



# レーザー熱処理による切りくず処理性の改善 に関する基礎的研究\*

田中隆太郎\*\* 林 勇伝\*\*\* 田邊 一真† 上田 隆司\*\* 細川 晃\*\*

Fundamental Study on Improvement of Chip Controllability in Turning with Laser Heat Treatment

Ryutarō TANAKA, Yuangchuan LIN, Kazumasa TANABE, Takashi UEDA and Akira HOSOKAWA

This study deals with the trial for improvement of chip controllability in turning with selective laser heat treatment for workpiece. Selective heat treatment for carbon steel JIS S45C was carried out with Nd:YAG laser which could be transmitted through an optical fiber and shows higher absorption rate against carbon steels than CO<sub>2</sub> laser. In turning of these selective laser heat treated carbon steel, the chip form changed regular curl from irregular curl and chip breakability was improved compared with non-laser treated carbon steel. Surface roughness was obviously smaller comparing with non-laser treated carbon steel. Especially in the case that the depth of cut was larger, the surface roughness was smaller. As for cutting force, the principal force was slightly smaller, but the thrust force and feed force were almost the same. The cutting temperature was slightly lower. The tool wear was almost same as that in the case of non-laser treated carbon steel.

**Key words:** Nd:YAG Laser, heat treatment, martensite, ferrite, pearlite, carbon steel, chip control, carbide tool, surface roughness, cutting force, tool wear, cutting temperature

## 1. 緒 論

切削加工の高能率化をはかるために、切削速度の高速化、さらに生産設備はライン化され昼夜を問わず自動運転されている。連続切削である旋削加工では、自動運転の際、切りくず処理性が問題となることがある。切りくずが被削材に絡みつき仕上げ面を擦過することで表面品位を低下させる恐れや、切りくずの噛みこみにより工具の破損が引き起こされる危険性も考えられる。

工具摩耗の抑制や、仕上げ粗さの向上、切りくず処理性を改善するなど目的で鋼材中に快削性添加物を含有する快削鋼として硫黄快削鋼や鉛快削鋼、超快削鋼など<sup>1)2)</sup>がある。その快削化メカニズムはおおよそ MnS による脆性付与や切削中の加工熱により被削材中の鉛、ビスマスが溶融することによる溶融脆化や潤滑性向上である。しかしながら、機械的強度や耐腐食性の低下、鉛が人体や作業環境へ及ぼす影響、添加物がレアメタルで高価であるなど、それぞれの快削鋼には問題が残る。このほかにも、切削加工の前処理として長手方向に浅い溝を入れる方法や放電加工機による放電痕により切りくずを折断しようとした試み<sup>3)4)</sup>もある。レーザーによる表面処理により切りくず改善の試みがなされたとの記述<sup>3)</sup>があるが、資料としては見当たらない。また、マシニングセンタ上でのレーザーを用いた機上焼入れについての報告<sup>5)</sup>もあるが、焼入れが切削性へ及ぼす影響について調べたものは見当たらない。

近年、レーザー発振器の小型化・高出力化に伴いその用途が拡大し、工作機械の複合化の傾向と相まって、例えば、レーザー発信器を備えたマシニングセンタとして積層光造形加工機など限られた用途ではあるが市場で広まりつつあり、その他の切削加工機械との複合

Table 1 Chemical compositions of work material

	Chemical compositions mass%						Hardness
	C	Si	Mn	P	S	Sol.Al	HB
S45C	0.44	0.19	0.74	0.017	0.018	0.026	240

Table 2 Experimental conditions in laser heat treatment process

Nd:YAG Laser (CW)	
Wave length : $\lambda$	1064 nm
Average power : Q	38~82 W
Scan rate :	10~40 mm/s
Spot diameter :	0.22 mm

Table 3 Cutting conditions

Work :	S45C (anneled)
Tool :	Carbide P30 (SNMN120408)
Cutting speed : v	150 m/min
Depth of cut : d	0.1~0.5 mm
Feed rate : f	0.1 mm/rev
Atmosphere :	dry

化も期待される。

そこで本研究では、Nd:YAG レーザを用いた被削材の選択的な改質による旋削加工時における切りくず処理性の改善を目的とし、一般的な機械構造用炭素鋼 S45C について実験を行った。実験で用いた Nd:YAG レーザは CO<sub>2</sub> レーザと比較し鋼材に照射したときの吸収率が高く、また光ファイバで伝送が可能であり、加工に用いる際において柔軟な取り回しが可能であるという特徴を持つ。実験では、レーザー照射された被削材の断面観察とともに、旋削加工時における切りくず処理性、仕上げ面粗さ、切りくずの厚さ、切削抵抗、切削温度および工具摩耗への影響について調査し、Nd:YAG レーザによる被削材の選択的な熱処理が切削機構へ与える影響につい

\* 原稿受付 平成 18 年 12 月 25 日

\*\* 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科 (金沢市角間町)

\*\*\* 学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科 (同上)

† 金沢大学工学部 (現、(株)日平トヤマ ; 富山県南砺市野尻 641)

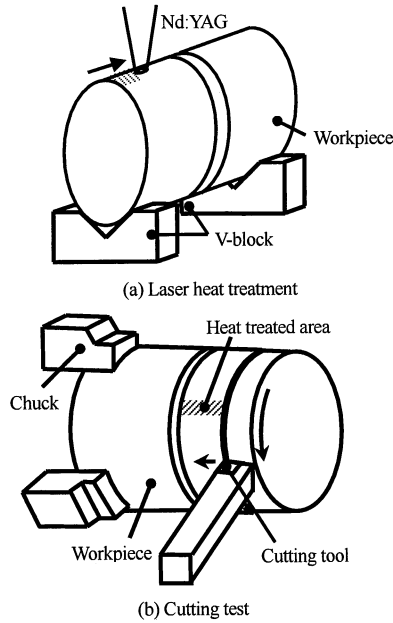


Fig.1 Schematic illustration of experimental set up

て検討を行った。

## 2. 実験方法

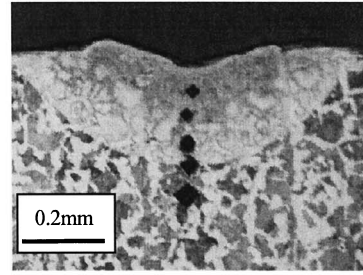
表1に被削材として使用した炭素鋼S45Cの化学成分および硬さを示す。被削材は熱間鍛造の後、850℃で5時間保持後、放冷で焼きならししてある。

表2にレーザーの照射条件を示す。Nd:YAGレーザーは、出力38～82W、連続発振、スポット径0.22mm、走査速度10～40mm/s(60-240mm/min)とした。炭素鋼のNd:YAGレーザーに対する吸収率はおよそ40%である<sup>6)</sup>。吸収剤およびアシストガスは使用していない。

被削材の断面観察用のサンプルは、レーザー照射の後、レーザーの走査方向と垂直方向に切断した。これを樹脂へ埋め込み、研磨した後、ナイタル溶液で腐食し、断面の組織観察およびピッカース硬さの分布を調べた。

切削試験は、図1(a)に示す長手方向にレーザーを連続照射した円筒状の被削材を、図1(b)に示すように長手方向へ旋削加工することで行った。レーザーを用いて選択的な熱処理をした被削材を、CNC旋盤を用いて乾式長手旋削を行い、切りくず処理性と工具摩耗についてレーザー未照射の被削材と比較し評価した。表3に切削条件に示す。切削速度は急激な工具摩耗が引き起こされることなく、顕著な構成刃先が発生せず比較的良好な仕上げ面が得られる速度として150m/minに設定した。切り込みを0.1～0.5mmの範囲で変化させ、送りは0.1mm/revの一定とした。工具は超硬合金P30(SNMN120408)を用いた。今回の旋削加工でチップブレーカーは使用していない。

工具摩耗試験の被削材として、S45CとNd:YAGレーザーを用いて選択的な熱処理を行ったS45Cを用いた。切削条件は、切削速度150m/min、切り込み0.4mm、送り0.1mm/revとした。レーザー熱処理は、直径66mmの円筒状のS45Cの長手方向にライン状にレーザー熱処理したものを長手方向に120mm旋削後、再度同じ箇所レーザー照射を行い直径が58.8mmとなるまで切削を続けた。工具摩耗は工具をホルダから任意の時間毎に取り外し、工具顕微鏡を用いて逃げ面摩耗幅の測定を行った。また切削終了後、最大クレータ深さを触針粗さ計で測定した。



Power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.2 Cross section of S45C after laser heat treatment with Nd:YAG Laser

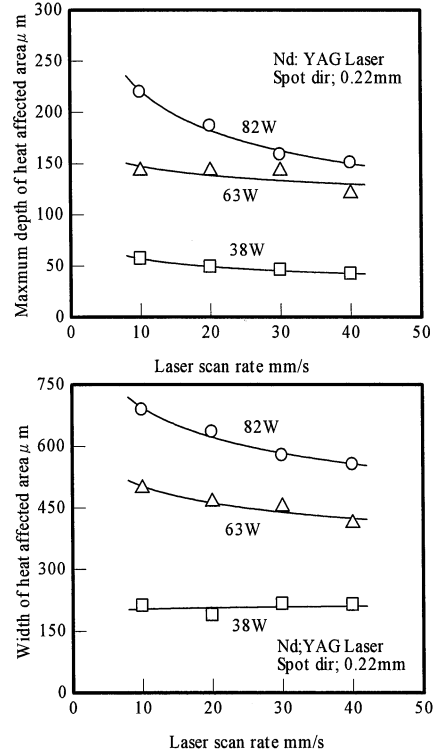


Fig.3 Influence of laser power and scan rate on the laser affected depth and width of S45C

切削抵抗の測定は、刃物台に取り付けたATS式動力計を用いて計測し、アンプを介してデジタルオシロスコープで記録した。切削抵抗は工具動力計に添付の校正曲線を用いて求めた。

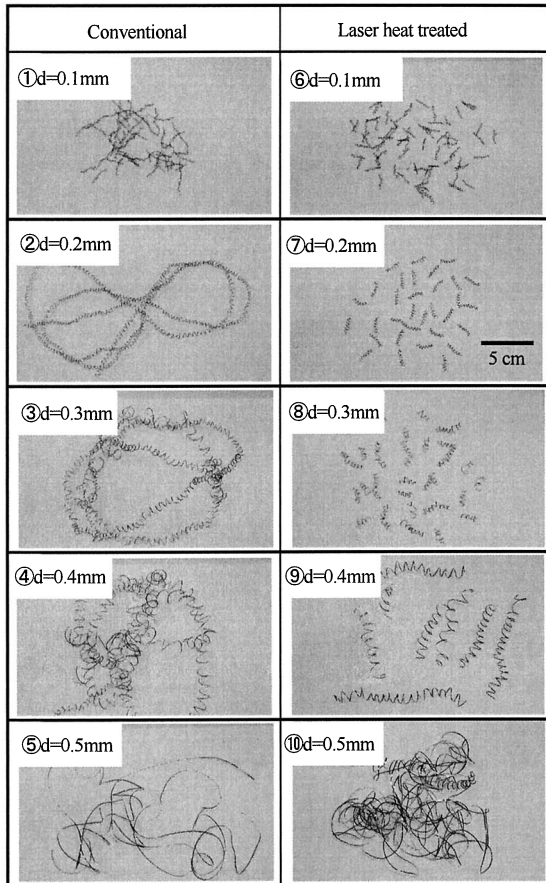
切削温度の測定は、工具-被削材熱電対法により行った。起電力を切削温度に校正するために校正曲線が必要となるが、積分球の焦点にあるクロメル-アルメル熱電対と工具または被削材の接点をもうひとつの焦点にあるスポットヒータで加熱し、クロメル-アルメル熱電対に対する起電力S45Cおよび超硬工具P30の熱起電力を求め、これらの差から求めた。

また、切削後の被削材についても加工面を観察し、触針粗さ計を用い表面形状および粗さの測定を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 Nd:YAGレーザーによるS45Cの熱処理特性

図2にレーザー照射後のS45Cの試料の断面についての組織写真を示す。試料はナイタル溶液により腐食後のものである。写真を見ると、フェライト-パーライト組織の母材中に半円状に組織が変化している部分が確認できる。写真中のピッカース圧子による圧痕の大きさを見ると、明らかに母材の領域における圧痕と比べ小さくその



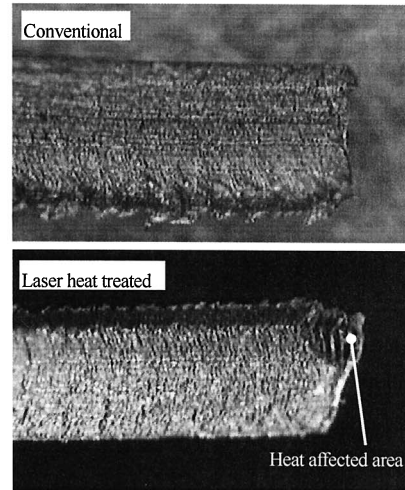
Tool: P30, v=150m/min, f=0.1mm, dry  
Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.4 Influence of laser heat treatment for workpiece on the chip form

硬度が高いことが分かる。組織が変化している部分にはマルテンサイト組織が見られ、硬度も最大で Hv600 程度に達していた。これよりレーザー照射により組織が変化したことがわかる。図 3 にレーザー照射によって変化した組織の深さと幅を示す。レーザーパワーが 63W と 82W の場合、レーザースポット径 0.22mm よりも、熱影響部幅が大きい。これは被削材中の熱伝導によりレーザーが直接照射されていない部分においても温度が上昇し組織が影響を受けたと考えられる。熱影響深さは、レーザーパワーが大きく、レーザー走査速度が小さいほどより深くまで熱影響層が得られることが分かる。また、影響幅についても同様の傾向が見られた。

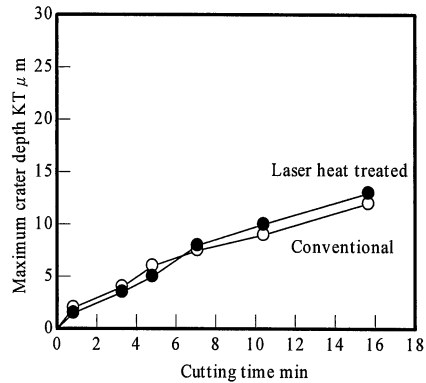
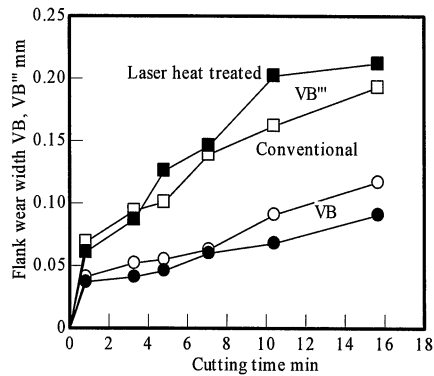
3.2 切りくず折断性への影響

図 4 に旋削加工時に生成された切りくず形態を示す。被削材の一方は、レーザーパワー82W, 送り 10mm/s で熱処理を行っている。図 2 および図 3 に示すようにこの条件でレーザー熱処理を行うと熱影響部は幅 1mm, 深さ 0.3mm である。切りくずの厚さは送りの約 2 倍であることから、被削材が 1 回転する間に生成される切りくずは全周の約半分の長さとなる。切り込みが 0.1mm①⑥では、レーザー熱処理後の有無にかかわらず切りくずが適度な長さで折断されている。レーザー熱処理なしと比べレーザー熱処理後の場合の切りくずの長さが短い。レーザー熱処理後では、被削材が 1 回転する間に生成される切りくず長さ(約 9cm)より明らかに短い切りくずも見受けられ、切り込みに対する送りの比が大きいため折断した場合とレーザーによる損傷部で折断した場合が混在していると考えられる。切り込みが 0.2mm でレーザー熱処理なし②では切りくずは折断されることなく連



Tool: P30, v=150m/min, d=0.4mm, f=0.1mm, dry  
Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

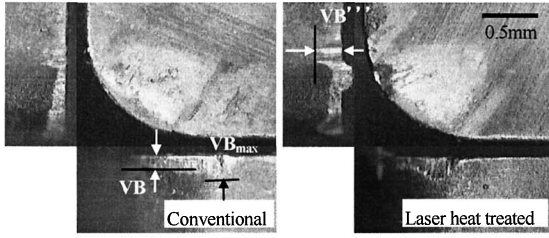
Fig.5 Microphotograph of the ends of chip in turning S45C



Tool: P30, v=150m/min, d=0.4mm, f=0.1mm, dry  
Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

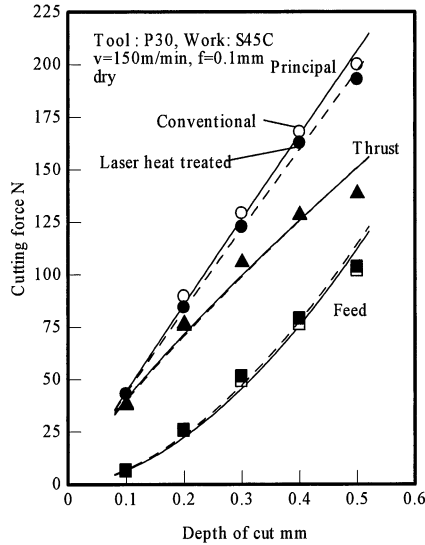
Fig.6 Wear progress cruces of carbide tool P30 in turning S45C and selective laser heat treated carbon steel

続であるが、レーザー熱処理後⑦では切りくずがほぼ同じ長さで折断されている。切り込みが 0.3mm においてもレーザー熱処理なし③はらせん状の一部不規則な連続した切りくずが生成されているが、レーザー熱処理あり⑧では、切りくずは 6, 7 巻き程度で折断されており、その長さはほぼ半周分に近く、折断された切りくずの両端においてレーザー熱処理による熱的な損傷が確認できる。このことからレーザー熱処理部において、かなり高い確率で切りくずが折断されていると考えられる。切り込みが d=0.4mm ではレーザー熱処理なし④は不規則ならせん状切りくずであるが、レーザー熱処理あり⑨では、切りくず



Tool: P30,  $v=150\text{m/min}$ ,  $d=0.4\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm}$ , dry  
Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.7 Wear patterns of carbide tool P30 after turning S45C and selective laser heat treated carbon steel



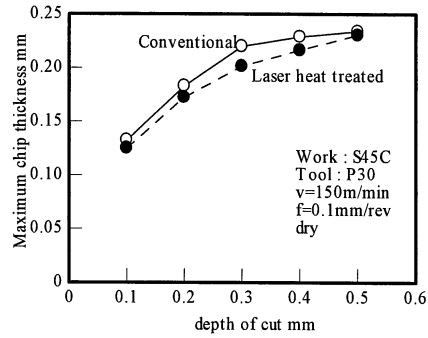
Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.8 Influence of laser heat treatment for workpiece on the cutting force

が10巻程度で定期的な長さで折断されているが1周分に相当する切りくず長さより長い。したがって、切りくずがすべてのレーザー照射痕において折断されているのではなく、切りくずがある程度の長さまで生成し、その後、切りくずの自重や遠心力により折断に至ったと思われる。このときの折断部においてレーザー照射痕が確認できた。切り込みが $d=0.5\text{mm}$ では、どちらの場合も連続した切りくずが観察されたが、レーザー熱処理なし⑤がリボン状であるのに対し、レーザー熱処理あり⑩では、リボン状の中に一部らせん状の部分も見られる。そして所々にレーザー照射による照射痕が周期的に観察できる。ほとんどの場合、その照射痕において切りくずが折断することはなかったが、所々折れかかり鈍角に曲がっている部分が観察できる。また、レーザー熱処理なしの場合の切りくずと比較すると、切りくずのカーブ半径が小さくなっていることが分かる。

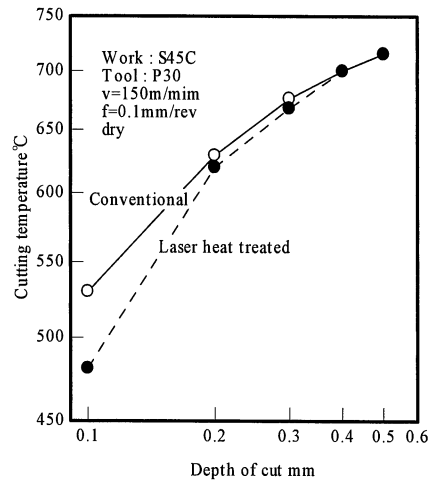
前処理により被削材表面に溝を入れ切りくずを折断しようとする場合、切り込みのおよそ5割以上の溝深さが必要であり、8割を超えると仕上げ面に影響を及ぼすとされている。今回の実験において $d=0.4\text{mm}$ では熱影響深さが切り込みの6割であるが、切りくずの形状に変化が見られたが折断に至ることはなく、 $d=0.3\text{mm}$ 以下の場合、熱影響深さが切り込みの8割以上となり折断性の向上が認められた。レーザー熱処理により被削材の部分改質により切りくずを折断させる方法は、溝入れのように完全に被削材の一部を除去する場合の除去深さより深い熱処理深さが必要であることが分かる。

図5に折断後の切りくず端部の拡大写真を示す。慣用時は切削点近傍で切りくずが折断されなかったので切りくずが生成後被削材



Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.9 Influence of laser heat treatment for workpiece on the chip thickness



Laser power; 82W, Spot dir; 0.22mm, Scan rate; 10mm/s

Fig.10 Cutting temperature in turning S45C and selective laser heat treated carbon steel

やチャックに絡みつき強制的に折断された場合のサンプルである。レーザーにより選択的な熱処理を行った被削材を旋削したときに生成される切りくずの端部は、明らかに未処理の場合と異なり、レーザーによる照射痕が確認できることから、レーザー熱処理により脆性が高いマルテンサイト組織に変化し、この部分において切りくずが折断され、結果として切りくずの折断性が向上したと考えられる。マルテンサイト相を適度に含む炭素鋼の切りくず処理性が優れていることが知られているが<sup>7)</sup>、レーザーによる被削材の部分的なマルテンサイト化でも折断性向上に効果があることが分かった。

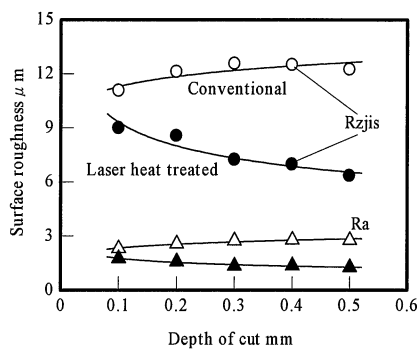
### 3.3 切削特性へ及ぼす影響

レーザー照射による被削材の部分熱処理が切削特性へ及ぼす影響として、工具摩耗、切削抵抗、切削温度、および仕上げ面粗さについて調べた。

図6にS45C切削時の工具摩耗進行線図を示す。横逃げ面平行部摩耗幅VBは、切り込みの1/2の位置における値である。前逃げ面境界部摩耗幅VB'''およびクレータ深さ切削終了後における摩耗幅の大きさはレーザー熱処理を行った場合の方が若干小さいが、初期摩耗およびその後の摩耗進行速度に大きな違いは認められない。また、逃げ面最大摩耗幅VBmaxもレーザー熱処理のほうがやや大きい有意な差とはいえない。

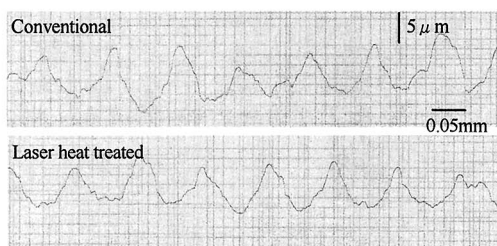
図7に切削後の工具摩耗形態を示す。レーザー照射した場合、周期的に母材より硬度が高い部分に接するが、異常な摩耗は認められず、レーザー熱処理なしと比較しても違いは認められない。

図8に切削抵抗を示す。切削抵抗は、レーザー熱処理後の場合、



Tool: P30, v=150m/min, f=0.1mm, dry  
Laser power: 82W, Spot dir: 0.22mm, Scan rate: 10mm/s

Fig.11 Influence of laser heat treatment for workpiece on the surface roughness



Tool: P30, d=0.4mm, v=150m/min, f=0.1mm, dry  
Laser power: 82W, Spot dir: 0.22mm, Scan rate: 10mm/s

Fig.12 Profile curve of work materials after turning with carbide tool P30

レーザー熱処理なしと比べ背分力, および送り分力はほぼ同じ値を示し, 主分力については若干の減少が見られた.

図9に切りくずの平均厚さを示す. 3次元切削における切りくずの厚さは一定でなく, 切り込み方向で変化するが, 今回の実験では切りくずのほぼ中央部をマイクロメータで測定し, 10回の測定値の平均値を切りくず厚とした. いずれの被削材切削時も, 切り込みの増加に伴い最大切りくず厚さが増加している. レーザ熱処理後の被削材の場合, レーザ熱処理なしの被削材と比べ切りくず厚さが小さいことが分かる.

図10に切削温度を示す. レーザ熱処理の有無の関わらず, 切り込みが増加するにしたがって切削温度が上昇する傾向が見られる. 切り込みが小さいほど, レーザ熱処理なしと比べレーザー熱処理後の被削材を切削した時の温度がわずかではあるが低くなっている. また, 切り込みが0.4mmと0.5mmではほぼ同じ温度を示している.

図11に旋削加工後の仕上げ面粗さとして算術平均粗さと十点平均粗さRzjisを示す. いずれも10回測定を行った平均値である. Ra, Rzjisともにレーザー熱処理なしと比べ明らかに小さい粗さを示す. レーザ熱処理なしの場合, 切り込みが変化してもほぼ一定の粗さを示すが, レーザ熱処理後では切り込みが大きいほど小さな粗さを示す.

図12に旋削加工後の仕上げ面の送り方向における断面プロファイルを示す. レーザ熱処理なしは, ピーク部, 谷部ともに高さが一定でない. レーザ熱処理後では, 工具の形状が規則的に転写されていることが分かる.

#### 4. 結論

炭素鋼 S45C について, Nd:YAG レーザ照射後の断面組織観察および硬さ測定した. また円筒表面の長手方向へレーザー照射した被削材について旋削加工を行い, 被削材の選択的な熱処理が切削特性へ及ぼす影響について調査し, レーザ熱処理なしの被削材切削時と比較し検討を行った結果, 以下の結論が得られた.

- 1) Nd:YAGレーザーを用いた炭素鋼 S45C の選択的な熱処理により, 切りくず処理性の改善が可能である. 切りくずの形態が不規則ならせん形状から規則的なならせん形状に変化し, 切りくずの厚さが薄くなった.
- 2) 背分力, および送り分力はほぼ同じ値を示し, 主分力について最大で約 5%の減少が認められた.
- 3) 算術平均粗さ Ra, 十点平均粗さ Rzjis ともにレーザー未照射と比べ明らかに小さい値を示し, 切り込みが大きいほどその傾向が顕著である.
- 4) 工具摩耗は, レーザ熱処理した被削材の方が逃げ面平行部摩耗幅ではわずかに小さい値を示し, 境界部付近ではやや大きな摩耗を示したが, 欠損など突発的な損傷は認められず, 両者に大きな違いは認められなかった.

本手法は, 切削条件に応じてレーザー熱処理深さをコントロールすることが可能であり, 切りくず折断性だけでなく, 更なる検討が必要であるが被削材が小径で切削速度が高く出来ないような場合において仕上げ面粗さを向上できる可能性があると言える.

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり多大なご支援いただきました JFE 条鋼に記して感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 1) 奥島啓式, 岩田一明: 金属材料の被削性に関する研究 (鉛快削鋼の切りくず生成), 日本機械学会論文集 (第 3 部), **28**, 187 (1962) 404.
- 2) 例えば, 中島利勝, 鳴瀧則彦: 機械加工学, コロナ社 (1983) 106.
- 3) 新井 実: 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社 (1990) 109.
- 4) 中山一雄, 上原邦夫: 新版機械加工, 朝倉書店 (1997) 89.
- 5) 廣垣俊樹, 中川平三郎, 速水雅人, 喜田義宏, 垣野義昭, 山路伊和夫: YAG レーザを用いた機上焼入れに関する研究-各種合金鋼の焼入れ特性-精密工学会誌, **66**, 5 (2000) 704.
- 6) 新井武二, はじめてのレーザープロセス初版, 工業調査会, (2004) 93.
- 7) 山本重男, 荒木透, 中島宏興: マルテンサイト相を混在させた鋼の切削挙動, 鉄と鋼, **71**, 16 (1985) 107.
- 8) 新井 実: 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社 (1990) 27.
- 9) 山内雅子, 堀内 幸, 村上良彦, 菅野浩人, 澁谷秀雄: タップ立て用切りくず折断工具の開発 (第 1 報) - 工具の試作と有効性 -, 精密工学会誌, **70**, 12 (2000) 1565.