

し はじめに

ピーニング (Peening) とは金属の表面を叩いて打ち延ばす ことを意味する。その応用として、鉄やガラスの小片 (Shot) を高速で吹きつけて金属の表面を鍛え、強度の向上を図る ショットピーニング (Shot peening) が知られている¹⁾。レー ザーピーニング (LP: Laser peening) は、鉄やガラスの小片 の代わりにレーザーパルスを使用するものであり、水中の材 料または表面に水膜を形成した材料に時間幅数 ns ~数 + ns のレーザーパルスを照射して高圧のプラズマを発生させ、そ の圧力を利用してピーニングを行う技術である^{2,3)}。欧米^{4,5)} ではレーザー衝撃処理 (Laser shock processing) またはレー ザー衝撃硬化 (Laser shock hardening) という言葉を使って いたが、近年ではレーザーピーニングと呼ぶことが多くなっ てきた。

レーザーピーニングを行うと表面に圧縮残留応力場が形成 されるため、疲労強度の向上や応力腐食割れ (SCC: Stress corrosion cracking)の防止などに効果が期待できる。レー ザー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1mmあるいはそれ以上の深 さまで圧縮残留応力場を形成することができる。また、レー ザーピーニングは、ショットピーニング等の他のピーニング 技術と異なり、決定論的なプロセスに基づいている。すなわ ち、レーザーピーニングは対象に応じて予め設定されたレー ザーの照射条件および照射シーケンスに従って処理を行うた め、材料のバラツキの影響を除けばその効果は一義的に決 定される。一方、他のピーニング技術はプロセス自体がラン ダムであり、その効果は統計的に決定される。従って、レー ザーピーニングは効果の再現性に優れ、より高品質な処理が 可能な技術と言える⁶。

∠ レーザーピーニングの原理

強いレーザーパルスを材料に照射すると、レーザーアブ レーションと呼ばれる相互作用により材料のごく表層がプラ ズマ化する⁷⁾。材料の表面に水があるとその慣性でプラズマ を閉じ込める効果が高まるため、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の数 十倍となり数GPaに達する^{2,8)}。この圧力によって衝撃波が 発生し、材料内を伝播する。このとき衝撃波の動的な応力 によって材料の表層は押し延ばされて塑性変形し、未変形 部から拘束を受けることによって表面に圧縮残留応力が生じ る³⁾。1パルスで処理できる面積は小さいため、レーザービー ムまたは材料を移動させながら連続的にレーザーパルスを照 射することにより、必要な面積を処理する。

水中および空気中の試験片にレーザーパルスを照射し、 発生したプラズマからの発光を高速のCCDカメラで観察し た²⁾。パルスエネルギー100mJ、パルス幅5nsのNd:YAG レーザーの第二高調波(波長532nm)をSUS304試験片に 0.75mm径で集光したときのプラズマの様子を図1に示す。 空気中の場合と比較して、水中ではプラズマの膨張が抑制さ れていることがわかる。図1からプラズマの膨張速度を算出 し、プラズマの圧力を評価した。その結果、空気中ではプラ ズマの最大圧力は300MPa程度であるのに対し、水中では約 2.5GPaまで高圧化されることがわかった²⁾。

レーザーピーニング処理の概念を図2に示す。図2左は、 主にフランス⁴⁾および米国⁵⁾で開発されたプロセスであり、 大型のガラスレーザーを使用して実験を行っている。ガラス レーザーは近赤外(波長:1.05µm)で発振し水に吸収され やすいため、水中ではなく材料の表面に薄い水膜を形成した 状態でレーザーを照射する。プラズマを閉じ込めるために必 要な水の厚さは0.1mm程度である。ガラスレーザーはパルス エネルギーが数十〜百ジュールと大きいため、直径数mmの 領域を1パルスで処理することができる。一方、強力なレー ザーを材料に直接照射すると表面が溶融して損傷するため、 金属箔や黒色ペイント等で厚さ数+µmのコーティング処理 を行って表面を保護する必要がある。また、レーザー照射後 には残った箔やコーティングを除去する必要がある⁴⁵。

図2右は筆者らが開発したプロセスである²⁾。水冷されて いる原子炉構造物の遠隔保守に適用するため、コーティング やその除去といった前後処理が不要なプロセスを開発した。 水による吸収が少ないNd:YAGレーザーの第二高調波(波 長:0.53µm)を使用することにより、水中で自由にレーザー を照射することができる。欧米で使用されているガラスレー ザーと比較してパルスエネルギーを二桁~三桁小さくするこ とにより、材料の表面を損傷させることなくピーニング効果 を得ることができる。また、パルスエネルギーを小さくした ことにより、光ファイバの適用も可能である⁹⁾。橋梁などの 陸上の大型構造物に適用する場合には、水を噴きかけながら パルスレーザーを照射する¹⁰⁾。



図1 水の慣性によるプラズマの閉じ込め





3 レーザーピーニングの効果

前述のとおり、レーザーピーニングは他のピーニング技術 と異なり、決定論的なプロセスに基づいている。従って、シ ミュレーションによる効果の予測³⁾や処理条件の管理が容易 であり、効果の再現性に優れている⁶⁾。また、レーザーの照 射条件は処理の目的と対象に応じて幅広いパラメータから選 択することができる。その結果、残留応力の深さを制御する ことも可能であり³⁾、表面から約1mmあるいはそれ以上の深 さまで圧縮の残留応力場を形成することができる。このため、 応力腐食割れや疲労き裂の発生および進展の抑制に対して も高い効果を発揮することが知られている¹¹⁾。

- レーザーピーニングの特徴をまとめると、以下となる。
 - (1) プロセスが決定論的であり、再現性が高い
 - (2) 処理条件 (レーザー照射条件) の管理が容易
 - (3) 目的と対象に応じた処理条件の設定が可能
 - (4) 効果 (圧縮残留応力) が材料の深くまで及ぶ
 - (5) 処理 (レーザー照射) の反力がないため装置が簡素

3.1 残留応力の改善

熱間金型用合金工具鋼SKD61にレーザーピーニング処理 を施し、残留応力の深さ分布を測定した。レーザーピーニ ング処理の条件はパルスエネルギー200mJ、照射スポット径 0.8mm、照射密度100パルス/mm²である。表面の残留応力 はX線回折 (sin² ψ法)により測定し、その深さ分布は電解研 磨による表面の除去と残留応力測定とを交互に繰り返して求 めた。結果を図3に示す。レーザーピーニング処理により、 表面から約2mmの深さまで圧縮の残留応力が形成されてい ることがわかる。ここで、σ_xはレーザーパルスの走査方向の 残留応力を、σ_yはそれに直行する方向の残留応力を示して いる。レーザーピーニング処理した材料の表面および近傍で は、X方向と比較してY方向の残留応力がより圧縮側となる



図3 レーザーピーニングによる残留応力の改善効果(SKD61)

場合が多く、図3の結果もその傾向を示している。

3.2 応力腐食割れの抑制

レーザーピーニングによる応力腐食割れ (SCC) の抑制効 果を確認するため、鋭敏化処理した SUS304 試験片の応力腐 食割れ加速試験を行った¹¹⁾。供試材に 893K (620℃)、8.64× 10⁴s (24時間)の熱鋭敏化処理を行った後、20%の冷間圧延 を行い、50mm×10mm、厚さ2mmの短冊状試験片を採取し た。その試験片を治具に固定して表面に1%の引張ひずみを 与え、レーザーピーニングを行った。応力腐食割れを加速す 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℃ (562K)、溶存酸素 8ppm、導電率0.1mS/mの高温高圧 水中に1.8×10⁶s (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金属組織を観察し、応力腐食割れ の発生の有無を確認した。

試験結果の一例を図4に示す。未処理の試験片には結晶粒 界に沿った典型的な応力腐食割れがすべての試験片(7体) に発生したが、レーザーピーニング処理した試験片(7体)に は応力腐食割れの発生は観察されず、レーザーピーニングに よりSUS304の応力腐食割れ感受性が大きく低下することを 確認した。また、ニッケル基合金Alloy600およびその溶接 金属Alloy182についても同様の試験を行い、レーザーピー ニングにより応力腐食割れの発生が抑制できることを確認 した¹¹⁾。深さ約1mm以下の応力腐食割れについては、レー ザーピーニングによりその進展が抑制されることも別途確認 している¹¹⁾。

3.3 疲労強度の向上

レーザーピーニングによる疲労特性の改善効果を確認す るため、SUS316Lの回転曲げ疲労試験を行った¹¹⁾。各試 験片には熱処理 (FHまたはSR)を施した。FH (Full heat treatment)は1373K (1100°C)で3600s (1時間)の真空焼鈍 により結晶を均一化するための熱処理であり、SR (Stressrelieving heat treatment)は1173K (900°C)で3600s (1時間) 保持して機械加工で生じた残留応力を除去するための熱処 理である。熱処理後は表面仕上げを行い、パルスエネルギー



図4 応力腐食割れ(SCC)加速試験結果(SUS304)

200mJ、照射スポット径0.8mm、照射密度36パルス/mm²で 試験片表面をスパイラル状にレーザーピーニング処理した。

試験片に負荷した応力振幅(S)と、試験片が破断するまで の負荷繰り返し数(N)との関係(S-N線図)を図5に示す。負 荷繰り返し速度は2760rpm(46Hz)、応力比(R)は-1であり、 試験片の発熱は水流により除去した。図中に矢印で示すとお り、レーザーピーニング処理により疲労限がFHで190MPa から320MPaに、SRで240MPaから340MPaになり、各々疲 労限が約1.7倍および約1.4倍向上した¹¹⁾。

4 橋梁材料への適用検討

4.1 溶接構造用圧延鋼材 (SM490)

溶接構造用圧延鋼材 (SM490)の回し溶接部の疲労に対す るレーザーピーニングの効果を確認するため、厚さ12mmの 鋼板に厚さ9mmの鋼板を6mmの脚長で全周隅肉溶接した 試験体を製作し、疲労試験を行った^{12,13)}。レーザーピーニン グ処理した試験体の疲労試験後の写真を図6に示す。リブの 片側はテーパーとし、さらにグラインダーを用いて余盛りを 滑らかな凹面状に仕上げた (図6①)。他の片側の余盛は溶接 のままとし (図6②)、さらに試験体の幅を98mmから50mm に狭めた。一部の試験体には、②の溶接止端部に20mm× 30mmの範囲でレーザーピーニング処理を施した。処理条件









はパルスエネルギー200mJ、照射スポット径0.8mm、照射密 度36パルス/mm²とし、リブと直角方向にレーザーパルスを 走査した。

疲労試験の結果、未処理の試験体では意図したとおり② の溶接止端部から疲労き裂が発生し、破断した。一方、レー ザーピーニング処理した試験体で疲労負荷応力が小さい場合 (応力振幅125~175MPa)には②の溶接止端部から疲労破壊 せず、明らかに応力集中が少ない平行部と肩部の境や、テー パー側(①)から疲労破壊した。最大負荷応力がSM490の降 伏応力にほぼ等しくなる応力振幅(200MPa)では、レーザー ピーニング処理した試験体においても未処理の試験体と同じ く②の溶接止端部から疲労き裂が発生し、破断した。

レーザーピーニング処理の有無による疲労寿命の比較を 図7に示す^{12,13)}。この図は未処理の試験体2体の疲労寿命の 平均を1として、レーザーピーニング処理した試験体の疲労 寿命を示したものである。図中の上向きの矢印は、レーザー ピーニング処理した試験体で溶接止端部以外で破断したも の、もしくは寿命が疲労試験の打ち切り回数(200万回)を超 えたものを示している。前述のとおり応力振幅125~175MPa では、レーザーピーニング処理した試験体は溶接止端部か ら疲労破壊しなかったためその疲労寿命は明らかでないが、 レーザーピーニング処理により疲労寿命が大きく伸びること が確認された。

4.2 高張力鋼 (HT780)

高張力鋼 (HT780) の回し溶接部の疲労特性に対するレー ザーピーニングの効果を明らかにするため、レーザーピーニ ング処理した試験体と未処理の試験体を使用して疲労試験 を行った^{14,15)}。試験体は130mmの平行部を有する厚さ9mm の鋼板に、厚さ6mmの鋼板をリブとして全周すみ肉溶接し



て作成した。試験体の外観とレーザーピーニング処理範囲を 図8に示す。レーザーピーニング処理はSM490と同様に溶接 止端部を含む20mm×40mmの範囲に対して行い、パルスエ ネルギー200mJ、照射スポット径0.8mm、照射密度36パルス /mm²の条件でリブと直角方向にレーザーパルスを走査した。

疲労試験の結果を図9に示す^{14,15)}。未処理の試験体の疲労 限が約100MPaであるのに対し、レーザーピーニング処理し た試験体の疲労限は約150MPaとなり、HT780についても レーザーピーニング処理により疲労強度が大きく改善される ことが明らかとなった。なお図9において、*印は応力集中 の大きい溶接止端部からの破断ではなく、応力集中のない裏 面から疲労き裂が発生・進展し、破断した試験体を示してい る。従って、レーザーピーニング処理した溶接止端部の疲労 限は150MPaよりさらに高いことが予想される。



図8 試験体およびレーザーピーニング処理範囲(HT780)





5 おわりに

筆者らの開発成果を中心に、レーザーピーニングの原理と 効果、橋梁材料への適用検討の状況をまとめた。本稿では割 愛したが、レーザーピーニングは国内では原子炉構造物^{16,17)} や低圧蒸気タービン動翼への適用¹⁸⁾が進められている。ま た、米国ではジェット戦闘機エンジンのファンブレードへの 適用¹⁹⁾が行われている。興味ある方は、文献を参照願いたい。

レーザープロセスは高コストとなる要因が多いため、レー ザーピーニングはショットピーニングの代替ではなく、レー ザーの特徴である「制御性」と「非接触性」を活用した展開が 望まれる。必要な部分にのみレーザーピーニング処理を行う ことによってコストを抑え、高い付加価値を産み出す技術と して適用を図るべきと考えている。

近年、レーザーピーニングに関する研究開発の動きが盛 んである。国内ではレーザー学会に「レーザー衝撃と応用技 術」専門委員会が設置され、関連の活動が進められている。 また、レーザーピーニングに関する国際会議がヒューストン (2008年12月)、サンフランシスコ (2010年4月) と相次いで 開催され、2011年10月には大阪で第三回²⁰⁾が開催される予 定である。

なお、本研究の一部は、JFE21世紀財団「2008年度・技術 研究助成」および科学研究費補助金「若手研究 (B)」(課題 番号15760352)の補助を受けた。

参考文献

- 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) Y.Sano, N.Mukai, K.Okazaki and M.Obata : Nucl. Instrum. Methods B, 121 (1997), 432.
- 法野雄二,依田正樹,向井成彦,小畑稔,菅野眞紀, 嶋誠之:日本原子力学会誌,42 (2000),567.
- P.Peyre and R.Fabbro : Laser Shock Processing : Opt. Quant. Electron., 27 (1995) , 1213.
- A.H.Clauer and D.F.Lahrman : Key Eng. Mater., 197 (2001) , 121.
- 6) A.Demma, G.Frederick and C.King : 6th Int. Symp. on Contribution of Materials Investigations to Improve the

Safety and Performance of LWRs, Fontevraud, (2006)

- 7)レーザアブレーションとその応用,電気学会レーザアブレーションとその産業応用調査専門委員会編,コロナ社, (1999)
- 8) R.Fabbro, J.Fournier, P.Ballard, D.Devaux and J.Virmont : J. Appl. Phys., 68 (1990) , 775.
- 9) 依田正樹, 佐野雄二, 向井成彦, T.Schmidt-Uhlig,
 G.Marowsky: レーザー研究, 28 (2000), 309.
- 10) 崎野良比呂, 佐野雄二, 金裕哲: 鋼構造年次論文報告集, 15 (2007), 419.
- 11) Y.Sano, M.Obata, T.Kubo, N.Mukai, M.Yoda, K.Masaki and Y.Ochi : Mater. Sci. Eng. A, 417 (2006), 334.
- 12) Y.Sano, Y.Sakino, N.Mukai, M.Obata, I.Chida, T.Uehara, M.Yoda and Y.-C.Kim : Mater. Sci. Forum, 580-582 (2008), 519.
- Y.Sakino, Y.Sano and Y.-C.Kim : IIW Document XV-1317-09, (2009)
- 14) 崎野良比呂,吉川健一,佐野雄二,金裕哲:溶接構造 シンポジウム講演論文集,(2009),471.
- 15) 崎野良比呂, 佐野雄二, 金裕哲:レーザ加工学会誌, 17 (2010), 7.
- 16) 向井成彦, 佐野雄二, 依田正樹, 千田格, 上原拓也, 山本哲夫:レーザー研究, 33 (2005),444.
- 17) M.Yoda, I.Chida, S.Okada, M.Ochiai, Y.Sano, N.Mukai, G.Komotori, R.Saeki, T.Takagi, M.Sugihara and H.Yoriki : 14th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-14), Miami, (2006)
- 18) 千田格, 佐野雄二, 犬飼隆夫, 村上格, 村上正人, 野村光:第14回動力・エネルギー技術シンポジウム, (2009) B112.
- D.W.See, J.L.Dulaney, A.H.Clauer and R.D.Tenaglia : Surf. Eng., 18 (2002), 32.
- 20) The 3rd International Conference on Laser Peening and Related Phenomena Website http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/3rdLP/

(2011年2月14日受付)