小出力レーザによる機上焼入れに関する研究*

喜田義宏** 藤川 泰*** 廣垣俊樹† 中川平三郎† 垣野義昭†† 山路伊和夫†††

Heat Treatment Using Small Power Laser on-the-Machine Tool

Yoshihiro KITA, Yasusi FUJIKAWA, Toshiki HIROGAKI, Heisaburo NAKAGAWA, Yoshiaki KAKINO and Iwao YAMAJI

This study describes laser heat treatment of die steels using YAG laser on-the-machine tool. An optical fiber has been used in order to transmit the laser light from a source to workpieces at this system. At first, the temperatures based on a theoretical model during laser irradiation were estimated in order to predict the hardened range of workpieces. Second, experiments of laser heat treatment were carried out for various die steels in order to grasp the relationship between the hardened depth and irradiation conditions. Finally, a method to repeat laser irradiation at the same area was proposed to increase the hardened depth. As a result, the detail of the hardened depth for various die steels becomes clear under various laser irradiation conditions. It is found that this heat treatment of die steels with YAG laser on-the-machine tool is an effective method.

Key words: YAG laser, quenching, machining center, heat treatment, optical fiber, on-the-machine tool, die steel

1. 緒 言

近年、製品の多様化に伴い、複雑な形状物が多く見られる。それに伴い、複雑な形状部品を製造するための金型製作や、機械加工技術の向上が必要である。ところで、これらの複雑な形状物の金型や機械部品には、耐摩耗性を向上させるために部分熱処理を行うことが望ましいとされる部品が多く存在している。これらの部品に対しては、従来の熱処理工程を入れることが、コスト、リードタイムおよび精度の確保の点などで不利となっている。したがって、部分熱処理は工程集約型の多機能工作機械に今後求められる最大の機能である¹⁾。すなわち、工作機械上に工作物を取り付けたまま機上（オン・ザ・マシン）で、その工程中に部分焼入れを行うことが可能となれば、焼入れ作業の大幅な省力化と製品の精度向上が期待できる。

そこでレーザ焼入れ法が着目されるが、レーザ焼入れを実用化した報告例は少なく、またその大部分は炭酸ガスレーザを用いたものである²⁾。また、炭酸ガスレーザを用いた熱処理は、専用加工機となる場合が多い。その理由として、発振器からレーザ光を光学ミラー系で伝送する必要があり、その光軸調整等の管理が難しい。さらに、炭酸ガスレーザは金属表面に大部分が反射されてしまうため、安定した焼入れを行うために、吸収剤を工作物表面に塗布する必要がある。しかしながら、吸収剤の管理や塗布厚さの均一性確保が難しいことなどが考えられる。一方、YAGレーザは光ファイバーによる伝送が可能のため、機上への導光が容易である。さらに、金属表面への吸収率も比較的良好であるため、工作物表面への吸収剤の塗布も必要ないものと考えられる。

そこで本研究では、マシニングセンタの主軸ヘッドに光ファイバを保持することによる YAG レーザを用いた機上焼入れ技術の確立を目的とした。しかしながら、YAG レーザを用いた熱処理に関する研究は極めて少ない³⁾のが現状である。レーザ

焼入れ法では、材料の基地組織、熱物性、レーザ照射条件により、焼入れ後の硬化層に大きな差を生じることが予想される。また、熱拡散による焼入れであるため硬化領域の大きさにも限界がある。そこで、本報では金型加工への適応を想定し、各種金型用の合金工具鋼に対して基礎的な焼入れ条件、および硬化層の拡大方法の検討を行ったので結果⁴⁾⁵⁾を報告する。

2. 機上焼入れへの適用性

2.1 小出力レーザによる焼入れ条件の推定

レーザ焼入れは急速加熱・冷却による焼入れ法であるため、焼入れ過程の現象を逐次とらえるのは非常に難しく、それらに関する研究³⁾⁶⁾⁷⁾は始められているが、まだまだ研究報告が少ないのが現状である。そのため、焼入れ条件は実験的に求めるのが一般的である。

しかしながら、機上焼入れを行うにあたり、要求に応じた硬化層を得るために、適切なレーザ照射条件を選定する必要があるが、YAG レーザを用いて吸収剤を塗布しない条件での焼入れの可否に関するデータはほとんど存在しない。そこで、レーザ照射条件と焼入れ温度、硬化層の関係をある程度推定しておくため、予想される温度を理論的に算出した。

レーザ焼入れによる研究はすでにいくつか報告されており、ガウス型強度分布をした熱源が x 軸に沿って半無限体表面を速度 v で移動するモデルで、熱源中心を原点とし、深さ方向 z の温度分布 T_v は、次の理論式として得られている⁸⁾⁹⁾。

$$T_v = \frac{2a^{0.5}\epsilon P}{\pi^{1.5}\lambda} \int_0^\infty \frac{1}{\tau^{0.5}(8a\tau + r_0^2)} \exp\left\{-\frac{2(x+v\tau)^2 + 2y^2}{8a\tau + r_0^2} - \frac{z^2}{4a\tau}\right\} d\tau \quad (1)$$

ここで、

P : 出力 (W), λ : 熱伝導率 (W/cm·K), ϵ : 熱吸収率,
 a : 熱拡散率 (cm²/s), τ : 時間 (s), $2r_0$: スポット径 (cm),
 v : 移動速度 (cm/s)

工作物の熱容量が確保されている場合、レーザ焼入れ時の冷却速度は十分であり、焼入れの可否は最高温度が重要な要因とされている。そこで、最高温度に着目して式(1)を用いて、硬化

* 原稿受付 平成 10 年 6 月 9 日

** 正 会 員 大阪工業大学 (大阪市旭区大宮 5-16-1)

*** 大阪工業大学大学院

+ 正 会 員 滋賀県立大学工学部 (彦根市八坂町 2500)

++ 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 (京都市左京区吉田本町)

+++ 京都大学工学部

Fig. 1 Hardened depth under various irradiation conditions

深さの推定を行った。表1は用いた工作物の熱物性値である。吸収率は、鋼材の鏡面に対する値⁽¹⁰⁾である。また硬化域は、SKD11の A_{c1} 点(823℃)以上とした。レーザ出力は300W一定とし、スポット径と移動速度を変化させた場合の計算例を図1に示す。スポット径が2.0mm程度の場合、硬化深さが50 μ m以下の領域が広いが、スポット径を1.5mm程度に絞れば、200 μ m以上の領域もかなり広くなり、また最大で400 μ m以上も可能であることがわかる。

2.2 温度履歴

本研究では、金型によく用いられる合金工具鋼を対象とする。しかしながら合金工具鋼の焼入れでは、変態温度(Ac3)以上で炭化物を溶け込ますための保持時間がある程度必要とされている。すなわち、材料によっては保持時間が短すぎると炭素拡散が不十分であったり、完全にオーステナイト化されない可能性がある。そこで、レーザ照射条件と変態温度以上での保持時間の関係を考察した。

Table 1 Physical properties of workpiece		
Thermal conductivity λ	W/cm $\cdot$ K	0.253
Thermal diffusivity a	cm ² /s	0.0545
Thermal absorption rate ϵ		0.35

Table 2 Laser irradiation conditions			
Number	Laser power P W	Spot diameter $2r_0$ mm	Feed rate V mm/min
1	300	1.4	750
2	300	1.4	1500
3	300	2.0	300

Fig. 2 Temperature histories (z=0)

Fig. 3 Temperature history (feed rate 750mm/min)

図2は、工作物表面(X,Y,Z)=(x,0,0)の温度履歴である。レーザ照射条件は表2の通りである。

図より工作物の表面は、合金工具鋼の変態に必要な1000℃以上の温度に達していることがわかる。条件1と条件2を比較すると、移動速度が遅いほど熱源中心の温度が高く、保持時間も長くなることもわかる。また、条件2と条件3を比較すると、熱源中心の温度はほぼ同じであるが、保持時間は条件3の場合が長くなることもわかる。

図3は、条件1における工作物深さ方向z=0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 μ mでの温度履歴の計算結果を示す。図3より、表面から深くなるにつれて変態温度以上での保持時間が短くなっていくことがわかる。また、z=200 μ mでは変態温度以上に達しているが、保持時間がかなり短いために、不完全な焼入れ組織となる可能性があることがわかる。

3. YAG レーザによる機上焼入れ実験

前章の結果より300W程度のYAGレーザを用いれば、工作物表面への吸収剤の塗布なしでも、焼入れが可能であることが判明した。しかしながら、各種の合金工具鋼を対象にレーザ焼入れ性を調べた報告は少ないため、材料に適したレーザ照射条件の詳細を調べる必要がある。そこで、合金工具鋼に対するレーザ焼入れ性を実験的に調べる。

3.1 実験材料

材料は、合金工具鋼で金型によく用いられる市販の表3に示す4種類を対象とした。HMD1(推奨焼入れ温度830-1000℃)およびHMD5(推奨焼入れ温度810-1150℃)は火炎焼入れ金型鋼であり、炭素およびクロムを比較的多く含む場合およびそれらが比較的小さい場合である。SKD11(推奨焼入れ温度1000-1050℃)は炭素およびクロムを非常に多く含む冷間金型鋼であり、SKD61(推奨焼入れ温度1000-1050℃)はクロムを比較的多く含むが炭素量は少ない熱間金型鋼である。

3.2 繰返しレーザ焼入れ実験

レーザ焼入れは、レーザ光を工作物に照射し、急速な熱拡散によって加熱する焼入れ法であるため硬化領域の大きさには限界がある。工作物表面の硬化幅の増大には、マシニングセンタのNC機能を用いて、幅方向に少しずつ処理することで対応可能である。一方、工作物深さ方向の増大には、最高温度は上昇するが保持時間が不十分な層に着目した。すなわち、硬化層を拡大するために同一箇所を数回繰返しレーザ光を照射することでトータルの保持時間を増大させ、硬化深さを増大させる手法

Table 3 Workpiece

Material	HMD1(C:1.0%,Cr:3.0%) HMD5(C:0.7%,Cr:1.0%) SKD11(C:1.5%,Cr:12.0%) SKD61(C:0.4%,Cr:5.0%)
Dimension	23×50×15mm
Surface roughness	R _a 1.0 μm
Surface condition	No coating

Fig. 4 Experimental equipment

Table 4 Laser irradiation conditions

Laser power W	Spot diameter mm	Feed rate mm/min
300	1.4	500,750,1000, 1250,1500,2000

について調べた。

3.3 装置および条件

本実験では、立型のマシニングセンタ(MC)の主軸に ATC ホルダを介して光ファイバを取り付けたレンズユニットを保持した。レーザ光は、レンズユニットより工作物に鉛直に照射されている。機上焼入れ装置の概要を図 4 に示す。また、レーザ焼入れ実験条件を表 4 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 深さ方向の硬さ分布

レーザ焼入れ後、工作物の中央を焼入れ条痕に垂直な方向にマイクロカットで切断した。その後、研磨を行い、5%ナイトル液で腐食し、マイクロピッカース硬さ試験機(明石製、型式: MVK-E3, 荷重 100gf)を用いて条痕中心の深さ方向の硬さを測定した。結果を図 5～図 8 に示す。各材料の特徴を以下にまとめる。

・HMD1: 硬化層の硬さは、深さ方向にばらつきが見られた。炭素量が多い合金鋼では、炭素の溶け込み時間が十分でない場合、溶け込んだ炭素濃度に不均一な部分が残ることが知られている¹¹⁾。本材料も炭素量が多いため、炭素濃度に不均一な箇所が存在し、本ばらつきの原因となっているものと考えられる。また、通常の焼入れ硬さ(HV 850)に比べて、最高硬さは Hv750 程度とやや低い傾向にあるが、比較的深くまで硬度が保たれている。

・HMD5: 深さ方向に均一で安定した硬さが得られた。本材料は推奨焼入れ温度の範囲が非常に広く、広範囲の焼入れ温度で安定した硬さが得られるためと考えられる。さらに通常の焼入れ硬さ(HV780)に比べて、最高硬さは HV800 程度と高い傾向にある。

Fig. 5 Vickers hardness in depth direction (HMD1)

Fig. 6 Vickers hardness in depth direction (HMD5)

Fig. 7 Vickers hardness in depth direction (SKD11)

Fig. 8 Vickers hardness in depth direction (SKD61)

Fig. 9 Energy density and hardened width

Fig. 10 Energy density and hardened depth

Fig. 11 Vickers hardness in depth direction (HMD1)

・SKD11：通常の焼入れ硬さ（HV780）に比べて、十分に焼入れ硬化できなかった。その一因は、大きな粒度の炭化物が多いにもかかわらず、 γ 化温度以上での保持時間が十分でなく、炭化物を十分に溶かすことができなかったためと推定される。

・SKD61：通常の焼入れ硬さ（HV580）に比べて、表面付近はかなり硬さが高い傾向にあることがわかった。しかしながら、深さ方向に一定の硬さを示す領域が少なく、硬さが変化する母材との境界領域が広い傾向にある。この原因は、SKD11ほど大きな粒度の炭化物が存在しないため、表面付近は炭化物の溶け込みに必要な γ 化温度以上での保持時間が確保されているが、深い部分は保持時間が十分でないためと推定される。

4.2 エネルギー密度と硬さ

以上の結果より、300W程度のYAGレーザを用いても焼入れはある程度可能であることが判明した。そこで本節では、一般的な条件を設定する指標として、エネルギー密度 e ($e = P/(vd)$: $d=2r_0$)を用いて硬化幅、深さの関係を整理する。

図9はエネルギー密度と硬化幅、図10はエネルギー密度と硬化深さの関係である。硬化判定のしきい値はHV600である。硬化幅に着目すると、エネルギー密度が1000J/cm²程度以上で、スポット径の70%以上の幅が硬化されていることがわかる。しかしながら、それ以下のエネルギー密度では急激に硬化幅が減少している。また、深さ方向に着目すると密度が1000J/cm²程度以下で、深さの減少割合がやや増していることもわかる。以上の結果より、YAGレーザで焼入れを行う場合、エネルギー密度1000J/cm²程度が目安となることがわかった。

(a) Number of irradiation:1

(b) Number of irradiation:3

Fig. 12 Surface shape (HMD1)

Fig. 13 Relation between number of irradiation and hardened depth

4.3 繰返し焼入れの硬さ分布

図11は、繰返し焼入れ時の深さ方向の硬さ分布である。繰返し照射することにより硬さの境界部が硬化し、硬化深さが増大することが判明した。

しかしながらレーザ焼入れでは、熱履歴時の熱応力や変態応力、さらに表面の溶融などが重なる。そのため、繰返してレーザを照射することで表面の形状が大きく変化することも判明した。表面形状の変化の様子を図12に示す。

図12(a)より、1回だけの焼入れでは主に表面の盛り上がりが見られる。機上焼入れ加工においては、工作物を取り外さないことが原則である。そこで、焼入れ後に研削等によるゼロカットを行うことで本変形の除去は容易である。

一方、繰返して焼入れを行うと、図12(b)のA部のような「へこみ（その量を h とする）」変形が観測された。実用性を考慮すると、有効な焼入れ深さは、へこみ量を研削等の加工で平坦になるまで加工した後の硬化深さである。そこで、有効な深さと繰返し数との関係を調べた。硬化深さの判定基準はHV600以上である。図13は硬化深さと有効な焼入れ深さの測定結果である。

図13よりへこみ量を考慮した場合でも、硬化深さは増大しており、繰返し焼入れ法は合金工具鋼の焼入れ深さの増大に有効であることが判明した。

ここで繰返し照射について以下で考察する。図14(a),(b)は、1回および5回の繰返し焼入れを行った断面組織である。腐食されにくいため白く見えるのがマルテンサイト組織である。またマルテンサイトと母材部分の間に観察される腐食されやすい（黒く見える）中間組織は、マルテンサイトと微細パーライトの混合組織であり、その中には溶け込めなかった炭化物粒が白く写っている。

Fig. 14 Microphotographs of cross section (HMD1)

Fig. 15 Measured results of γ_R (feed rate 750 mm/min) Fig. 16 Relation between number of irradiation and γ_R (HMD1, $f=750\text{mm/min}$)

図 14(a)で白く観察される部分の最大深さは約 $200\mu\text{m}$ であり、図 5 の 1 回照射で最大硬さを示す深さとほぼ一致している。また黒く観察される部分の深さは約 $200\text{--}350\mu\text{m}$ であり、図 5 の 1 回照射で最大硬さから母材の硬さに変化する境界領域と一致している。以上から、図 14 中で白く写る部分は焼入れされた領域で、十分な硬さが得られる部分であり、黒く写る部分は溶け込み時間や温度が不十分なために十分な硬さが得られない部分と考えられる。ここで図 14(a)および(b)を比較すると、1 回の照射では中間組織であった領域が、5 回照射を繰り返すことでマルテンサイト化したために白くなっていることがわかる。すなわち、境界領域で繰返して温度が上昇し炭化物の溶け込みが進むことにより、その領域がマルテンサイト化して深さ方向の硬さが增大している様子がわかる。

4.4 残留オーステナイト(γ_R)

合金工具鋼は、合金元素が多いため焼入れ後、 γ_R が残りやすい。 γ_R が多く残ると焼入れ硬さを低下させたり、時効変形の

原因になったり、表面に引張りの残留応力を発生させる。そのため、レーザ焼入れ後の γ_R 量がどのくらいあるかを調べるため X 線を用いて測定を行った。その結果を図 15 に示す。

図 15 より炭素量の多い順に、 γ_R も多くなる傾向が見られた。特に工作物表面が非常に高温となるため、炭素、クロム量が多にも多い SKD11 では γ_R が多くなり、焼入れ後の硬さが十分に上がらない一因になっていることが判明した。HMD1 も、やや γ_R が多く、そのために図 5 で表面付近の硬さがやや低下しているものと考えられる。HMD5 は HMD1 に比べ共析鋼に近く、そのために γ_R も少なくなり十分な硬さが得られている。

次に、レーザ照射回数と γ_R の関係について図 16 に示す。図よりレーザ照射回数を増やすことで γ_R は減少していくことがわかる。図 11 で、照射回数を増大させると、最大硬さもやや上昇する傾向にあり、本結果もその一因と考えられる。すなわち、合金工具鋼のレーザ焼入れにおいて、複数回の照射は γ_R の低減にも効果が見られることが判明した。

5. 結 言

小出力 YAG レーザを用いた機上焼入れ技術の確立を目指して、焼入れ硬さと照射条件について基礎的な検討を行った結果、次の結論を得た。

- (1) レーザ焼入れ時の温度解析を行い、工作物表面に吸収剤を塗布しない場合でも、工作物は焼入れ可能な温度に達することを示した。さらに、その結果より硬化深さの推定も行った。
- (2) 各種合金工具鋼の基礎的なレーザ焼入れ特性を明らかにした。その結果、火炎焼入れ鋼が非常に安定した焼入れ性を示すことが判明した。また、低炭素の SKD61 も通常の焼入れに比べて高い硬さが得られることが判明した。
- (3) 工作物深さ方向に硬化層を増大させる手法として、レーザ光を同一箇所を繰返し照射する方法が有効であることも判明した。

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成 c, **62**, 595(1995) 1133.
- 2) 例えば, 安井武司: レーザ加工, 大河出版, (1990) 97.
- 3) 中崎一之, 井上達雄: パルス YAG レーザによる炭素鋼の焼入れの変態・熱・力学的シミュレーション, 材料, **46**, 3(1997) 268.
- 4) 喜田義宏, 垣野義昭, 中川平三郎, 大坪 寿: 小出力レーザによる機上焼入れに関する研究, 1993 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1993) 919.
- 5) 喜田義宏, 藤川 泰, 廣垣俊樹, 中川平三郎, 垣野義昭: 小出力レーザによる機上焼入れに関する研究 (第 2 報), 1997 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1997) 349.
- 6) 井上勝敏, 大村悦二, 春日浩一: 亜共析鋼のレーザ硬化処理による組織変化の計算機シミュレーション, 日本機械学会論文集成 C, **54**, 500(1988) 1026.
- 7) 大村悦二, 高町恭行, 井上勝敏: 速度論に基づく亜共析鋼のレーザ変態硬化過程の解析, 日本機械学会論文集成 A, **56**, 526(1990) 1496.
- 8) 丸尾 大, 宮本 勇, 石出 孝, 荒田吉明: レーザ焼入れの研究 (炭素鋼の硬化条件の解析), 溶接学会誌, **50**, 2(1981) 208.
- 9) 難波義治, 大村悦二, 牧之内三郎: レーザ硬化処理に関する研究, 日本機械学会論文集成, **50**, 454 (1984) 1099
- 10) 安永暢男: レーザが変える加工技術, 海文堂出版, (1992) 39.
- 11) 日本熱処理協会編: 熱処理ガイドブック, (1993) 73.