

# レーザピーニング作用に及ぼすパルス幅の影響

—サブナノ秒レーザピーニングの優位性—

松本 康太郎<sup>\*,\*\*\*</sup> 辻 俊哉<sup>\*\*</sup> 小林 祐次<sup>\*\*</sup>  
部谷 学<sup>\*\*\*</sup> 沖原 伸一郎<sup>\*\*\*</sup>

Influence of the laser pulse width on the effect of laser peening  
—Advantage on laser peening using a sub-nanosecond laser—

MATSUMOTO Koutaro, TSUJI Toshiya, KOBAYASHI Yuji, HEYA Manabu and OKIHARA Shin-ichiro

\*エンシュウ株式会社 (〒432-8522 静岡県浜松市南区高塚町 4888)

\*\*新東工業株式会社 (〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅 3 丁目 28-12)

\*\*\*光産業創成大学院大学 (〒431-1202 静岡県浜松市西区呉松町 1955 番 1)  
koutaro\_matsumoto@enshu.co.jp

(原稿受付 2010 年 5 月 19 日)

Laser peening (LP) using Q-switch nanosecond (ns) lasers with a laser pulse width of a few to a few tens of nanoseconds has recently been used in heavy industries as a characteristic surface treatment technology. The purpose of this study was to investigate the dependence of the laser peening on the laser pulse width, with emphasis on the laser peening using sub-ns laser pulses. We compared the different types of peening techniques; ns laser peening (nsLP), sub-ns laser peening (sub-nsLP), typical shot peening (SP), and fine shot peening (FSP). The pulse widths of nsLP and sub-nsLP were 7.5 ns and 0.18 ns, respectively. We have found that sub-nsLP in the parameters we examined can introduce the compressive residual stress effectively (while suppressing the surface roughness) in comparison with a conventional nsLP. Thus, we showed the advantages of LP with sub-ns lasers and present its potential for micro-machine technology.

**Key words:** surface treatment technology, sub-ns laser peening, shot peening, compressive residual stress, surface roughness, micro-machine technology

## 1. 緒 言

近年、レーザ加工技術は、重工業産業などにおいてレーザの特徴(高いパワー密度や非接触性等)を活かし、溶接や切断といった加工方法として幅広く実用化されている。この要因として他の加工技術と比べて高い生産性や高品質な加工が挙げられる<sup>1), 2)</sup>。さらに、表面改質においてもレーザの導入が進んでおり、省エネルギー化や環境性の向上といった付加価値の付与を目的とした新しいレーザ表面処理技術(フェムト秒レーザによる表面微細構造形成<sup>3)</sup>やナノ秒(ns)レーザによるレーザピーニング(LP: Laser peening)<sup>4)</sup>が検討され、利用されつつある。

ピーニングとは「金鎚で打つ」といった意味をもつ。代表的技術であるショットピーニング(SP: Shot peening)では、無数の金属球または非金属球を高速度で金属表面に衝突させる。その機械的作用により金属表面を塑性変形させ、圧縮残留応力の付与や加工硬化などを引き起こし、疲労強度および耐応力腐食割れ性の向上といった効果をもたらす<sup>5)</sup>。

一方、LPでは、高強度のパルスレーザを水中に設置した金属材料に照射することにより生じる高圧のレーザプラズマの作用を利用する<sup>6)</sup>。水の慣性によってプラズマの膨張が抑えられ大気中で照射した場合に比べて数10倍もの圧力が生じる。発生した衝撃波が金属中を伝播し、その動的応力が金属の降伏応力を超えた領域で塑性変形が起こり、

圧縮残留応力が金属表面に付与される(Fig. 1)。

LPでの衝撃エネルギーは、SPでのショットの運動エネルギーに比べ大きいため、材料表面からより深い領域へ圧縮残留応力を付与できるという特徴を有している<sup>4)</sup>。これは、耐応力腐食割れ性や疲労強度向上の点で非常に有利である。また、水中処理のためSPのように排気汚染がなく環境性も良い。さらに、局所処理が可能であり、制御性に優れている<sup>7)</sup>。これらの特徴から、LPは高い安全性が求められる市場(航空産業、原子力産業等)で実用化が進んでいる<sup>8), 9)</sup>。また、マイクロマシン等に使用されるような微小部品や複雑形状を有する部品など、SPでは処理が困難とされていた部品への適用が期待されている。

しかしながら、LPはSPのように広範囲を一度にランダム加工するのではなく、レーザスポットを処理範囲にわたって走査させる必要があるため、処理速度が遅く生産性が低い。また、レーザ装置のイニシャルコストが高くコストパフォーマンスが低いことから、量産性の求められる市場(自動車産業等)への実用は進んでいない。

現状のLPでは1~数10 nsのパルス幅のnsレーザが多く利用されており、さまざまな材料への照射試験や、パワー密度やカバレッジなどのパラメータの違いによる効果の検証は数多くの研究者によって行われてきた<sup>4), 6), 9)</sup>。しかしながら、さらに短いパルス幅のレーザを用いた先行研究はほとんどなく、フェムト秒レーザ<sup>10)</sup>、ピコ秒レーザ<sup>11)</sup>を用

いた研究が数件あるものの、短パルス化によるピーニング作用(残留応力付与, 硬度, 表面粗さ, 形状変化)に与える影響等はいまだ明示されているとはいえない。

本論文では、高効率かつ非熱的处理が期待できるサブナノ秒(sub-ns)レーザ(パルス幅 0.18 ns)と実用されている ns レーザ(パルス幅 7.5 ns)を用いて LP 処理を行った。短パルス化(7.5 ns から 0.18 ns へ)により、疲労強度向上に影響する残留応力付与や表面形状変化について調べ、かつ、SP とも比較することにより、sub-ns LP の優位性とその産業利用の可能性について考察する。測定データとしては、残留応力分布、硬度分布、表面粗さ、変形量を掲載する。

## 2. 実験方法

### 2.1 LP 実験装置

使用した実験装置を Fig. 2 に示す。アクリル水槽内に水を溜め、供試材を水中に設置した。アクリル水槽の側面のレンズホルダに直接集光レンズを取り付けた。これにより、集光されたレーザ光の水面反射等の損失を抑えた。また、水中ポンプを用いて加工中に供試材表面に常時水流を発生させることにより、レーザ照射によって発生する微細な金属粒子を照射領域から除去し、金属粒子による後続のレーザ光の散乱を低減させた。供試材はステンレスバイスにより固定し駆動系と接続した。駆動系は XYZ 軸可動とし、照射時は平面走査させるため、自動ステージコントローラ

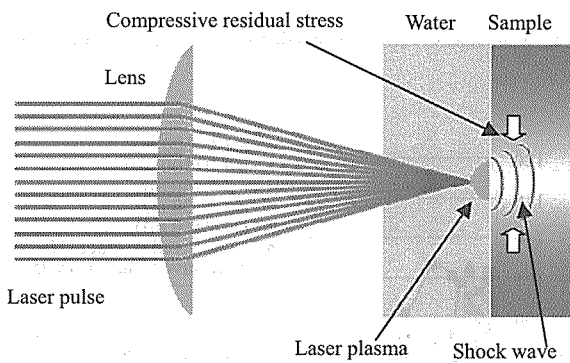


Fig. 1 Principles of laser peening

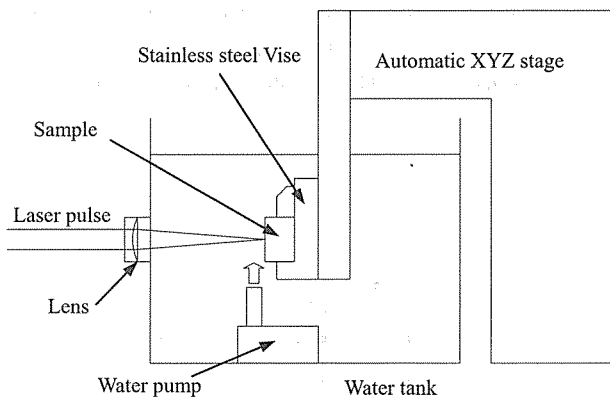


Fig. 2 Experimental set-up

を用いて加工平面内の 2 軸(XY 軸)を制御した。

### 2.2 実験条件

本実験ではパルス幅の異なる 2 種類のレーザを用いた。ns LP には、Q-switch Nd:YAG レーザの 2 倍波を光源として使用し、sub-ns LP には、チタンサファイヤ超短パルスレーザシステムにおけるパルス圧縮前の CPA パルスレーザを使用した。

レーザの集光径(D)はおおよそ  $\phi 1$  mm であり、 $5 \times 5$  mm<sup>2</sup> の範囲を走査し、照射した。送り速度は 600  $\mu$ m/sec とし、照射列間の移動量は D/2 に設定しビーム重ね率が 50 % となるようにした(Fig. 3)。これにより、カバレッジはおおよそ 2000% となった。なお、SP におけるカバレッジとは、処理面積に対する痕面積の割合だが、LP におけるカバレッジは単位面積あたりの重ね撃ち量であり、以下の式によって求められる。たとえば、2000% の場合、同じ箇所に見かけ上 20 ショット照射したことになる。

$$C_v = A \cdot NA \cdot 100 \quad (1)$$

$C_v$  : カバレッジ [%]

$A$  : レーザ集光面積 [mm<sup>2</sup>]

$NA$  : 単位面積あたりのレーザショット数 [shot/mm<sup>2</sup>]

これらのパラメータを固定し、投入パルスエネルギーを変化させて実験を行った(Table 1)。また、ショットピーニング(SP)と微粒子ショットピーニング(FSP)も LP と比較するために施行した(Table 2)。

### 2.3 供試材および試験片形状

供試材には、Al-Cu 系アルミニウム合金である A2017 に

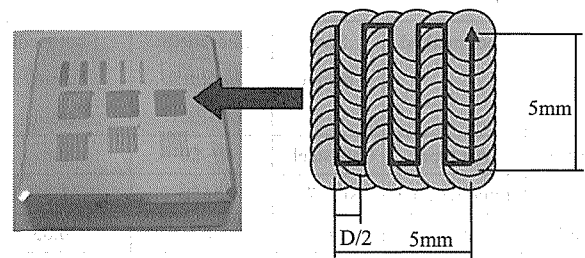


Fig. 3 Photograph of a typical irradiated sample and the scanning method of laser beam

Table 1 Laser parameters of ns LP (ns laser peening) and sub-ns LP (sub-ns laser peening)

		ns laser		sub-ns laser	
Pulse width (ns)		7.5		0.18	
Wavelength (nm)		532		800	
Pulse energy (mJ)	Irradiance (GW/cm <sup>2</sup> )	200	3.3	50	34
		100	1.6	30	20
		50	0.8	10	7
		30	0.5	5	3.5
		10	0.2	3	2
Repetition rate (Hz)		10		10	
Coverage (%)		≒ 2000		≒ 2000	

熱処理を施したものをを用いた。供試材の選択理由としては、軽量化、高強度化が進む部品業界でアルミニウム合金の需要は今後も高まると想定されるからである。また、熱処理を施すことにより、供試材の物性値(残留応力や硬度等)の個体差を抑えた。機械的性質を **Table 3** に示す。試験片は、35 mm × 35 mm × 12 mm の平板形状とした。

2.4 評価

残留応力測定に関しては、迅速型 X 線応力測定装置 (RIGAKU 製) により表面残留応力値 ( $\sigma_s$ ) を測定した。電解研磨により処理面を徐々に研削しながら測定を行い、深さ分布を得た。その結果から最大圧縮残留応力値 ( $\sigma_{max}$ ) を求めた。付与深度 ( $D_s$ ) については、未処理材の残留応力値が 200  $\mu\text{m}$  付近から横ばいとなっているため、以降の深さにおいても同様の数値を示しているものとし、LP 処理によって付与された圧縮残留応力値が、その数値の近傍値を示す深さまでを  $D_s$  と定義した。

硬度測定に関しては、処理後の供試材を切削砥石で切断し、微小硬さ試験機 (AKASHI 製, MVK-H1) を用いて、処理断面を測定し硬度の深さ分布を得た。(10  $\mu\text{m}$  以降) 測定値は 3 点平均とし、測定荷重は 0.1 N とした。

表面粗さ (Ra) に関しては、表面粗さ測定器 (MITUTOYO 製, S-3000) を用いて表面粗さ測定を行った。

また、LP については、5 mm 平方の照射条件と同条件下にて直線状の照射を行い、照射痕凹部の変形量 (Depth of

dent) を上記の表面粗さ測定器を用いて測定した。Fig. 4 については、直線照射における断面形状の 1 例であり、凹部の深さはおおよそ 10  $\mu\text{m}$  である。このように測定した凹部の深さを変形量 (Depth of dent) とし、数箇所測定を行い、最も凹部の深いものを採用した。

3. 実験結果

3.1 ナノ秒レーザーピーニング (ns LP)

ns LP における残留応力の深さ分布結果 (Fig. 5) においては、投入パルスエネルギーの増大とともに、表面残留応力が圧縮側になること、最大圧縮残留応力値が上昇すること、付与深度が深くなるのが観測された。しかし、100 mJ を超え、200 mJ のパルスエネルギーを投入した場合、圧縮残留応力値が低減した。

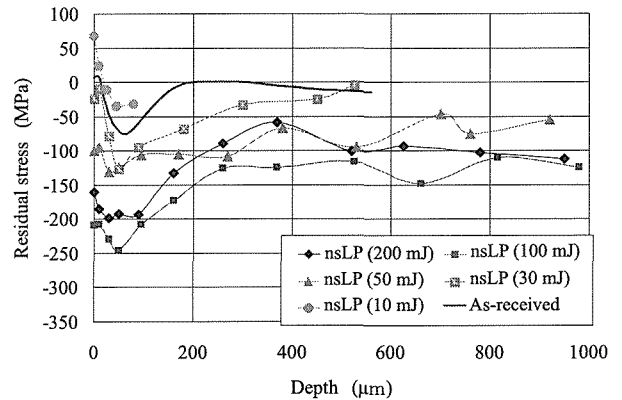


Fig. 5 Results of residual stress distribution by ns LP processing

Table 2 Peening conditions of SP (shot peening) and FSP (fine shot peening)

	Shot method	Shot media	Shot media hardness (HRC)	Shot media diameter (mm)
SP①	Air type	Cast steel	40~50	0.6
SP②	Impeller type	SB-17	40~50	1.7
FSP	Air type	B120	60	0.05

Table 3 Mechanical properties of the used samples

	Tensile strength (MPa)	0.2% proof stress (MPa)	Surface hardness (HV)	Elongation (%)
A2017-T4	424	256	80	26

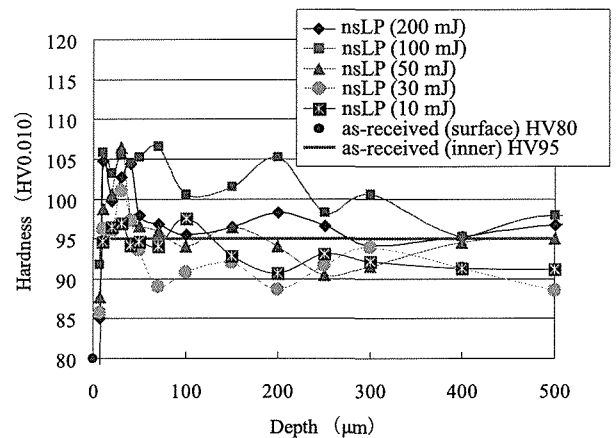


Fig. 6 Results of hardness distribution by ns LP processing

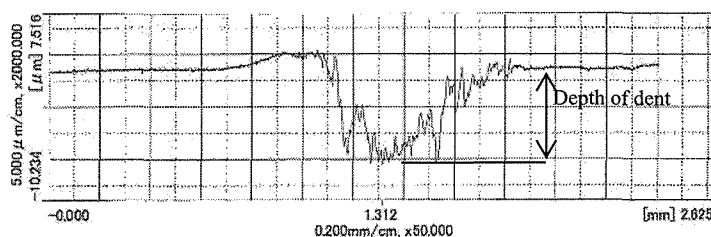


Fig. 4 Typical example of the surface profile measurement of a dent

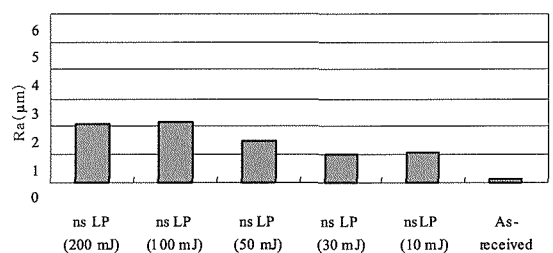


Fig. 7 Results of surface roughness by ns LP processing

硬度分布結果(Fig. 6)においては、投入パルスエネルギーと硬度変化に明らかな依存性はなく、深さ 300  $\mu\text{m}$  程度の内部硬度と比較して、表面近傍(20~50  $\mu\text{m}$ )の硬度は 10~15 Hv 程度しか上昇しなかった。また、極表層部(約 20  $\mu\text{m}$  以下)では 10 Hv 程度硬度が低下する現象が確認できた。これらの現象は他論文においても同様の実験結果が報告されている<sup>11),12)</sup>。

表面粗さの結果(Fig. 7)においては、投入パルスエネルギーの増大とともに表面粗さも増加し、最大で Ra 2  $\mu\text{m}$  程度であった。

### 3.2 サブナノ秒レーザピーニング(sub-ns LP)

sub-ns LP における残留応力の深さ分布結果(Fig. 8)においては、投入パルスエネルギー(30 mJ 以上の領域)の増大とともに、顕著な残留応力付与(表面圧縮残留応力値、最大圧縮残留応力値、付与深度)の増大が見られた。なお、本実験条件における sub-ns LP では、ns LP で観測された高いパルスエネルギー領域で圧縮残留応力値が低減する傾向(Fig. 5)は観測されなかった。

硬度分布結果(Fig. 9)においては、投入パルスエネルギーと硬度変化に明らかな依存性はなく、深さ 300  $\mu\text{m}$  程度の内部硬度と比較して、表面近傍(20~50  $\mu\text{m}$ )の硬度は 10~15 Hv 程度の上昇しか起こらなかった。投入パルスエネルギーによっては極表層部の硬度が低下する場合もあった。これらの現象は他論文においても同様の実験結果が報告され<sup>11),12)</sup>、本実験において ns LP と同様の結果であった。

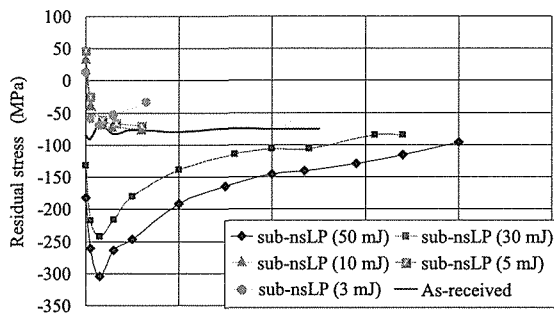


Fig. 8 Results of residual stress distribution by sub-ns LP processing

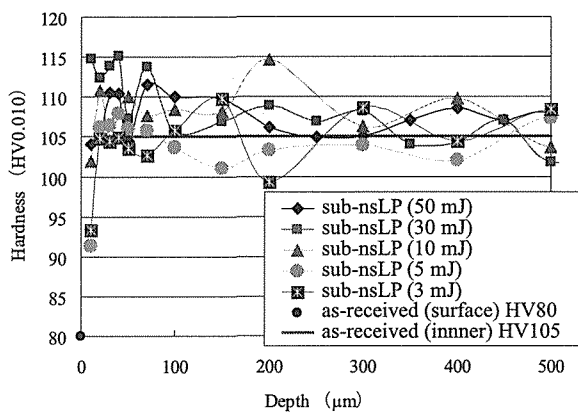


Fig. 9 Results of hardness distribution by sub-ns LP processing

表面粗さ結果(Fig. 10)においては、ns LP と比較しても、全体的に低く、最大でも Ra 1  $\mu\text{m}$  程度であった。

### 3.3 ショットピーニング(SP, FSP)

SP においては、一般的に使用される条件 SP①に加え、付与深度を重視した条件 SP②と、表層効果を重視した条件 FSP を行った。SP①では最大圧縮残留応力値として -250 MPa が得られたが、深度は 400  $\mu\text{m}$  程度であった(Fig. 11)。SP②では極表層部の圧縮残留応力値は低いものの、付与深度は 1 mm 以上であった。FSP では極表層部における圧縮残留応力値は -200 MPa 程度であり、付与深度は 180  $\mu\text{m}$  程度と小さかった。

表層の硬度においては SP①では HV140 程度まで付与できたが、SP②、FSP では HV120 程度であった(Fig. 12)。

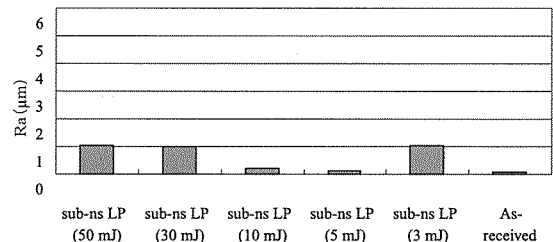


Fig. 10 Results of surface roughness by sub-ns LP processing

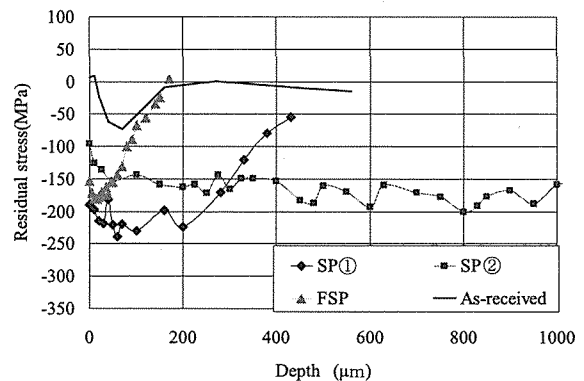


Fig. 11 Results of residual stress distribution by SP and FSP processing

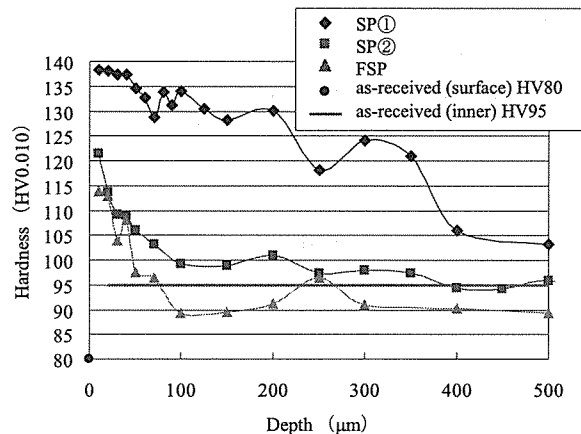


Fig. 12 Results of hardness distribution by SP and FSP processing

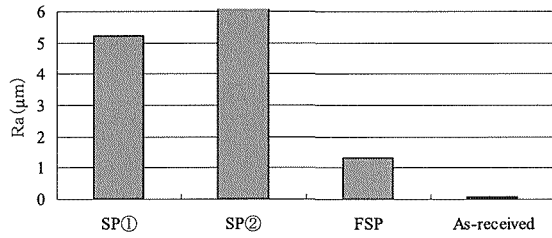


Fig. 13 Results of surface roughness by SP and FSP processing

Table 4 Results of depth of dent by ns LP processing

	ns LP (200 mJ)	ns LP (100 mJ)	ns LP (50mJ)	ns LP (30 mJ)	ns LP (10 mJ)
Depth of dent (μm)	40	18	8	6	3

Table 5 Results of depth of dent by sub-ns LP processing

	sub-ns LP (50 mJ)	sub-ns LP (30 mJ)	sub-ns LP (10 mJ)	sub-ns LP (5 mJ)	sub-ns LP (3 mJ)
Depth of dent (μm)	8	6	1	0.5	0.2

Table 6 Comparison of residual stress

Symbol	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$D_s$ (μm)
Ns LP (100 mJ)	-209.3 ±23.3	-246.1 ±17.6	800~1000
sub-ns LP (50 mJ)	-181.8 ±27.3	-303.9 ±14.9	800~1000
SP①	-190.2 ±14.3	-239.5 ±12.3	400~500
SP②	-95.7 ±5.8	-198.5 ±9.3	1000~
FSP	-153.0 ±3.6	-180.7 ±4.3	150~200

表面粗さにおいては, FSP が最も低く Ra 1 μm 程度であり, SP①および SP②では Ra 5 μm 以上であった (Fig. 13).

### 3.4 照射痕形状

ns LP と sub-ns LP における照射痕の深さ(変形量)の測定結果を Table 4 および Table 5 にそれぞれ示す. この変形はレーザーアブレーションによる表層除去と塑性変形によって引き起こされたと考えられる. 効果的な残留応力付与(表面圧縮残留応力値, 最大圧縮残留応力値, 付与深度)が得られた領域では ns LP (約 100 mJ 以上) では 15~40 μm 程度の変形量であったが, sub-ns LP (約 30 mJ 以上) においては 10 μm 以下と低い数値であった.

また, 同一の投入パルスエネルギーで比較すると, 50 mJ, 30 mJ, 10 mJ における変形量は, ns LP においては 8 μm, 6 μm, 3 μm であり, sub-ns LP においては 8 μm, 6 μm, 1 μm とほぼ同等の変形量であった.

## 4. 考察

### 4.1 圧縮残留応力付与における短パルス化の有効性

疲労強度や耐応力腐食割れ特性の改善において, 表面残留応力値 ( $\sigma_s$ ) と最大残留応力値 ( $\sigma_{max}$ ) の圧縮側への移行と増大, および付与深度 ( $D_s$ ) の増大が重要である<sup>13)</sup>. 本実験における各パルス幅での LP と SP による残留応力深さ分布 (Fig. 5, Fig. 8, Fig. 11) から  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $D_s$  を求め, Table 6 にまとめた.  $\sigma_s$  では ns LP が,  $\sigma_{max}$  では sub-ns LP が最も高かった.  $D_s$  については SP①と比較して ns LP および sub-ns LP では 2 倍程度大きかった. 従って, 残留応力分布に関しては SP①よりも LP の方が総合的に見て高い効果が得られており, 従来通りの結果が得られた<sup>6), 14)</sup>. なお, SP②では深い付与深度が得られたが,  $\sigma_s$  および  $\sigma_{max}$  がほかのケースと比べて低いことから, 上記の比較対象から除外した (Fig. 11).

LP 作用はプラズマ圧力による機械的効果と熱影響に影響される. Peyre らのモデルによると, LP におけるプラズマ圧力 ( $P$ ) の最適領域は  $2 \times HEL < P < 2.5 \times HEL$  であり,  $2.5 \times HEL$  を超えると表面圧縮残留応力値や最大圧縮残留応力値などの数値が低減するとされている<sup>4)</sup>. この HEL (Hugoniot elastic limit) は材料のユゴニオ降伏限界を示し, 降伏応力で決まる材料固有の値であり, Peyre らはプラズマ圧力モデル式と実験値を照合し, ns LP (波長 532 μm, パルス幅 25 ns) におけるプラズマ圧力 ( $P$ ) の近似式を示した<sup>4)</sup>. それによると, ns LP における  $P$  (GPa) は式(2)から求まる.

$$P = 1.02 \sqrt{I_0} \quad (2)$$

$I_0$ : パワー密度 [GW/cm<sup>2</sup>]

本実験での供試材の HEL はおよそ 0.5 GPa であるため<sup>15)</sup>, Peyre らのモデルから最適領域は 1 GPa から 1.25 GPa となる. 式(2)に当てはめると, ns LP においては 100 mJ の投入パルスエネルギーでプラズマ圧力が 1.3 GPa であり, ほぼ最適領域近傍の数値を示したが, 200 mJ (1.8 GPa) は最適領域から大きく外れ, 200 mJ での  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{max}$  の低減は ns LP における Peyre らのモデルとほぼ一致することがわかった.

一方, sub-ns LP においては 50 mJ の投入パルスエネルギーでプラズマ圧力が 6 GPa となり最適領域外である. しかしながら, この場合においても, ns LP と同等以上の効果が得られており,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{max}$  の低下も確認されなかった. これは, sub-ns LP において, Peyre らの従来のモデルでは実験結果(最適領域外における  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{max}$  の増大)を説明できないことを意味している. 新たなモデル化を進めるためには, プラズマ発生や塑性変形等におけるナノ秒領域とサブナノ秒領域との違いについて調べる必要がある.

また, 熱影響による引張残留応力の発生機構の違いも要因の一つと考えられる<sup>16)</sup>. sub-ns LP では低い投入パルスエネルギーで同等の残留応力付与(表面圧縮残留応力値, 最大圧縮残留応力値, 付与深度)が得られるため, 熱影響を抑えつつ圧縮残留応力付与が可能であると推測できる.

本実験において ns LP については水中でのブレイクダウンは起こっていない。sub-ns LP についても処理面の状態から、実験の範囲内ではブレイクダウンは観測されなかった。

このように、レーザの短パルス化(ナノ秒からサブナノ秒へ)は圧縮残留応力付与について有効であり、今後その機構解明が望まれる。

#### 4.2 表面性状における短パルス化の効果

SP において表面粗さは痕径とショット材の硬度などに影響を受ける<sup>17)</sup>。十分な残留応力付与(表面圧縮残留応力値、最大圧縮残留応力値、付与深度)が得られている結果について比較すると、SP①の条件下では Ra 6 μm 程度であったのに対し、LP においては ns LP (100 mJ) で Ra 2 μm 程度、sub-ns LP (50 mJ) で Ra 1 μm 程度であり (Fig. 14)、LP は SP と比較して、表面粗さを抑えて高い表面圧縮残留応力値と最大圧縮残留応力値、付与深度を得られることがわかった。また、sub-ns LP の場合、ns LP と比べて照射痕深さ(変形量)が小さくなることがわかった (Table 4, Table 5)。

ここで、LP では SP と比較して表面粗さが小さくなる理由について考察する。照射対象が金属材料の場合、レーザは金属の極表層部(1 μm 以下)にのみ侵入するため、レーザアブレーションによる除去量も小さく、表面粗さを抑えることができる。

次に、変形量について考察する。Table 4 および Table 5 より、変形量が投入パルスエネルギーに依存していることがわかる。sub-ns LP は ns LP に比べて、小さい投入パルスエネルギーで LP 処理できるため、変形量を必然と小さく抑えることができる。表面粗さや変形量の低減は疲労強度向上の点で非常に有利であることに加え、処理後の研磨などの後工程の短縮に繋がる。

#### 4.3 産業応用のために

LP は国内では原子炉シュラウドに、海外では航空機関連にしか実用化されていない<sup>8), 9)</sup>。この理由としては、レーザ光源のインシヤルコストが高く、SP(広範囲にランダム加工)と違い、ビームスポットを重畳照射する必要がある<sup>14)</sup>、加工速度という点で著しく生産性が低いことが考えられる。そのため前述のようなコストパフォーマンスよりも部品の安全性が重視されることが多い市場でしか実用化できていない。しかし、量産性の高い自動車業界などの市場においても、高い安全性を求められる部品は多くある。

本実験により、SP に比べて LP では高い残留応力付与(表面残留応力値、最大圧縮残留応力値、付与深度)を得られることがわかった。さらに、従来用いられているナノ秒レー

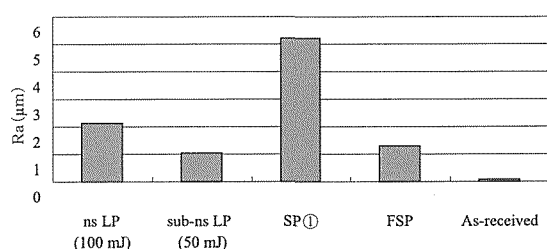


Fig. 14 Comparison of surface roughness among the different processes

ザよりも短いパルス幅のサブナノ秒レーザを用いることで、変形量、表面粗さを抑えて高い圧縮残留応力値が得られ、部品寿命を改善できる可能性を見出すことができた。これにより、定期的な補修が必要な部品に関しては補修サイクルを伸ばすことによるメンテナンスコスト・ランニングコストの削減が見込める。また、表面粗さや変形量を抑制でき、照射箇所を制御し易いことから、マイクロマシン産業に利用される微小形状部品や薄肉材料などの SP では大きな変形や欠けを起こしてしまう処理が困難な部品に対しても処理できる可能性がある。

しかしながら、生産性という点では SP を代表とする既存技術と比較すると未だ及ばない。量産性の高い部品への LP の適用を目指すには、スポット径を大きくすること、レーザビームの走査速度を上げてカバレッジを低くすることなどのパラメータ設定の見直しと、処理前後工程の短縮などのシステムの効率化が必要である。材料に直接照射する場合の LP では熱影響による最表面の引張残留応力層の除去のため、カバレッジを大きく設定することが必要とされている<sup>15)</sup>。サブナノ秒レーザを用いると、小さいパルスエネルギーで LP 処理できるため熱影響が少なく、カバレッジを低く設定できる可能性があり、それによる処理時間の短縮が見込める。

### 5. 結 言

本論文では、レーザの短パルス化(7.5 ns から 0.18 ns へ)によるピーニング作用(残留応力付与、硬度、表面粗さ、形状変化)への影響と sub-ns LP の優位性を調査するとともに、既存技術である SP と比較することで、産業応用への可能性について考察し、以下の結論を得た。

- (1) LP は、SP と比べ効果的な圧縮残留応力付与ができ、さらにレーザの短パルス化によって小さいパルスエネルギーで同等の残留応力付与(表面圧縮残留応力値、最大圧縮残留応力値、付与深度)を得ることができる。
- (2) パルス幅 0.18 ns のサブナノ秒レーザを用いた LP は、SP や従来の ns LP (パルス幅 7.5 ns) と比べ処理面の変形量や表面粗さを抑えて効果的な残留応力付与(表面圧縮残留応力値、最大圧縮残留応力値、付与深度)を得ることができる。また、処理箇所の制御もしやすい。これは、SP では大きな変形や欠けが問題とされる微小形状部品や複雑形状部品への処理に繋がり、マイクロマシン産業における部品の表面処理技術としての利用が期待できる。
- (3) LP は、生産性という点では SP に及ばないものの、そのピーニング効果は非常に高く、短パルス化により高い圧縮残留応力付与と表面形状変化の抑制が得られているため、疲労強度に対する優位性が上がることが推測され、部品の長寿命化によるメンテナンスコスト削減が見込める。

以上のように、パルス幅 0.18 ns のサブナノ秒レーザを用いることにより、表面形状変化を抑えてナノ秒レーザと同等以上の圧縮残留応力を付与できることが明らかとなった。

今後は, 引き続き短パルス化の検証(機構説明, 疲労試験実施など)に取り組んでいく必要がある.

参考文献

- 1) Murakami, K. and Kan, H.: Development of a high power diode laser welding system and usability for tailored blank processing, *IEEE J.*, **125-2**, (2005), 260-265. (in Japanese)
- 2) Kutsuna, M.: Recent trends of laser system (2), *Sci. Mach.*, **57-10**, (2005), 1050-1058. (in Japanese)
- 3) Kato, T., Abe, N., Yamanaka, M. and Matsumoto, K.: Development of femtosecond pulsed laser machining system for low friction metal parts, *Rev. Laser Eng.*, **36-3**, (2008), 144-148. (in Japanese)
- 4) Peyre, P., Fabbro, R., Merrien, P. and Lieurade, H.P.: Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour, *Mat. Sci. Eng. A*, **210**, (1996), 102-113.
- 5) ショットピーニング技術協会編: 金属疲労とショットピーニング, 現代工学社, (2004), 1-12.
- 6) Sano, Y., Mukai, N., Okazaki, K. and Obata, M.: Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation, *Nucl. Instrum. & Methods. Phys. Res. B*, **121**, (1997), 432-436.
- 7) レーザー学会編: レーザープロセッシング応用便覧, NGT コーポレーション, (2006), 228-234.
- 8) See, D.W., Dulaney, J.L., Clauer, A.H. and Tenaglia, R.D.: The Air Force Manufacturing Technology Laser Peening Initiative, *Surf. Eng.*, **18**, (2002), 32-36.
- 9) Sato, K., Kobayashi, M., Sano, Y. and Kimura, S.: Laser Technologies in the Nuclear Field. Maintenance Technologies for reactor Internals, *Toshiba Rev.*, **55-10**, (2000), 37-41. (in Japanese)
- 10) Tsuyama, M., Shibayama, T., Tsukamoto, M., Abe, N. and Nakano, H.: Surface Treatment of Carbon Steel by Femtosecond Laser Peening, *Rev. Laser Eng.*, **37-11**, (2009), 825-829.
- 11) Banas, G., Elsayed-Ali, H.E., Lawrence, Jr. F.V. and Rigsbee, J.M.: Laser shock-induced mechanical and microstructural modification of welded maraging steel, *J. Appl. Phys.*, **67-5**, (1990), 2380-2384.
- 12) Fabbro, R., Peyre, P., Berthe, L. and Scherpereel, X.: Physics and applications of laser-shock processing, *J. Laser Appl.*, **10-6**, (1998), 265-279.
- 13) Okada, H., Tange, A. and Ando, K.: Relationship among specimen's hardness, residual stress distribution and yield stress on the difference of shot peening methods, *JHPI*, **41-5**, (2003), 233-242. (in Japanese)
- 14) Mukai, N., Aoki, N., Obata, M., Ito, A., Sano, Y. and Konagai, C.: Laser processing for underwater maintenance in nuclear plants, *ICONE-3, Kyoto, Japan*, **3**, (1995), 1489-1495.
- 15) Ding, K., Ye, L.: Laser shock peening Performance and process simulation, Woodhead Publishing Ltd., (2004), 17.
- 16) Tanaka, H., Akita, K., Sano, Y., Mukai, N. and Ohya, S.: Experimental Study on Compressive Residual Stress Evolution by Pulse Laser Irradiation, *J. Soc. Mater. Sci.*, **55-7**, (2006), 641-646. (in Japanese)
- 17) ショットピーニング技術協会編: 金属疲労とショットピーニング, 現代工学社, (2004), 39-41.