

応力改善工法で付与した圧縮残留応力の持続性評価—ショットピーニングを施した溶接継手の熱サイクルおよび応力負荷による残留応力変化(第2報)

Evaluation of the sustainability of compressive residual stress by introduced a stress improvement method (the second report) –Residual stress change of welded joint with shot peening by thermal cycle and stress loading.

発電設備技術検査協会	西川 聡	Satoru NISHIKAWA	Member
発電設備技術検査協会	古川 敬	Takashi FURUKAWA	Member
日本原子力研究開発機構	秋田 貢一	Koichi AKITA	Non Member
日本原子力研究開発機構	鈴木 裕士	Hiroshi SUZUKI	Member
日本原子力研究開発機構	諸岡 聡	Satoshi MOROOKA	Non Member
日本原子力研究開発機構	ハルヨ ステファヌス	Stefanus HARJO	Non Member
大阪府立大学	柴原 正和	Masakazu SHIBAHARA	Non Member
大阪府立大学	生島 一樹	Kazuki IKUSHIMA	Non Member
大阪府立大学	木谷 悠二	Yuji KITANI	Member
大阪府立大学	山田 祐介	Yusuke YAMADA	Member

To validate the FEM simulation technique presented in the previous report, we made pipe butt welded joints between base metals of the same material SUS316L and between base metals of the dissimilar materials SUS316L and STPT370. Shot peening (SP) on the outer surface or the inner surface of these welded joints induces high compressive residual stresses on the surface. After heat treatment with the peak temperature of 623 K was applied to the welded joints, they retained high compressive residual stresses but the compressive residual stresses were relaxed by 100-300 MPa. Similarly, applying an axial compressive strain of 0.3% to the welded joints enabled them to retain high compressive residual stresses but the compressive residual stresses were relaxed by up to 100 MPa.

Keywords: butt welded pipe, shot peening, compressive residual stress, relaxation, thermal treatment, stress loading

1. はじめに

第1報では、大規模非線形構造解析手法である理想化陽解法FEMを基に、ショットピーニング(SP)時の力学挙動をモデル化した解析手法を開発し、表面近傍の圧縮残留応力等が測定値とほぼ同じであることを確認した。しかし、開発した解析手法を実機の評価に適用するためには、実機で想定される残留応力変化を解析で再現できることを確認する必要がある。

そこで本報では、実機部分模擬溶接試験体を製作して、溶接→SP施工→実機を想定した熱緩和またはひずみ負荷の各々のプロセスにおける残留応力を測定し、開発したFEM解析手法の妥当性を検証するためのデータを取得した。

2. 実験方法

2.1 溶接試験体の製作

900℃で応力除去焼鈍したSUS316LTP S-H オーステナ

連絡先: 西川聡、〒230-0044 神奈川県横浜市鶴見区弁天町14-1、一般財団法人発電設備技術検査協会、溶接・非破壊検査技術センター

E-mail: nishikawa-satoru@japeic.or.jp

イト系ステンレス鋼管(以下、SUS316L)および620℃で応力除去焼鈍したSTPT370-SH炭素鋼管(以下、STPT370)を用いて、円筒形状の実機部分模擬溶接試験体を製作した。Table 1に製作した溶接試験体の材料と寸法を示す。母材、溶接材料ともにSUS316Lから成る同材溶接試験体と、母材がSUS316LとSTPT370、溶接材料がY316LまたはYNiCr-3から成る異材溶接試験体を製作した。Fig. 1に開先寸法を示す。長さ中央部の周方向に開先加工を施し、試験体を回転させて全周下向き姿勢でTIG

Table 1 Materials and size of welded joint made.

Welded Joint	Base metal	Filler wire	Size
Same welded joint	SUS316L	Y316L	O.D. 161.5 mm, 11.25 mmt, 195
Dissimilar welded joint	SUS316L, STPT370	Y316L	O.D. 161.5 mm, 11.25 mmt, 400
		YNiCr-3	

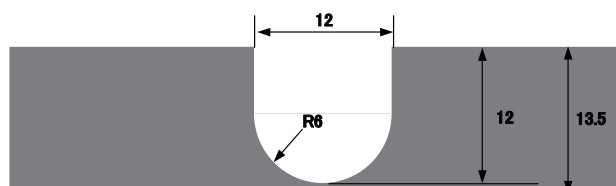


Fig. 1 Schematic illustration of groove shape.

溶接した。Table 2 に溶接条件を、Fig. 2 に溶接試験体の外観写真を示す。そして、2.3 で述べる応力負荷試験において、溶接部に応力が均一に負荷されるようにするため、裏波と余盛を研削して Table 1 に示した寸法に仕上げた。

Table 2 Welding condition of welded joint

Joint	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire feeding speed(g/min)
Same	1~10	180	10	8	6.33
	1	180	10	9	12.05
Dissimilar (Y316L)	2	220	10	11	6.49
	3	250	10	11	6.49
	4~6	250	10	9	6.49
	7~12	250	10	8	6.49
	1	180	10	9	12.05
Dissimilar (YNiCr-3)	2	220	10	11	6.49
	3	250	10	11	6.49
	4~6	250	10	9	6.49
	7~12	250	10	8	6.49
	1	180	10	9	12.05



(a) Same welded joint (b) Dissimilar welded joint

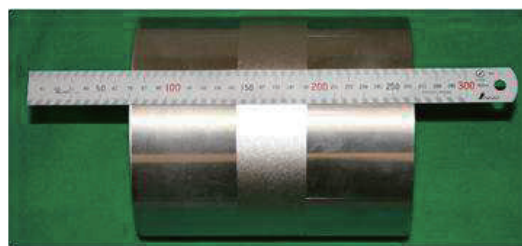
Fig. 2 Appearance of welded joint.

2.2 SP 施工条件

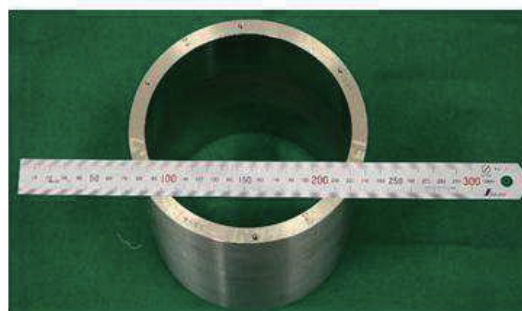
製作した溶接試験体の一部に対して、溶接部の幅約 50 mm の範囲に SP を施した。Table 3 に SP 条件を示す。SP は外表面または内表面に施し、外表面はインペラ式を、内表面はエア式の装置を用いた。内外表面の SP で用いた装置は異なるものの、アルメンストリップを用いたアークハイト値がともに 0.265 mm になる条件を選定した。Fig. 3 に、内外表面に SP を施した同材溶接試験体の外観写真を示す。

Table 3 Shot peening condition of outer and inner surface.

	Equipment	Impeller method
	Outer surface	Cut wire
Projection speed		30 m/s
Rotation speed of stage		12 r.p.m.
Projection time		280 s
Coverage		200%
Equipment		Air method
Inner surface	Cut wire	SUS304(φ0.8 mm, 0.8 mmL, Hv468)
	Projection pressure	0.4 MPa
	Nozzle size	φ9 mm
	Projection volume	9.4 kg/min
	Rotation speed of stage	30 r.p.m.
	Projection time	120 s×3



(a) SP of outer surface



(b) SP of inner surface

Fig. 3 Appearance of welded joint after SP.

2.3 熱サイクルの付与および応力負荷

実機は、起動・停止により熱サイクルが付与される。そのため、実機の運転温度に曝されたときの圧縮残留応力の変化を把握するため、溶接試験体に熱処理を施した。保持温度は、加圧水型原子炉の設計上の最高温度である 350 °C で、保持時間は 1 hr とした。また、加熱・冷却速度は 120 °C/hr 以下とした。

一方、実機の起動時等において溶接部に応力が負荷されることを想定し、同材溶接試験体の長さ（軸）方向に最大 0.3% の圧縮ひずみを負荷した。また、異材模擬試験体には、軸方向に最大 170 MPa の圧縮応力を段階的に負荷した。

2.4 残留応力測定

X 線回折法を用いて、表面残留応力を測定した。Table 4 に各材料の測定条件を示す。sin²ψ 法で測定^[1]し、X 線照射領域は φ 1 mm とした。なお、結晶粒径が大きい等の要因で、回折線の形状が乱れる場合は φ 2 mm で測定した。

また、中性子線回折法を用いて、内部ひずみを測定した。J-PARC/MLF のパルス中性子工学回折装置 TAKUMI を用いて、飛行時間法により面間隔を測定してひずみを求めて残留応力を算出した。なお、測定体積は、周方向残留応力は 2×2×2 mm³ で、軸方向残留応力は 2×2×12 mm³ とした。

Table 4 Measurement condition of residual stress by X-ray diffraction.

Measured Material	STPT370	SUS316L (Y316L)	YNiCr-3
Characteristic X-ray	Cr K α	Mn K α	Mn K α
Tube voltage (kV)	20	20	20
Tube Current (mA)	4	4	4
Diffraction	α -Fe 211	γ -Fe 311	Ni 311
Diffraction angle 2 θ (deg)	156.4	152.2	152.2
Number of X-ray incident angle ψ	9	9	9
X-ray elastic constant E/(1+v) (GPa)	175	149	149

3. 実験結果および考察

3.1 同材溶接試験体の残留応力変化

Fig. 4 に溶接のままにおける外表面と内表面の残留応力分布を示す。外表面では、最大引張残留応力は周・軸方向ともに約 200 MPa で、その位置は、周方向が溶融線近傍、軸方向では溶接金属中央から約 50 mm の箇所であった。また、内表面では、周方向に高い引張残留応力が生じる箇所はなく、溶接金属中央から約 40 mm の位置に約 200 MPa の圧縮残留応力が生じていた。

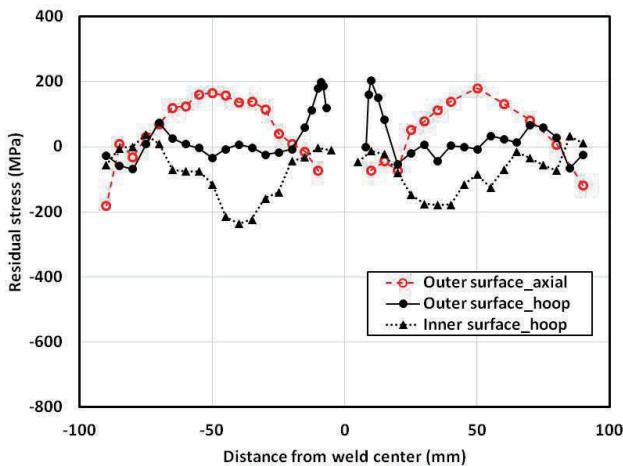


Fig. 4 Residual stress distribution on surface in as welded joint.

Fig. 5 に SP 施工後の残留応力分布を示す。SP 施工領域は、外表面が ± 20 mm、内表面が ± 30 mm で、SP 施工領域以外の残留応力は研削加工によるものである。SP 施工した箇所は、外表面で-500~-600 MPa、内表面で-600~-700 MPa になっており、外表面では溶接による引張残留応力が無くなり、高い圧縮残留応力が付与されていた。

Fig. 6 に外表面の 350 °C の熱処理前後における残留応力分布を示す。熱処理後も高い圧縮残留応力を維持しているものの、熱処理前と比較して圧縮残留応力が 100~200 MPa 緩和していた。

一方、Fig. 7~9 に圧縮ひずみ負荷前後の残留応力分布を示す。いずれの結果においても、ひずみ負荷後も高い圧縮残留応力が維持されていた。Fig. 7 に示す外表面に

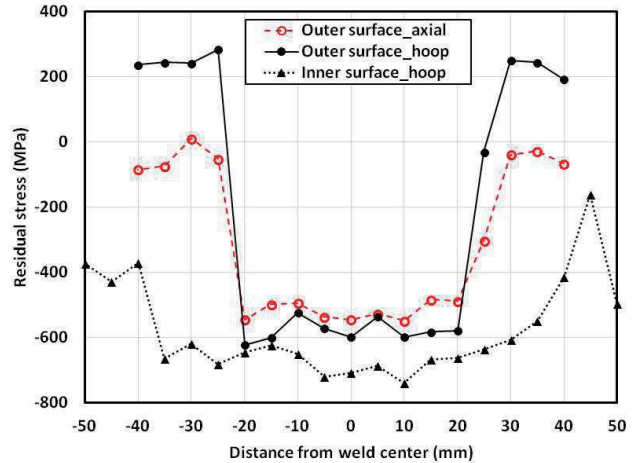


Fig. 5 Residual stress distribution on surface of as peened.

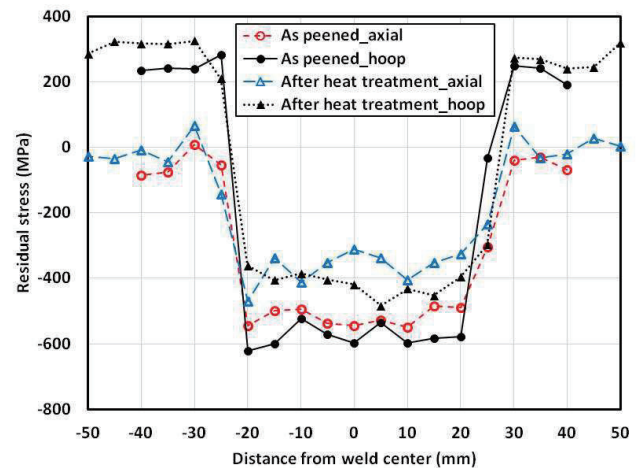


Fig. 6 Residual stress change of outer surface by heat treatment at 350 °C.

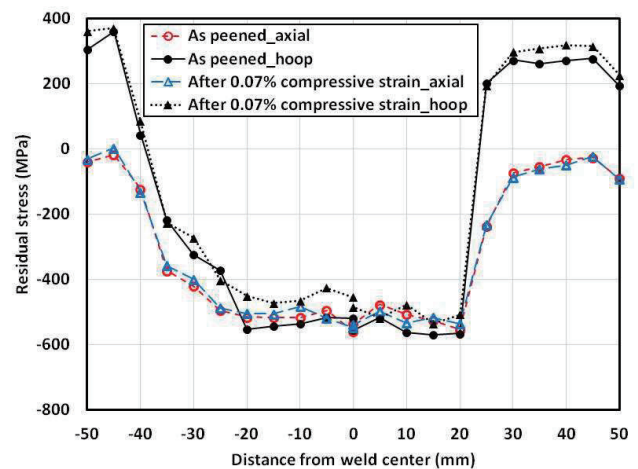


Fig. 7 Residual stress change of outer surface by 0.07% compressive strain.

SPした結果では、圧縮ひずみを負荷した軸方向の残留応力は、ひずみ負荷前後で大きな変化は見られないが、周方向の圧縮残留応力は最大で100 MPa程度緩和した。一方、Fig. 8とFig. 9に示す内表面にSPした試験体は、Fig. 7と同様に最大で100 MPa程度圧縮残留応力が緩和したが、0.07%と0.3%で顕著な差は見られなかった。これまでに、応力改善工法適用部に引張応力を負荷して、圧縮残留応力の持続性を評価している報告^{[2][H5]}はあるが、圧縮応力を負荷した報告は非常に少ない^[6]。本結果から、溶接部にSPした試験体に圧縮ひずみを負荷した場合でも、引張を負荷した場合と同様に圧縮残留応力が緩和することが示唆された。しかし、圧縮と引張のどちらのひずみ負荷が圧縮残留応力の緩和に対して厳しいかは、今後、開発したFEM解析手法等を用いて検証する必要がある。

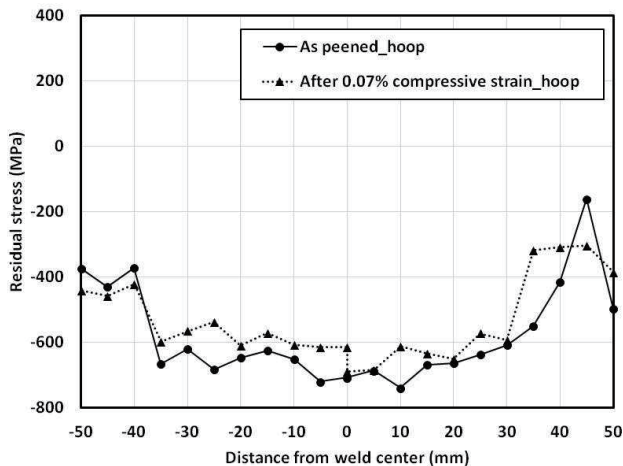


Fig. 8 Residual stress change of inner surface by 0.07% compressive strain.

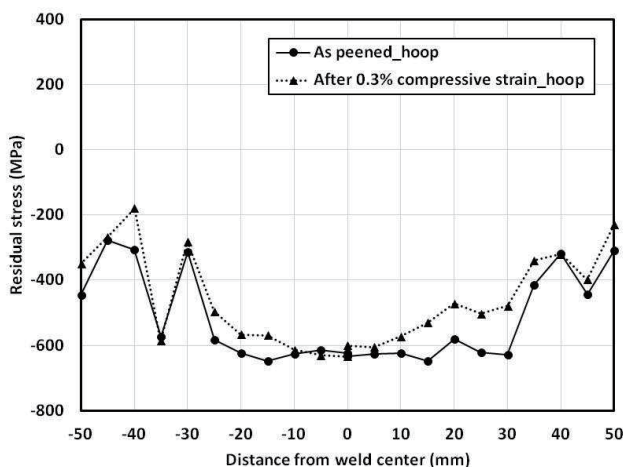


Fig. 9 Residual stress change of inner surface by 0.3% compressive strain.

3.2 異材溶接試験体の残留応力変化

Fig. 10に溶接材料がY316LとYNiCr-3の溶接のままにおける外表面の残留応力分布を示す。両溶接試験体の残留応力分布に有意な差は見られず、最大引張残留応力はほぼ同じで、周方向はSUS316L、STPT370ともに約100 MPa、軸方向はSTPT370が約200 MPa、SUS316Lが約130 MPaであった。したがって、溶接材料がY316LとYNiCr-3では、母材の表面残留応力分布はほぼ同じであると言える。

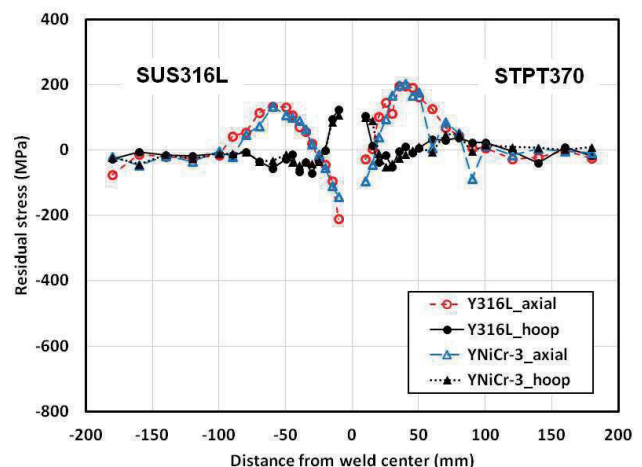


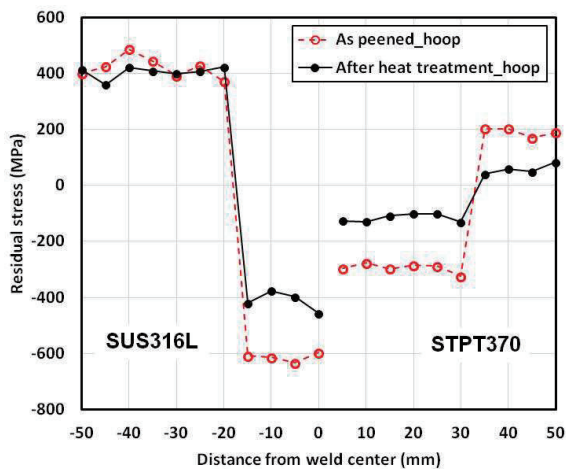
Fig. 10 Residual stress distribution on surface in as welded joint of dissimilar welded joint.

Fig. 11に内表面にSP施工した試験体の350℃の熱処理前後における残留応力分布を示す。SPにより溶接後の引張残留応力は消失して高い圧縮残留応力が付与され、SUS316Lは-600~-700 MPa、STPT370は約-300 MPaであり、同じSP条件にも関わらず、SUS316Lの方が高い圧縮残留応力が付与されていた。そして、熱処理後も高い圧縮残留応力を維持しているものの、熱処理により圧縮残留応力が約150~300 MPa緩和した。

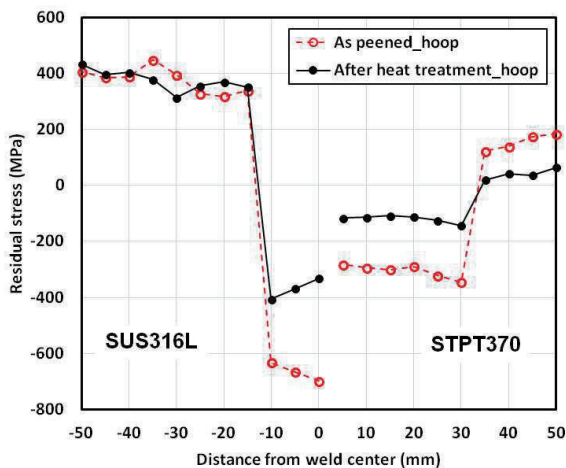
また、Fig. 12に溶接材料がYNiCr-3で、外面にSPした試験体を軸方向に圧縮応力を負荷した時の軸方向内部ひずみ分布を示す。初期の①では、溶接部近傍の外面に圧縮ひずみ、内面に引張ひずみが生じており、圧縮応力の負荷後の③においては、ほぼ全面が圧縮ひずみになっていた。そして、除荷後は①と比較して、引張および圧縮ひずみの緩和が生じていた。したがって、外部ひずみの負荷で局部的に塑性変形が生じ、ひずみが再配分されたものと推察される。

以上より、同材溶接試験体と異材溶接試験体は、SPにより表面に高い圧縮残留応力が付与される。そして、350℃の熱処理や最大0.3%の圧縮ひずみを軸方向に付与しても高い圧縮残留応力が維持されるものの、熱処理で

100~300 MPa, 圧縮ひずみの負荷で最大 100 MPa 圧縮残留応力が緩和した。



(a) Filler wire: Y316L



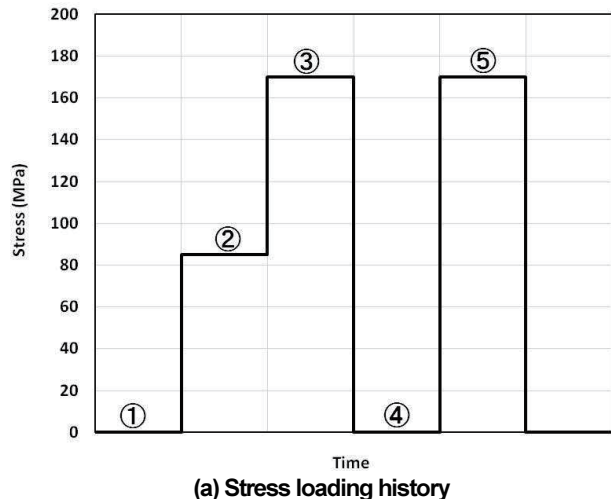
(b) Filler wire: YNiCr-3

Fig. 11 Residual stress change of outer surface by heat treatment at 350 °C.

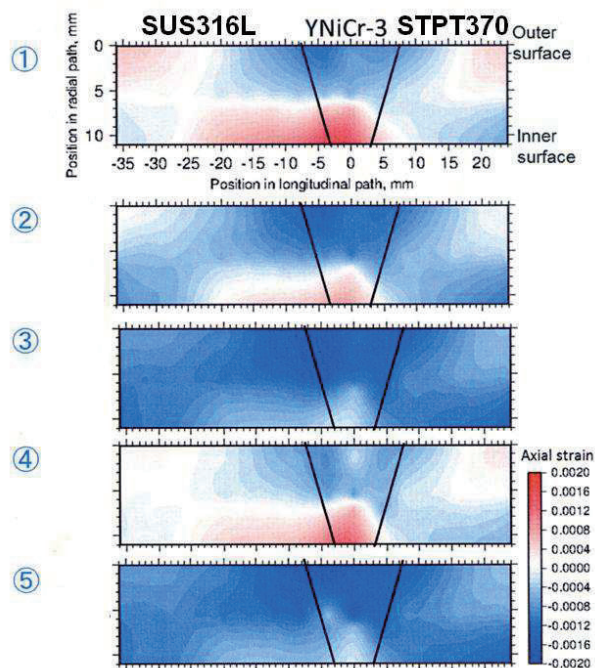
4. まとめ

本報では、第1報で開発したFEM解析手法の妥当性を検証するため、円筒形状を有する実機部分模擬溶接試験体（同材、異材）を製作して、溶接→SP施工→熱緩和またはひずみ負荷の各々のプロセスにおける表面と内部の残留応力を測定した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 溶接のままでは、外表面に最大 200 MPa 程度の引張残留応力が生じていたが、SPにより SUS316L で-500~-600 MPa の高い圧縮残留応力が付与される。
- 2) 内表面に SP を施した溶接試験体では、同材と異材溶接試験体の SUS316L に-600~-700 MPa, 異材溶接試験体の STPT370 に約-300 MPa の高い圧縮残留応力が付与される。



(a) Stress loading history



(b) Distribution of inner residual strain

Fig. 12 Change of inner residual strain by stress loading.

- 3) SP後の溶接試験体に350 °Cの熱処理や最大0.3%の圧縮ひずみを軸方向に付与しても高い圧縮残留応力が維持されたが、熱処理で100~300 MPa, 圧縮ひずみの負荷で最大100 MPa 圧縮残留応力が緩和した。

謝辞

本研究は、「文部科学省 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「原子力発電機器における応力改善工法の長期安全性評価のための基盤技術開発」の成果である。また、中性子回折実験は、J-PARC MLF の BL19 TAKUMI において行った（課題番号：2015P0401）。

参考文献

- [1] 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（2002年版）—鉄鋼編—（JSMS-SD-5-02）
- [2] 角谷利恵、田澤俊幸、檜崎千尋、斎藤利之、“レーザーピーニング施工面の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響”、M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集、pp.340-342.
- [3] 齋藤昇、波東久光、吉久保富士夫、守中廉、“WJPによる残留応力改善効果の持続性評価”、日本材料学会第59期学術講演会講演論文集、2010、pp.307-308.
- [4] 前口貴治、堤一也、豊田真彦、太田高裕、岡部武利、佐藤知伸、“ピーニングによる応力腐食割れ防止効果に関する研究”、日本保全学会第7回学術講演会要旨集、2010、pp.568-571.
- [5] 西川聡、大北茂、山口篤憲、“応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性”、保全学、Vol.11 No.4、2013、pp.69-76.
- [6] 宮下大輔、竹田和也、大谷眞一、佐野雄二、斎藤利之、秋田貢一、“アルミニウム合金におけるレーザーピーニング残留応力の機械的負荷による緩和挙動”、材料、Vol.60 No.7、2011、pp.617-623.