

機上レーザー熱処理法による炭素鋼の被削性の改善 —切りくず折断性と仕上げ面粗さへの効果—

林 勇伝*1, 田中隆太郎*2, 草野岳彦*1, 細川 晃*2, 上田隆司*2

Improvement of machinability of carbon steel by in-situ laser heat treatment
—Effects of chip breakability and surface roughness—

Yongchuan LIN, Ryutaro TANAKA, Takahiko KUSANO, Akira HOSOKAWA and Takashi UEDA

本研究は、炭素鋼S45Cの旋削加工においてレーザー熱処理が切りくず処理性や仕上げ面粗さへ及ぼす影響について検討している。実用的な見地から小型の半導体レーザーをCNC旋盤の刃物台に設置し、機上にて工作物長手方向にレーザーを照射して選択的に熱処理を行っている。工具は超硬P30種とアルミナ-炭化チタン系セラミック工具を用い、すべての実験でブレーカピースを併用している。レーザー熱処理を行わない通常の旋削では低切削速度と高送りの場合のみ切りくずが折断されるが、レーザー熱処理した炭素鋼を旋削すると広範囲の切削条件において切りくずが折断され、被削性が向上する。レーザー熱処理された炭素鋼の切りくず観察より、連続型切りくず中に変形形態が異なる部分が確認され、この部分を起点として切りくずが折断されている。このとき、超硬P30種およびセラミック工具いずれの場合においても仕上げ面粗さはレーザー照射なしの場合と比べて若干良好になる傾向にあり、硬化したレーザー熱処理部を周期的に切削することによる仕上げ面の劣化は引き起こされない。

Key words : laser heat treatment, chip breakability, direct diode laser, machinability, carbon steel, carbide tool, ceramic tool, breaker piece

1. 緒言

連続切削である旋削加工においては、切りくず処理性の良否が生産効率に大きく影響を及ぼす。とくに、長くつながった連続型切りくずが生成される場合には切りくずが工具や工作物にからみつき、加工を中断せざるを得ない。このような現象は軸などの素材として最も多用される普通鋼の旋削で生じやすく、種々の対策が講じられている。すなわち、素材を切りくずが折れやすい硫黄快削鋼や鉛快削鋼などに変更したり¹⁾²⁾、チップブレーカを用いる方法である^{3)~7)}。しかしながら、前者では添加される快削性添加物の種類によっては材料そのものの機械的強度や耐腐食性を低下させる可能性があるとともに、鉛快削鋼では製鋼や熱間鍛造時において作業環境への負荷が大きい。一方、後者のチップブレーカを使用する方法では、比較的低切削速度で送りや切込みが大きい場合には有効であるが、仕上げ切削のように切削速度が高く切込みや送りが小さい場合にはその効果が得られにくい。このような背景の下、筆者らはあらかじめ工作物の長手方向にNd:YAGレーザーを照射して部分的に熱処理(硬化・脆化)を行うことによって、切りくずを折断できることを示した⁸⁾。

そこで本研究では実用化を視野に入れ、他のレーザー加工

機と比べて小型で取り回しが容易で、かつ高い出力を得ることができコスト的にも有利な半導体レーザーを用い、機上にて熱処理を行い切りくず折断を実現する手法について検討している。工作物には最も一般的で使用頻度も高い炭素鋼S45Cを選び、超硬P30種工具およびアルミナ-炭化チタン系セラミック工具を用いて旋削加工を行っている。この工具は超硬よりも高速で安定した切削加工が可能であり、被削材との親和性が低いとされている。工作物の部分的なレーザー熱処理が被削性へ及ぼす影響として、まず、切りくず処理性(折断性)についてレーザー熱処理部の断面組織観察などで詳細に検討するとともに、仕上げ面粗さへの影響についても議論している。

2. 実験方法

表1に使用した工作物(JIS S45C)の化学成分および硬さを示す。工作物は熱間鍛造の後、850°Cで5時間保持した後、保冷焼きならしをしてある。

表2にレーザーの照射条件を示す。小型の半導体レーザー(日鐵テクニサーチ: NSDL40-160, 波長808nm, 出力120W, 連続発振)を用い、レーザー走査速度は126mm/minとした。なお、

表1 工作物の化学成分および硬さ

| 工作物 | 化学成分 (%) | | | | | | 硬さ |
|----------|----------|------|------|-------|-------|--------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Sol.Al | |
| JIS S45C | 0.44 | 0.19 | 0.74 | 0.017 | 0.018 | 0.026 | HB240 |

*1 金沢大学大学院: 〒920-1192 石川県金沢市角間町
Graduate School of Natural Science and Technology,
Kanazawa University

*2 金沢大学: 〒920-1192 石川県金沢市角間町
Kanazawa University

(学会受付日: 2008年12月1日)

表2 レーザの照射条件

| | | |
|---------|--------------|------------|
| レーザ | 半導体レーザ | |
| 波長 | λ | 808 nm |
| レーザ パワー | Q | 120 W |
| 走査速度 | C | 126 mm/min |
| スポットサイズ | 2.5 × 0.1 mm | |

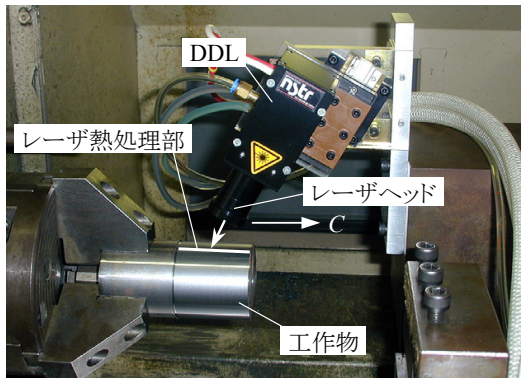


図1 DDL (Direct Diode Laser)による机上熱処理装置

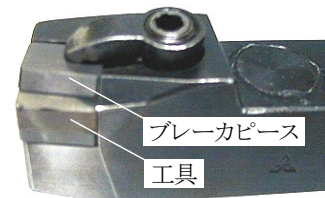
表3 切削条件

| | |
|----------|--|
| 工作物 | JIS S45C |
| 工具 | Carbide (P30), TiC-Al ₂ O ₃ Ceramics |
| 工具形状 | ISO SNMN120408 |
| 切削速度 v | 100–250 m/min |
| 送り速度 f | 0.1–0.2 mm/rev |
| 切込み d | 0.4 mm |
| 切削方式 | 乾式 |

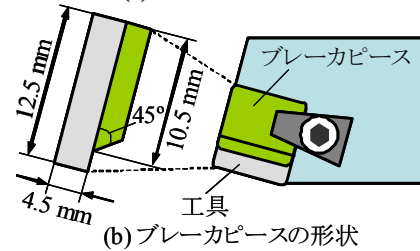
レーザのスポットサイズは幅0.1mm、長さ2.5mmの矩形で、長さ方向に走査している。使用した半導体レーザの鋼に対する吸収率はおよそ40%である⁹⁾。吸収剤およびアシストガスは使用していない。図1にCNC旋盤の刃物台に取り付けた半導体レーザ (DDL: Direct Diode Laser) の概観を示す。

表3に切削条件を示す。切削速度 v は100~250m/min、送り f を0.1~0.2mm/revの範囲で変化させ、切込み d は0.4mmの一定とし、乾式で切削している。ここで、図2に切削工具とブレードカピースの構造図を示す。ブレードカピースの型番はISOCBS-4Mである。使用した工具は、超硬P30種工具およびアルミナ-炭化チタン系セラミック工具である。チップの型番は、いずれもSNMN120408である。工具ホルダはCSBNR2020 (三菱マテリアル製)を使用した。

図3に示すように、CNC旋盤に装着した工作物S45Cの丸棒の長手方向に、主軸を停止させた状態で半導体レーザを連続照射して選択的 (直線状) に熱処理を行った後、続けて乾式旋削を行っている。なお、工作物の中央には切削終了時に切込みが増加して工具が損傷するのを防ぐために幅5mm程度の溝をつけている。このような工作物への選択的熱処理の影響を、切りくず形態、切りくず厚さ、切削温度および仕上げ面粗さについて、レーザ熱処理なしの工作物と比較しながら評価している。

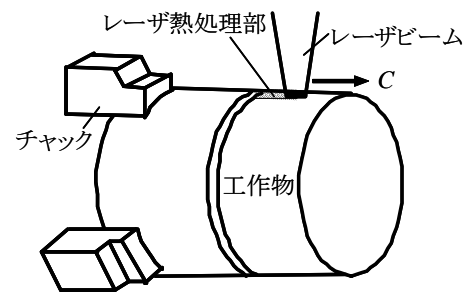


(a) 切削工具の外観

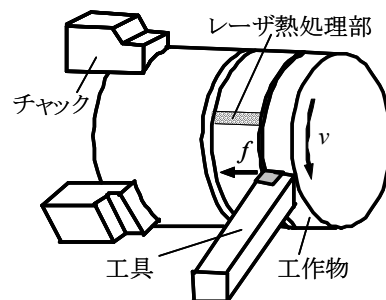


(b) ブレードカピースの形状

図2 切削工具とブレードカピースの装着形態



(a) 机上レーザ熱処理方法



(b) 切削加工実験

図3 切削実験方法

切削温度の測定は工具-工作物熱電対法により行った。なお、熱起電力と温度の関係は、工具および工作物の接点を窒素ガス雰囲気中で加熱して実測して求めている⁸⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 半導体レーザによる炭素鋼の熱処理特性

図4に半導体レーザを照射した炭素鋼S45Cの断面の組織写真を示す。写真はレーザ走査方向と垂直な面を示しており、ナイトル溶液により腐食後のものである。図にみるように、母材である初析フェライト・パーライト組織の中に半円状に色に変化した部分が確認できる。ピッカース硬さを測定したところ、図に記したように、変色部分の硬度は明らかに母材の領域と比べ高いことがわかった。半円状に変色した部分の中で表層に近いところにはマルテンサイト組織がみられ、硬度も最大で

600HV程度に達している. これにより, レーザ照射により工作物を部分的に硬化することが可能であることが確認できる.

3. 2 切りくず折断性への影響

本研究では切りくず折断を目的として工作物表面に硬化(脆化)層を生成するが, 仕上げ面にはその影響がでてはならない. したがって, 切込み d は硬化深さ D 以上にする必要がある(図4参照). これまでの実験より, D が d の50%以下になると切りくず折断性が急激に低下するため, 本実験では $d=0.4\text{ mm}$ と一定とし, 切削速度と送りを変化させている.

図5に超硬P30種工具を用いて炭素鋼を旋削したときの切り

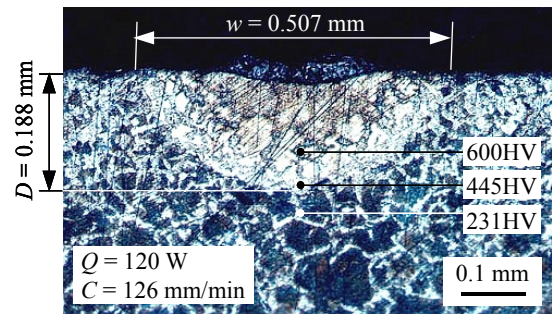


図4 レーザ熱処理されたS45Cの断面組織

| 超硬P30種工具 | | | | | | | | |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $f \backslash v$ | レーザー熱処理なし | | | | レーザー熱処理あり | | | |
| | 100 m/min | 150 m/min | 200 m/min | 250 m/min | 100 m/min | 150 m/min | 200 m/min | 250 m/min |
| 0.1 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.125 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.15 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.175 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.2 mm/rev | | | | | | | | |

図5 超硬P30種工具で切削したときの切りくず形態(折断された切りくずは塗りつぶした枠内に表示)

| Al ₂ O ₃ -TiC系セラミック工具 | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $f \backslash v$ | レーザー熱処理なし | | | | レーザー熱処理あり | | | |
| | 100 m/min | 150 m/min | 200 m/min | 250 m/min | 100 m/min | 150 m/min | 200 m/min | 250 m/min |
| 0.1 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.125 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.15 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.175 mm/rev | | | | | | | | |
| 0.2 mm/rev | | | | | | | | |

図6 Al₂O₃-TiC系セラミック工具で切削したときの切りくず形態(折断された切りくずは塗りつぶした枠内に表示)

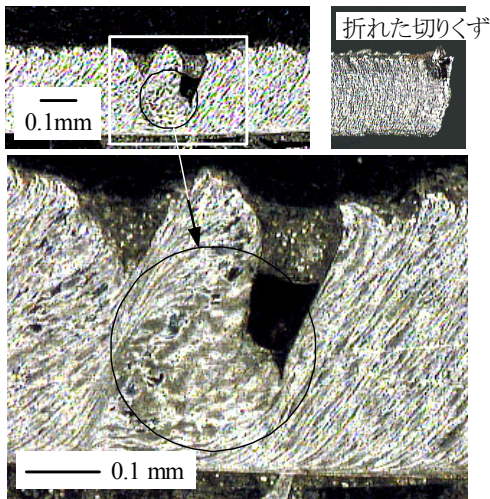


図7 切りくず断面におけるレーザー熱処理組織

くず形態を示す。すべての実験でプレーカピースを用いているが、レーザー熱処理を行っていない炭素鋼を切削した場合、送り速度が小さくなると切りくずが折断されにくくなり、切削速度が高いほどこの傾向が強い。切削速度 $v=250\text{m/min}$ では、送り速度を 0.175mm/rev 以上に設定しないと切りくずを折断できないことがわかる。一方、レーザー熱処理を施した炭素鋼を切削すると、切削速度が高く、送りが小さい条件では多少つながった切りくずが生成されるが、すべての切削条件において切りくずを適度な長さで折断できている。また、レーザー熱処理を施した方が切りくずのカール半径が小さく、規則性のある螺旋形状の切りくず形態を示している。

図6にアルミナ-炭化チタン系セラミック工具を用いて炭素鋼を旋削したときの切りくず形態を示す。レーザー熱処理を行っていない炭素鋼を切削すると、超硬P30種工具の場合と同様に高切削速度、低送りで切りくずが折断されにくく、この傾向が超硬工具より強く現われている。これに対し、レーザー熱処理を施した炭素鋼を切削する場合、切削速度が高く送りが小さい条件では切りくずを折断することはできなかったが、送りを 0.2mm/rev と比較的大きくすると、切削速度 250m/min においても切りくずをほぼ同じ長さで折断できることがわかる。

図7にレーザー熱処理を施された部分を切削したときの切りくず断面を示す。炭素鋼を切削したときにみられる典型的な流れ型切りくずの中に、一部不連続となっている部分がみられる。この部分を拡大して観察すると、図4の組織写真にみられるレーザー熱処理部の変質層と似た組織であることがわかる。したがって、レーザー熱処理により工作物の硬度が高くなった部分を切削するとき流れ型切りくずの生成が一時的に中断され、焼入鋼を切削したときに見られる鋸刃状切りくずに似た形態が部分的に生成されたと考えられる。折れた切りくずを同時に示しているが、折断部が変質していることが確認できる。

ここで、炭素鋼の旋削加工における切りくず折断のメカニズムを考察する。レーザー熱処理によって母材よりも硬度が高く脆性が増加した部分を切削すると、流れ型切りくずの生成が一時的に中断され切りくずは部分的に鋸歯状に似た形態となるとともに、切りくずのカール半径が小さくなることで切りくずに

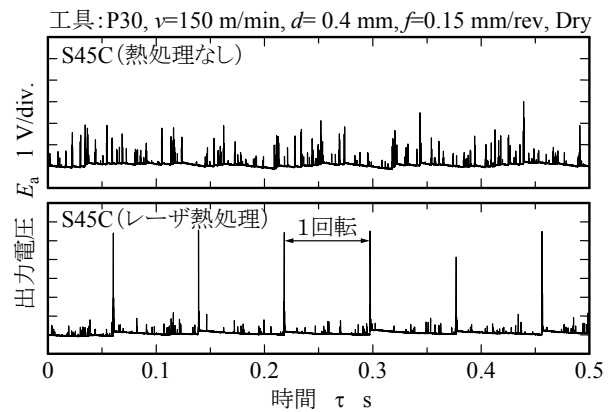


図8 工具ホルダに固定した加速度ピックアップの出力波形

ひずみが生じる。このような状況の下、ある程度の長さまで連続した切りくずが生成されると、切りくずの自重および横向きカールによる回転運動により鋸歯状の破断ひずみ強度が小さい部分で折断されたと考えられる。

3.3 切削特性へ及ぼす影響

前節では切りくずの折断性の観点から被削性を評価してきた。本節では、レーザー熱処理が切削特性、ひいては仕上げ面粗さに及ぼす影響について検討を加える。図8は周期的に硬化した工作物を切削したときの状態をみるため、工具ホルダに取り付けた加速度ピックアップからの出力波形を示す。図8(a)にみるように、レーザー熱処理を施していない炭素鋼を切削した場合には常に不規則な波形が出力されているが、レーザー熱処理を施した炭素鋼では工作物が1回転する毎に(およそ90ms)パルス状の出力がでていくことがわかる(図8(b))。この断続的なパルスはレーザー熱処理部を工具刃先が通過するとき生じる微小な振動によるものと考えられる。また、このパルスを除いた部分の出力はレーザー熱処理を施していない場合と比べると小さく、安定した切削になっていると思われる。

図9に旋削加工後の工作物長手方向に測定した仕上げ面粗さ(最大高さ粗さ R_z)を示す。いずれも10回測定した平均値である。レーザー熱処理の有無に関わらず、切削速度の上昇にともなって粗さが減少する傾向がみられる。また、超硬P30種工具を用いて切削した場合の方がセラミック工具を用いて切削した場合より切削速度の変化にともなう粗さの変化が大きく、すべての切削速度において超硬P30種工具よりアルミナ-炭化チタン系セラミック工具を用いた方が粗さが小さくなっていることがわかる。注目すべきは、レーザー熱処理を施した炭素鋼を切削した場合の方がレーザー熱処理を施していない場合と比べ若干小さい粗さを示すことである。

図10に旋削加工後の仕上げ面の送り方向についての断面プロファイルを示す。レーザー熱処理を施していない場合、ピーク部、谷部ともに高さが一定ではないことがわかる。一方、レーザー熱処理を施すとピーク部と谷部の高さがほぼ一定の値を示しており、工具の形状が規則的に転写されたことがわかる。

このように、レーザー熱処理によって工具形状の仕上げ面プロファイルへの転写精度が改善され、仕上げ面粗さが小さくなる理由として以下のことが考えられる。図8より、レーザー熱処

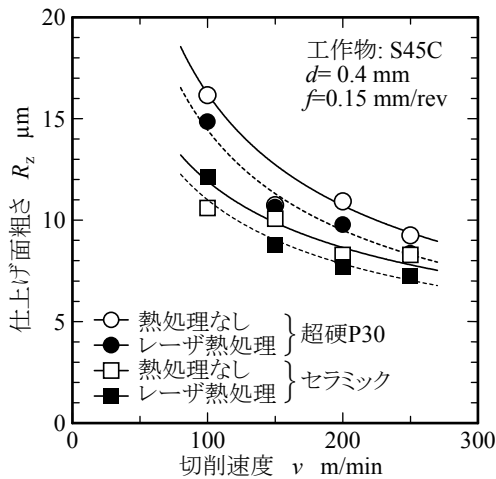


図9 旋削加工後の仕上げ面粗さ

理した工作物を切削した場合、熱影響部を除いた部分では明らかに工具ホルダの振動が小さくなっていることから、熱影響部を切削するとき生じるインパルスの微小な衝撃により、工具すくい面、稜線部における凝着物が減少したものと推察される。なお、形状精度への影響は今後の課題である。

図11に切削温度と切りくずの厚さの関係を示す。切削温度は切削速度の増加にともなって上昇していることから、切りくずの厚さは切削温度の増加とともに減少していることになる。一般に、薄い切りくずほど折断するのが難しいとされており、これがアルミナ-炭化チタン系セラミック工具で切りくずが折断されにくい要因と思われる。すなわち、同じ切削速度ではアルミナ-炭化チタン系セラミック工具で切削する方が超硬P30種工具で切削した場合より切削温度が上昇するとともに、超硬P30種工具と比べ炭素鋼に対する親和性が低いことから切りくずが薄くなり、切りくずの折断が困難となると考えられる。

4. 結論

実用的な見地から小型の半導体レーザをCNC旋盤の刃物台に設置し、機上にて工作物S45Cの長手方向にレーザを照射するシステムを構築した。そして、レーザ熱処理が切りくず処理性や仕上げ面粗さへ及ぼす影響について、超硬P30種工具およびアルミナ-炭化チタン系セラミック工具を用いた旋削加工において検討した。以下に結果を示す。

- (1) 小型の半導体レーザをCNC旋盤に設置することによって、機上にて工作物S45Cの選択的な熱処理が可能である。
- (2) レーザ熱処理部は硬化・脆化するため、工作物の長手方向にレーザを走査して直線状に熱処理を行うことで、切りくずの折断性を改善することができる。
- (3) 超硬P30種工具と比べアルミナ-炭化チタン系セラミック工具で切削した場合切りくずが薄く折断されにくい。これは、後方で切削する方が切削温度が高く、また、炭素鋼に対する親和性が低いことが挙げられる。
- (4) レーザ熱処理した炭素鋼を切削した場合、未処理の場合と比べて若干仕上げ面粗さが小さくなる。これは、レ

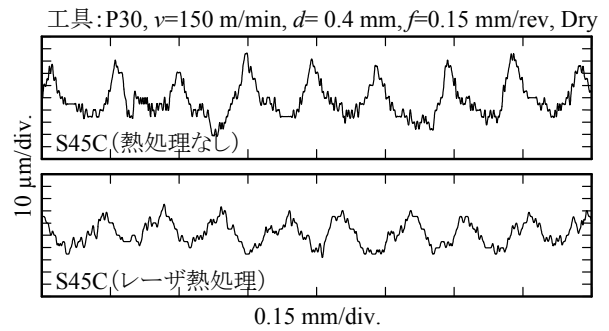


図10 仕上げ面長手方向断面プロフィール

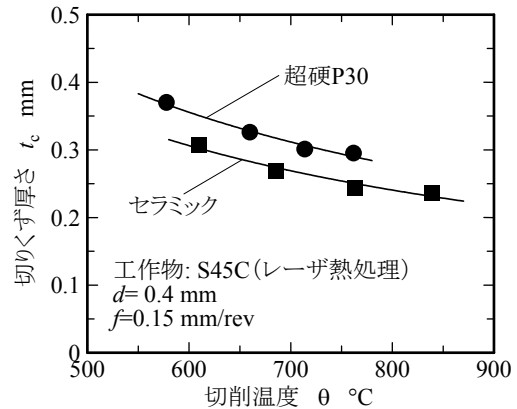


図11 切削温度と切りくず厚さの関係

ーザ熱影響部を切削するとき生じる微小な振動により、工具切れ刃部の凝着物が少なくなることが一因と考えられる。

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。

5. 参考文献

- 1) K. Okushima and K. Iwata: Machinability of Metals —Chip Formation of Lead Steels, Bull. JSME., 28, 187 (1962) 404 (in Japanese).
- 2) K. Nakayama and K. Uehara: Mechanical Machining, Asakura Publishing Co., Ltd., (1983) 93 (in Japanese).
- 3) K. Nakayama, Z. Li and M. Arai: Performance of the Chip-breaker of cutting Tool (1st Report) —Range of Cutting Conditions for Breaking, J. Japan. Soc. Prec. Eng. 52, 12 (1986) 2120 (in Japanese).
- 4) M. ARAI: Fundamental of Chip Controllability and Applications, N. K. Industrial Newspaper Publishing Company, (1990) 110 (in Japanese).
- 5) K. Nakayama and K. Uehara: Machining, A. K. Bookshop, (1997) 89 (in Japanese).
- 6) I. S. Jawahir and C. A. van Luttervelt: Recent Developments in Chip Control Research and Applications, Ann. CIRP, 42, 2 (1993) 659.
- 7) M. Arai: Study on Chip Control in Metal Cutting —On the Natural Curl Radius and the Optimum Chip Breaker, Trans. Jpn. Soc. Precision Eng., 68, 7 (2002) 933 (in Japanese).
- 8) R. Tanaka, Y. Lin, K. Tanabe, T. Ueda and A. Hosokawa: Fundamental Study on Improvement of Chip Controllability in Turning with Laser Heat Treatment, Trans. Jpn. Soc. Precision Eng., 73, 9 (2007) 1025 (in Japanese).
- 9) T. Miyaki, H. Miyazaki, M. Murakawa and T. Yosioka: Laser processing technique, S. G. Books, (1991) 18 (in Japanese).