on metals", Material Science Research International, STP, No. 2, pp. 453-458 (2001).
- [3] S. Okido, M. Tsubaki, A. Chiba, W. Sagawa and T. Matsuda, "Application of jet peening to the shroud components in BWR power plant and residual stress measurement after WJP", Maintenance, Vol. 9, No. 1, pp. 26-31 (2010).
- [4] K. Suzuki and T. Shobu, "Residual microstress of austenitic stainless steel due to tensile deformation", Material Science Forum, Vpol. 652, pp. 7-12 (2010).
- [5] K. Suzuki and T. Shobu, "Residual stresses in austenitic stainless steel due to high strain rate", Material Science Forum, Vol. 681, pp. 287-283 (2011).
- [6] K. Tanaka, K. Suzuki and Y. Akiniwa, "Evaluation of residual stresses by X-ray diffractions — Fundamentals and applications", p. 125 (2006), Yokendo Ltd, Tokyo.
- [7] Y. Akiniwa, K. Tanaka, K. Suzuki, E. Yanase, K. Nishio, Y. Kusumi and H. Okado, "Evaluation of residual stress distribution in shot-peened steel by synchrotron radiation", Journal of Materials Science, Japan, Vol. 52, No. 7, pp. 764-769 (2003).
- [8] M.T. Hutchings, P.J. Withers, T.M. Holden and T. Lorentzen, "Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction", p. 78 (2005), Taylor & Francis.
- [9] H.M. Ledbetter, "Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316", British Journal of NDT, Vol. 23, pp. 286-287 (1981).
- [10] E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vierkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", Zeitschrift Physik, Vol. 151, pp. 504-518 (1958).
- [11] ISO/TTA 3, "Polycrystalline materials determinations of residual stresses by neutron diffraction", ISO, Geneva, Switzerland, (2001).