

# 炭素鋼におけるレーザー焼入条件の探索(第1報)

## ー 走査速度が表面状態および硬化層へ与える影響ー

菊竹 孝文\*1

### Exploring Laser Hardening Conditions for Carbon Steel ( I )

#### - Effect of scanning speed on surface state and hardened layer -

Takafumi Kikutake

近年レーザー光を使った焼入方法が注目されている。本研究では、「ディスクレーザ」を用いて、炭素鋼におけるレーザー焼入時の走査速度が表面状態および硬化層へ与える影響を調査した。その結果、表面状態によって各条件を分類すると、走査速度と出力には累乗の良い相関が得られた。また、硬化深さにおいて、硬化幅と硬化深さのどちらも走査速度と対数の良い相関があった。出力が1kW、走査速度が5mm/secでは、約1mmの硬化深さが得られたが、表面の一部が熔融した。

#### 1 はじめに

近年急速に「ものづくりのデジタル化」が求められている。ものづくり基盤となる金属加工（溶接、肉盛、熱処理、切断等）に数kW級の高出力のレーザー光を用いる技術がすでに実用化され、急速に普及しつつある。

また、このレーザー加工技術と産業用ロボットとの親和性が非常に高く、産業用ロボットの先端にレーザー加工機を取り付け、デジタル制御を行うことで、生産性向上、品質の安定化、技能伝承、人手不足解消といった、昨今中小企業が直面している様々な課題解決に繋がることが期待されている。

レーザーを熱処理に適用する場合、最も多い用途が「焼入」である。「レーザー焼入」は、局所加熱と自己冷却によって、主に鉄鋼材料の表面を硬化する技術である。同様に局所加熱が可能な「高周波焼入」に比べ、デジタル制御の効果に加えて、加熱用のコイルや冷却剤が不要という経済的、環境負荷低減の利点もある。

レーザー焼入に関する研究例は少なくないが、レーザーの種類が異なると、レーザー光の波長やビーム品質等が異なるため、加工条件等をそのまま適用することは難しい。これまでの報告は、いずれも「CO<sub>2</sub>レーザー」や「YAGレーザー」を用いた報告が多い<sup>1)</sup>。近年では、低出力の「ファイバーレーザー」<sup>2)</sup>やビーム品質がやや低い「半導体レーザー」<sup>3)</sup>を用いた研究報告は複数あるものの、最新の高出力かつ高品質な「ディスクレーザ」

や「ファイバーレーザー」を用いた報告は少ない<sup>4)</sup>。そこで今回「ディスクレーザ」を用いて、炭素鋼のレーザー焼入における走査速度が表面状態および硬化層へ与える影響を調査した。

#### 2 実験方法

##### 2-1 レーザ加工機およびレーザー焼入方法

本試験で用いたレーザー加工機の発振器はトルンプ(株)製のディスクレーザ (TruDisk 5000) であり、最大出力は5kW、ロボットは安川電機(株)製のMOTOMAN-MC2000 IIを用いた。レーザー焼入時の様子を図1に示す。

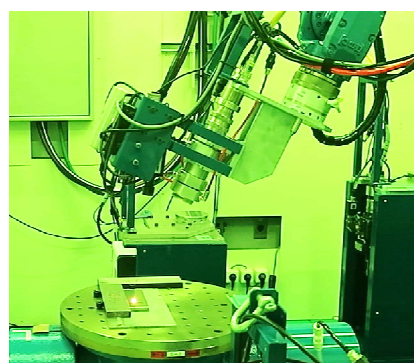


図1 レーザ焼入時の様子

発振機より出力されたレーザー光は、光ファイバーを通して伝送され、ロボットアームの先端に取付けた熱処理用加工ヘッドから試料表面に照射される。レーザー光を照射された試料表面は急速に加熱され、その後試料自身の自己冷却によって急冷されることで焼入（硬化）される。また、照射されるレーザー光は、トップハ

\*1 機械電子研究所

ット型と呼ばれる幅方向に均一なエネルギー密度分布が得られる。レーザー焼入の模式図を図2に示す。

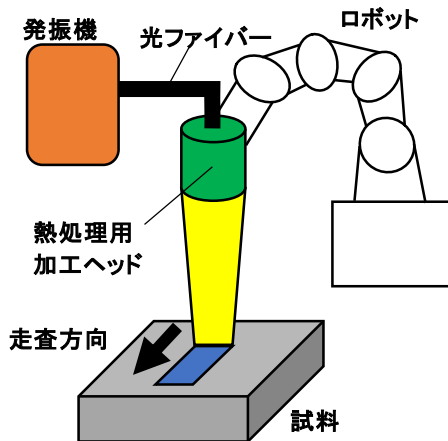


図2 レーザ焼入の模式図

### 2-2 加工条件および供試材料

照射領域は、縦1mm、横8mmのライン形状とし、長さは40mmとした。今回は走査速度の影響を大略的に調査するため、出力は0.5~4kW、走査速度は1~50mm/secの範囲で変化させた。焦点距離は300mmとし、戻り光対策として進行方向とは逆に25度傾斜させた(温度測定器があるため)。照射ガラスが汚れる事によって出力が低下する可能性があるため、試験開始と終了時にパワーメータを使って、1kWの出力時の実測値が0.95kW以上(出力の低下が5%以内)である事を確認した。

供試材料は市販のS50Cを用い、幅150mm、長さ50mm、厚み10mmに切断した。レーザーを照射する試料表面は、WA-46-Iの砥石による研削仕上げ面とした。

### 2-3 評価方法

実体顕微鏡を用いて表面を観察し溶融の有無を確認した。断面組織は、長さ方向中央の断面を鏡面研磨後、3%ナイトル液でエッチングし観察した。断面のマクロ組織観察には実体顕微鏡、ミクロ組織観察には光学顕微鏡を用いた。マクロ組織観察後、母材から変化した組織の最大幅と最大深さを評価した。

機械的性質は、マイクロピッカース硬さ試験機(株式会社ミットヨ製 HM-100)により評価した。測定面は、マクロおよびミクロ組織観察を行った断面とし、試験荷重は2.94N (300gf)とした。また、JIS G 0559の「鋼の炎焼入及び高周波焼入硬化層深さ測定方法」に準拠し、450HV以上を硬化深さとした。

## 3 実験結果

### 3-1 外観および表面観察結果

図3に示す様に、レーザー焼入後の試料を出力(縦)、走査速度(横)毎に並べた。走査方向は、左から右である。5~20mm/secの範囲では、長さ方向の焼入幅は概ね一定であった。1mm/secではレーザー照射開始から終了に向けて徐々に焼入幅が広がった。50mm/secではレーザー照射開始直後のみ焼入幅が広がった。

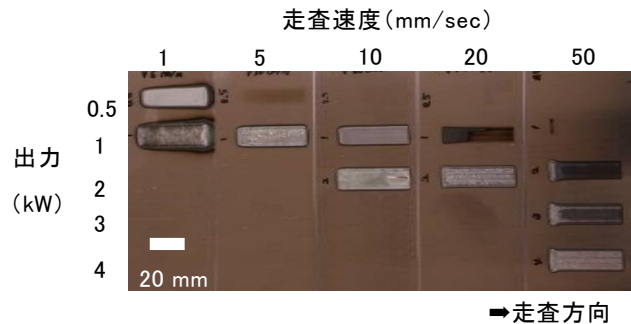


図3 レーザ焼入後の外観

実体顕微鏡を用いてレーザー照射した試料表面を観察した。出力が1kW、走査速度が1~20mm/secの観察結果を図4に示す。走査速度が1mm/secでは完全に溶融状態、5mm/secでは部分的に溶融状態、10mm/secでは均一な焼入肌、20mm/secではテンパーカラーが観察された。出力が1kW、走査速度が50mm/secでは、レーザー照射直後以外は金属光沢のままだった。

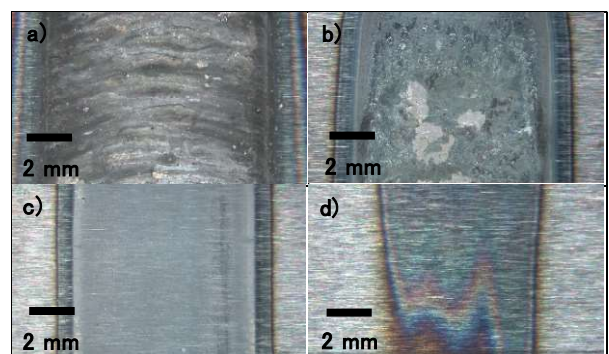


図4 レーザ焼入した試料表面の実体顕微鏡観察結果 (出力1kW、走査速度 a) 1, b) 5, c) 10, d) 20mm/sec)

図5に断面のマクロ組織観察結果を示す。出力が1kW、走査速度が1~10mm/secにおいて、レンズ形状の組織が観察されたが、20mm/secでは、組織の変化が観察されなかった。また、走査速度が1mm/secにおいて表面

が完全に熔融し、深さ方向に0.5mm程度の大きな凹凸が観察された（点線は熔融前の表面の位置を示している）。変化した組織の最大幅と最大深さは、速度が低下するにつれてどちらも大きくなった。

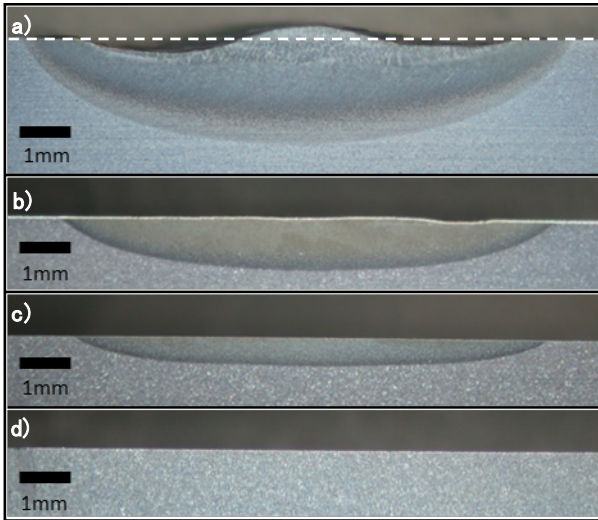


図5 レーザ焼入した試料の断面マクロ組織観察結果（出力1kW，走査速度 a) 1, b)5, c)10, d)20mm/sec)

図5で観察されたレンズ形状組織のマイクロ組織観察を行った。図6に出力1kW，走査速度10mm/secにおける表層近傍のマイクロ組織観察結果を示す。観察の結果，表層の組織は，マルテンサイト相（硬化層）であることがわかった。

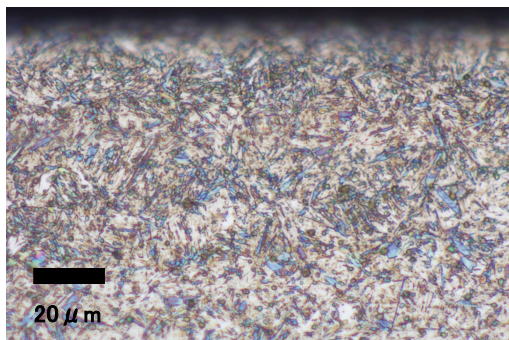


図6 レーザ焼入した試料の断面マイクロ組織観察結果（出力1kW，走査速度10mm/sec)

マクロ組織観察で観察された硬化層の最大幅（硬化幅）と最大深さ（硬化深さ）を測定した。図7に出力1kWにおける硬化幅と硬化深さの測定結果を示す（1mm/secでは表面に大きな凹凸があるため，図5中の点線に示す様に，焼入されていない表面を基準に最大

深さを測定した）。横軸に走査速度（対数スケール），縦軸に硬化幅と硬化深さを示し，図中のプロット形状は図4で評価した表面状態を示す。対数近似を取ると $R^2$ 値（相関係数の二乗）はそれぞれ0.995，0.979となり，表面状態に関わらず走査速度と硬化幅および硬化深さは，良い相関が得られた（硬化深さは20mm/secの硬化層が無い場合も良い相関が得られた）。

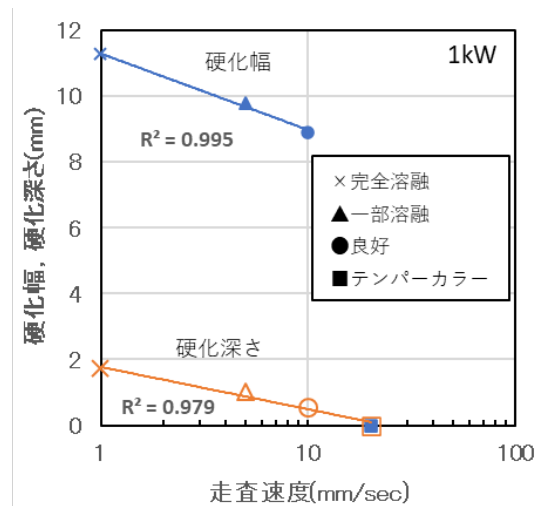


図7 出力1kW時のレーザ焼入における走査速度と硬化幅および硬化深さの関係（×▲●■は表面状態を示す）

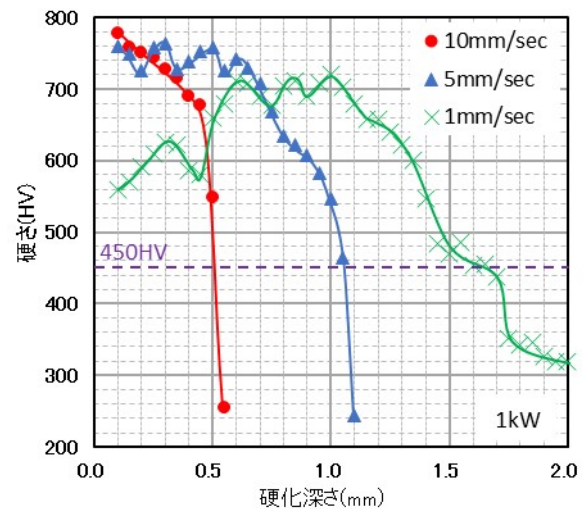


図8 ビッカース硬さ試験結果（出力1kW，走査速度1, 5, 10mm/sec)

図8に出力が1kW，走査速度が1~10mm/secにおける断面の硬さ試験結果を示す。硬化深さは10mm/secが0.52mm，5mm/secが1.06mm，1mm/secが1.65mmであった。いずれも図7のマクロ組織観察による硬化深さの

測定結果と良く一致した。最高硬さは10mm/secが約780HV、5mm/secが約760HV、1mm/secが約720HVであった。また、1mm/secにおいて表層から深さ約0.6mmまで最高硬さより硬さが低い領域が見られた。この要因は凝固組織である点が考えられるが、今後組織および機械的性質を詳しく調査する必要がある。

#### 4 考察

図6のマイクロ組織と図8の硬さ試験結果から、レーザー焼入によって、炭素鋼（S50C）の表面がマルテンサイト相へ変態し硬化したことがわかった。しかしながら、高出力かつ高ビーム品質である「ディスクレーザ」は、条件によって試料表面が一部あるいは完全に溶融した（図4）。図9にレーザー焼入後の表面状態を走査速度と出力毎に整理した。一部溶融とテンパーカラーについて累乗近似曲線をそれぞれ図中の点線で示す。レーザー照射後の表面状態において、走査速度と出力には累乗の関係があり、それぞれ $R^2$ 値が0.999と0.986と良い相関が得られた。この2つの曲線間に表面が溶融しない最適条件範囲があると考えられる。

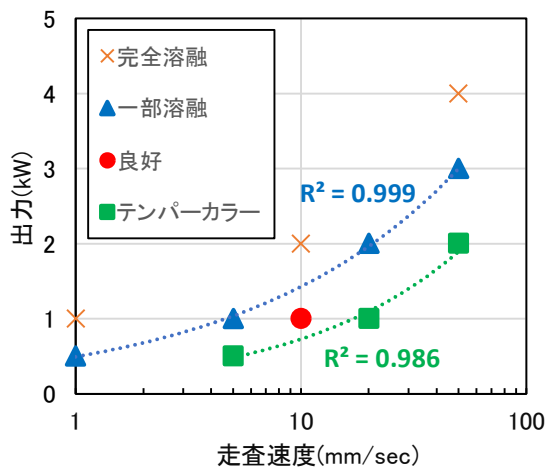


図9 レーザ焼入後の表面状態における走査速度と出力の関係

図9の一部溶融条件における、走査速度と硬化深さの関係を図10に示す。走査速度が5~50mm/secの範囲において、速度を低下させると硬化深さが大きくなった。同範囲において対数近似を取ると $R^2$ が0.996と良い相関が得られた。また、出力が1kW、走査速度が5mm/secにおいて約1mmの硬化深さが得られた。一般的な高周波焼入の硬化深さは1mm以上得られるため、本

実験結果は高周波焼入に比べて、硬化深さが同等以下といえる。一方、出力0.5kW、走査速度1mm/secでは良い相関が得られなかった。これは、低速のために硬化幅が走査方向に対して広がる（図3）ため、幅方向の伝熱が影響していると考えられる。

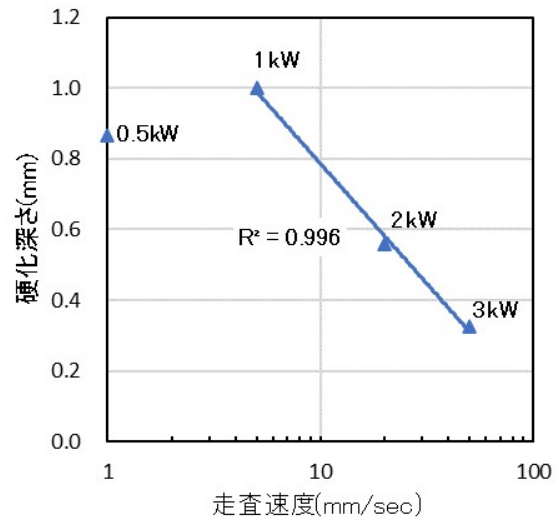


図10 一部溶融するレーザー焼入条件と硬化深さの関係

#### 5 まとめ

高出力かつ高ビーム品質である「ディスクレーザ」を用いて、レーザー焼入時の走査速度が表面状態および硬化層へ与える影響を調査し、以下の知見が得られた。

- (1) レーザ照射後の表面状態を走査速度と出力によって整理すると、累乗の良い相関があった。
- (2) 硬化幅と硬化深さのどちらも走査速度と対数の良い相関があった。
- (3) 出力が1kW、走査速度が5mm/secでは約1mmの硬化深さが得られたが、表面の一部が溶融した。
- (4) 組織観察と硬さ試験による硬化深さの測定結果は、良く一致した。

#### 5 参考文献

- 1) 大村悦二, 難波義治: 日本機械学会論文集(A編), 51巻(469), pp. 2231-2238(1985)
- 2) 安田武司等: 鉄と鋼, 108巻(7), pp. 405-416(2022)
- 3) 萩野秀樹, 宮田良雄: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.22, pp. 33-38(2008)
- 4) 津本宏樹等: あいち産業科学技術総合センター研究報告, pp. 22-25(2015)