

## 過大負荷による表面処理材の残留応力緩和挙動の測定

Relaxation behavior of residual stress on surface-treated materials by overloading

佐野 雄二<sup>1)</sup> 竹田 和也<sup>2)</sup> 林 健吾<sup>2)</sup> 秋田 貢一<sup>2,3)</sup> 鈴木 裕士<sup>3)</sup>  
 Yuji SANO Kazuya TAKEDA Kendo HAYASHI Koichi AKITA Hiroshi SUZUKI

<sup>1)</sup>(株)東芝 <sup>2)</sup>東京都市大 <sup>3)</sup>原子力機構

表面処理によって表面層に圧縮残留応力を導入した試験片に引張荷重を負荷し、試験片内部の残留応力を中性子回折により測定した。その結果、引張負荷を増加していくと、表面処理によって生じた引張残留応力が存在する試験片の内部から塑性変形が始まることが明らかとなった。また、内部の塑性変形により残留応力の再配分が生じ、表面層が降伏する前に表面層の圧縮残留応力が緩和し始めることがわかった。

**キーワード：** 表面処理, レーザーピーニング, 残留応力, 中性子回折, 外部負荷, 降伏

### 1. 背景および目的

省エネルギー、低コスト、高機能化などの要請から、構造物、特に輸送機器においてはピーニングなどの表面処理によって表面に圧縮の残留応力を付与し、疲労強度や耐応力腐食割れ（SCC）性を高めることが行われている。この場合、構造物内部には表面の圧縮残留応力にバランスする形で引張の残留応力が形成されるため、その分布を把握し、外部荷重が加わった場合の降伏挙動を確認しておくことは、構造物を安全に設計・製造し、利用する上で必要不可欠な知見である。

このため我々は、表面に圧縮残留応力を付与したアルミニウム合金について、疲労ならびに静的負荷による表面残留応力の緩和挙動を実験室 X 線により評価した。その結果、疲労による表面残留応力の変化は、疲労の第 1 サイクルが特に重要であり、静的負荷試験によってある程度定量的に評価できることを明らかにした<sup>1-4)</sup>。また、その結果を使用して有限要素法解析を行うことにより、構造物内部の残留応力緩和挙動を予測できる可能性を示した<sup>5,6)</sup>。

本研究課題では、非破壊で構造物内部の残留応力測定が可能な中性子を使用して、構造物内部の残留応力緩和挙動を把握するとともに、上記予測手法の正当性を確認することを目的とする。この手法を確立することにより、設計時に考慮していなかったような事象の発生やユーザーによる想定外の利用によって構造物に過大荷重が負荷された場合についても、構造物の残留応力の再配分やひずみ分布の評価が可能となり、構造物を安全に維持・利用していくための評価手法を確立することが可能となる。また、構造物の形状や材質に応じた表面処理のあり方や、負荷荷重様式に応じた最適な残留応力分布を提示するための基盤技術を構築するための第一歩とすることができる。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片および表面処理

供試材には溶接構造用圧延鋼材 SM41（降伏応力  $\sigma_y = 286\text{MPa}$ ）を使用し、Fig. 2.1 に示す試験片を作成した。表面処理には、導入される圧縮残留応力が大きく深くまで及び、その結果として内部に発生する引張残留応力が大きいレーザーピーニング処理を採用した。試験片（Fig. 2.1）斜線部両面（表裏）を Table 2.1 示す処理条件で、順次レーザーピーニング処理した。

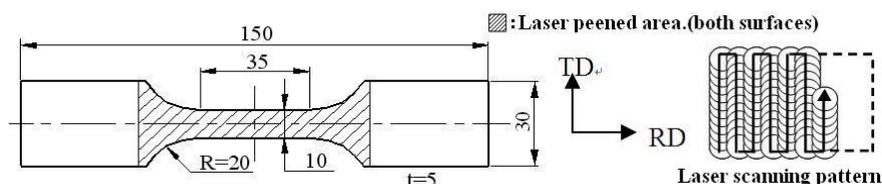


Fig. 2.1 Scheme of laser peening on SM41 specimens.

Table 2.1 Laser peening conditions.

Pulse energy $E_p$ , mJ	Laser spot diameter $d$ , mm	Irradiation density $N_d$ , pulse/mm <sup>2</sup>
200	0.8	36

## 2.2 内部応力測定および引張負荷の荷重方法

中性子応力測定には日本原子力研究開発機構（原子力機構）JRR-3 に設置されている RESA-1 を使用した。RESA-1 の試料ステージにロードセル付きの引張治具を設置し、試験片に引張負荷を段階的に加えた。各段階で、負荷中と除荷後に負荷方向（試験片軸方向）のひずみを測定した。中性子の波長は 0.165nm、ゲージサイズは 0.5mm×0.5mm×15mm とし、 $\alpha$ -Fe-211 回折面を用いて板厚 5mm の試験片内部 15 点で負荷方向のひずみを測定した。回折プロファイルを Gauss 関数でフィッティングし、回折角  $2\theta_m$  と負荷前の回折角  $2\theta_0$  を用いて負荷方向のひずみを算出し、その値にヤング率を乗じて応力とした。

中性子回折実験の様子と、引張治具を Fig. 2.2 に示す。



Fig. 2.2 Neutron diffraction experiment at RESA-1 (left) and specimen in tensile jig (right).

## 3. 実験成果および考察

### 3.1 引張負荷による SM41 試験片内部の応力変化

レーザーピーニング処理した SM41 試験片の引張負荷による内部応力の変化について、負荷中を Fig. 3.1 に、除荷後を Fig. 3.2 に示す。Fig. 3.1 に示すとおり、負荷応力の増加に伴って実応力も上昇し、 $\sigma_{ap} = 187\text{MPa}$  で試験片内部がほぼ降伏点に達している。 $\sigma_{ap} = 227\text{MPa}$  除荷後の結果 (Fig. 3.2) を見ると、試験片内部が降伏点に達したことで内部に生じている引張残留応力が緩和を始め、バランスを取るように表面近傍の圧縮残留応力が引張側に変化したことがわかる。 $\sigma_{ap} = 313\text{MPa}$  では試験片がほぼ全断面降伏し、除荷後はほぼ 0MPa に収束していることがわかる。

Fig. 3.1 において、深さ  $d = 0\text{mm}$  および  $d = 5\text{mm}$  の表面近傍では実応力の上昇度合いが異なっている。これは、レーザーピーニング処理で試験片に生じていた反りが引張負荷によって元に戻り、両表面近傍で応力の変化に差異が生じるためと考えられる。

降伏点近傍の  $\sigma_{ap} = 289\text{MPa}$  を負荷した時点では、表面近傍の応力が内部より大きくなる逆転現象が見られた。これは、レーザーピーニング処理による表面近傍の加工硬化によって生じたものと考えられる。表面近傍は降伏点が増しているため、応力を負荷していくと、内部がまず降伏点に達して塑性ひずみが生じる。しかし表面近傍は降伏しないため、内部に生じた塑性ひずみによって表面近傍の応力分担が増え、内部よりも大きい引張応力が表面近傍に発生するものと考えられる。

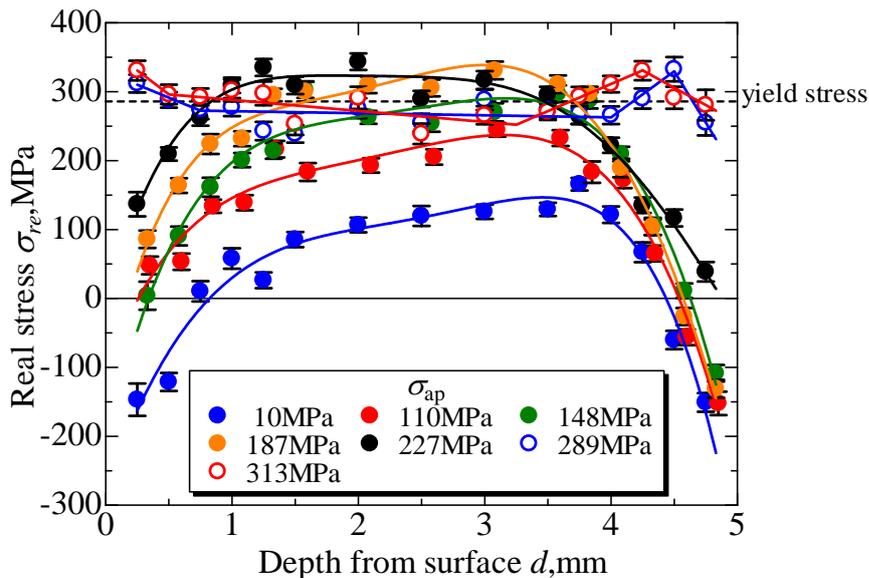


Fig. 3.1 Changes in real stress distribution under tensile loading.

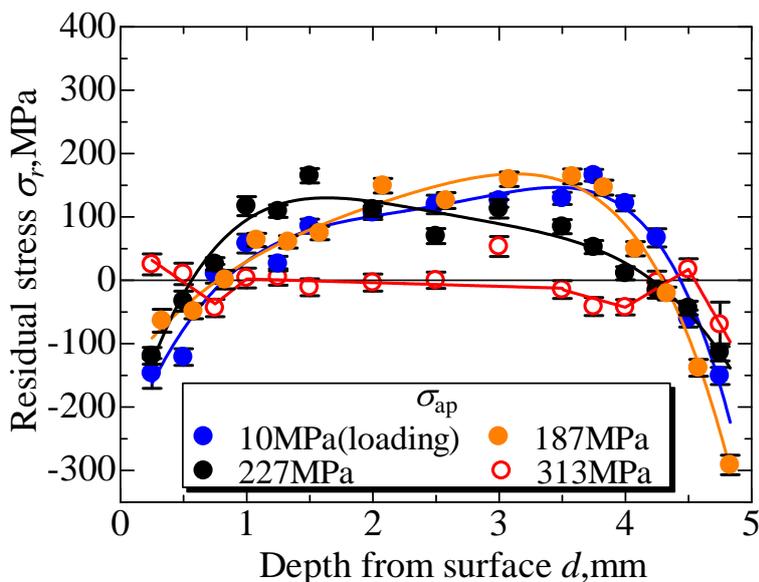


Fig. 3.2 Changes in residual stress distribution after tensile loading.

### 3.2 引張負荷によるSM41 試験片表面の応力変化 (X線残留応力測定)

レーザーピーニング処理したSM41 試験片の引張負荷中の表面応力の変化を Fig. 3.3 に示す。X線応力測定標準に従い、Cr-K $\alpha$  線を使用して  $\alpha$ Fe-211 面からの回折X線を測定し、 $\sin^2\psi$  法により負荷方向の応力を求めた。

Fig. 3.3 より、負荷応力の増加に伴い表面の実応力が増加し、 $\sigma_{ap} = 220\text{MPa}$  付近で実応力の急上昇が始まっていることがわかる。また  $\sigma_{ap} = 240\text{MPa}$  を加えた時点で表面と裏面における実応力値が一致している。 $\sigma_{ap} = 240\text{MPa}$  を負荷した後、除荷して試験片を確認したところ、レーザーピーニング処理によって試験片に発生していた反りが解消されていることがわかった。この結果から、表面と裏面の表面近傍における応力変化の差異は、レーザーピーニング処理による試験片の反りが原因と考えられる。 $\sigma_{ap} = 240\text{MPa}$  以降では試験片の反りが解消されているため、試験片全体で均一な引張負荷が加わるようになり、表面と裏面の応力変化の挙動が一致したものと考えられる。

また、 $\sigma_{ap} = 270\text{MPa}$  で実応力がSM41の引張強さである400MPaに達するため、それ以上負荷応力を増加させても表面の実応力はほぼ400MPaで一定となった。

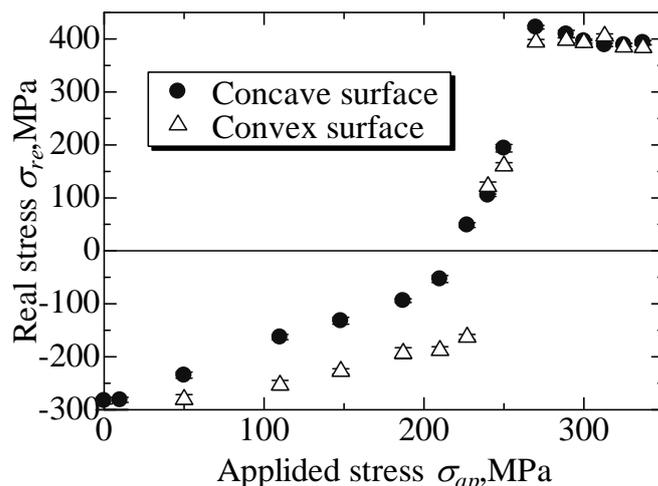


Fig. 3.3 Changes in surface stress under tensile loading measured by XRD.

### 3.3 SM41 試験片各深さにおける応力変化

レーザーピーニング処理した SM41 試験片の各深さにおける引張負荷中の応力変化を Fig. 3.4 に示す。引張負荷を加えていくと  $\sigma_{ap} = 150\text{MPa}$  付近で試験片内部中央 (深さ  $d = 2.5\text{mm}$ ) の実応力が降伏点に達していることがわかる。内部が降伏点に達したことにより、表面 (深さ  $d = 0\text{mm}$ 、 $d = 5\text{mm}$ ) および表面近傍 (深さ  $d = 0.25\text{mm}$ 、 $d = 4.75\text{mm}$ ) の実応力の急上昇が大きくなる。 $\sigma_{ap} = 220\text{MPa}$  では、最表面 (深さ  $d = 0\text{mm}$ 、 $d = 5\text{mm}$ ) における実応力が急上昇を開始している。SM41 の降伏応力 (286MPa) 付近の負荷応力になると、最表面の実応力は SM41 の引張強さである 400MPa に収束し、最表面以外の深さでは実応力が降伏点近傍の値に収束している。

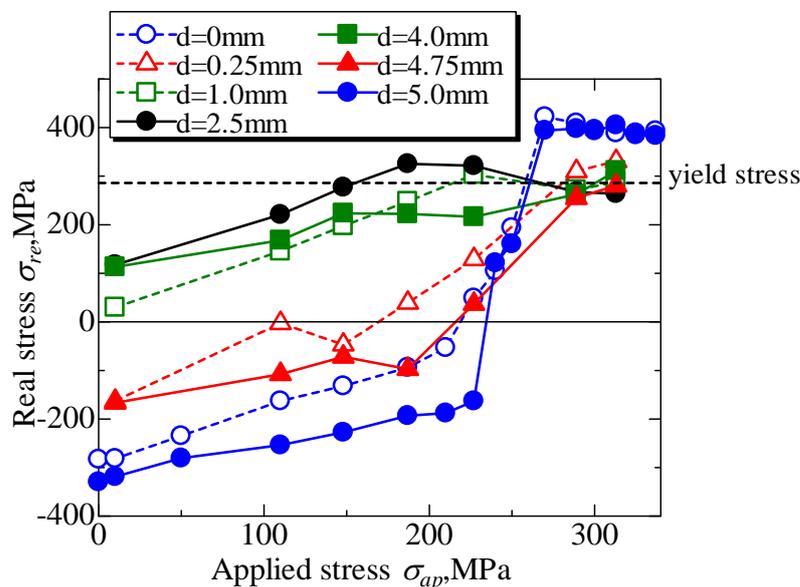


Fig. 3.4 Changes in real stresses at various depth under tensile loading.

## 4. 結論

レーザーピーニング処理した溶接構造用圧延鋼材 SM41 試験片 (厚さ 5mm) について、引張負荷による内部および表面の応力変化を、中性子および X 線回折により測定した。その結果、負荷応力の増加によって試験片内部がまず降伏し、内部の降伏に伴って応力の再配分が生じるため最表および表面近傍の残留応力が緩和することが明らかとなった<sup>7)</sup>。

## 5. 文献

- 1) 塚崇弘, 秋田貢一, 大谷眞一, 佐野雄二, 齋藤利之, “レーザーピーニングによる残留応力に及ぼす静的負荷および疲労負荷の影響,” 材料, Vol. 57, No. 7 pp. 648-653, (2008).
- 2) 宮下大輔ら, “ピーニング材における疲労負荷中の残留応力変化”, 第 43 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp. 41-46 (2008).
- 3) 竹田和也, 大石将之, 秋田貢一, 大谷眞一, 佐野雄二, 齋藤利之, “レーザーピーニング処理したアルミニウム合金の疲労負荷における残留応力緩和挙動”, 第 53 回日本学術会議材料工学連合講演会論文集, pp. 217-218 (2009).
- 4) Y. Sano, K. Akita, K. Takeda, R. Sumiya, T. Tazawa, T. Saito, C. Narazaki, “Stability of residual stress induced by laser peening under cyclic mechanical loading,” Int. J. Struct. Integ., Vol.2, pp.42-50 (2011).
- 5) 秋田貢一, 宮下大輔, 竹田和也, 大谷眞一, 菖蒲敬久, 佐野雄二, 齋藤利之, “機械的負荷によるレーザーピーニング残留応力の緩和挙動”, 第 44 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (2010).
- 6) 竹田和也, 大谷眞一, 秋田貢一, 佐野雄二, 齋藤利之, “レーザーピーニング施工材の残留応力分布に及ぼす引張負荷の影響”, SPring-8 利用者懇談会第 1 回残留応力と強度評価研究会 (2010).
- 7) 竹田和也, 秋田貢一, 佐野雄二, 齋藤利之, 大谷眞一, “過大負荷による表面処理材の残留応力緩和”, JRR-3 改造 20 周年記念シンポジウム (2011).