

# レーザーパルス照射痕・微小部残留応力分布測定

株式会社 東芝  
東芝プラントシステム株式会社  
武蔵工業大学

佐野雄二  
内藤英樹  
秋田貢一，田中寛大

## 1. はじめに

水中の材料に 10 ナノ秒 ( $10^{-8}$ s) 程度のパルス時間幅のレーザーを照射すると、材料の表面を圧縮の応力状態にすることができる。この技術はレーザーピーニング (laser peening) と呼ばれており、疲労強度の向上や応力腐食割れ (SCC) の予防に効果が期待できるため、<sup>1)</sup> 航空機や自動車部品を中心にその適用が検討されている。<sup>2-4)</sup> また、レーザーには照射反力がなく、制御性が良好で遠隔非接触作業に適することから、供用中原子炉の予防保全工事への適用が進められている。<sup>5)</sup>

ここでは、先ず、レーザーピーニングの効果と応用事例を紹介する。次に、大型放射光施設 (SPring-8) の高輝度細束 X 線を使用して実施したレーザー照射痕表面の残留応力分布の測定結果について報告し、レーザー照射による表面残留応力の発生要因について検討を行う。

## 2. レーザーピーニングの効果

オーステナイト系ステンレス鋼を例として、表層の残留応力分布、疲労強度、応力腐食割れ感受性に対するレーザーピーニングの効果をまとめる。

### 2.1 残留応力

圧延により 20% の冷間加工を施した SUS304 を使用して、残留応力の改善効果を確認した。レーザーピーニングの様子を図 1 に示す。グラインダ加工により表面に引張残留応力を与えた試験片を水中に設置し、Q スイッチ発振の Nd:YAG レーザーの第 2 高調波 (波長 532nm) を照射した。

残留応力の改善効果を図 2 に示す。パルスエネルギー 200mJ、レーザー照射のスポット径 0.8mm で試験片の表面にレーザーを一様に照射した後、表面および各深さにおける残留応力を X 線回折により測定した。表面から約 1mm の深さまで圧縮残留応力が形成されている。

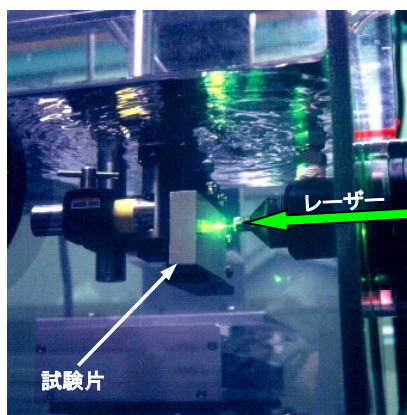


図1 レーザーピーニングの様子

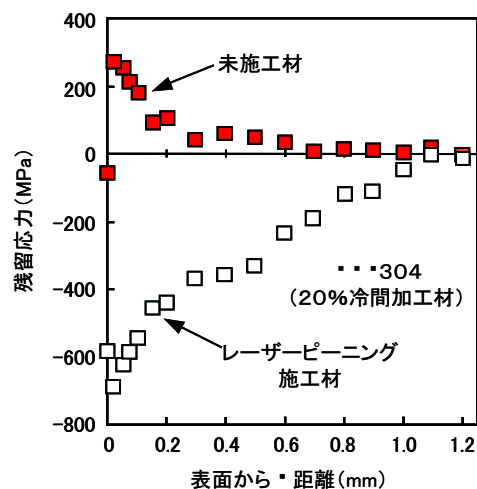


図2 レーザーピーニングによる残留応力改善効果

## 2.2 疲労強度

表面の圧縮残留応力や硬度上昇は、疲労強度の向上に効果があることが知られている。このため、繰り返し負荷を受ける部材には、ショットピーニングを行うことが多い。レーザーピーニングは、ショットと比較して、より深くまで圧縮残留応力が形成されるため、さらに高い効果が期待できる。

日本、フランス、米国で SUS316L、アルミ合金、チタン合金のレーザーピーニングが行われ、疲労強度の向上が確認されている。<sup>6-8)</sup> SUS316L の回転曲げ疲労試験の結果を図 3 に示す。<sup>6)</sup> レーザーピーニングを行うことにより、疲労強度が大幅に向上している。

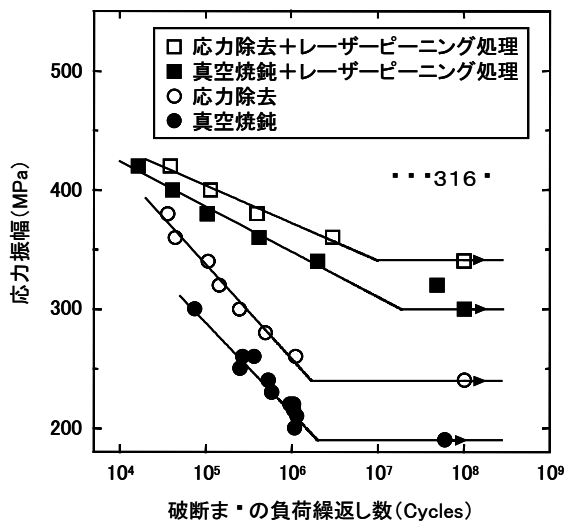


図3 レーザーピーニングによる疲労強度の向上

## 2.3 応力腐食割れ

表面の残留応力を改善することによって応力腐食割れ (SCC) の発生が防止できることを示すため、レーザーピーニング施工を行った試験片 (SUS304) と未施工の試験片について応力腐食割れの加速試験を行った。結果の一例を図 4 に示す。レーザーピーニングを行うことにより、応力腐食割れが完全に防止できることを確認した。<sup>9)</sup> また、き裂の進展を抑制する効果も報告されている。<sup>10)</sup>

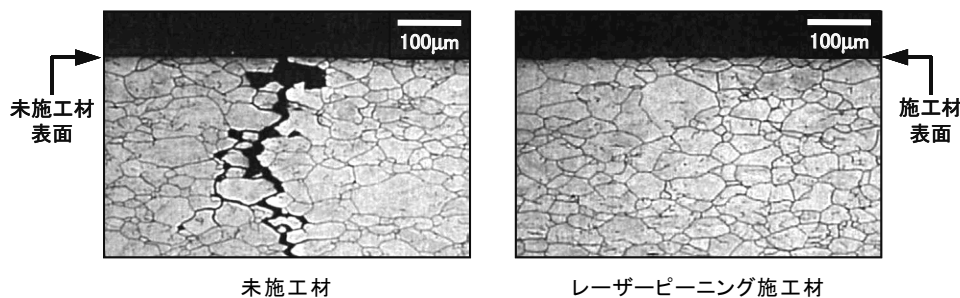


図4 レーザーピーニングによる応力腐食割れの防止 (SUS304 の応力腐食割れ加速試験結果)

## 3. レーザーピーニングの応用

レーザーピーニングは他のピーニング技術と比較して圧縮応力層がより深くまで形成されるという利点がある。このため、長期にわたる応力腐食割れの防止対策、疲労強度の向上 (特に高サイクル疲労による内部破壊対策)、亀裂進展の抑制などへの適用が検討されている。

### 3.1 部品の疲労対策

航空機のジェットエンジンが砂粒などの異物を吸い込むと、ファンブレードに FOD (foreign object damage) と呼ばれる損傷が生じ、そこを起点とした高サイクル疲労破壊が起きることがある。このため、ファンブレードには二段ショットピーニングなどを行い、表面に高い圧縮残留応力を付与している。レーザーピーニングを行うと疲労強度の大幅な向上や亀裂進展の抑制が期待できるため、ファンブレードに対する適用研究が米国で活発に行われている。<sup>2)</sup>

金型は過酷な条件で繰返し使用されるため、種々の表面処理技術を適用し、その寿命を延長する試みがなされている。その一環として、レーザーピーニング処理を行うことにより熱間金型鋼（SKD61）の熱疲労特性が改善され、き裂の成長が抑制されることが報告されている。<sup>11)</sup>

### 3.2 溶接構造物の応力腐食割れ対策

沸騰水型原子炉の炉心シュラウドはステンレス鋼でできた円筒状の溶接構造物であり、溶接熱影響部に応力腐食割れ（SCC）を起こすことがある。このため、その予防保全対策として、1999年4月よりレーザーピーニングの適用が開始されている。<sup>5)</sup> また、米国では核廃棄物処分容器溶接部の応力腐食割れ対策として、レーザーピーニングの適用が検討されている。<sup>12)</sup>

## 4. レーザーピーニングの原理

レーザーピーニングは、短い時間幅のレーザーパルスを水中の材料に照射したときに発生する高圧のレーザープラズマと、材料表面の機械的な相互作用を利用した表面処理技術であり、その原理は以下のように考えられている。

### 4.1 基礎プロセス

水中でレーザーを1パルス照射したときの材料の応答を、模式的に図5に示す。

レーザーの強い電場によってアブレーションが発生し、材料のごく表層（通常は $1\mu\text{m}$ 以下）がプラズマ化する。<sup>13)</sup> 水中では水の慣性が働いてプラズマの膨張が妨げられるため、狭い領域にレーザーのエネルギーが集中する。その結果、プラズマの圧力は空気中と比較して $10\sim 100$ 倍となり数GPaに達する。<sup>14)</sup> この圧力によって衝撃波が発生し、材料中を伝播する。衝撃波の動的な応力が材料の降伏応力を超える領域で塑性変形が起き、未変形部の弾性拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が形成される。<sup>15)</sup>

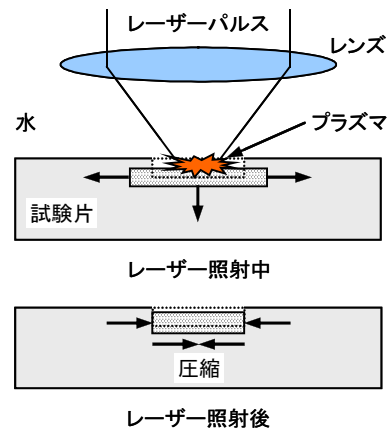


図5 基礎プロセス

### 4.2 表面残留応力の支配因子

残留応力の深さ分布（図2）は、プラズマの圧力を境界条件とした弾塑性動解析によって再現することができる。<sup>15)</sup>

一方、材料の最表面はレーザーの照射を直接受けるため、熱的な効果も考慮に入れる必要がある。SUS304では温度上昇が起きる範囲は表面から数 $\mu\text{m}$ 以内であり、<sup>16)</sup> 熱拡散に要する時間は $10^{-6}\text{s}$ のオーダーである。表面から数 $\mu\text{m}$ の領域で衝撃波が通過する時間は約 $10^{-9}\text{s}$ であり、衝撃波が通過した後、冷却とそれによる材料の収縮が生じる。従って、表面の応力状態は、衝撃波による圧縮と冷却による収縮の両者のバランスによって決まると考えられる。<sup>16,17)</sup>

## 5. レーザー照射痕の残留応力測定

水中の材料にレーザーパルスを照射したときの応答は、上記のように考えられているが、現象が高速で複雑なため定量的な検討はほとんど行われていない。そこで、大型放射光施設（SPring-8）で得られる高輝度細束X線を使用して、実験室X線では測定が難しいレーザー照射痕の残留応力分布測定を行い、表面残留応力の発生要因について検討を行った。

## 5.1 試験片

熱処理と電解研磨によって残留ひずみを除去した高張力鋼（HT1000）に、水中でレーザーを1パルス照射して試験片を作成した。照射したレーザーのパルス時間幅は約7nsである。

表1に各試験片のレーザー照射条件をまとめて示す。レーザー照射直後の冷却効果に明確な差が現れるよう、照射スポット径が大きく異なる3つの試験片を用意した。また、レーザー照射によって発生するプラズマの圧力は、照射出力密度の平方根に比例することが知られている。<sup>15)</sup>そこで、照射痕内で衝撃波による圧縮の効果が同等となるよう、レーザーの照射出力密度をほぼ一定に制御した。

表1 HT1000 試験片のレーザー照射条件

試験片	パルスエネルギー (mJ)	照射スポット径 (mm)	照射出力密度 (TW/m <sup>2</sup> )
A	320	1.2	40
B	34	0.4	39
C	8.6	0.2	39

## 5.2 放射光による残留応力測定

レーザー照射痕内外の残留応力測定は、高輝度光科学研究センター（JASRI）大型放射光施設（SPring-8）のビームライン「BL46XU」で行った。X線のエネルギーは12keV（波長0.103nm）とした。試験片へのX線侵入深さは約12μmである。

実験の様子を図6に示す。4象限スリットで入射X線を0.1mm×0.1mmに整形し、試験片に照射した。並傾法により、α-Fe 332面からの2θ≈115度の回折X線をシンチレーションカウンタで計測した。φ角は45度までとし、sin<sup>2</sup>φ法により残留応力値を求めた。

レーザーを1パルス照射した痕の内外の残留応力分布を図7に示す。レーザーが直接照射される痕の内側は引張、その外側は圧縮であった。ここで、φ1.2mmおよびφ0.4mmのデータの一部は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）放射光実験施設（PF）のビームライン「BL3A」で測定した結果である。PFでは5.4keVのX線をφ0.2mmに整形し、α-Fe 211の回折線をPSPCで計測した。

照射スポット径0.4mmの照射痕については、同一試験片を使用してSPring-8およびPFの両方で残留応力測定を実施したが、結果は良く一致した。

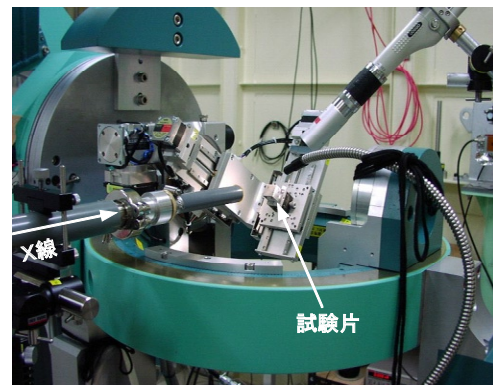


図6 レーザーパルス照射痕の残留応力測定 (BL46XU)

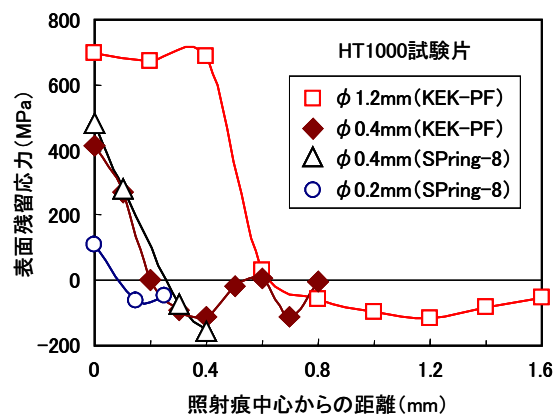


図7 レーザーパルス照射痕表面の残留応力分布

### 5.3 材料表面の冷却効果

レーザー照射痕の表面の応力状態は、衝撃波による圧縮とその後の冷却による収縮の両者のバランスによって決まると考えられている。金属内の熱伝導は水への熱伝達と比較して十分に速いため、照射痕の冷却は主に周囲の金属への熱伝導によると思われる。試験片には一定の出力密度でレーザーを照射したため、各試験片とも照射痕内では衝撃波による圧縮の効果はほぼ同等と考えて良い。一方、レーザーの照射スポット径は0.2~1.2mmと大きく異なるため、照射痕表面の冷却効果は試験片によって大きく異なるものと考えられる。

図7では、レーザーの照射スポット径が1.2mmと大きい場合には照射痕内の応力値は降伏応力で飽和しているが、0.4mm、0.2mmと小さくなると照射痕内の応力値は急激に減少している。これは、照射スポット径を小さくしたことによって、深さ方向への熱伝導に加えて面内方向への熱伝導の効果が有意になったためと考えられる。また、レーザー照射によって生じるプラズマの体積が減少したため、プラズマと周囲の水との相互作用が相対的に大きくなり、プラズマのクエンチが促進された結果、プラズマから材料表面への輻射再入熱の効果が小さくなったためと考えられる。

### 5.4 塑性変形の蓄積効果

照射痕内はレーザーの照射直後に急冷されて収縮する。このときの収縮は表面から数 $\mu\text{m}$ の範囲で起きるため、すぐ近くに続けてレーザーパルスが照射されると、強い衝撃力によって応力状態は圧縮側にリセットされる。従って、照射するレーザーのパルス数を増やしていくと塑性変形のみが蓄積され、全体の応力レベルは圧縮側に推移すると考えられる。

実際のレーザーピーニング施工では多数のレーザーパルスが照射されるため、図2に示すように圧縮領域は表面から約1mmの深さまで達し、表面の応力値はその材料の降伏応力にはほぼ等しくなることが知られている。<sup>15)</sup>

吉岡らは、複数のレーザーパルスをライン状に照射すると、ラインに沿って明確な圧縮領域が現れることを報告している。<sup>18)</sup> この結果も、レーザーを1パルス照射したときに照射痕外縁に生じる塑性変形の蓄積によると考えられる。

## 6. おわりに

レーザーピーニングは、疲労強度の向上と応力腐食割れ（SCC）の抑制に有効であることが知られている。しかしながら、現象が高速で複雑なため、レーザー1パルス毎の個々のプロセスや圧縮残留応力の形成メカニズムに関する検討はほとんど行われていない。

今回、大型放射光施設（SPring-8）の高輝度細束X線を使用することにより、レーザーパルス照射痕表面の残留応力分布に関して、これまでになく新しい知見を得ることができた。この結果は、個々のプロセスのモデル化とその検証に大きく寄与することは言うまでもない。また、並行して実施している解析検討の結果と総合することにより、これまで経験にのみ頼っていたレーザー照射条件の最適化が、より迅速に行えるものと期待される。

今後、3次元残留応力分布を含めた更に詳細な測定を行うことにより、レーザーピーニングによる圧縮残留応力の形成メカニズムを明らかにしていく。

最後に、細束X線を使用した残留応力分布測定は、（財）高輝度光科学研究センター（JASRI）の協力により大型放射光施設（SPring-8）のトライアルユース課題（2003B0678-NI-np）として、ビームライン「BL46XU」を使用して行った。測定においては、JASRIの佐藤眞直博士に熱心なご指導をいただいた。ここに記して謝意を表す。また、実験の一部は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）

の放射光実験施設(PF)のビームライン「BL3A」で行った(受理番号:2003G032)。

#### 参考文献

- 1) ショットピーニング技術協会編著, 「金属疲労とショットピーニング」, 現代工学社 (2004).
- 2) D. W. See et al., *Surface Engineering*, **18**, 32 (2002).
- 3) J. J. Daly, J. R. Harrison and L. A. Hackel, “New Laser Technology Makes Lasershot Peening Commercially Affordable,” 7th Int. Conf. on Shot Peening (ICSP7), Warsaw, September 1999.
- 4) E. de los Rios and C. A. Rodopoulos, “Investigating the Effects of Shot and Laser Shock Peening on the Fatigue Behaviour of 2024-T351 Aluminium Alloy,” *Metal Finishing News*, **4**, 24 (2003).
- 5) Y. Sano et al., “Development and Application of Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Core Shroud,” Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering, (ICONE-8), Baltimore, April 2000.
- 6) 若林豊, 他, 日本機械学会材料力学部門講演会 講演論文集, 283 (2003), 講演番号 407.
- 7) P. Peyre et al., *Surface Engineering*, **11**, 47 (1995).
- 8) J. J. Ruschau et al., *Int. J. Fatigue*, **21**, 199 (1999).
- 9) Y. Sano et al., “Underwater Laser Shock Processing to Introduce Residual Compressive Stress on Metals,” *Materials Science Research International, Special Technical Publication – 2*, 453 (2001).
- 10) 久保達也, 他, 日本材料学会第 52 期学術講演会 講演論文集, 330 (2003), 講演番号 335.
- 11) 八代浩二, 他, 「レーザーピーニング処理の熱間金型への適用性」, 日本材料学会第 38 回 X 線材料強度に関する討論会講演論文集, 53, (2001).
- 12) Yucca Mountain Science and Engineering Report Rev.1, DOE/RW-0539 Rev.1, February 2002.
- 13) 電気学会レーザーブレーションとその産業応用調査専門委員会編, 「レーザーブレーションとその応用」, コロナ社 (1999).
- 14) Y. Sano et al., *Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. B*, **121**, 432 (1997).
- 15) 佐野雄二, 他, 日本原子力学会誌, **42**, 567 (2000).
- 16) N. Mukai, et al., “Laser Processing for Underwater Maintenance in Nuclear Plants,” Proc. 3rd Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-3), Kyoto, April 1995.
- 17) 佐野雄二, 他, レーザー研究, **26**, 793 (1998).
- 18) 吉岡靖夫, 他, 「レーザーピーニングをした鋼の残留応力の放射光による測定」, 日本材料学会第 38 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 88, (2002).