# ナノ秒パルス固体レーザ照射による 炭素鋼 S45C の静摩擦係数の低減

部 谷 学\*,武 田 信 秀\*\*,内 山 文 宏\*\*,沖 原 伸一朗\*\* 坪 井 昭 彦\*\*

> \*大阪産業大学工学部(〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1) \*\*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) heya@eic.osaka-sandai.ac.jp

Reduction of Static Friction Coefficient of Carbon Steel (S45C) by Irradiation of Nanosecond Pulsed-laser

HEYA Manabu\*, TAKEDA Nobuhide\*\*, UCHIYAMA Fumihiro\*\*, OKIHARA Shin-ichiro\*\* and TSUBOI Akihiko\*\*

(Received January 25, 2016)

In order to experimentally investigate the reduction of static friction coefficient of carbon steel (S45C), we have irradiated carbon steel samples using a nanosecond pulsed solid state laser. We varied the laser conditions (power density and beam scanning speed) and the initial surface roughness of the samples used (0.5-6  $\mu$ m in  $R_a$ ). The reduction of  $R_a$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $\mu_s$ ,  $\mu_k$  were mainly confirmed within the ranges of a spot diameter of below 88  $\mu$ m and a beam scanning speed of below 2.0 m/s, leading to smooth surface after laser irradiation. From spatial frequency analysis, we speculated that spatial frequency compositions for 60-200 mm<sup>-1</sup> decreased due to surface melting, resulting in the reduction of static friction coefficient after laser irradiation. Laser processing involved these findings is expected to be applied into the polishing process of the sliding surface of machine tools and the substitute of hand finishing process of molds by skilled workers.

Key words : ns pulsed-laser, 532 nm, S45C, static friction coefficient

## 1. 緒 言

金属部品の摺動特性の改善を目的として、レーザ表面処 理技術の研究開発および実用化が進められている<sup>1)</sup>.金属 材料の表面粗さの制御に使用されているレーザとして、 CW 発振レーザ(炭酸ガスレーザ<sup>2,7)</sup>,半導体レーザ<sup>2-5,7)</sup>, ファイバレーザ<sup>6)</sup>等),パルス発振レーザ(ミリ秒パルス YAG レーザ<sup>2,11)</sup>,エキシマレーザ<sup>2,8-10,21,22)</sup>,サブマイクロ 秒あるいはマイクロ秒パルスレーザ<sup>12-16,19)</sup>,ナノ秒パルス 固体レーザ<sup>17-19)</sup>,ピコ秒あるいはサブピコ秒パルスレー ザ<sup>20-22)</sup>,フェトム秒レーザ<sup>23-27)</sup>等)が用いられている.

レーザ照射中に,金属の結晶構造変化,溶融・再凝固, 気化,プラズマ化等の物理現象が起こる.本研究では,鉄 鋼材料を対象とし,金属の相変化(金属の溶融・再凝固, 気化,プラズマ化)を利用した表面粗さの制御に着目する. この時,母材金属への熱影響を抑えた表面粗さの制御が重 要となる.母材金属への熱的影響を抑えて表層のみをレー ザ表面処理する場合,光侵入長および熱拡散長を短くする 必要があるため,短波長あるいは短パルスのレーザの使用 が求められる.

短波長・短パルスのエキシマレーザ(パルス幅は数十 ns

が一般的)は金属部品の表面処理のレーザ光源として古く から使用されてきた<sup>1)</sup>. ナノ秒パルスの紫外光の光侵入長 は数十 nm 以下,熱拡散長は数 µm オーダである.光侵入 長 L<sub>pen</sub> および熱拡散長 L<sub>diff</sub> は, 消衰係数 k<sup>28)</sup>を与えれば,  $L_{nen}=(4\pi k/\lambda)^{-1}, L_{diff}=(K\tau)^{1/2}$ を使って評価できる(ここで,  $\lambda$ はレーザ波長, Κは金属材料の熱拡散係数, τはレーザの パルス幅である). たとえば,純鉄( $K=\sim 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^{28}$ ) に対し、波長 248 nm、パルス幅 30 ns のエキシマレーザの 消衰係数,光侵入長,熱拡散長はそれぞれ約1.9,約10 nm,約0.8 µm である.一方,ナノ秒パルスの固体レーザ(波 長 532 nm, パルス幅 10 ns) に対する純鉄の消衰係数, 光 侵入長,熱拡散長はそれぞれ約3.3,約13 nm,約0.5 um である.このように、レーザ照射によって熱的影響を受け る深さ方向の領域は、ナノ秒パルスの場合、レーザ波長で はなくパルス幅でほぼ決定される.これは、ナノ秒パルス の固体レーザでもエキシマレーザとほぼ同等の表面粗さ制 御が期待できることを示唆している. ナノ秒パルスの固体 レーザ(ファイバレーザも含む)は、安価で高い出力安定性 を有しており、金属部品やセラミックス部品のレーザマー キング装置の光源として製造現場において幅広く使用され ている.

しかしながら、ナノ秒パルスの固体レーザを用いた金属 の表面粗さ制御に関する先行研究は少ない<sup>19)</sup>.先行研究で は、鉄鋼材料に対し、パルス幅を15 ns から200 ns に変化 させて、2ステップ照射による表面処理に取り組んでい る<sup>19)</sup>.ステップ1では短いパルス幅(15-65 ns 程度)のレー ザでマイクロディンプルを形成し、ステップ2で長いパル ス幅(200 ns 程度)のレーザで凸凹状の表面の円滑化を行っ ている. また, パルス幅数百 ns 以上のレーザ照射による 表面円滑化の研究はすでに報告されている<sup>12-16,19)</sup>.本研究 では、パルス幅が 10 ns と短いナノ秒パルスの固体レーザ を用いた炭素鋼 S45C の静摩擦係数の低減に関する研究に 取り組む. S45C は工作機械等機械装置の滑り摺動部に用 いられている.工作機械の摺動部には,テーブルおよびワー ク等の重量物を載せ、これらを高精度に且つ高速に移動さ せることが求められる. 移動開始時の摩擦力(静摩擦係数) が大きすぎると、駆動力も大きくなりテーブルを高精度・ 高速に移動させることが困難となる.移動開始時の摩擦力 (静摩擦係数)を適切に制御できれば、切削加工の精度の向 上に繋がることが期待できる.なお、フェムト秒レーザを 用いたナノ周期構造形成による摩擦係数低減に関する先行 研究では,動摩擦係数の低減を主目的としている27).また, フェムト秒レーザを用いた場合、金属材料ではなく脆性材 料<sup>29)</sup>に対する摩擦係数低減に関する研究が行われている.

本研究では、ナノ秒パルスの固体レーザを用いて、表面 粗さを変化させた金属試料(炭素鋼 S45C,  $R_a$ で 0.5-6  $\mu$ m 程度)をレーザ照射する.レーザ条件(パワー密度、ビーム 走査速度)が、表面粗さの指標(算術平均粗さ $R_a$ 、初期摩 耗高さ $R_{pk}$ ,油溜り深さ $R_{vk}$ )および摩擦係数(静摩擦係数  $\mu_s$ ,動摩擦係数 $\mu_k$ )に及ぼす影響について調べる.そして、 静摩擦係数が低減できた条件下において、静摩擦係数の低 減の要因について考察する.また、実験結果を基に、ナノ 秒パルス固体レーザを用いたレーザ表面処理技術の産業応 用について考察する.

# 2. 実験方法

### 2.1 レーザ発振器および照射条件

使用したナノ秒パルスの固体レーザ(メガオプト社製, 型番 #300-0508)は Nd:YVO4 レーザであり,用いたレーザ 波長は 532 nm,最大平均出力は 6 W,パルス幅は 10 ns,ビー ム品質は M<sup>2</sup> 値で 1.2,繰り返し周波数は 10-100 kHz の範 囲内で可変である.本実験では、レーザ波長を 532 nm, パルス幅 10 ns,繰り返し周波数 40 kHz,平均出力 6 W に 固定する.パルスエネルギー,ピーク出力は、それぞれ 150 µJ, 15 kW となる.

パワー密度を大きく変えて実験を行うために、スポット 径(1/e<sup>2</sup> 値)を44,66,88,110,132 µm に設定する. それぞれ のスポット径に対するパワー密度(エネルギー密度)は、次 の通りである.987(9.87),439(4.39),247(2.47),158(1.58), 110(1.10) MW/cm<sup>2</sup> (J/cm<sup>2</sup>).面状にレーザ照射を行うため、 ガルバノスキャナを用いてレーザビームを2次元的(横方 向,縦方向)に走査する.横方向の走査後、縦方向にビー ムを少しずらし,再び横方向の走査を行う.これを繰り返 すことでおおよそ5 mm×5 mm の範囲を2次元的に照射す る.この時,横方向のビーム走査速度を1.0,1.5,2.0,2.5 m/ sに変化させ,縦方向のずらし距離は1 µm に固定する. なお、5 mm×5 mm の2次元走査においては,試料の向き を変えて横・縦方向に1回ずつレーザ照射を行う.

今回の実験では縦ずらし距離は1µmであり、これはス ポット径の約1/40-1/100である.つまり、本実験では極め て大きい照射パルス数に設定しており、適切な照射パルス 数の導出は今後の課題の一つであることを付記しておく.

## 2.2 金属試料

金属試料として、既述の工作機械等機械装置の滑り摺動 部に用いられている、炭素鋼 S45C を使用する. 試験片の サイズは 20 mm×20 mm であり、厚さは 9 mm である. 照 射前の表面粗さが照射後の表面粗さおよび摩擦係数に及ぼ す影響を調べるために、平面研削盤の砥石のドレス方法を 調整して,照射前の表面粗さを *R*a で 0.5-6 µm 程度に変化 させた金属試料を用いる.

### 2.3 表面粗さ測定および摩擦係数測定

表面粗さ測定には、表面粗さ測定器(ミットヨ社製,SJ-210)を用いる.表面粗さの指標として、算術平均粗さ $R_{a}$ 、初期摩耗高さ $R_{pk}$ ,油溜り深さ $R_{vk}$ を照射前後に測定する. 粗さ測定は、一つの実験条件ごとに異なる場所を7回測定し、その平均値と標準偏差を求める.摩擦係数の測定は、表面性測定機(新東科学社製、HEIDEN14DR)を用い、照射前後の静摩擦係数( $\mu_s$ )、動摩擦係数( $\mu_k$ )を測定する.この時、垂直荷重として200gの分銅を用いる.なお、摩擦係数測定では、一つの実験条件ごとに3回測定を行い、その平均値と標準偏差を求める.

今回用いた金属試料は平面研削盤を用いて表面研磨する ため,ある一方向に研磨傷がある.研磨傷と平行方向を"平 行",それと垂直方向を"垂直"と呼び,2方向について表 面粗さ測定,摩擦係数測定をそれぞれ行う.

## 3. 実験結果

### 3.1 照射後の表面形状および表面粗さの変化

**Fig. 1** に光学顕微鏡で撮影した,照射前後の金属表面の 写真を示す.**Fig. 1**(a) および(b) は,スポット径 44  $\mu$ m, 88  $\mu$ m の実験結果である.最上段の写真はレーザ照射前の 非照射試料の写真である.横(平行)方向に研磨傷があり, 平 行 方 向 の  $R_a(R_{a\#})$  は 0.518  $\mu$ m(44  $\mu$ m) と 0.457  $\mu$ m(88  $\mu$ m),縦(垂直)方向の  $R_a(R_{a\perp})$ は 0.978  $\mu$ m(44  $\mu$ m), 1.108  $\mu$ m(88  $\mu$ m)であった.垂直方向の  $R_a$ の方が平行方向のそ れと比べて大きく,これは他の全サンプルについても同様 の傾向であった.**Fig. 1**(a) および(b) を見ると,レーザ照 射によって微小な研磨傷が消え,表面が滑らかになったと 推測される表面に変化した.また,研磨傷の消失は,走査 速度が遅くなるにつれて顕著になる傾向が観測された.最 も遅い走査速度 1.0 m/s の写真を見ると,**Fig. 1** 中に白い 矢印で示したように,100  $\mu$ m 程度の広い間隔の縞模様が 残る一方,走査速度 2.5 m/s では縞模様の間隔は走査速度

# (a) Spot diameter = 44 μm (b) Spot diameter = 88 μm R<sub>a#</sub>=0.518 μm R<sub>a#</sub>=0.457 µm R<sub>a⊥</sub>=0.978 μm R<sub>a⊥</sub>=1.108 μm Unirradiated Unirradiate Parallel Paralle 100 µm 100 μm .0 m/s 1.0 m/s 5 m/s < 1.5 m/s 100 u 2.0 m/ 100 μ 00 14

Fig. 1 Snapshots of metallic samples before and after laser irradiation for (a) 44  $\mu$ m and (b) 88  $\mu$ m spot diameters. The scanning speed was varied within the range of 1.0-2.5 m/s.

1.0 m/s のそれと比べて狭かった.

Fig. 2 に走査速度およびスポット径を変えた時の算術平 均粗さ $R_a$ の変化を示す. Fig. 2(a)および(b)は、それぞれ 研磨傷と平行方向, 垂直方向に測定した R<sub>a</sub>である. 走査 速度0m/sの実験結果は照射前の金属試料のR<sub>a</sub>(R<sub>a0</sub>)を示 している. 既述した通り, 研磨傷と平行方向の Rao の方が 垂直方向のそれと比べると小さいことがわかる(Fig. 2(a) および(b)参照). 最も大きいスポット径 132 µm において は、レーザ照射後に光学顕微鏡観察による変化が確認され なかったため, 照射後の $R_a$ を照射前の $R_{a0}$ とした. Fig. 2 より, 平行方向, 垂直方向において, スポット径 110 µm, 132 µm を除いた 44-88 µm の実験結果では、照射後の Ra が照射前のRauを下回る走査速度の領域があることがわ かった. また, 高走査速度(たとえば, 2.5 m/s)では, 平行・ 垂直方向いずれの場合においても R<sub>a</sub>が増加する傾向が観 測された.これは、Fig.1で観測された、高走査速度領域 において比較的狭い間隔の縞模様が現れたことと矛盾しな い.



Fig. 2 Changes of  $R_a$  in the (a) parallel and (b) vertical directions as functions of scanning speed and spot diameter.



Fig. 3 Relation between  $R_{Ra}$  and  $R_{a0}$  before laser irradiation as a function of spot diameter.

# 3.2 照射前の R<sub>a0</sub> に対する R<sub>a</sub>, R<sub>pk</sub>, R<sub>vk</sub> の変化

照射前の $R_{a0}$ が照射後の $R_a$ の低減に及ぼす影響につい て調べるために, Fig. 3 に照射前の $R_{a0}$ に対する照射前後 の $R_a$ の比 $R_{Ra}$ の変化を示す.  $R_{Ra}$ とは照射前の $R_{a0}$ に対す る照射後の $R_a$ の比であり,  $R_{Ra}$ =1 は照射前後で $R_a$ に変化 がないことを意味する. ここで,  $R_{Ra}$ の数値が 1.5 を超え ているのは走査速度が 2.0 m/s 以上の実験データである. 162 技術論文 部谷, 武田, 内山, 沖原, 坪井: ナノ秒パルス固体レーザ照射による炭素鋼 S45C の静摩擦係数の低減

なお, *R<sub>Ra</sub>*の全データに対する標準偏差は 0.13 程度であった.

照射前の $R_{a0}$ が小さい程,  $R_{Ra}$ も小さくなり, レーザ照 射によって表面が滑らかになる傾向が観測された. 平行方 向, 垂直方向ともに,  $R_a$ の顕著な低減が得られたのは, 平行方向の 110  $\mu$ m のデータ(**Fig. 3** の左下の $\triangle$ データ)を 除き, スポット径が 88  $\mu$ m 以下でのレーザ照射結果であっ た.

**Fig. 4** に照射前の  $R_{a0}$  に対する照射前後の初期摩耗高さ  $R_{pk}$ の比  $R_{Rpk}$ の変化を示す.  $R_{Rpk}$  とは照射前の  $R_{pk0}$  に対す る照射後の  $R_{pk}$ の比であり,  $R_{Rpk}$ =1 は照射前後で  $R_{pk}$ に変 化がないことを意味する. なお,  $R_{Rpk}$ の全データに対する 標準偏差は 0.33 程度であった. 照射前の  $R_{a0}$  が小さいおよ び大きい領域では, レーザ照射による  $R_{pk}$ の顕著な低減が 確認できたものの, 照射前の  $R_{a0}$ が数  $\mu$ m 程度の領域では レーザ照射の効果は小さかった. また,  $R_{a}$ と同様に,  $R_{pk}$ の低減が確認できたのは主にスポット径が 88  $\mu$ m 以下の 照射結果であった.



 $R_{\rm a}$  before irradiation [ $\mu$ m]

**Fig. 4** Relation between  $R_{Rpk}$  and  $R_{a0}$  before laser irradiation as a function of spot diameter.



**Fig. 5** Relation between  $R_{Rvk}$  and  $R_{a0}$  before laser irradiation as a function of spot diameter.

**Fig. 5** に照射前の  $R_{a0}$  に対する照射前後の油溜り深さ  $R_{vk}$ の比  $R_{Rvk}$ の変化を示す.  $R_{Rvk}$ とは照射前の  $R_{vk0}$ に対する照射後の  $R_{vk}$ の比であり,  $R_{Rvk}=1$  は照射前後で  $R_{vk}$ に変化がないことを意味する. なお,  $R_{Rvk}$ の全データに対する標準偏差は 0.31 程度であった. 照射前の  $R_{a0}$ が約 1  $\mu$ m 以下の領域では、レーザ照射による  $R_{vk}$ の顕著な低減が確認できたものの、1  $\mu$ m 以上の領域ではレーザ照射の効果は小さかった. また,  $R_a$ や  $R_{pk}$ と同様に,  $R_{vk}$ の低減が確認できたのは、主にスポット径が 88  $\mu$ m 以下の照射結果であった.

### 3.3 照射前の R<sub>a0</sub> に対する µ<sub>s</sub>, µ<sub>k</sub> の変化

**Fig. 6** に照射前の  $R_{a0}$  に対する照射前後の(a) 静摩擦係数  $\mu_s$  および(b) 動摩擦係数  $\mu_k$ の変化を示す.  $R_{\mu s}$ ,  $R_{\mu k}$  とは照 射前の  $\mu_{s0}$ ,  $\mu_{k0}$  に対する照射後の  $\mu_s$ ,  $\mu_k$ の比であり,  $R_{\mu s}$ =1,  $R_{\mu k}$ =1 は照射前後で  $\mu_s$ ,  $\mu_k$  に変化がないことを意 味する. なお,  $R_{\mu s}$ ,  $R_{\mu k}$ の全データに対する標準偏差は 0.1 程度であった. **Fig. 6**(a) から, 静摩擦係数において, 照射 前の  $R_{a0}$  が約 0.4  $\mu$ m 以下を除いて  $\mu_s$ の低減が確認できた. また, この低減が確認できたのは, 主にスポット径 88  $\mu$ m 以下の照射結果であった. 動摩擦係数についても静摩擦係 数と同様の傾向の実験結果が得られた(**Fig. 6**(b)参照).



**Fig. 6** Relation between ((a)  $R_{\mu s}$ , (b)  $R_{\mu k}$ ) and  $R_{a0}$  before laser irradiation as a function of spot diameter.

#### 4.1 静摩擦係数と表面粗さの相関

静摩擦係数の低減と表面粗さの相関を調べるために、 **Fig. 7** に, (a) 照射前の *R*<sub>a0</sub> および(b) 照射後の *R*<sub>a</sub> に対する 静摩擦係数 u,動摩擦係数 u,の相関をそれぞれ示す。 Fig. 7(a) および(b) から、1 µm 近傍より大きい領域では  $R_{a0}$  および  $R_a$  が増大するにつれて  $\mu_s$  および  $\mu_k$  が大きくな る傾向がある一方, 1 μm 近傍より小さい領域では μs およ び μk が一定になる傾向が見て取れる. Fig. 7 で示したよう な,表面粗さ1µm 近傍において,表面粗さが変化しても 摩擦係数はほぼ一定となる領域があることは良く知られて いる<sup>30)</sup>. ここでは、算術平均粗さが1 µm 近傍よりも大き い領域を A 領域,小さい領域を B 領域として,それぞれ について考察する. Fig. 7(a)より, 照射前のA, B領域に おける µs と Raoの線形相関係数はそれぞれ 0.814, 0.356 で あった. また, Fig. 7(b)より, 照射後の A', B' 領域におけ る μ<sub>s</sub> と R<sub>a</sub>の相関係数は 0.779, -0.297 であり, 領域 B, B' では相関係数が低下した.

**Fig. 8** に, 照射前後の表面粗さの指標(*R*<sub>a</sub>, *R*<sub>pk</sub>, *R*<sub>vk</sub>)と摩 擦係数(*µ*<sub>s</sub>, *µ*<sub>k</sub>)の間の線形相関係数の関係を示す. **Fig. 8**(a)



Fig. 7 Relation between friction coefficients  $(\mu_s, \mu_k)$  and  $R_a$  for (a) before and (b) after irradiation. Symbols A and B indicate the  $R_a$  regions above  $\sim 1 \ \mu m$  and below  $\sim 1 \ \mu m$ , respectively.

の左側に、既述した、A、B領域における照射前(0.814(A), 0.356(B))と照射後(0.779(A'), -0.297(B'))の静摩擦係数 の線形相関係数を示す. 図中のA', B'は照射後の結果であ る. A領域(1  $\mu$ m 近傍以上)においては、 $\mu$ s と表面粗さの 指標( $R_a$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ )に強い正の相関があることがわかる. 特 に、算術平均粗さ $R_a$  と $\mu$ s では照射前・照射後でも線形相 関係数が最も大きかった. 一方、B領域(1  $\mu$ m 近傍以下) においては、 $\mu$ s と表面粗さの指標の間に相関がほとんど なかった. 同様に、動摩擦係数 $\mu$ k についてもA, B領域と もに強い相関がなかった(**Fig. 8**(b)). このように、A領域 (1  $\mu$ m 近傍以上)では算術平均粗さの低減によって静摩擦 係数が低下することを示唆する結果が得られた.

## 4.2 静摩擦係数低減の要因

スポット径 88 µm 以下のレーザ照射において,照射後 には研磨傷が消え,表面溶融を示唆する金属表面が生成さ れた(Figs. 1-5 参照).また,2.0 m/s 以下の走査速度領域 において,照射後の R<sub>a</sub>が照射前の R<sub>a0</sub> に比べて小さくな る傾向が観測された(Fig. 2 参照).スポット径 88 µm での パワー密度は247 MW/cm<sup>2</sup>である.文献19の先行研究では, ナノ秒パルス固体レーザ(レーザ波長1,064 nm,パルス幅 15 ns)を用いて,鉄鋼材料(1095 spring steel)に対し,パワー 密度約 120 MW/cm<sup>2</sup> において表面溶融による表面粗さの低 減を行っている<sup>19)</sup>.先行研究よりもパワー密度が大きい,



**Fig. 8** Changes of correlation coefficients between ((a)  $\mu_{s}$ , (b)  $\mu_{k}$ ) and the indexes of surface roughness ( $R_{a}$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ). Symbols A and B indicate the  $R_{a}$  regions above  $\sim 1 \ \mu m$  and below  $\sim 1 \ \mu m$ , respectively. A/B and A'/B' show the results before and after irradiation, respectively.

スポット径 88 µm(パワー密度 247 MW/cm<sup>2</sup>)でのレーザ照 射時には、金属の溶融と一部気化が同時に起こっていると 推測される.これより小さいスポット径 44 µm および 66 µm では金属の気化が顕著になり、スポット径を 132 µm(パ ワー密度 110 MW/cm<sup>2</sup>)まで拡大すると金属溶融が起こら なくなると考えられる.

レーザ照射による静摩擦係数 $\mu_s$ の低減の要因について 考察するために、Fig.9に、静摩擦係数 $\mu_s$ の顕著な低減が 確認された実験条件における表面粗さプロファイル、その 空間周波数解析結果を示す。解析した実験結果は、照射前 の垂直方向の $R_{a0}$ が1 $\mu$ m 程度の金属試料に対して、走査 速度1.5 m/s、スポット径44 $\mu$ m および88 $\mu$ m で照射した 実験結果であった。Fig.9(a)に上から、照射前の、スポッ ト径44 $\mu$ m の照射後の、スポット径88 $\mu$ m の照射後の表 面粗さプロファイルをそれぞれ示す。下に行くにつれて小 さな凸凹がなくなり、滑らかになっていく傾向が見てとれ る.

**Fig. 9**(b)は,それぞれの表面粗さプロファイルに対して 空間周波数解析をした結果である.ここでは,7つの異な る場所の表面粗さプロファイルに対して周波数解析した結 果を平均した.なお,**Fig. 9**に示した照射条件での*R*<sub>us</sub>は,

スポット径 44 μm で 0.795, 88 μm で 0.689 であった. Fig. 9(b)から、照射前データの空間周波数解析から空間周波数 が大きくなるにつれて振幅が小さくなること、スポット径 44 µm では約 70 mm<sup>-1</sup>(周期約 14 µm)以上の空間周波数成 分が照射前と比べて小さくなること、スポット径88 µm では約 20 mm<sup>-1</sup>(周期約 50 µm)以上の空間周波数成分が照 射前と比べて小さくなること、スポット径 88 um におい ては 18.555 mm<sup>-1</sup>(周期約 54 μm)に新たなピーク成分が現 れることが明らかとなった.スポット径 88 µm で約20 mm<sup>-1</sup>以上の高周波数成分が低減したことは、表面粗さ結 果(Fig. 9(a)参照)と矛盾せず、レーザ照射によって滑らか な表面が得られたことを意味している. これらの結果は, パワー密度が低いスポット径 88 µm では金属の溶融が支 配的であり、それよりもスポット径が小さい(パワー密度 が高い)場合には、金属の気化が顕著になると考察した内 容と矛盾しない.以上のことから,金属溶融による表面粗 さの低下が静摩擦係数の低減に寄与したと推測できる.

**Fig. 10** に,照射前の垂直方向の *R*<sub>a0</sub> が 6 µm 程度の金属 試料における表面粗さプロファイル(**Fig. 10**(a)),その空 間周波数解析結果(**Fig. 10**(b))を示す.**Fig. 10**(a)より,約 0.7 mm 間隔で深さ約 20 µm の研磨傷があり,それに対応



Fig. 9 (a) Depth profiles for samples before and after laser irradiation. (b) Results using spatial frequency analysis. The surface roughness of the unirradiated sample  $R_{a0}$  was about 1 µm in the vertical direction.



Fig. 10 (a) Depth profiles for samples before and after laser irradiation. (b) Results using spatial frequency analysis. The surface roughness of the uniradiared sample  $R_{a0}$  was about 6 µm in the vertical direction.



Fig. 11 Dependence of  $R_{\mu s}$  on the corresponding amplitude ratios  $R_{Amp}$  for different spatial frequency ranges.

した空間周波数 1.465 mm<sup>-1</sup> (周期約 0.7 mm) にピークがあ ることがわかる (**Fig. 10**(b)参照). **Fig. 9** と同様に,静摩擦 係数の低減 (*R*<sub>µs</sub>=0.591) が顕著なスポット径 88 µm では約 20 mm<sup>-1</sup>(周期約 50 µm) 以上の空間周波数成分が照射前の それと比べて小さくなることがわかる.

どの空間周波数成分が静摩擦係数の低減に寄与するかに ついて考察するために, Fig. 11 に異なる4つの空間周波 数領域の振幅成分と静摩擦係数の低減(*R*<sub>us</sub>)の相関を示す.

空間周波数領域は、0-10, 10-60, 60-220, 220-900 mm<sup>-1</sup>の 4 領域について考察する.  $R_{Amp}$ は4つの空間周波数領域ご との照射前後の振幅の比である.  $R_{Amp}$ =1 は照射前後で振 幅が変化しなかったことを意味している. 最も相関係数が 大きいのは、0.466の空間周波数領域 60-200 mm<sup>-1</sup> であり、 順に 0.418 の 10-60 mm<sup>-1</sup>, 0.298 の 220-900 mm<sup>-1</sup>, -0.0474の 0-10 mm<sup>-1</sup> であった.

以上のように, 金属の溶融によって約 60-200 mm<sup>-1</sup> の空 間周波数領域の粗さ成分が低下し, 静摩擦係数が低減する ことを示唆する結果が得られた. なお, 静摩擦係数の顕著 な低減は, *R*<sub>a0</sub> が 1 µm 近傍を超える金属サンプルに対し, ビーム走査速度 2.0 m/s 以下, スポット径 88 µm 以下のレー ザ照射において確認された.

### 4.3 産業応用に向けた考察

Fig. 12 に、代表的な金属部品および製品について、求められるおおよその表面粗さ(*R*a)で分類した結果を示す. Fig. 12 は、得られた研究成果を基に、著者と企業の技術開発者らで産業応用に向けたブレインストーミングを実施し作成した。図中に記載した部品・製品の多くは、研削加工あるいは手仕上げで表面仕上げを行っている。1 に部品および製品の名称、2 に表面仕上げの目的、3 に求められる*R*a、4 に従来加工法をそれぞれ記載した。図中の「切削→手仕上げ」という表記は、最終工程に手仕上げを行うことを意味する。

Fig. 12 を基に,本研究成果の適用先として,① 工作機 械の摺動面への応用,② 金型材料平滑加工における手仕 上げ工程の代替をあげ,以下に適用可能性について考察す



Fig. 12 Various industrial uses for the required surface roughness of product.

る.

① 本研究において,照射前の算術平均粗さ R<sub>a0</sub> が 1 µm 近傍を超える金属サンプルでは,照射後の R<sub>a</sub> を低下させ ることにより,静摩擦係数を低減できること,を示した. したがって,本研究成果を利用して,工作機械の摺動面に おける摩擦係数の低減(求められる R<sub>a</sub> は数 µm 程度)が期 待できる.摺動面は母材金属の機械的特性が重要であるた め,母材金属への熱的影響を抑えることができる,ナノ秒 パルスの小スポット径のレーザ照射は有効である.

また、レーザ表面処理技術を新たに導入する場合、従来 技術との差別化をはかることが重要となる.工作機械を用 いた切削加工では、切削、焼入れ、研磨の3工程は、重量 の大きい加工対象を搬送し、別々の場所で行われている. レーザを用いると、焼入れと研磨を1台のレーザ加工装置 で処理できる可能性がある.このレーザ加工機能を工作機 械に搭載させることができれば、機械加工で切削、レーザ 加工で焼入れと研磨を行い、1台の装置で研削から研磨工 程までを加工できる.

②本研究では、初期の表面粗さ Rao が 1 µm 近傍以上の 金属サンプルに対し、静摩擦係数の低減を確認したが、 Rao が 0.5-1 µm 近傍においてもその効果は期待できる。し たがって、Fig. 12 に示した、各種金型および各種自動車 部品への適用、特に、手仕上げが困難な金型の狭小部平滑 加工への応用は有望であると考えられる。現在、表面粗さ の低減、表面欠陥層の除去、形状精度改善のために最終的 には手磨き仕上げが行われている。この手磨き工程は熟練 者の技能に頼ることが多く、また、長時間を要することか ら、この高能率化が従来からの課題となっている<sup>31)</sup>. 電子 ビーム<sup>31,32)</sup>やナノ秒紫外レーザ光<sup>33)</sup>を用いた研究が報告さ れている。本研究で用いたナノ秒パルスの固体レーザは、 レーザマーキング装置の光源として使用されている.装置 価格が比較的安価であり、金型平滑化への応用が期待され る.なお、金型材料の表面改質を伴うレーザ加工では、レー ザ焼入れやレーザ溶融チル化による金型材料の高硬度化が 可能である.熟練工による手仕上げ工程の代替と金型の高 硬度化・長寿命化を同時に実現することが期待される.

# 5. 結 論

ナノ秒パルスの固体レーザを用いて炭素鋼 S45C の静摩 擦係数の低減を確認するために、表面粗さを変化させた炭 素鋼(R<sub>a</sub>で0.5-6 μm 程度)をレーザ条件(パワー密度,ビー ム走査速度)を変えてレーザ照射した. レーザ照射前後に おいて、表面粗さ測定器および表面性測定機を用いて、表 面粗さの指標(算術平均粗さ R<sub>a</sub>,初期摩耗高さ R<sub>pk</sub>,油溜 り深さ Rvk)と摩擦係数(静摩擦係数 µs, 動摩擦係数 µk)を 測定した. Ra, Rpk, Rvk, µs, µkの低減が得られたのは, 主に、スポット径が88 µm(パワー密度247 MW/cm<sup>2</sup>)以下、 ビーム走査速度が 2.0 m/s 以下でのレーザ照射結果であり, 比較的滑らかな金属表面が生成されることがわかった。照 射前後の表面プロファイルの空間周波数解析を行った結 果,金属の溶融によって約 60-200 mm<sup>-1</sup>の空間周波数領域 の粗さ成分が低下し、静摩擦係数が低減することを示唆す る結果を得た、また、本研究成果は、工作機械の摺動面の 研磨工程,熟練工による金型手仕上げ工程の代替への応用 が期待される.

# 参考文献

- 1) Dahotre, N.B.: Lasers in Surface Engineering, ASM International, Ontario, (1998).
- Lawrence, J. and Li, L.: Wettability Characteristics of Carbon Steel Modified with CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, Excimer and High Power Diode Lasers, Appl. Surf. Sci., 154-155, (2000), 664.
- Lawrence, J. and Li, L.: Carbon Steel Wettability Characteristics Enhancement for Improved Enamelling using a 1.2 kW High Power Diode Laser, Opt. Lasers Eng., 32, (2000), 353.
- Lawrence, J. and Li, L. : A Laser-Based Technique for the Coating of Mild Steel with a Vitreous Enamel, Surf. Coat. Technol., 140, (2001), 238.
- Lawrence, J. and Li, L. : On the Mechanisms of Wetting Characteristics Modification for Selected Metallic Materials by means of High Power Diode Laser Radiation, J. Laser Appl., 14, (2002), 107.
- 6) Joo, B.D., Jang, J.H., Lee, J.H., Son, Y.M., and Moon, Y.H.: Selective Laser Melting of Fe-Ni-Cr Layer on AISI H13 Tool Steel, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 19, (2009), 921.
- 7) Ukar, E., Lamikiz, A., López de Lacalle, L.N., del Pozo, D., and Arana, J.L.: Laser Polishing of Tool Steel with CO<sub>2</sub> laser and High-power Diode Laser, Int. J. Mach. Tool Manuf., **50**, (2010), 115.
- Baseman, R.J.: Feature Size and Temperature Sensitive Process Windows for Excimer Laser Planarization of Aluminum, J. Vac. Sci. Tecilnol. B, 8, (1990), 84.
- Woratschek, B., Carey, P., Stolz, M., and Bachmann, F.: Excimer Laser Planarization of AlSi, AlSiTi and AlSiCu Alloys, Appl.

Surf. Sci., 43, (1989), 264.

- Marella, P.F., Tuckerman, D.B., and Pease, R.F.: Modeling of Laser Planarization of Thin Metal Films, Appl. Phys. Lett., 54, (1989), 1109.
- Guo, K.W. and Tam, H.Y.: Study on Polishing DF2 (AISI O1) Steel by Nd:YAG Laser, J. Mater. Sci. Res., 1, (2012), 54.
- 12) Mai, T.A. and Lim, G.C. : Micromelting and its Effects on Surface Topography and Properties in Laser Polishing of Stainless Steel, J. Laser Appl., 16, (2004), 221.
- 13) Perry, T.L., Werschmoeller, D., Duffie, N.A., Li, X., and Pfefferkorn, F.E. : Examination of Selective Pulsed Laser Micropolishing on Microfabricated Nickel Samples using Spatial Frequency Analysis, J. Manuf. Sci. Eng., **131**, (2009), 021002.
- 14) Perry, T.L., Werschmoeller, D., Li, X., Pfefferkorn, F.E., and Duffie, N.A.: Pulsed Laser Polishing of Micro-milled Ti6Al4V Samples, J. Manuf. Process, 11, (2009), 74.
- 15) Vadali, M., Ma, C., Duffie, N.A., Li, X., and Pfefferkorn, F.E.: Pulsed Laser Micro Polishing : An Analytical Method for Predicting Surface Finish, Proceedings of the ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2011), June 2011, Corvallis, Oregon, USA.
- 16) Nüssera, C., Wehrmann, I., and Willenborg, E. : Influence of Intensity Distribution and Pulse Duration on Laser Micro Polishing, Phys. Procedia, **12**, (2011), 462.
- 17) Verdier, M., Costil, S., Coddet, C., Oltra, R., and Perret, O.: On the Topographic and Energetic Surface Modifications Induced by Laser Treatment of Metallic Substrates Before Plasma Spraying, Appl. Surf. Sci., **205**, (2003), 3.
- 18) Li, H., Costil, S., Barnier, V., Oltra, R., Heintz, O., and Coddet, C.: Surface Modifications Induced by Nanosecond Pulsed Nd: YAG Laser Irradiation of Metallic Substrates, Surf. Coat. Technol., 204, (2006), 1383.
- 19) Gao, Y., Wu, B., Zhou, Y., and Tao, S. : A Two-step Nanosecond Laser Surface Texturing Process with Smooth Surface Finish, Appl. Surf. Sci., 257, (2011), 9960.
- 20) Vouagnera, D., Beleznai, Cs., and Girardeau-Montaut, J.P.: Characterisation of Surface Processes on Metals under Pulsed Picosecond Laser Irradiation by Photoelectric Work Function Measurements, Appl. Surf. Sci., 171, (2001), 288.
- 21) Bereznaia, M., Pelsoczi, I., Toth, Z., Turzo, K., Radnai, M., Bor, Z., and Fazekas, A.: Surface Modifications Induced by Ns and Sub-ps Excimer Laser Pulses on Titanium Implant Material, Biomaterials, 24, (2003), 4197.
- 22) Karnakis, D.M., Knowles, M.R.H., Petkov, P.V., Dobrev, T., and Dimov, S.S.: Surface Integrity Optimisation in Ps-laser Milling of Advanced Engineering Materials, Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2007, June 2007, Munich, Germany.
- Groenendijk, M.N.W. and Meijer, J.: Surface Microstructures Obtained by Femtosecond Laser Pulses, CIRP Ann., 55, (2006), 183.
- 24) Qi, L., Nishii, K., and Namba, Y.: Regular Subwavelength Surface Structures Induced by Femtosecond Laser Pulses on Stainless Steel, Opt. Lett., 34, (2009), 1846.
- 25) Dusser, B., Sagan, Z., Soder, H., Faure, N., Colombier, J.P., Jourlin, M., and Audouard, E. : Controlled Nanostructrures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking, Opt. Express, 18, (2010), 2913.
- 26) Hou, S., Huo, Y., Xiong, P., Zhang, Y., Zhang, S., Jia, T., Sun, Z.,

Qiu, J., and Xu, Z. : Formation of Long- and Short-periodic Nanoripples on Stainless Steel Irradiated by Femtosecond Laser Pulses, J. Phys. D : Appl. Phys., 44, (2011), 505401.

- 27) Bonse, J., Koter, R., Hartelt, M., Spaltmann, D., Pentzien, S., Höhm, S., Rosenfeld, A., and Krüger, J.: Femtosecond Laserinduced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium Alloy for Tribological Applications, Appl. Phys. A, **117**, (2014), 103.
- 28) Lide, D.R.: Handbook of Chemistry and Physics, CRS Press, New York, (2000).
- 29) For example, Dumitr, G., Romano, V., Webera, H.P., Pimenov, S., Kononenko, T., Hermann, J., Bruneau, S., Gerbig, Y., and Shupegin, M.: Laser Treatment of Tribological DLC Films, Diam. Relat. Mat. 12, (2003), 1034; Yasumaru, N., Miyazaki, K., and Kiuchi, J.: Femtosecond-laser-induced Nanostructure Formed

on Hard Thin Films of TiN and DLC, Appl. Phys. A, **76**, (2003), 983 ; Yasumaru, N., Miyazaki, K., and Kiuchi, J. : Control of Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films with Femtosecond-laser-induced Nanostructuring, Appl. Surf. Sci., **254**, (2008), 2364.

- 30) 山本雄二, 兼田楨宏: トライボロジー, 理工学社, (2010).
- 31) 岡田 晃: 大面積電子ビーム照射による金型表面の高能率 平滑化および表面改質,天田財団第7回助成研究成果発表 会講演論文集,(2008),36.
- 32) 井上基弘:電子ビームの金型平滑化への応用,レーザ協会, 35,(2010),29.
- 33) 坂本治久:ナノ秒紫外レーザ光による金型材料平滑加工の 試み,レーザ協会, 35,(2010),19.