

Development of In-Situ Heat Treatment Method by Laser Heat Source with a Turning Center

Yohei SHINKAI*, Masaki KONDO**, Toshiki HIROGAKI*** and Eiichi AOYAMA⁺

(Received July 6, 2017)

In the present report, we propose a novel in-situ heat treatment method by laser heat source with a turning center, which is a kind of multi-functional CNC machine tool. First, we investigate to select a suitable laser heat source and a turning center. Second, we develop novel proper equipments to keep a safe condition in a manufacturing factory. Finally, we attempt to perform some laser cutting and laser quenching methods in-situ conditions. As a result, a proposed method is found to be effective to perform a laser cutting and laser heat treatment, and we demonstrate an adequate quenching condition with this technology.

Key words : in-situ heat treatment, laser, machine tool, turning center, hardening

キーワード:機上熱処理, レーザ, 工作機械, ターニングセンタ, 焼入れ

ターニングセンタにおけるレーザ熱源による機上焼入れ法の開発

新海洋平, 近藤昌樹, 廣垣俊樹, 青山栄一

1. 緒言

工作機械は1950年代の3軸直交のフライス盤の直進運動軸のNC化を源流とした切削加工の自動化から, さらに高速・高精度化が進み工程分散を基本とするフレキシブルトランスファーラインを支える中心的な機械(マザーマシン)となった。さらに近年, 旋回運動軸を含めた5軸以上の多軸制御の技術が発展し, その多機能性より工程集約を基本とするフレキシブル生産システムを構築するための中心的な機械にもなりつつある。すなわちフライス盤をベースにNC化し, さらに工具交換の自動化を具備したマシニングセンタにおいては, エンドミル加工, ドリル加工, タップ加工, などの回転工具を用いた機械

加工の工程集約がなされてきた。さらにグライインディングセンタでは, それらの後工程である研削加工の工程集約も進められてきた。その一方, 工作機械の多機能化に関する研究は1990年代に検討が開始され, 超多機能工作機械に求められる仕様が提案¹⁾されている。その成果においては, これら機械加工だけでなく, さらにその前後の工程となる熱処理や放電加工等に対する工程集約のニーズも高く, その中でも熱処理工程に対する要望が多いことが示されている。

しかしながら, 熱処理には加熱炉や冷却液などが必要であり, 工作機械の機上に工程集約するには課題が山積していた。そこでレーザ熱源が着目されていたが, 1990

* DMG Mori Co. Ltd, Nara
Telephone/Fax: +81-743-53-1123, E-mail: shinkai@dmgmori.co.jp

** DMG Mori Co. Ltd, Mie
Telephone/Fax: +81-743-53-1123, E-mail: ms-kondo@dmgmori.co.jp

*** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

+ Department of Energy and Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

年代以前には金属熱処理の用途に必要な出力を有するレーザー熱源は炭酸ガスレーザーのみであり、その扱いの難しさから工作機械の機上熱処理の熱源として利用されるに至らなかった。

その中で著者らの先行研究²⁾では、1990年代に高出力化が進んだYAGレーザー熱源に着目したマシニングセンタにおける機上熱処理の研究開発を進め、次世代の工程集約技術としての可能性を示してきた。一方で、旋盤をベースにNC化し、さらに自動工具交換だけでなく回転工具も具備することで旋削加工からエンドミル加工、ドリル加工、タップ加工、などを工程集約できるターニングセンタと称される複合加工機が開発され、近年のフレキシブル生産システムにおいてマシニングセンタと両輪のレーザーマシンとなってきている。近年のレーザー熱源に着目すると、YAGレーザーに比べレーザービーム品質が良好でかつコストパフォーマンスにも優れたファイバーレーザーも開発されてきており、工作機械の機上焼入れ用のレーザー熱源として有望と考えられる。そこで本報では、工作機械にファイバーレーザー熱源を具備した超多機能・工程集約型の次世代のターニングセンタを提案し、その可能性を考察する。

2. 先行研究と提案する機上焼入れ方法

2.1 レーザー熱源と焼入れ技術

金属材料の熱処理を遂行するためには、レーザー集光系によって若干異なるが、一般に数十W以上のレーザーの連続発信での出力が必要となる。レーザー焼入れに関する日本における基礎研究は1970年代に波長が $10\mu\text{m}$ 程度の炭酸ガスレーザーを用いて開始³⁾され、その頃にはアメリカのGM社で専用ラインにおいての実用化⁴⁾がなされている。炭酸ガスレーザーの波長帯では、鋼の機械加工面に対するビーム吸収率が数%程度であり、一般に対象面にレーザー吸収剤を塗布した後にレーザー熱処理がなされていた。したがって吸収剤の塗布工程や洗浄工程が必要となった。さらにビームの伝送はミラー反射が主体となるため、工作機械の機上への伝送も極めて困難な状態であり、いわゆる工程集約には適さないレーザー熱源であった。

1990年代に波長帯が $1\mu\text{m}$ 程度であり、光ファイバー伝送も可能なYAGレーザーの高出力化が進んだ。そこで著者の先行研究では、Fig. 1に示すように連続発信300W

級のYAGレーザー（集光スポット直径1.4~2mm）を汎用3軸制御マシニングセンタの機上に導入する機上焼入れ法を提案した。ベース機となるマシニングセンタの可動範囲は $400\times 400\times 600\text{mm}$ 、主軸はテーパNC5の最大回転数2万rpmである。さらにYAGレーザーの波長帯では、鋼の機械加工面に対するビーム吸収率が35%程度にも達し、対象面にレーザー吸収剤を塗布することなく走査速度300~4000mm/minにおいて機上でレーザー焼入れが可能であることを示した。

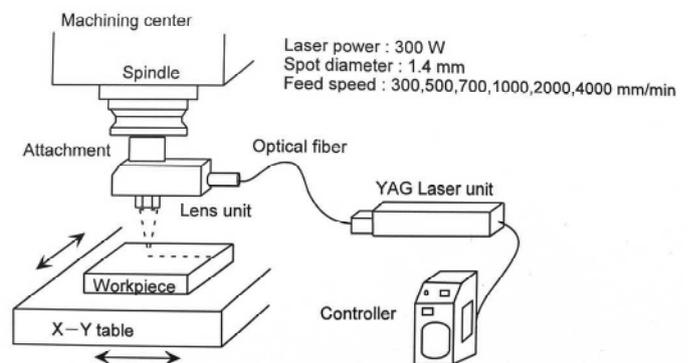


Fig. 1. In-situ laser quenching system with a machining centers.

2.2 提案するターニングセンタのベース機

本報では、ターニングセンタとしてチャックサイズ150mm（6インチ）~600mm（24インチ）を想定し、ベッド長さは500mm~3000mm、旋削機能の他、ミーリング機能、Y軸機能、心押し台に代わる第2主軸台機能を選択可能とする機種とした。さらにFig. 2に示すように、ミーリング主軸モータを刃物台に内蔵し、モータとミーリング工具をダイレクトに連結駆動が可能なビルトインモータ・タレットを有する機種を選定した。Fig. 3に

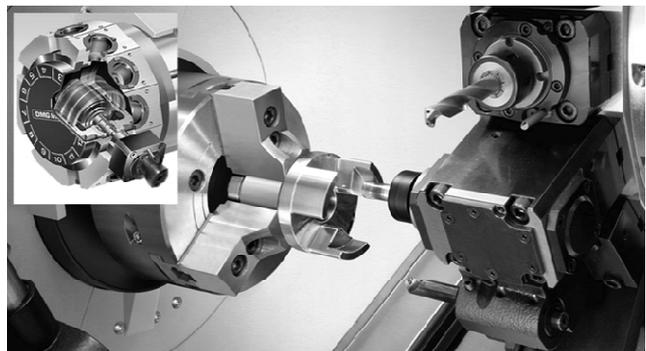


Fig. 2. Functions in turning center.



Fig. 3. Basic turning center for in-situ quenching system.



Fig. 4. Machined gear blank with a turning center.

対象機の中型（チャックサイズ 250mm）の例を示す。多品種少量生産に対応した最新の多機能工作機械であり、Fig. 4 に示すギヤ加工やホブ加工、さらにスカイピング加工などの機能も具備するものである。

2.3 提案するターニングセンタの機上レーザ熱源

近年、YAG レーザと同等の波長帯でビーム品質およびコストパフォーマンスに優れたファイバーレーザが着目されてきている。そこで本機においては連続発信 300W ファイバーレーザを機上熱源として採用した。レーザ熱源の搭載の様子を Fig. 5 に示す。最小スポット直径は $75\mu\text{m}$ で、波長は 1070nm である。

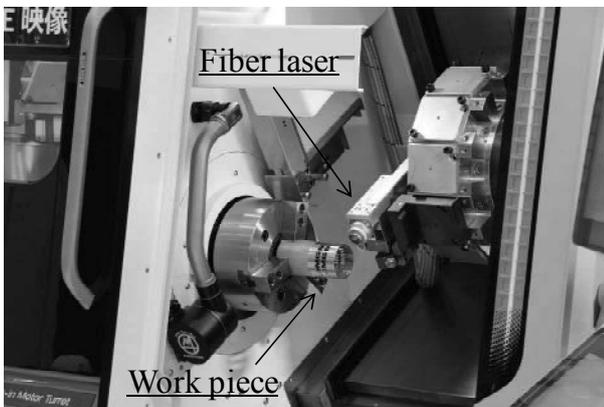


Fig. 5. Experimental setup with a fiber laser heat source.

2.4 機上レーザ加工に対する安全対策

対象としたターニングセンタにおいては、日本のレーザ製品の安全規格 JIS-C-6802, 労働安全衛生法第 22 における事業者の講ずべき措置等, 欧州のレーザ製品の安全規格 EN60825-1, 保護筐体に関する安全規格 EN60825-4, レーザガードの安全規格 EN207, アメリカのレーザ製品の安全規格 FDA-CDRH-21CFR-J-1040.10, 国際規格としてのレーザ製品の安全規格 IEC60825-1, 保護筐体に関する安全規格 IEC60825-4, レーザ製品の安全に関する一般要求事項 ISO11553-1, を遵守した仕様を開発した。機械の外周における主な仕様を Fig. 6 に、レーザ光源周辺の機内の主な仕様を Fig. 7 に示す。レーザ光の漏れもないように機内を十分な強度を有する鋼版カバーで完全に保護し、加工点の様子は機内のカメラの信号を操作者にモニターで表示する方式とした。また加工で生じるヒュームやガスはコレクターで完全に吸引した。さらにアシストガスや加工ガスなどが機内に充満するため、酸素濃度計を設置して酸素濃度が安全条件を満たさなければドアが開かない仕組みとして、工場現場における酸欠に対する対策も施してある。

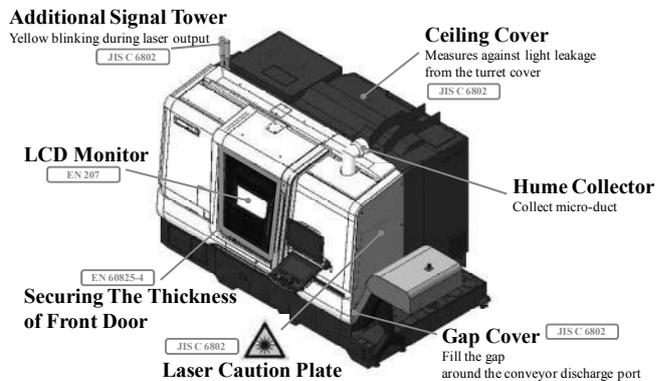


Fig. 6. Developed outer equipments in for safety.

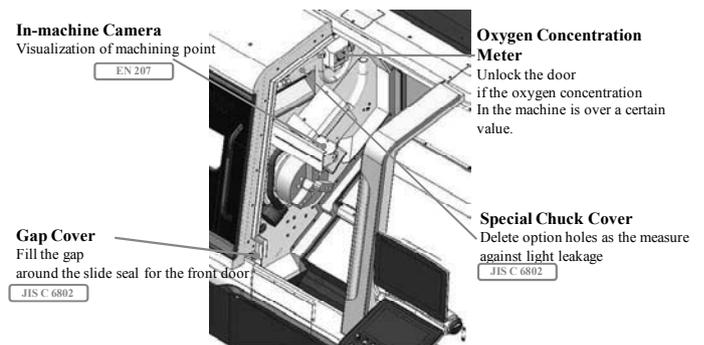


Fig. 7. Developed inner equipments in for safety.

3. 実験結果および考察

3.1 ファイバーレーザー熱源の出力の確認

工業用のレーザー熱源としての出力、さらに加工面にレーザー吸収剤を塗布しない条件における加工性を確認するため、Fig. 8に示すようにファイバーレーザーを用いて円筒鋼材（板厚4mm，送り速度1125mm/min，アシストガス：窒素）の切断加工を遂行した。一般に、切断、溶接、熱処理の順に照射面に対して高いエネルギー密度が求められる。用いたファイバーレーザーはガウスモードの高品質なレーザー光であるため、容易に集光することが可能であり、図に示されるように切断加工にも対応可能な十分なエネルギー密度が確保されていることが示された。



Fig. 8. Cutting performance with a fiber laser.

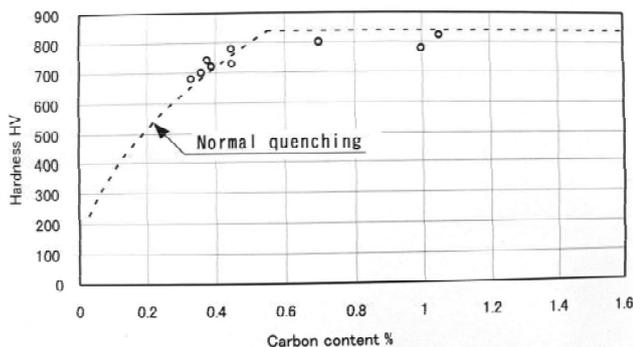


Fig. 9. Influence of carbon content on quenched hardness.

3.2 レーザ焼入れ対象材の検討の結果

ターニングセンタで機上焼入れの工程集約に取り組むが、対象物は多品種少量生産を基本とする場合が多いものと考えられる。しかしながら、従来のレーザー焼入れ

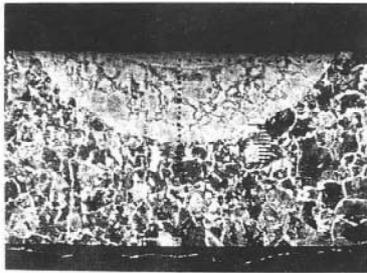
に関する研究は、S55C（中炭素）程度の一般構造用炭素鋼を対象とした場合が大半である。そこで提案する手法の対象材の適用範囲を明確化するため、各種の鋼材に対するレーザー焼入れ特性についての知見を深めておくこととする。対象とする鋼材は、JISのS45C, SKD61, SNCM439, SUS420J2, SKS93, SUJ3, さらに日立金属製HMD1, HMD5, 大同特殊鋼SKD61 プリハードン鋼である。スポット直径1.4mm, レーザ走査速度700mmで焼入れして、その表面のビッカース硬さを調べ、それぞれの材料の炭素含有量との関係を調べた。

その結果をFig. 9に示す。図中の破線は、一般炉において焼入れした場合の焼入れ硬さの目安を示す。レーザー焼入れにおいても、炭素量が焼入れ硬さの目安になることがわかる。その一方で、炭素量が0.5%未満の鋼材においてレーザー焼入れを用いた方が若干であるが高い硬さを示すことがわかる。この理由は、一般にレーザー焼入れは自己冷却を基本とした急速冷却であるため、冷却速度の効果が顕著になったものと考えられる。対象部品が小型であったり、対象形状の熱容量が小さな箇所においては自己冷却の速度の低下が予想され、そのような場合には逆に焼入れ硬さが低下する可能性も高いことがわかる。炭素量が0.5%以上の鋼材においてはレーザー焼入れを用いた方が若干であるが目安より低い硬さを示すことがわかる。この理由は、内部にある程度の焼入れ深さを確保するためには表面付近がどうしても高温となるため、若干の残留オーステナイトが生じるためと考えられる。したがって、焼入れ後に残留オーステナイトが生じやすい高炭素な合金鋼などを対象とする場合には、十分な焼入れ硬さが確保できない可能性があることがわかる。

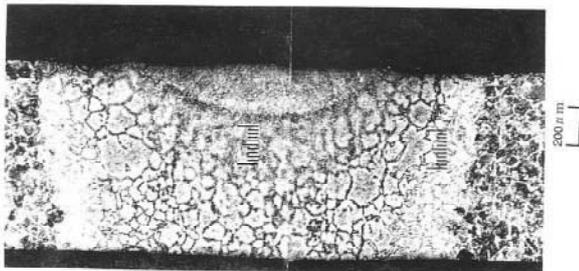
3.3 対象材の熱容量と焼入れ硬さの関係

Fig. 10(a) (b)はS45Cの板厚1.0mmの対象材に対して、出力300Wでレーザースポット径1.4mmで波長1 μ m程度のレーザーで焼入れ処理を遂行した後の断面写真（1%ナイトル液にて腐食）である。Fig. 10(a)では送り速度が速いため板厚方向の熱容量が確保されており、十分な自己冷却がなされ焼入れ部の硬さは700~800Hv程度を示していた。その一方でFig. 10(b)では板厚に対する送り速度が遅くマルテンサイト変態の範囲が全厚にまで拡大している。しかしながら、その場合には板厚方向の自己冷

却のための熱容量が不足して、冷却速度が低下するため焼入れ部の硬さは600Hv程度に低下していた。すなわち前節でも述べたように、レーザ焼入れは自己冷却を基本とするため、その性能は対象部の熱容量による影響が大きいことが示された。したがって、レーザ焼入れにおいては、その熱容量と自己冷却速度の確保を考慮した出力と走査速度が重要になることがわかった。



(a) Feed speed 1000 mm/min.



(b) Feed speed 300 mm/min.

Fig. 10. Section of hardened steel.

3.4 重ねレーザ焼入れ時に生じる現象

広範囲にレーザ焼入れを施す場合、レーザ光を重ねながら照射する走査が必要となる。Fig. 11の右側から順にレーザを3回照射(対象材はS45C、送り速度は700mm/min)した後の断面写真と表面の硬さの関係を示す。レーザの照射の重ね率はスポット直径の50%としている。

Fig. 11中の断面写真より、右側の2本(1回目、2回目の照射)の照射断面は左の最後の1本(3回目の照射)の照射断より少し黒い色を示している。マルテンサイト化された組織は耐食性が高く、写真では白く写る。右側の2本の断面はその左側のレーザ照射時の再加熱により焼戻し現象が生じ、ツールスタイトやソルバイトが生じているものと考えられる。したがって、その境界付近の硬さも400Hv程度にまで低下している様子がわかる。

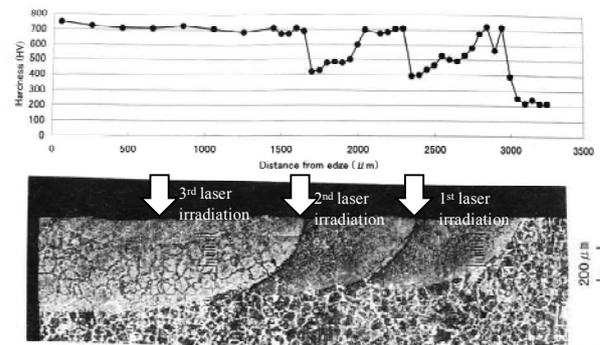


Fig. 11. Section of hardened steel after multi irradiation (S45C).

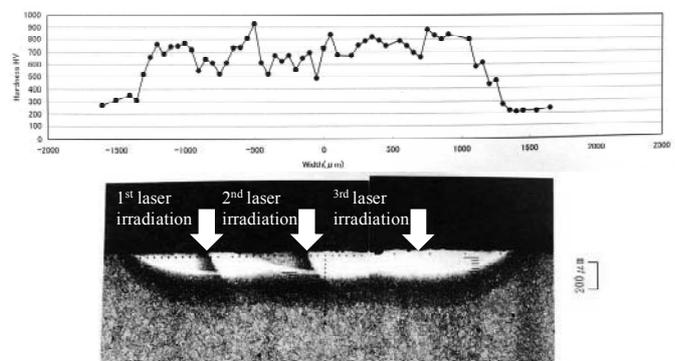


Fig. 12. Section of hardened steel after multi irradiation (SKD61).

すなわち、焼戻し軟化抵抗が低い鋼材においては、重ね照射による再加熱の影響を受けやすく、均一な硬さの焼入れ表面を達成するのが難しいことがわかった。

3.5 焼戻し軟化抵抗と重ねレーザ焼入れ

焼戻し軟化抵抗が高い熱間合金工具鋼のSKD61に対して、Fig. 12は左側から順にレーザを3回照射(送り速度は700mm/min)した後の断面写真と表面の硬さの関係を示す。レーザの照射の重ね率はスポット直径の50%である。

Fig. 11に比べると、Fig. 12における焼入れ分の断面写真はほぼ均一に白く写っている。さらに硬さの分布も、最後の照射をした右側の1本(3回目の照射)では硬さ700~800Hvを示し、再加熱の影響を受けるその左側(1回目、2回目の照射)でも硬さ700Hv程度を維持している様子がわかる。したがって重ね焼入れが必要な場合には、焼戻し軟化抵抗の高い材料を選定すると均一な焼入れ硬さを維持できることがわかった。

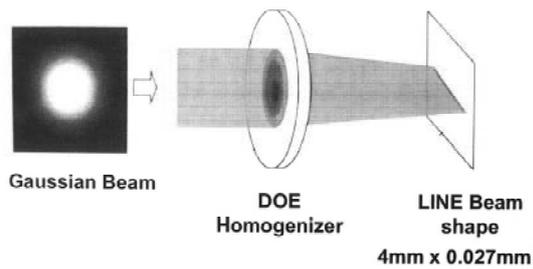


Fig. 14. Line laser beam by homogenizer.

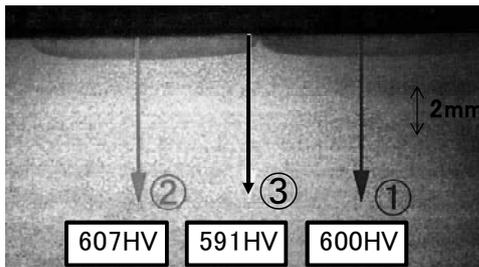


Fig. 15. Section of hardened steel after line beam irradiation.

3.6 ラインビームによる重ねレーザー焼入れ

3.4 節に示すように、レーザー照射部のビーム形状がスポット円であるような場合は重ね焼入れ時にその周辺の前処理部を再加熱する時間が長く、焼戻し作用が生じることが判明した。その影響を避けるために、Fig. 11 に示すようにホモジナイザにより照射部のビーム形状をライン状にする手法を検討した。ビームサイズを $4\text{mm} \times 0.027\text{mm}$ にして、オーバーラップ幅 $50\mu\text{m}$ でレーザーの重ね焼入れを施した例を Fig. 12 に示す。図中の①～③はその表面の硬さを示す。Fig. 12 より、硬さの変動は $590\text{HV} \sim 610\text{HV}$ 程度になり、ほぼ均一な焼入れ硬さを維持できていることがわかる。

4. 結言

ターニングセンタに波長 $1\mu\text{m}$ 程度のレーザーを搭載する実用的な機上熱処理システムを提案し、現場で使いやすい安全装置の検討、さらに機上焼入れの対象材やレーザービーム形状に対する指針を示すことができた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 日本、欧州、北米のレーザーの安全基準をクリアできる、現場でも使い勝手の良いターニングセンタの安全装置を開発することができた。
- (2) ファイバーレーザーを用いることで、工作物の表面にレーザー吸収剤を塗布することなく、機上で十分なレーザー

切断、レーザー焼入れが可能であることを示した。

(3) 多品種少量生産に対応するため、各種の鋼材に対する焼入れ硬さの目安を示すことができた。炭素含有量が 0.5% 以下の中炭素鋼材では一般の炉熱処理より若干高い硬さとなり、逆に高炭素・合金鋼では若干低い硬さとなる。

(4) 自己冷却を基本とするため、対象の熱容量により焼入れ硬さが変化することが示され、レーザー照射条件の設定における検討事項となる。特に炭素含有量が 0.5% 以下の中炭素鋼材で、その影響が顕著である。

(5) 広範囲の表面焼入れにおいて複数回のレーザー照射を必要とするが、円状ビームを用いたその場合には後工程のレーザー照射による入熱で焼戻しを生じ、硬さの低下が見られる。

(6) 複数回のレーザー照射により生じる硬さの低下の抑制には、焼戻し軟化抵抗が高い合金工具鋼が有効である。

(7) ライン状ビームを用いる複数回の重ねレーザー焼入れの手法は、照射時の周辺への再加熱の時間を抑制することができ、処理面の硬さの変動の抑制に有効である。

参考文献

- 1) 杉村延広, 上野滋, 三島望, 八賀聡一, “超多機能工作機械の設計と評価に関する研究 (要求仕様分析と設計)”, 日本機械学会論文集, **62C**[595],1133-1138 (1996).
- 2) 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 (各種金型鋼の焼入れ特性)”, 精密工学会誌, **66**[5],704-708 (2000).
- 3) 荒田吉明, 宮本勇, 山田猛, “大出力炭酸ガスレーザーの熱源的な研究 (第2報) 金属材料による炭酸ガスレーザービームの吸収特性”, 溶接学会誌, **40**[12],1249-1260 (1970).
- 4) 久田秀夫, “レーザー焼入れ技術”, 実務表面技術, **29**[4], 170-176 (1982).