

黒色液体インクを吸収層に用いたレーザピーニングの効果検証

飯田 裕之*, 王 明炎*, 古河 裕之**, 津山 美穂***
草場 光博*, 中野 人志***, 部谷 学*

*大阪産業大学工学部 (〒 574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

**レーザー技術総合研究所 (〒 550-0004 大阪府大阪市西区靱本町 1-8-4)

***近畿大学理工学部 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

heya@eic.osaka-sandai.ac.jp

Investigation of the Effect of Laser Peening using a Black Liquid Ink as an Absorber

IIDA Hiroyuki, WANG Mingyan, FURUKAWA Hiroyuki, TSUYAMA Miho,
KUSABA Mitsuhiro, NAKANO Hitoshi and HEYA Manabu

(Received November 21, 2016)

In order to produce compressive residual stress on a metallic sample, the following three experiments of Ink-LP (Laser peening) processing have been conducted using a black liquid ink as an absorber: (Exp-1) a single shot experiment using a glass slide as a confinement layer to investigate probable conditions of Ink-LP processing; (Exp-2) a single shot experiment to confirm the usefulness of an acrylic plate as the confinement layer; and (Exp-3) an experiment using the acrylic plate by repetitive laser irradiation to confirm the generation of compressive residual stress. The samples used were A2017 aluminum alloy in (Exp-1) and (Exp-2) and SUS304 stainless steel in (Exp-3). The following findings could be derived from experimental results. (1) The depth of the dent for Ink-LP processing using the glass slide was almost the same with that of conventional LP (C-LP) processing below a power density of about 10 GW/cm². (2) The depth of the dent for Ink-LP processing even using the acrylic plate was almost the same with those of C-LP processing using the glass slide and the acrylic plate, which indicating that Ink-LP processing using the acrylic plate would produce similar LP effects for C-LP processing. (3) Compressive residual stress within the range of about -200 to -400 MPa was observed even though when the coverage of the Ink-LP processing was only 100%.

Key words: no surface melting, surface deformation, compressive residual stress, Ink-LP, C-LP

1. 緒 言

パルス幅がナノ秒オーダーのパルスレーザを光学的に透明な閉じ込め層(透明層, 水が一般的)を介して金属材料に照射すると, 金属表面でプラズマが発生する。プラズマの膨張を閉じ込め層の慣性で閉じ込めることによって, 金属表面に数 GPa を超える圧力波が発生する。この時, 圧力が金属の降伏応力を超えると金属の塑性変形が起こる。これによって金属表層への圧縮残留応力の付与, あるいは加工硬化が可能となる¹⁾。この表面処理技術はレーザピーニング(LP: Laser peening)と呼ばれている。LP 処理技術は, 主に航空機部品²⁾およびエネルギープラント機器の金属部品の機械特性³⁾・耐食特性⁴⁾の改善を目的として実用化あるいは開発研究が進められている。

LP 処理には保護層を使用する場合としない場合がある。なお, 保護層はレーザ光を吸収する吸収層としての機能と保護層の表面でプラズマを発生させて処理材料表面の溶融を防ぐ犠牲層としての機能を有している。Fig. 1(a)に保護層なし, Fig. 1(b)に保護層ありの処理配置図を示す。保護層ありの場合では, レーザ光は保護層で吸収されるため, 処理表面がレーザ照射によって溶融することはない。しか

しながら, 保護層の使用は前工程を増やすことから, 生産性向上のためには保護層を使用しない LP 処理が求められる場合がある。一方で, 保護層なしの場合では, 金属表面の溶融を必ず伴うため, 処理表面には引張応力が残留しやすい。金属表面に圧縮応力を残留させるためには, パワー密度, 照射回数, カバレージなどを最適化したレーザ光を二次元的に走査する必要がある⁴⁾。この場合, 長い処理時間が問題になることがある。

前稿では, 吸収層として黒色液体インクを用いた新規のレーザピーニング(Ink-LP)の原理実証実験を行った⁵⁾。従

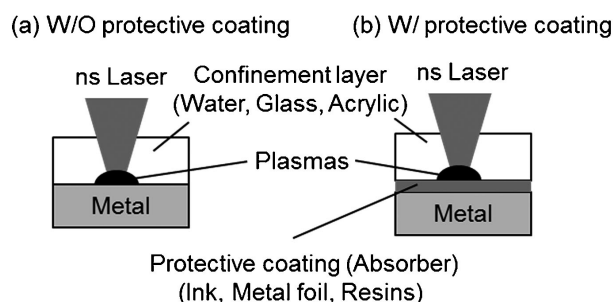


Fig. 1 Two LP methods (a) without and (b) with a protective coating.

来、固体状の吸収層として金属薄膜や光硬化性樹脂や黒色ペイントなどが用いられてきた⁶⁾。液体状の吸収層の使用によってレーザ照射中の吸収層の供給が容易になる可能性があり、吸収層の使用のための前工程を必要としないことが期待できる。前稿では、閉じ込め層にスライドガラスを用いて、スライドガラスとアルミニウム合金の間に10 μm 程度の墨汁(吸収層)を配置し、ナノ秒パルスレーザ(波長 532 nm, パワー密度約 5.6 GW/cm²)を用いてシングルショットの照射実験を行った⁵⁾。比較のために、閉じ込め層として水を用いた従来型のレーザピーニング(C-LP: Conventional LP)の実験も行った。その結果、Ink-LP 処理では、適切な条件下においては金属溶融がないと推察される表面変形(凹みの形成)を起こせることが明らかとなった。これは圧縮残留応力の付与を示唆している。しかしながら、前稿はシングルショットの実験であり、残留応力の計測ができなかった。加えて、閉じ込め層に用いたスライドガラスは1回の照射で割れるため、繰返しの照射が求められる LP の閉じ込め層として使用できず、繰返しのレーザ照射に耐えられる閉じ込め層について調べる必要がある。

Ink-LP 処理による圧縮残留応力の付与を実証するために、Q スイッチパルス Nd:YAG レーザの第二高調波(波長 532 nm, パルス幅約 5 ns)を用いて本稿では三つの実験を行う。一つ目の実験では、Ink-LP 処理の条件について調べるために、パワー密度とスポット径を変化させてシングルショットの実験を行う。閉じ込め層にはスライドガラスを用いてアルミニウム合金の表面変形量(凹み深さ、凹み幅)を計測する。二つ目の実験では、繰返し照射可能な閉じ込め層としてアクリル板が使用できることを確認するために、一つ目の実験結果に基づいて、スポット径を約 300 μm に固定し、パワー密度を変化させてシングルショットの実験を行う(比較のためにスライドガラスも用いる)。ここでもアルミニウム合金の表面変形量から LP 効果を評価する。三つ目の実験では、二つ目の実験結果に基づいて決定したパワー密度に固定して、ビームを二次元的に走査させた照射実験を行い、処理回数を変化させて圧縮残留応力の付与の実証を行う(比較のために C-LP 実験も行う)。

2. 実験方法

2.1 装置配置図

Fig. 2 に装置配置の概略図を示す。使用するレーザ(Continuum 社製, SLII-10)はパルス幅約 5 ns の Q スイッチ Nd:YAG パルスレーザの第二高調波であり、レーザ波長は 532 nm であった。Ink-LP 処理では、金属サンプル表面に供給する黒色液体インクが吸収層の役割を果たす。そして、インクの大気側にあるスライドガラスあるいはアクリル板が閉じ込め層の役割を果たす(Fig. 2(c)参照)。一方、C-LP 処理では、金属サンプルの上に閉じ込め層であるスライドガラスあるいはアクリル板を設置した。なお、金属サンプルとスライドガラスの間には、音響インピーダンスマッチングのために薄い水の層を設置した。水を閉じ込め層として機能させるためには通常数 mm 程度以上の水膜

の厚みが必要となる^{1,7)}。これに比べて本実験での水膜の厚みは 10 μm 以下と非常に薄く、この場合、水膜ではなくスライドガラスが閉じ込め層として機能する(Fig. 2(b)参照)。

2.2 スライドガラスを用いたシングルショット実験

Table 1 に一つ目の実験の実験条件を示す。ここでは、Ink-LP 処理の実験条件について考察するために、閉じ込め層にスライドガラスを用いた。スポット径とパルスエネルギーの組み合わせを変えて、パワー密度を広範囲に変えたシングルショットでの照射実験を行った。金属サンプル

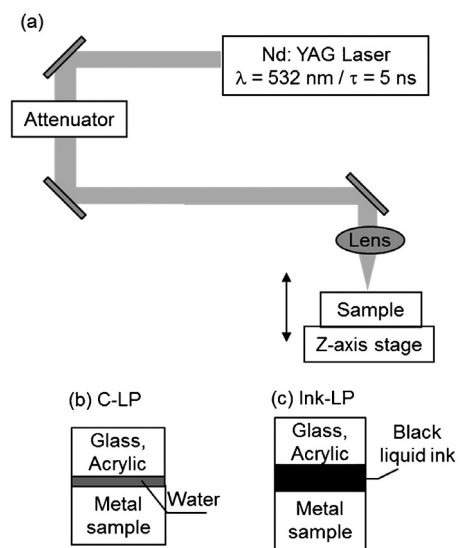


Fig. 2 Experimental set-up. (a) Schematic drawing of a ns laser system and a sample. Sketches of the samples for (b) C-LP and (c) Ink-LP processing.

Table 1 Experimental conditions examined in this study.

Laser oscillator (Nd: YAG laser, Continuum, SLII-10)	
Wavelength [nm]	532
Pulse duration [ns]	~5
Repetition rate [Hz]	10
Experiment I :	
Laser	
Spot diameter [μm]	~300, ~450, ~520, ~610
Power density [GW/cm^2]	~1-16
Target	
Ink-LP	Glass slide/Indian ink/A2017
C-LP	Glass slide/Water/A2017
Experiment II :	
Laser	
Spot diameter [μm]	~300
Power density [GW/cm^2]	~0.7-10
Target	
Ink-LP	Glass slide or Acrylic/Indian ink/A2017
C-LP	Glass slide or Acrylic/Water/A2017
Experiment III :	
Laser	See Fig. 3
Target	
Ink-LP	Acrylic/Indian ink/SUS304
C-LP	Water/-/SUS304

にはピーニング処理によって変形しやすいアルミニウム合金(A2017, ミスミ社製, サーフフェイス研磨仕上げ)を用いた。使用したサンプルのサイズは縦 35 mm, 幅 40 mm, 厚み 12 mm であり, 閉じ込め層と金属表面の間に, Ink-LP 処理では黒色液体である市販の墨汁を, C-LP 処理では音響インピーダンスマッチングのための水膜を設置した。墨汁の厚みは 10 μm 程度以下であり, 前稿においてこれ以上厚みが厚くなると, 金属表面での変形量が小さくなり, ピーニング効果が低下することがわかっている⁵⁾。

照射後, レーザ共焦点顕微鏡(KEYENCE 社製, VK-8500), 表面粗さ計(Mitsutoyo 社製, SJ-210)を用いて表面変形量(凹み幅, 凹み深さ)および表面溶融の有無を評価した。実験結果の一例を Fig. 4 に示す。顕微鏡写真の下グラフは表面粗さプロファイルである。凹み深さは金属表面から底部の平均的な距離として, 凹み幅は凹んだ領域の直径として定義した。

2.3 閉じ込め層の調査のためのシングルショット実験

2.2 節での実験結果からスポット径を決定し, 閉じ込め層にアクリル板を用いてシングルショットの実験を行った(比較としてスライドガラスも用いた)。アクリル板はある程度繰り返し照射しても割れることがなく, 閉じ込め層として使用できる可能性がある。スライドガラスは 1 回のパルスレーザ照射で必ず割れるため, 繰り返し照射が求められる LP 処理の閉じ込め層には適さない。

Table 1 に示すように, スポット径を約 300 μm に固定し, パワー密度を変えてシングルショットの実験を行った。C-LP 配置の実験も同条件で実施し, Ink-LP 処理と C-LP 処理において, 閉じ込め層がアクリル板とスライドガラスの場合のピーニング効果の比較を行った。2.2 節と同様に, ピーニング処理によって変形しやすいアルミニウム合金(A2017)を用いた。評価方法は 2.2 節と同様であった。

2.4 残留応力評価のための繰り返し照射実験

2.3 節での実験結果からスポット径およびパワー密度を決定し, 残留応力評価のためにレーザビームを二次元的に走査させた繰り返し照射の実験を行った。比較のために C-LP 配置での従来法の LP 実験も行った。Ink-LP 処理では閉じ込め層にはアクリル板を用い, サンプルにはステンレス鋼(SUS304, ミスミ社製, ロータリー研磨仕上げ, 焼鈍処理)を用いた。サイズはアルミニウム合金と同じであった。サンプルの個体差の影響を最小限にするために, 一つのサンプルを用いた。

Fig. 3(a), (b)に示すように, Ink-LP 処理および C-LP 処理でのパワー密度およびスポット径はそれぞれ約 8.3 GW/cm² と約 300 μm , 約 7.9 GW/cm² と約 400 μm であった。レーザビームの走査速度 v は 3 mm/s(Ink-LP), 1 mm/s(C-LP), 垂直ずらし距離 δ は 0.3 mm(Ink-LP), 0.05 mm(C-LP) であった。Ink-LP 処理では隣接するパルス間でビームの重なりがないため, 1 スポット当たりの見かけ上のパルス数は 1 pulses/spot となる(この場合, カバレッジが 100% となる)。一方, C-LP 処理ではビーム走査方向およびその垂直方向にビームを重ねて照射するため, 32 pulses/spot(=

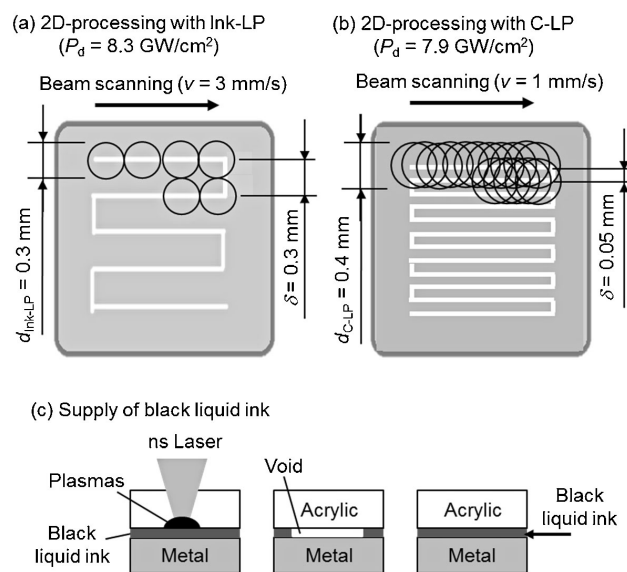


Fig. 3 2D processing methods for (a) Ink-LP and (b) C-LP processing. (c) Supply method of black liquid ink.

($0.4/1.0$) $\times 10 \times (0.4/0.05)$)となる。Ink-LP 処理と C-LP 処理とでは 1 スポット当たりの見かけ上のパルス数が大きく異なることとなる。なお, Ink-LP 処理では, 二次元走査の処理回数を 1 から 4 回(カバレッジ 100~400%)まで変化させて処理を行った。この時, 2 回目以降の各レーザスポットの位置は 1 回目のそれと一致させた。残留応力計測は X 線測定装置(島津製作所社製, XRD-6100)を用いた。

Fig. 3(c)に示すように, Ink-LP 処理では金属表面とアクリル板の間に墨汁を強制的に供給した。1 パルスの照射ごとに墨汁は照射領域から除去される。照射中は墨汁を常に供給し続け, 照射直前には照射領域に墨汁が常に存在するようにした。なお, 2.4 節での C-LP 実験はアクリル板を用いず, 水槽内にサンプルを設置し, サンプル表面に一方方向にポンプで水の流れを作りながら照射を行った。水の流れによって照射中の金属デブリを除去でき, 安定な LP 処理が実現できる。

3. 実験結果

3.1 スライドガラスを用いたシングルショット実験

Fig. 4 に閉じ込め層にスライドガラスを用いた場合のスポット径約 610 μm , パワー密度約 5.5 GW/cm² における (a) Ink-LP, (b) C-LP 処理後のレーザ顕微鏡写真と表面粗さプロファイルをそれぞれ示す。Ink-LP 処理後の表面には中央部に凹んだ領域が観測された(Fig. 4(a) 参照)。その周辺の未変形領域および凹んだ領域では, 表面仕上げによる縦方向の研磨傷が確認できた。Fig. 4(a) の下の表面粗さプロファイルから, この研磨傷の粗さは μm オーダであることがわかる。また, 凹んだ領域の中央部が最も深くお椀状の表面変形が観測された。この場合の凹み深さは約 20 μm であり, 凹み幅は約 0.9 mm であった。一方, C-LP 処理後では凹んだ領域の底部において Ink-LP 処理の結果と比べて処理表面はあるものの比較的一様に凹むことが観測された(Fig. 4

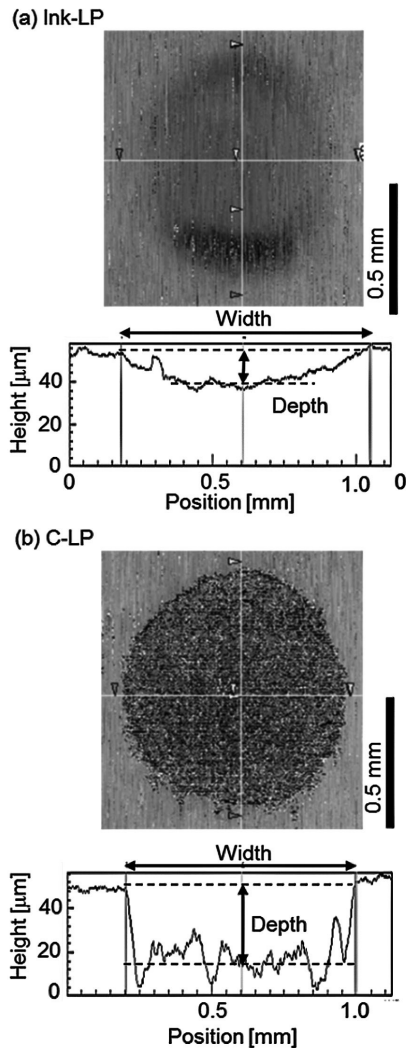


Fig. 4 Snapshots and surface roughness profiles for (a) Ink-LP and (b) C-LP processing at a spot diameter of about 610 μm and a power density of about 5.5 GW/cm^2 . The sample used was A2017Al alloy.

(b)参照). **Fig. 4(b)**の下表面粗さプロファイルから、Ink-LPの結果と比較すると凹みの底部において数十 μm オーダの大きな凸凹が観測され、Ink-LPの結果で観測された研磨傷が消失した(**Fig. 4(b)**参照). なお、照射領域の周辺ではInk-LP処理と同様に縦方向の研磨傷が確認された。

Fig. 5にInk-LPおよびC-LP処理におけるパワー密度を変えた時の(a)凹み幅、(b)凹み深さの変化をそれぞれ示す。約10 GW/cm^2 以上の高パワー密度領域では、Ink-LPおよびC-LP処理ともに凹み深さが飽和し始める傾向が観測された(**Fig. 5(b)**参照)。スポット径が約300 μm の場合では、Ink-LP処理とC-LP処理の凹み深さはほぼ同じであったが、より大きなスポット径においては凹み深さはC-LP処理の方がInk-LP処理に比べて深くなる傾向が観測された。また、凹み幅においてはパワー密度の増大とともに凹み幅も増加し、Ink-LP処理の凹み幅はC-LP処理よりも若干広くなる傾向にあった(**Fig. 5(a)**参照)

3.2 閉じ込め層の調査のためのシングルショット実験

Fig. 6に閉じ込め層にアクリル板、スライドガラスを用

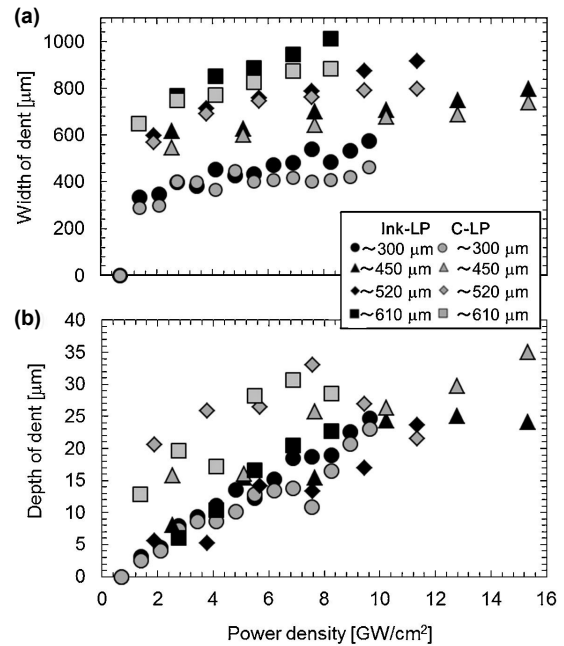


Fig. 5 Dependences of a power density on (a) the width and (b) the depth of dents for Ink-LP and C-LP processing. A spot diameter was varied from about 300 μm to about 610 μm . The sample used was A2017 Al alloy.

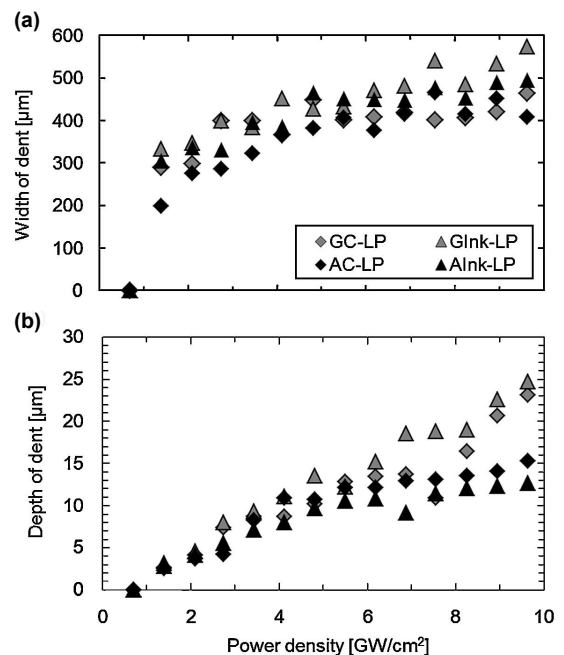


Fig. 6 Dependences of a power density on (a) the width and (b) the depth of dents for Ink-LP and C-LP processing. A spot diameter was fixed at about 300 μm . “G” and “A” symbols show the results with a glass slide and an acrylic plate, respectively. The sample used was A2017 Al alloy.

いた場合のパワー密度を変えた時の(a)凹み幅、(b)凹み深さの変化をそれぞれ示す。ここでは、**Fig. 5**においてInk-LP処理とC-LP処理で凹み深さに差がほとんどなかった、スポット径約300 μm を選択した。GC-LP、AC-LPはスライドガラス(G)、アクリル板(A)の場合のC-LP処理の実験結果を、GInk-LP、AInk-LPはスライドガラス(G)、アクリ

ル板(A)の場合の Ink-LP 処理の実験結果をそれぞれ示す。凹み深さにおいて, スライドガラスの場合, 6 GW/cm^2 付近以上でも深くなる一方で, アクリル板の場合は C-LP 処理および Ink-LP 処理ともに飽和する傾向にあった(Fig. 6 (b)参照)。加えて, 6 GW/cm^2 付近以下の領域では, スライドガラスおよびアクリル板のいずれの場合においても, スポット径約 $300 \mu\text{m}$ では C-LP 処理および Ink-LP 処理の凹み深さはほぼ同程度であった。なお, 凹み幅についてはいずれの処理方法においてもほぼ同じであった。

3.3 残留応力評価のための繰返し照射実験

Fig. 7 に繰返し照射後の金属表面の顕微鏡写真を示す。カバレッジ 100% とは処理回数が 1 回を意味しており, Fig. 3(a) に示したビーム走査によって二次元的に 1 回照射する。カバレッジ 200% とは同様のビーム走査を 2 回繰返すことを意味する。いずれの場合においても, 表面には間隔数十 μm オーダの表面仕上げの研磨傷が観測できており, 金属表面の溶融はないと推測できる。ただし, Fig. 7(b) の写真の上部に示したように, 金属の研磨傷が一部消失した。この部分は繰返し照射の最初の部分であり, 墨汁の供給が適切に行われなかったことが原因の一つだと考えられる。

Fig. 8 に処理回数を変えた時の垂直方向および水平方向の残留応力の計測結果を示す。ここでは金属表面の残留応力を計測した。垂直方向とはレーザービームの走査方向に対して垂直な方向を意味する。なお, Fig. 8 中の 2 本の破線は C-LP 照射後の垂直方向と水平方向の残留応力値を示す。

従来の LP 照射法では, ビーム走査方向に対して垂直方向の圧縮残留応力が水平方向のそれよりも大きくなることが知られている⁸⁾。本実験結果も C-LP 処理では垂直方向の圧縮残留応力の方が -200 MPa 程度大きかった。しかし

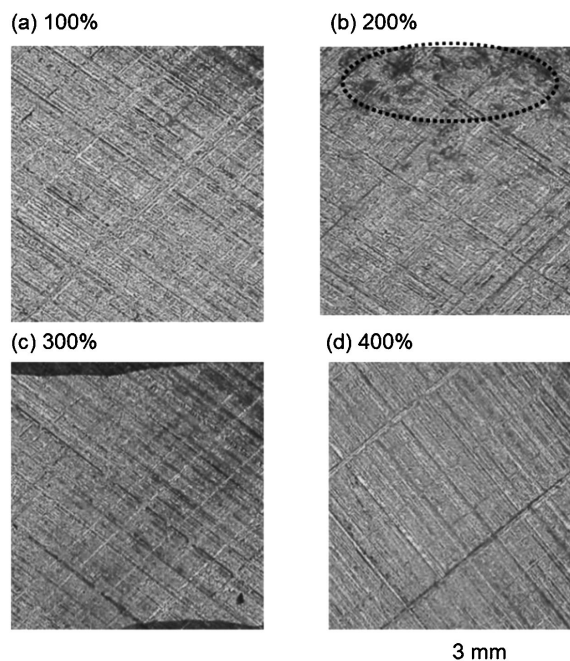


Fig. 7 Snapshots of the surface of the irradiated sample at a coverage of (a) 100%, (b) 200%, (c) 300%, and (d) 400%. The sample used was SUS304 stainless steel.

ながら, Ink-LP 処理では必ずしも垂直方向の圧縮残留応力が大きいとは言えない結果が得られた。また, 照射前の残留応力は引張り残留応力が計測されたが, ビーム走査照射を 1 回(カバレッジ 100%)行くと, $-200 \sim -400 \text{ MPa}$ 程度の圧縮残留応力が付与された。そして, 処理回数を増やしても顕著な圧縮残留応力の増大は観測されなかった。なお, 本実験ではカバレッジ 200% の垂直方向の圧縮残留応力が最も大きかった。Fig. 9 に最も大きな圧縮残留応力値が観測されたカバレッジ 200% のサンプルの深さ方向の残留応力分布を示す。表面から約 $200 \mu\text{m}$ まで, 垂直・水平方向いずれに対しても圧縮残留応力が付与できた。

4. 考 察

4.1 アクリル板とスライドガラスの比較

前稿では, Ink-LP において墨汁表面がプラズマ化し, そのプラズマの膨張を閉じ込め層によって閉じ込めることで, アルミニウム合金の降伏応力を超える圧力波が発生すると考察した³⁾。Fig. 6 に示したように, スライドガラスでは 10 GW/cm^2 近傍まで凹み深さが増大するのに対し, アクリル板では $5 \sim 6 \text{ GW/cm}^2$ 以上のパワー密度領域において凹み深さが飽和する傾向が観測された。凹み深さとレーザー照射中に発生する圧力波の間には正の相関があることが知られている⁸⁾。アクリル板において $5 \sim 6 \text{ GW/cm}^2$ 以

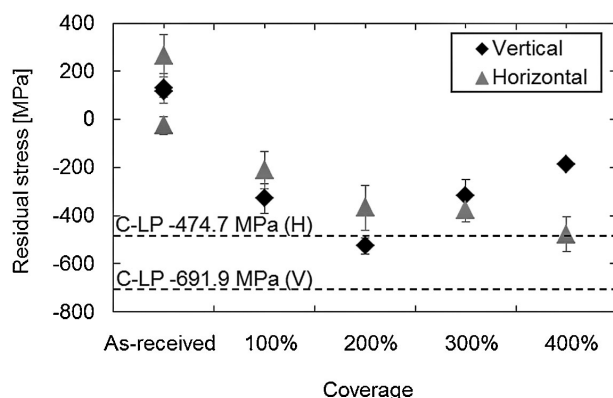


Fig. 8 Residual stress on the surface of the sample in the horizontal and vertical directions as a function of a coverage. The sample used was SUS304 stainless steel.

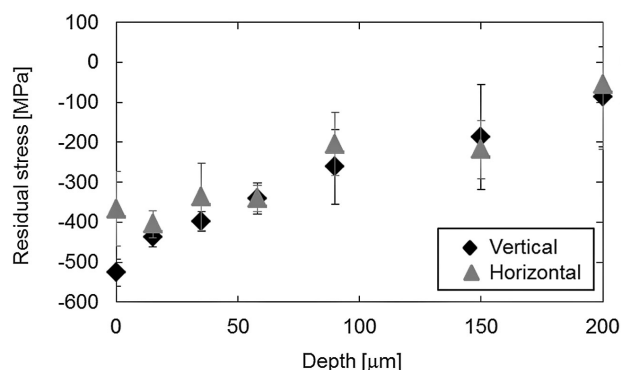


Fig. 9 In-depth distributions of residual stress at a coverage of 200% in the vertical and horizontal directions. The sample used was SUS304 stainless steel.

上で凹み深さが飽和することは、発生する圧力波も飽和すると推測できる。圧力波が飽和する要因として、レーザー照射によるアクリル板の光学損傷が考えられる。アクリル板はガラスに比べて蒸発温度が低く、損傷閾値が低くなると考えられる。

5~6 GW/cm² 以下のパワー密度領域では、アクリル板の場合の凹み深さはスライドガラスのそれとほぼ同じであった。加えて、C-LP 処理と Ink-LP 処理での結果もほぼ同程度であった。通常、C-LP 処理では 1~4 GW/cm² のパワー密度領域で処理を行う。これらのことにより、5~6 GW/cm² 以下のパワー密度領域ではアクリル板を用いた Ink-LP 処理でもスライドガラスを用いた従来法の C-LP 処理とほぼ同等のピーニング効果が期待できる。なお、残留応力評価実験では、大きな圧力波の発生が期待できる、凹み深さが飽和した 8.3 GW/cm² のパワー密度を選択した。

4.2 Ink-LP によるピーニング効果

Fig. 8 に示したように、処理回数が 1 回(カバレッジ 100%)の場合においても、-200~-400 MPa 程度の圧縮残留応力を金属表面に付与できた。Fig. 3 に示したように、本実験の Ink-LP 処理は隣り合うスポットを相互に重ねていない(従来法の C-LP 処理では金属溶解による引張り残留応力を圧縮側に変換するために隣接するスポットを重ねて照射する^{4,8)})。ビームを重ねず LP 処理できることは、処理速度の向上に寄与する。このように、Ink-LP 処理ではビームを重ねなくても圧縮残留応力が付与できることを示した。この要因としては、Fig. 4 に示したように、入射レーザー光のエネルギーを墨汁に吸収させ、金属表面の溶解がなく、塑性変形を誘起できたことによると考えられる。

Ink-LP 処理によって付与された圧縮残留応力は、従来の C-LP とは違い、レーザービームの走査方向に依存しないと考えられる結果が得られた(Fig. 8 参照)。既述したように、従来法の C-LP 処理では圧縮残留応力の異方性が観測される⁸⁾。これはビーム走査の異方性が主要因であると推測される。C-LP 処理ではビーム走査方向に対して連続してピーニング処理が行われた後、走査方向と直交した方向にスポット位置をずらし、再び走査方向に連続処理が行われる(Fig. 3(b) 参照)。これを繰り返して処理が行われる。一方、本実験での Ink-LP 処理ではビーム走査に異方性はない。

Fig. 9 より、約 200 μm の深さまで圧縮残留応力を付与できた。疲労強度の向上を目的とした、ショットピーニング処理によって圧縮残留応力を付与する深さは数百 μm 程度の場合も多く¹⁰⁾、本実験で得られた処理深さでも適用できる部品は多いと考えられる。既述したように、本研究では C-LP 処理での垂直方向で得られた約 -700 MPa までの圧縮残留応力は Ink-LP 処理では実現できなかった。今後、処理条件の最適化によって C-LP 処理と同等のピーニング効果(圧縮残留応力値の増大と更なる深部処理)の実現に取り組んでいく必要がある。加えて、Fig. 4 からわかるように、処理表面は Ink-LP 処理の方が滑らかなため、表面粗さを抑えたピーニング処理が可能である。このよ

うに、Ink-LP 技術は C-LP 技術よりも疲労強度の向上に優れた、異方性の少ない、新規の表面処理技術となる可能性を有している。

5. 結 論

本稿では、Ink-LP 処理による圧縮残留応力の付与を実証するために、Q スイッチパルス Nd:YAG レーザの第二高調波(波長 532 nm, パルス幅約 5 ns)を用いて次の三つの実験を行った。(1) Ink-LP 処理の条件について調べるための閉じ込め層にスライドガラスを用いたシングルショット実験(サンプルはアルミニウム合金(A2017))、(2) 繰返し照射可能な閉じ込め層としてアクリル板が使用できることを確認するためのシングルショット実験(サンプルはアルミニウム合金(A2017))、(3) 圧縮残留応力の付与の実証のためのビームを二次元的に走査させた繰返し照射実験(サンプルはステンレス鋼(SUS304))。その結果、以下の事が明らかになった。

- (1) 閉じ込め層にスライドガラスを用いた場合、約 10 GW/cm² 以下のパワー密度領域において、スポット径が約 300 μm の場合では、Ink-LP 処理と C-LP 処理の凹み深さはほぼ同じであった。
- (2) 5~6 GW/cm² 付近以下の領域では、スライドガラスおよびアクリル板のいずれの場合においても、スポット径約 300 μm では C-LP 処理および Ink-LP 処理の凹み深さはほぼ同程度であった。このことにより、このパワー密度領域ではアクリル板を用いた Ink-LP 処理でもスライドガラスを用いた従来法の C-LP 処理とほぼ同等のピーニング効果が期待できる。
- (3) 凹み深さが飽和する照射条件(パワー密度約 8.3 GW/cm² とスポット径約 300 μm)において、ビーム走査照射を 2 回(カバレッジ 200%)行くと、表面溶解がないと推察される処理表面に、-200~-400 MPa 程度の圧縮残留応力を付与できた。この時、表面から数百 μm の深さまで圧縮応力を残留できた。

今後、処理条件の最適化によって C-LP 処理と同等のピーニング効果(圧縮残留応力値の増大と更なる深部処理)の実現に取り組んでいく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Ding, K. and Ye, L.: Laser Shock Peening, Woodhead Publishing, (2006), 7.
- 2) 足立隆史: 航空機部品へのレーザーピーニング適用検討, レーザー研究, **42**, (2014), 462.
- 3) 千田格, 佐野雄二, 廣田圭一, 犬飼隆夫, 角谷利恵, 佐々木英寿, 村上格, 野村光: レーザーピーニングの原子力タービンへの応用, **42**, (2014), 467
- 4) Sano, Y., Mukai, N., Okazaki, K., and Obata, M.: Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, **121**, (1997), 432.
- 5) 飯田裕之, 丹羽勝之, 王明炎, 古河裕之, 津山美穂, 中野人志, 草場光博, 部谷学: 吸収体に黒色液体インクを用いた金属溶解フリーのレーザーピーニングの原理実証, 電気学会論文誌 A, **135**, (2015), 581.

- 6) Ding, K. and Ye, L.: Laser Shock Peening, Woodhead Publishing, (2006), 9.
- 7) Peyre, P., Berthe, L., Fabbro, R., and Sollier, A.: Experimental Determination by PVDF and EMV Techniques of Shock Amplitudes Induced by 0.6-3 ns Laser Pulses in a Confined Regime with Water, J. Phys. D: Appl. Phys., **33**, (2000), 498.
- 8) 日下一也, 田中剛, 英崇夫: レーザピーニング処理したアルミニウム合金の残留応力のレーザーパワー密度および走査速度依存性, J. Soc. Mat. Sci., **54**, (2005), 672.
- 9) Peyre, P., Berthe, L., Vignal, V., Popa, I., and Baudin, T.: Analysis of Laser Shock Waves and Resulting Surface Deformations in an Al-Cu-Li Aluminum Alloy, J. Phys. D: Appl. Phys. **45**, (2012), 335304.
- 10) 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), 5.