

## はじめに

水で覆われた金属材料に時間幅10<sup>-9</sup>秒~ 10<sup>-8</sup>秒程度の高出力レーザパルスを照射する と、材料の表面が瞬時にレーザのエネルギーを 吸収して高い圧力のプラズマが発生し、その圧 力によって材料の表面が押し延ばされるように 塑性変形する<sup>1)~3)</sup>。レーザの1パルスで処理 できる面積は限られるため、材料またはレーザ を走査して必要な範囲を処理すれば表面に一様 な圧縮の残留応力を形成することができる。そ の結果、応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking)) や疲労き裂の発生、更にはその進 展が抑制されるため、金属構造物等の寿命延長 を図ることができる<sup>4)~8)</sup>。この技術はショッ トピーニングになぞらえ、レーザピーニング (Laser Peening) と呼ばれている。

レーザピーニングに関連した技術開発は1970 年頃から米国で、次いでフランスで行われ、 1990年代の初めにはジェットエンジンのファン ブレードの高サイクル疲労対策として実用化さ れた<sup>9),10)</sup>。このプロセスはパルスエネルギーが 10 J~100 J にも及ぶ高出力で大型のレーザ装 置を使用するため、レーザショックピーニング (Laser Shock Peening) と呼ばれることが多 い。またパルスエネルギーが大きいため、材料 にレーザを直接照射すると表面が損傷して逆効 果となるため、あらかじめ材料の表面に金属 テープ等を貼りつけることで表面の損傷を防ぎ ピーニングの効果を得ている。

国内では、原子炉構造物のSCCに対する予防保全対策としてレーザピーニングに関する独自の技術開発が行われ、1999年より実適用されている<sup>11)</sup>。原子炉停止時に炉内で冷却されている放射化された構造物の処理においては、表面に金属テープ等を貼りつけることは不可能なため、構造物の表面に直接レーザパルスを照射するだけの簡素なプロセスを開発した<sup>1)~8)</sup>。このプロセスはテープ等のコーティングを使用しないため、LPwC(Laser Peening without Coating)とも呼ばれている。

レーザピーニングの最大の特徴はその効果が 材料の奥深くまで及ぶ点にあり、表面から約 1 mm あるいはそれ以上の深さまで圧縮の残 留応力を形成することができる<sup>3),4),10),11)</sup>。な お小さなパルスエネルギーを用いることによ り、圧縮の残留応力をごく表面のみに形成する ことも可能である<sup>12,13)</sup>。またショットピーニン グがランダムなプロセスであるのに対してレー ザピーニングはパルスごとの照射条件を厳密に 制御することが可能なため、原理的に再現性の



-----防衛技術ジャーナル March 2023

高い処理を行うことができる。

これらのメリットの反面、高出力のレーザに は空調や光学定盤が必要で装置が大掛かりとな り、運転・保守には熟練した技術者が必要など といったデメリットもある<sup>10)</sup>。このため、その 応用はこれまで屋内に限られており、屋外での 適用は困難であった。そこでわれわれは、超小型 でロバスト性に優れたマイクロチップレーザ<sup>14),15)</sup> を使用することで、屋外の構造物にも適用が可 能で取り扱いも容易なレーザピーニング装置を 開発した<sup>8),13)</sup>。

本稿では、レーザピーニングの原理、効果お よび国内外の開発状況を概説し、最後に今後の 課題および将来展望について述べる。

# レーザピーニングの原理

レーザピーニングの基礎プロセスを図1に示 す<sup>1),2),7)</sup>。強いレーザパルスを材料に照射す ると、材料のごく表層が瞬時にプラズマ化す る。水の慣性がプラズマの膨張を妨げる結果、 プラズマの圧力は空気中の数十倍となり数 GPaに達する。この圧力によって衝撃波が発 生し、材料中を伝播する。衝撃波による動的な 応力によって材料の表層は塑性変形を受け、未 変形部からの弾性拘束により表面に圧縮残留応 力が生じる。レーザビームまたは対象物を移動さ せながらレーザパルスを順次照射すれば、表面 に一様に圧縮残留応力を形成することができる。

レーザピーニングの様子を図2に示す。ここ では、水槽に沈めた試験片を電動ステージで2 次元的に移動させながらレーザパルスを連続的 に照射している。水槽に入らない大型の部品や 構造物を処理する場合には、水を噴きかけなが らレーザを照射する。

圧延によって20%の冷間加工を施したオース テナイト系ステンレス鋼 SUS304にレーザパル スを照射したときの衝撃波伝播のシミュレー ション結果を図3に示す。レーザの照射条件 は、パルスエネルギー 200 mJ、パルス幅



図1 レーザピーニングの基礎プロセス



図2 レーザピーニングの状況



図3 レーザ照射による衝撃波の伝播



8 ns、集光径0.8 mm である。衝撃波が塑性変 形を起こしながらエネルギーを失っていく様子 が示されている。

シミュレーションから求めた残留応力の深さ 分布と測定結果の比較を図4に示す<sup>3)</sup>。シミュ レーションは測定結果を良く再現し、今回の条 件(パルスエネルギー 200 mJ、集光径 0.8 mm) では、2~3パルスのレーザ照射で十分な深さ まで圧縮の残留応力が導入できることが分か る。なお残留応力の測定はX線回折により行 い、その深さ分布は電荷研磨とX線回折を交互 に繰り返して求めた。

レーザピーニングの効果

ここでは SUS304の SCC 感受性に対する効 果および SUS316L の疲労特性に対する効果に ついてまとめる。金属組織、硬さ、表面粗さ、 加工誘起マルテンサイト等に対する影響につい ては、文献16)、17)を参照されたい。

# (1) SCC 特性

レーザピーニングによる SCC 抑制効果を確認 するため、SUS304の SCC 加速試験を行った<sup>4)</sup>。 供試材に893 K (620 ℃)、8.64 × 10<sup>4</sup> s (24時間)



の熱鋭敏化処理を行い20%の冷間圧延を行った 後、50 mm × 10 mm、厚さ2 mm の短冊状試 験片を採取した。治具を使用して試験片表面に 1%の引張ひずみを与えた状態で、パルスエネ ルギー 200 mJ、パルス幅8 ns、集光径0.8 mm、 照射密度36パルス/mm<sup>2</sup>の条件でレーザピーニ ング処理を行った。SCC を加速するためグラ ファイトウールで試験片の表面に隙間を作り、 289 °C (562 K)、溶存酸素8 ppm、導電率 0.1 mS/m の高温高圧水中に1.8 × 10<sup>6</sup> s (500時 間) 浸漬した。その後、試験片を長手方向に切断 して断面の組織を観察し、SCC の有無を確認した。

試験片断面の金属組織を図5に示す。未処理 材(参照材)では、全ての試験片(7体)に結 晶粒界に沿った典型的なSCCが発生していた。 一方、レーザピーニング処理した試験片(7体) にはSCCの発生は確認できず、レーザピーニ ングによりSUS304のSCC感受性を大きく低 減できることが分かった。

なお同様の試験は、インコネル600、インコ ネル182等についても行い、効果を確認してい る<sup>18)</sup>。またアルミニウム合金 A5083等について もレーザピーニングにより SCC 感受性が低下 することが報告されている<sup>19)</sup>。

#### (2) 疲労特性

高サイクル疲労に対するレーザピーニングの 効果を確認するため、SUS316L 丸棒試験片に 対する回転曲げ疲労試験を行った<sup>4)</sup>。負荷繰り 返し速度は46 Hz(2,760 rpm)とし、試験片の 発熱は水流により除去した。

試験片にはあらかじめ 2 種類(FH:Full



Heat Treatment および SR: Stress Relieving Treatment)の熱処理を施した。FH は結晶の均 一化を目的とし、1,373 K (1,100 ℃)、3,600 s (1 時間)の条件で真空焼鈍処理を行った。一方、 SR は試験片作成時の機械加工による残留応力の 除去を目的とし、1,173 K (900 ℃)、3,600 s (1 時 間)の条件で処理を行った。熱処理後は試験片の 表面仕上げを行い、パルスエネルギー 200 mJ、 パルス幅 8 ns、集光径0.8 mm、照射密度36パル ス/mm<sup>2</sup>の条件でレーザピーニング処理を施した。

疲労試験の結果を図6に示す。レーザピーニングにより、SR 材の疲労限度が240 MPa から340 MPa まで上昇し、疲労限度は約1.4倍向上した。FH 材では190 MPa から320 MPa まで上昇し、疲労限度が約1.7倍に向上した<sup>4)</sup>。

高サイクル疲労については SUS304、アルミ ニウム合金 AC4CH、A7050、A7075、橋梁用 鋼材 SM490、高張力鋼 HT780、電磁鋼板 Fe-3Si、チタン合金 Ti-6Al-4V 等についても試験 を行い、レーザピーニングによる残留応力や疲 労特性の改善を確認している。また摺動特性の 改善についても良好な結果が得られている<sup>20)</sup>。

レーザピーニング装置の開発状況

「レーザピーニングの原理」の節および「レー ザピーニングの効果」の節では、筆者らが1990 年代から2000年代に実施した基礎的な研究開発 の内容を中心に紹介した。本節では、近年の **NECENCE TECHNIN IIIY JUNK**14 防衛技術ジャーナル March 2023

レーザピーニング装置の開発状況を概観する。

## (1) 米国 LSPTechnology (LSPT) 社

レーザピーニングはジェットエンジン・ファ ンブレード等の FOD (Foreign Object Damage) 対策として有効であり、LSPT 社は1990年代よ りその施工サービスを行っている<sup>9),10),21)</sup>。ター ビンブレードへの施工の様子を図7に示す。水 ノズルを使用してブレード表面に水膜を作りな がらレーザパルスを照射している。なおブレー ドの表面にはあらかじめ黒色ペイント等を塗布 し、材料表面の損傷を防いでいる。

図8はLSPT 社が近年リリースしたレーザピー ニング装置(Procudo<sup>®</sup>)に使用されているレー ザ装置である。Airbus 社はアルミニウム合金を 主体とした航空機機体構造物への適用を目指し、 ドイツ・ハンブルクの ZAL センターに LSPT 社 のレーザピーニング装置を導入している<sup>22)</sup>。



図7 タービンブレードの施工状況<sup>21)</sup>



図8 ピーニング用レーザ装置<sup>21)</sup>



図9 移動式レーザピーニング装置<sup>23)</sup>

# (2) 米国Curtiss-Wright Surface Technologies(CWST) 社

CWST 社もジェットエンジン・ファンブ レードやタービンブレードのレーザピーニング 施工サービスを行っている<sup>23)</sup>。また F-22の主 翼付け根部分のラグへのレーザピーニングを空 軍基地内で実施するため、トレーラーに載せた レーザピーニング装置を開発している(**図9**)。

#### (3) (株)東芝

(㈱東芝は原子炉構造物の SCC 対策として、 1999年からレーザピーニングを使用している<sup>24)</sup>。 沸騰水型原子炉 (BWR) に初めてレーザピー ニングを適用した際の装置構成を図10に示す。 水密パイプとミラーを組み合わせてレーザパル スを約50 m 伝送し、±0.1 mm の精度でシュラ ウドの溶接熱影響部に照射する。レーザ装置を 設置する仮設床の揺れや空気の揺らぎを補償す るため、特殊な光学系を開発してレーザパルス の照射位置を制御している<sup>25)</sup>。レーザ波長は 532 nm (Nd: YAG レーザの第2高調波)とし、 水の吸収によるエネルギーロスを防いでいる。 図11は加圧水型原子炉 (PWR) のピーニング に使用したレーザ装置である。



図10 BWR のレーザピーニング概念<sup>24)</sup>



図11 PWR 用レーザ装置<sup>24)</sup>

東芝はレーザの照射方法を最適化するととも に、LSPT 社や CWST 社と比較してパルスエ ネルギーを1桁~2桁小さい60~250 mJ とす ることにより、構造物の表面にコーティングを 施すことなく圧縮残留応力を導入する技術を開 発し、適用している<sup>1).26).27)</sup>。また高出力レー ザパルスの光ファイバー伝送技術も開発し、 2002年から原子炉に適用している<sup>25)</sup>。

#### (4) (株) LAcubed

(株) LAcubed は小指サイズのマイクロチップ レーザ発振器と人協働ロボットを組合せた小型・ 可搬式レーザピーニング装置を開発した<sup>8).13)</sup>。 装置の外観を図12に示す。消費電力は約300W で電源工事は不要であり、コンセントに接続し

NEFENRE TECHNINI OGY INIRNA 防衛技術ジャーナル March 2023



図12 可搬型ピーニング装置



て数リットルの水を供給するだけで直ぐに使用 が可能である。レーザのパルスエネルギーは 1~10 mJ であり、東芝より1桁以上、LSPT 社 および CWST 社より約3桁小さい。このよう に極端に小さいパルスエネルギーで処理を行っ ているが、アルミニウム合金や高張力鋼溶接継 手の残留応力や疲労特性が大きく改善できるこ とを確認済みである<sup>8),12),13)</sup>。

780MPa 級高張力鋼(HT780)溶接継手試験 片のレーザピーニングの様子を図13に、疲労 試験の結果を図14に示す。7.7 mJ という小さ なパルスエネルギーにもかかわらず、疲労特性 が大きく改善され、従来のレーザ(パルスエネ ルギー 200 mJ)を使用した結果と比較しても 遜色のない結果が得られた<sup>13)</sup>。

図13では、レーザピーニングの騒音を低減し 周囲に水が飛び散るのを防ぐため、試験片を水 に沈めて処理しているが、水を噴きかけながら ピーニングすることも可能である<sup>12)</sup>。



#### (5) その他の開発

パルスレーザの性能は2010年代に飛躍的に向 上し、近年では多種多様なレーザ装置が入手可 能となっている。このため、それらのレーザを 活用した研究開発がレーザピーニングおいても 多くなされている。

レーザピーニング装置については、LSPT 社、 CWST 社、(㈱東芝、(㈱ LAcubed の他、チェコ HiLASE<sup>28)</sup>、シンガポール Tyrida 社<sup>29)</sup>等でも 開発が行われている。なお中国では、レーザ ピーニング関連の研究開発が2010年代の中頃か ら急激に立ち上がり、航空機関連部品への適用 を既に開始したとの情報もある。今後の展開に 注視が必要である。また近年、インドからも多 くの論文発表がなされている。

新しいプロセスの開発としては、フェムト秒 レーザによる水を使用しない乾式のレーザピー ニング (Dry Laser Peening)<sup>30)</sup>や、水の代わり にポリマーを使用する技術開発<sup>31)</sup>などが行われ ている。

# 今後の課題

これまで述べてきた通り、レーザピーニング は高機能かつ再現性の高い効果を期待できる技 術であるが、装置が高価で取り扱いに熟練者が 必要なため、その応用は特殊な用途に限られて いる。以下では、レーザピーニングを広く普及 させるための課題を記載する。いずれも、わが 国が先行している分野であり、更なる研究開発 による実用化への展開が期待できる。

#### (1) 曲面および不連続部位への対応

現在、米国が中心となって使用している高エ ネルギーのレーザピーニングは、表面にあらか じめ金属テープ等を貼りつける必要があり、複 雑な3次元形状への対応は難しい。一方で、応 力集中は形状が不連続な部位で発生するため、 曲面への対応は構造物の健全性の維持および向 上において重要な課題である。

コーティングが不要なLPwCは、集光径が 小さいため曲面への対応が容易であり、期待が 高まっている。しかしながら、必然的に圧縮残 留応力の導入深さが浅くなるため、き裂進展の 抑制などに関する定量的な評価が必須であり、 その結果から適用範囲を明確にしていく必要が ある。

#### (2) 装置の小型化・簡素化による現地施工

高出力のマイクロチップレーザの実現<sup>14).15)</sup> により、レーザピーニング装置の桁違いの小型 化が達成された(図12)。運用も極めてシンプ ルなため、生産ラインへの適用に限らずインフ ラのメンテナンス等、屋外の構造物への適用も 可能と思われる。

屋外での施工が実現すると、鋼橋などでは自 重で生じる表面の引張応力をキャンセルできる 可能性が高い。その場合、工場での施工では得 られない高い効果が期待できる。このため、自 重やペイロードを想定した試験環境を整備し、 その効果を確認する必要がある。

## (3) 水を使用しないプロセス

電気・電子機器が組み込まれたシステムのメ ンテナンス等では、水の使用が許されない場合 が想定される。また材料によっては錆の発生が 問題となる他、建築現場などでは上下同時作業 も多く、水の使用は好ましくない。更には、真 空状態(宇宙環境)や氷点下(極地環境)では、 水の使用は困難である。

このため、フェムト秒レーザを使用した乾式の レーザピーニングへの期待が大きいが、現状では レーザ装置の安定性や施工速度が十分とは言え ず、今後のレーザ装置開発の進展が期待される。

## おわりに

近年、研究開発が盛んなレーザピーニングに ついて、その原理と効果、特にSCCおよび高 サイクル疲労特性に及ぼす効果について概説し た。レーザピーニングの起源は50年ほど前、 レーザの発明から約10年後に行われた実験であ る<sup>32)</sup>。当初、実用化にはほど遠い状況にあった が、レーザ技術の急速な進展により1990年代に 入ると米国および日本で相次いでその実用化が 始まった<sup>10,11)</sup>。

レーザピーニングの性能はレーザ発振器に 大きく依存するため、安定で高繰り返しが可 能なナノ秒レーザが安価に手に入るようにな れば、大きな広がりを見せる技術と考えられ ている。一方、小型かつ高出力のマイクロチッ プレーザ<sup>14,15)</sup>が開発されたことから、簡便に持 ち運びができるレーザピーニング装置が開発さ れた。小型のロボットアームとの組み合わせに より狭隘な部位や高所への適用が容易となるた め、建築現場の溶接後処理、鋼橋の寿命延長、 航空機機体構造物などへの適用が想定される。

また本稿では誌面の都合で割愛したが、金型 が不要な成型技術(レーザによるピーンフォー ミング)への展開も期待できる。

# 参考文献

- Y. Sano, *et al.*: "Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation", Nucl. Instrum. Methods B, **121** (1997), 432-436.
- 2) 佐野雄二、ほか "レーザピーニング現象の観察とモデル化" レーザ研究 26 (1998), 793-799.
- 3) 佐野雄二、ほか "レーザの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム" 日本原子力学会誌 42 (2000), 567-573.
- 4) Y. Sano, *et al.*: "Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating", Mater. Sci. Eng. A, **417** (2006), 334-340.
- 5) Y. Sano, *et al.*: "Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating", Mater. Des., **36** (2012), 809-814.
- 6) 佐野雄二、秋田貢一 "レーザピーニングによるセラミックスの機械的強度向上" セラミックス 55 (2020), 78-81.
- 7) 佐野雄二 "パルスレーザの直接照射による金属材料の長寿命化技術" スマートプロセス学会誌 11 (2022), 40-44.
- 8) 佐野雄二 "持ち運び可能なレーザピーニング装置の開発" 光アライアンス 2022年2月号, 57-61.
- 9) D. W. See, et al.: "The Air Force Manufacturing Technology Laser Peening Initiative", Surf. Eng., 18 (2002) 32-36.
- 10) A. H. Clauer: "Laser shock peening, the path to production", Metals, 9 (2019), 626.
- 11) Y. Sano: "Quarter century development of laser peening without coating", Metals, 10 (2020), 152.
- 12) Y. Sano, *et al.*: "Effects of laser peening with a pulse energy of 1.7 mJ on the residual stress and fatigue properties of A7075 aluminum alloy", Metals, 11 (2021), 1716.
- 13) Y. Sano, *et al.*: "Development of a portable laser peening device and its effect on the fatigue properties of HT780 buttwelded joints", Forces in Mechanics, 7 (2022), 100080.
- 14) 平等拓範 "マイクロ固体フォトニクスによる小型集積レーザ" 応用物理 90 (2021), 155-161.
- 15) L. Zhen, et al.: ">30 MW peak power from distributed face cooling tiny integrated laser", Opt. Express, 27 (2019), 30219-30224.
- 16) 小畑稔、ほか "パルス状レーザ照射による応力改善技術の開発 SUS304鋼に対する応力改善効果の検討—" 材料 49 (2000), 193-199.
- 17) 佐野雄二 "レーザピーニングの効果" ショットピーニング技術 14 (2002), 1-10
- 18) 佐野雄二、ほか "レーザピーニングによる溶接部の残留応力改善" 溶接学会誌 74 (2005), 525-528.
- J. Kauffmann *et al.*: "Effect of Laser Shock Peening Parameters on Residual Stresses and Corrosion Fatigue of AA5083", Metals 10 (2021), 1635.
- J. Park *et al.*: "Improvement of friction characteristics of cast aluminum-silicon alloy by laser shock peening", J Mater Process Technol., 266 (2019), 283-291.
- 21) https://www.lsptechnologies.com/
- 22) https://zal.aero/news/echt-laser-die-lsp-projekte-peencor-und-leadpeen/
- 23) https://cwst.com/
- 24) https://www.global.toshiba/jp/company/energy/topics/nuclearenergy/laserpeening.html
- 25) 向井成彦、ほか "レーザピーニングによる原子炉の応力腐食割れの予防 一高出力パルスレーザの遠隔伝送技術—" レーザ研究 33 (2005), 444-451.
- 26) Y. Sano, et al.: "A Mechanism for Inducing Compressive Residual Stresses on a Surface by Laser Peening without Coating", Metals, 10 (2020), 816.
- 27) Y. Sano and K. Akita: "Dependence of surface residual stress on the coefficient of thermal expansion for materials subjected to laser peening without coating", Opt. Laser Technol., 156 (2022), 108528.
- 28) https://www.hilase.cz/produkty/laser-shock-peening-lsp/
- 29) https://tyrida-intl.com/lsp-machines/
- 30) T. Sano, et al.: "Femtosecond laser peening of 2024 aluminum alloy without a sacrificial overlay under atmospheric conditions", J Laser Appl., 29 (2017), 012005.
- C. Le Bras, et al.: "Laser Shock Peening: Toward the Use of Pliable Solid Polymers for Confinement", Metals, 9 (2019), 793.
- 32) N. C. Anderholm: "Lase-generated Stress Waves", Appl. Phys. Lett., 16 (1970), 113-115.

March 2023