

## 中性子回折による原子炉用小口径配管の残留応力分布測定

Residual stress measurement of small diameter piping for nuclear reactors  
by neutron diffraction

佐野雄二<sup>1)</sup>      秋田貢一<sup>2)</sup>      堺崇弘<sup>2)</sup>      鈴木裕士<sup>3)</sup>      町屋修太郎<sup>3)</sup>  
Yuji SANO      Koichi AKITA      Takahiro SAKAI      Hiroshi SUZUKI      Shutaro MACHIYA

<sup>1)</sup>株式会社 東芝      <sup>2)</sup>武蔵工業大学      <sup>3)</sup>日本原子力研究開発機構

JRR-3 中性子ビームを使用して、小口径配管の残留ひずみ分布を測定した。その結果、レーザピーニング処理により、内径 9.5mm の配管内面に圧縮残留応力が形成されることを非破壊で確認した。

キーワード： 原子炉、配管、残留応力、レーザピーニング、中性子、非破壊

### 1. 目的

原子炉用材料（ニッケル基合金 Alloy600 など）およびその溶接金属（Alloy182 など）に対する中性子残留応力測定技術の適用可能性を確認する。また、応力腐食割れ（SCC）対策として使用されているレーザピーニング処理による残留応力の改善効果を非破壊で確認する。さらに、材料内部の残留ひずみ分布を測定し、有限要素法（FEM）による残留応力予測技術の妥当性を評価するための基礎データとする。

### 2. 方法

ニッケル基合金模擬配管（Alloy600）、ニッケル基合金溶接継手（Alloy182）および中性子回折による残留応力測定例が豊富なフェライト系材料による模擬配管（SK3）を試験体として用意した。試験体の寸法は、外径 17mm、内径 9.5mm、肉厚 3.75mm、長さ 150mm である。

中性子回折による残留応力測定は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 ガイドホール T2-1 に設置されている残留応力解析用中性子回折装置（RESA）で実施した。測定の様子を図 1 および図 2 に示す。

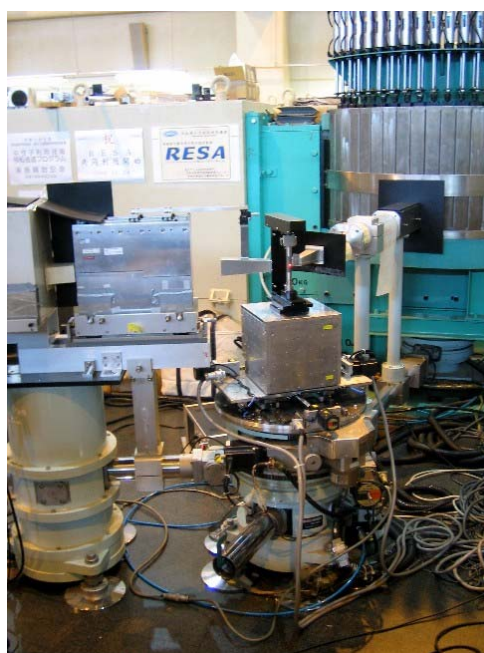


図 1 JRR-3 中性子回折による残留ひずみの測定

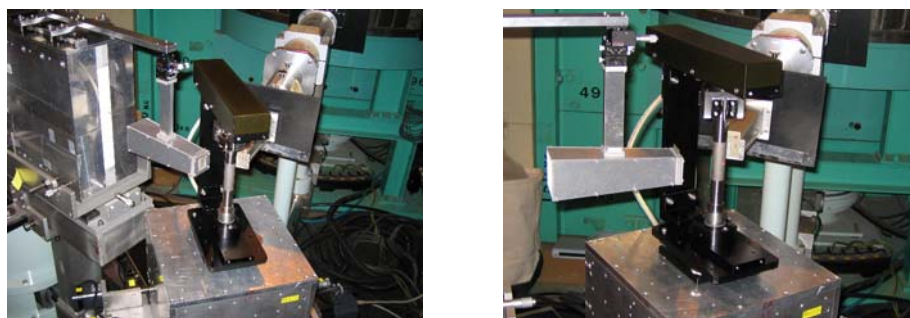


図2 ニッケル基合金模擬配管 (Alloy600) の残留ひずみ測定

各試験体について回折角および回折強度を測定し、測定可能な体系（中性子透過長さ）を評価した。次に、レーザピーニング処理を行ったパイプ状試験体および未処理の試験体のひずみ測定を行い、レーザピーニング処理による残留応力改善効果を確認した。さらに、FEMによるレーザピーニング処理のシミュレーションを行って中性子回折による測定結果と比較することにより、シミュレーションの有効性、レーザピーニング処理の曲面形状への適用性を評価した。

溶接継手については、ひずみ測定から予想される初期残留ひずみ分布を仮定してレーザピーニングシミュレーションを行った結果（ひずみ分布）を、測定結果を比較することによって適用性を評価した。

### 3. 研究成果

フェライト系材料 (SK3) で製作したパイプ状試験体 (外径 17mm、内径 9.5mm、肉厚 3.75mm、長さ 150mm) については、全肉厚にわたる残留ひずみおよび応力の深さ分布測定が可能であった。また、パイプ状試験体の内面にレーザピーニング処理を行うと、内面側に圧縮残留応力が形成されるため、それとバランスする形で肉厚中央の残留応力は引張側に変位することを確認した。

SK3 試験体の測定条件をまとめて表 1 に示す。また一例として、内面にレーザピーニング処理した SK3 試験体と未処理の試験体のひずみ分布測定の結果を図 3 に示す。ここで、回折角 ( $2\theta$ ) は、回折強度曲線をガウス関数によりフィッティングすることにより、求めた。無応力状態の回折角 ( $2\theta_0$ ) の測定には、3mm 角のクーポン 8 個を 6mm 角に組み上げて使用した。残留応力の算出に必要なヤング率 ( $E$ ) およびポアソン比 ( $\nu$ ) は、224GPa および 0.28 を使用した。

表 1 中性子回折測定条件 (SK3)

Detector	PSD		
Wavelength, nm	0.2073		
Strain component	$\epsilon_h$	$\epsilon_r$	$\epsilon_z$
Diffraction plane	$\alpha$ -Fe211	$\alpha$ -Fe110	$\alpha$ -Fe110
Diffraction angle $2\theta_0$ , deg	124.55	61.37	61.37
Divergent slit, mm	W=0.5, H=15	W=0.5, H=15	W=1.0, H=1.0
Receiving slit, mm	W=0.5, H=15	W=0.5, H=15	-

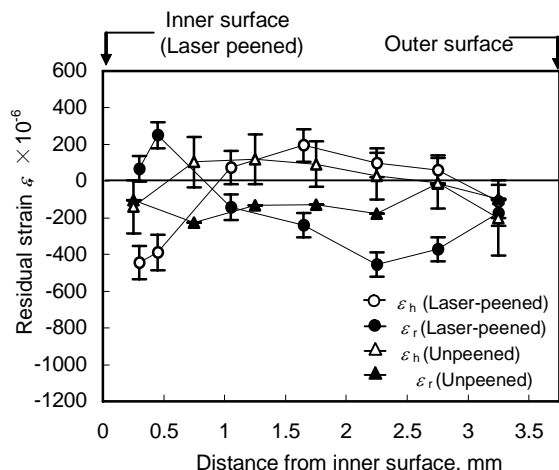


図3 残留ひずみ分布の測定結果 (SK3)

レーザピーニング施工により配管内面から約 0.5mm ないし 1mm の深さまで、圧縮の周方向ひずみ ( $\epsilon_h$ ) と引張の径方向ひずみ ( $\epsilon_r$ ) が導入された。なお、配管肉厚中心部には、内面側の圧縮ひずみを補償するような形で引張ひずみが生じている。

次に、等二軸応力状態 ( $\sigma_h = \sigma_z$ ) を仮定して求めた残留応力分布を図 4 に示す。周方向残留応力 ( $\sigma_h$ ) は、パイプ状試験体内面から少なくとも深さ約 0.5mm までの領域で圧縮となっている。また、試験体の肉厚中心部では引張残留応力が発生している。これは試験体内面近傍で発生した圧縮残留応力にバランスする引張残留応力と考えられる。

等二軸応力状態を仮定して求めた残留応力分布 (図 4) の妥当性を確認するため、レーザピーニング施工した試験体の軸方向ひずみ ( $\epsilon_z$ ) を外表面から深さ 1.8 mm の位置で測定した。三方向のひずみ ( $\epsilon_z$ ,  $\epsilon_h$ ,  $\epsilon_r$ ) 測定結果から、深さ 1.8mm 付近の残留応力を三軸応力状態として求めた。その結果、軸方向 ( $\sigma_z$ )、周方向 ( $\sigma_h$ ) および径方向 ( $\sigma_r$ ) の残留応力は、34MPa、42MPa、-43MPa となり、 $\sigma_h$ ,  $\sigma_r$  は等二軸応力状態を仮定した結果とほぼ一致した (図 4 参照)。

レーザピーニング施工材の径方向ひずみ ( $\epsilon_r$ ) および残留応力 ( $\sigma_r$ ) は、深さ約 2~3mm の範囲で圧縮側の結果が得られているが、レーザピーニング施工によってこの範囲に圧縮ひずみが生じることは考えにくく、材料の調製方法を含め、今後の検討が必要である。

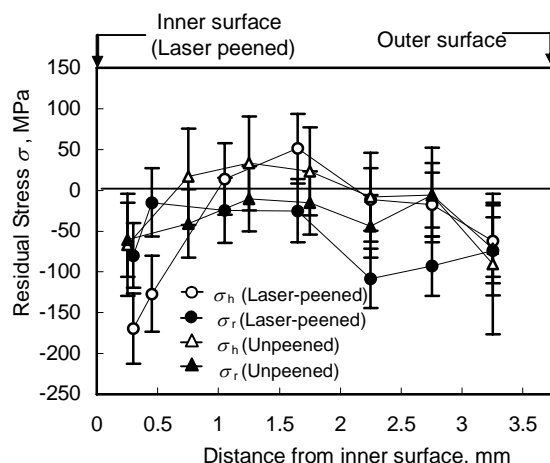


図4 残留応力分布の測定結果 (SK3)

ニッケル基合金 (Alloy600) 試験体については結晶粒が大きいいためか、回折角の変化を十分な精度で決定できるような回折プロファイルを得ることができなかった。そこで、回転ホルダー (図 2 参照) を使用して回転揺動を行い、全肉厚 (3.75mm) にわたるひずみ分布の測

定を試みた。また、配管内面は中性子透過長さが大きくなり十分な測定精度が得られない可能性があるため、レーザピーニング処理はパイプ状試験体の外表面に対して行った。

ニッケル基合金 (Alloy600) 試験体の測定条件を表 1 に示す。また、径方向ひずみ ( $\varepsilon_r$ ) および回折角 ( $2\theta$ ) 測定例を図 5 および図 6 に示す。

表 2 中性子回折測定条件 (Alloy600)

Divergent slit, mm	width= 0.5, height= 15
Receiving slit, mm	
Direction of measured strain	Radial ( $\varepsilon_r$ )
Diffraction plane	Ni 111
Diffraction angle $2\theta_0$ , deg	60.51109
Setting angle of PSD $2\theta$ , deg	60.5

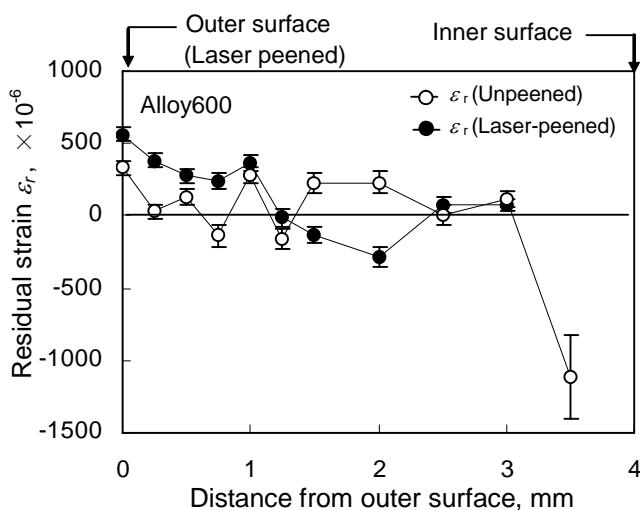


図 5 残留ひずみ分布の測定結果 (Alloy600)

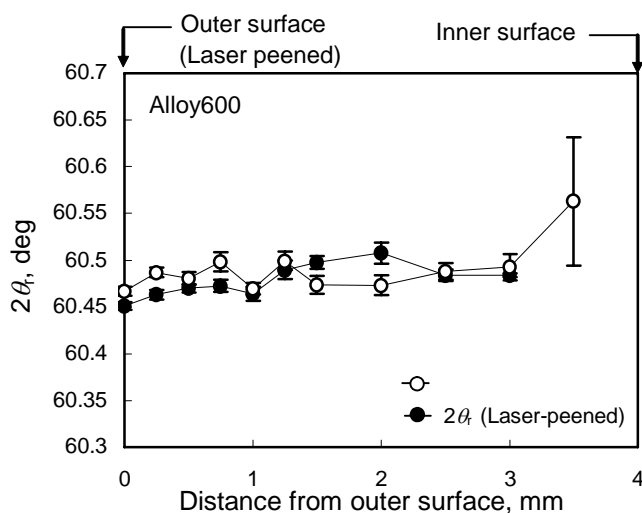


図 6 回折角分布の測定結果 (Alloy600)

レーザーピーニング処理により、Alloy600 試験体外表面から深さ約 1mm にわたり径方向ひずみ ( $\epsilon_r$ ) が引張側に变化している。従って、周方向および軸方向の残留応力は圧縮であると予想される。

#### 4. 結論・考察

実機最小径配管（内径 9.5mm）を使用して、中性子回折の有効性を確認するとともに、レーザーピーニング処理による残留応力改善効果を非破壊で確認した。

フェライト系材料と比較して、ニッケル基合金（オーステナイト）の中性子回折ではバックグラウンドが高く、測定のス N 比が低下する傾向にあった。このため、比較的薄肉の配管については中性子回折による残留応力測定が可能であるが、厚肉のニッケル基合金配管についてはバックグラウンド低減など、今後の検討が必要である。

#### 5. 引用(参照)文献等

- (1) 佐野雄二, 秋田貢一, 政木清孝, 越智保雄, 佐藤眞直, 梶原堅太郎, 鈴木裕士, “放射光および中性子によるレーザーピーニング効果の確認”, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 2006 年 3 月.
- (2) 佐野雄二, 小畑稔, 内藤英樹, 秋田貢一, 田中寛大, 高橋和馬, 鈴木裕士, “レーザーピーニングによる細管内面の残留応力改善と中性子回折による確認”, 日本材料学会 第 55 期学術講演会, 2006 年 5 月.
- (3) Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, T. Uehara, I. Chida, and M. Obata, “Development and Applications of Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology,” Proc. Int. Conf. on Application of Photonic Technology (Photonics North 2006), Quebec City, June 2006.
- (4) 鈴木裕士, 佐野雄二, 田中寛大, 秋田貢一, レーザーピーニング処理面における第二種ひずみの発生, 日本機械学会材料力学部門カンファレンス (M&M2006), 2006 年 8 月.
- (5) 佐野雄二, 小畑稔, 内藤英樹, 秋田貢一, 鈴木裕士, レーザーピーニング処理した小口径配管の中性子回折による残留応力評価, 日本機械学会材料力学部門カンファレンス (M&M2006), 2006 年 8 月.
- (6) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara, “Characterization of Laser Peened Materials by X-ray and Neutron Diffraction Techniques,” Proc. Int. Symp. on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, Sapporo, September 2006.
- (7) 堺崇弘, 秋田貢一, 大谷眞一, 佐野雄二, 町屋修太郎, 盛合敦, 鈴木裕士, レーザーピーニング施工した細管内部の中性子回折による残留応力測定, 第 50 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2006 年 12 月 (発表予定).
- (8) Y. Sano, N. Mukai, M. Obata, M. Yoda, T. Kubo, I. Chida, T. Uehara, H. Kato and S. Shima, “Laser Peening without Protective Coating as a Surface Enhancement Technology,” Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-15), Nagoya, April 2007, Paper No.: ICONE15-10812.
- (9) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara, “Characterization of Laser-peened Materials by Synchrotron Radiation and Neutron Diffraction Techniques,” 実験力学, Vol.7, No.2 (2007) (掲載予定).