

炭素鋼におけるレーザ焼入条件の探索(第2報) －出力が表面状態および硬化層へ与える影響－

菊竹 孝文*1

Exploring Laser Hardening Conditions for Carbon Steel (II) - Effect of power on surface state and hardened layer -

Takafumi Kikutake

第1報では、「ディスクレーザ」を用いて、炭素鋼（S50C）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。第2報では走査速度が10mm/secにおいて、出力を0.25kW刻みで変化させて出力の影響を調査した。その結果、出力と硬化深さには線形の良い相関があり、出力が1kWでは硬化深さが約0.5mm、1.25kWでは約0.8mm得られた。ただし、出力が1.25kWでは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，デジタル化の効果に加えて，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。

レーザ焼入に関する研究例は少なくないが，レーザの種類が異なると，レーザ光の波長やビーム品質等が異なるため，加工条件等を直接適用することは難しい。これまでの報告は，いずれも「CO₂レーザ」や「YAGレーザ」を用いた報告が多い¹⁾。近年では，低出力の「ファイバーレーザ」²⁾やビーム品質がやや低い「半導体レーザ」³⁾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ビーム品質である「ディスクレーザ」や「ファイバーレーザ」を用いた報告は少ない⁴⁾。

第1報では「ディスクレーザ」を用いて，炭素鋼（S50C）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。本報では，出力値を0.75～2.0kW(0.25kW毎)の範囲で，硬化層に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焼入方法

本試験で用いたレーザ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（レーザ焼入時の様子は第1報を参照）。

発振機より出力されたレーザ光は，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。レーザ光を照射された試料表面は急速に加熱され，その後材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（レーザ焼入の模式図は第1報を参照）。また，照射されるレーザ光は，トップハ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。

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。走査速度は10mm/secのみとし，出力は0.75～2.0kWの範囲において0.25kW刻みとした。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測定した。さらに電解放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM, 株式会社日本電子製 JSM-7001F) およびエネルギー分散型X線分光法 (EDX) を用いて詳細に組織観察および成分分析を行った。

機械的性質の評価は、マイクロビッカース硬さ試験機(株式会社ミツトヨ製 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1にレーザ焼入後の試料外観を示す。出力が0.75~2.0kWでレーザ焼入した試料を2列で並べた。走査方向は左から右である。出力が1.0~2.0kWにおいて焼入幅は走査方向に対して概ね一定であった。0.75kWは照射直後に表面酸化は見られなかったが、走査方向に対して徐々に酸化したことが観察された。

実体顕微鏡を用いてレーザ焼入した試料表面を観察した。走査速度が10mm/sec, 出力が0.75~1.5kWの観察結果を図2に示す。1.5kW以上では完全に溶融状態, 1.25kWでは一部溶融状態, 1.0kWでは均一な焼入色, 0.75kWではテンパーカラーが観察された。

図3に断面のマクロ組織観察結果を示す。走査速度が10mm/sec, 出力が1.0~1.5kWにおいて、レンズ形状の組織が観察された。0.75kWにおいては、組織の変化が観察されなかった。また、1.5kWでは表面が完

全に溶融し、深さ方向に0.3mm程度の凹凸が観察された(点線は溶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、出力が大きくなるにつれてどちらも大きくなった。

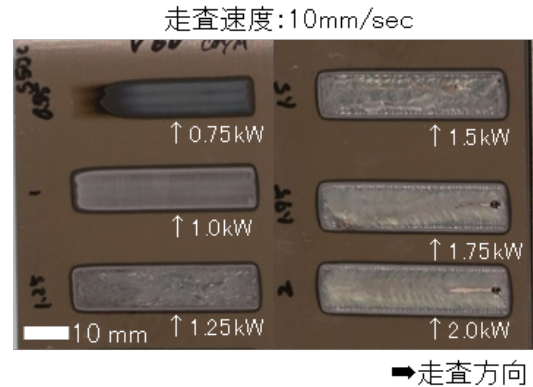


図1 レーザ焼入後の外観

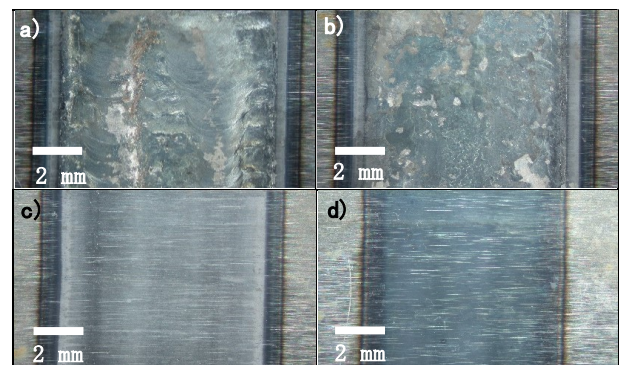


図2 レーザ焼入した試料表面の実体顕微鏡観察結果 (走査速度10 mm/sec, 出力 a) 1.5, b)1.25, c)1, d)0.75 kW)

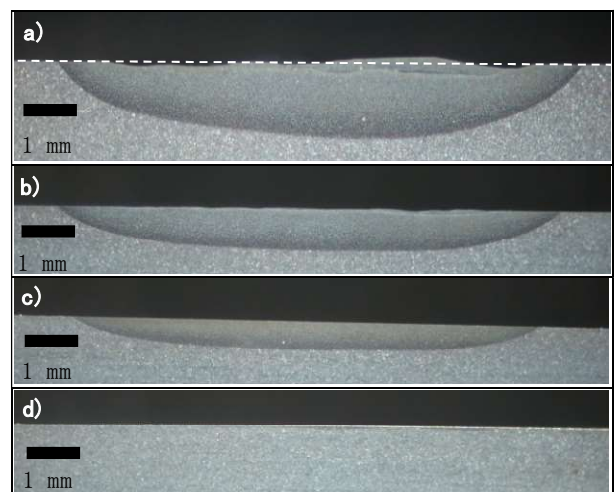


図3 レーザ焼入した試料断面のマクロ組織観察結果 (走査速度10mm/sec, 出力a) 1.5, b)1.25, c)1.0, d)0.75kW)

第1報では、レーザ照射によって変化した組織はマルテンサイト相（硬化層）であり、マクロ組織観察結果と硬さ試験から測定した硬化深さが、良く一致することを報告した。そこで本報も同様に、マクロ組織観察結果から硬化層の最大幅（硬化幅）と最大深さ（硬化深さ）を測定した。図4に走査速度10mm/secにおける硬化幅と硬化深さの測定結果を示す（1.5kWでは表面に大きな凹凸があるため、図3中の点線で示す様に、焼入されていない表面を基準に硬化深さを測定した）。横軸に出力、縦軸に硬化幅および硬化深さを示す。図中のプロット形状は図4で評価した表面状態を示す。線形近似を取ると R^2 値（相関係数の二乗）はそれぞれ0.974, 0.937となり、表面状態に関わらず出力と硬化幅および硬化深さは、どちらも良い線形の相関関係が得られた（硬化深さは出力0.75kWの硬化層が無い場合も良い相関が得られた）。

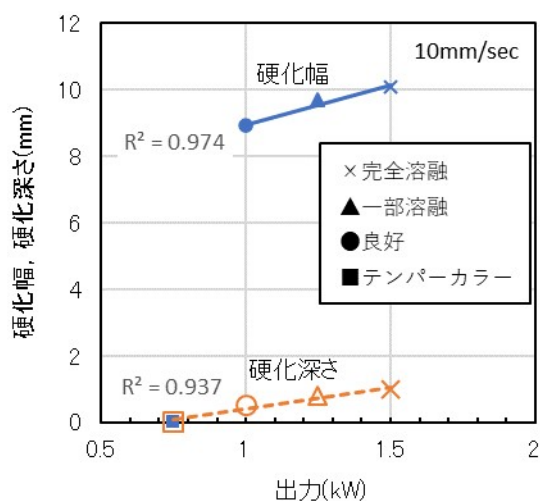


図4 走査速度10mm/sec時のレーザ焼入における出力と硬化幅および硬化深さの関係(×▲●■は表面状態を示す)

図5に走査速度が10mm/sec, 出力が1.0~1.5kWにおける断面の硬さ試験結果を示す。硬化深さは1kWが0.52mm, 1.25kWが0.76mm, 1.5kWが0.90mmであった。図4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、いずれも約800HVであり、表面から深くなるにつれて硬さが低下した。ただし、1.25kWと1.5kWの場合、硬化深さが0.4~0.6mm辺りでわずかに硬さの上昇が見られた。この要因については、今後組織および機械的性質を詳しく調査する。

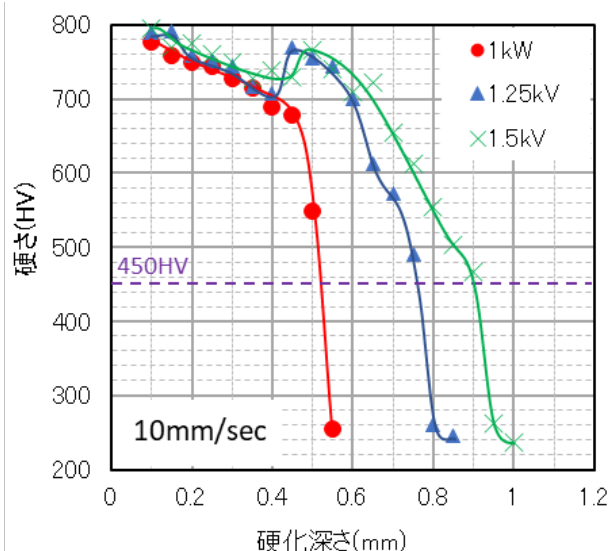


図5 ビッカース硬さ試験結果（出力1.0kW, 走査速度 1, 5, 10mm/sec）

図6に出力1.0kW, 走査速度10mm/secにおけるマイクロ組織観察結果を示す。表面から深さ方向にかけてマルテンサイト相から母材のフェライト相およびパーライト相に変化していることがわかった。

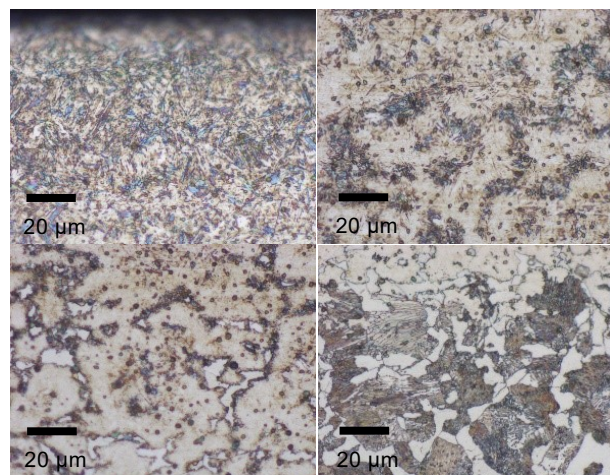


図6 出力1.0kW, 走査速度10mm/secにおけるマイクロ組織観察結果 (a) 表層近傍, b) 深さ0.25mm近傍, c) 深さ0.45mm近傍, d) 深さ0.55mm近傍)

レーザ照射した複数の試料において、硬化層およびその近傍で割れが観察された。FE-SEMを用いて詳細に観察したところ、割れ近傍には数ミクロンサイズの細長い粒子が観察された。図7にその粒子のEDX分析結果を示す(右上の写真は分析点を示す)。分析の結果、Fe以外にMn, S等の強い強度が得られた。

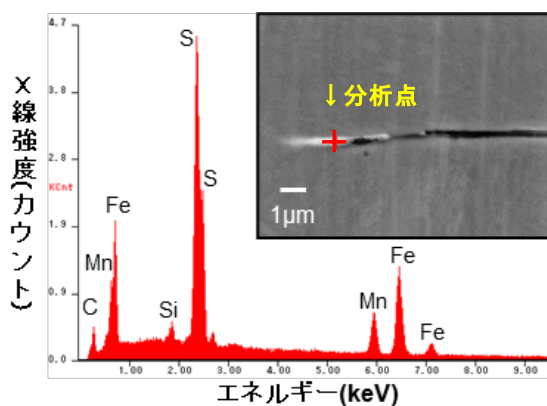


図7 割れ近傍の粒子におけるEDX分析結果（右上の写真は分析点を示す）

4 考察

第1報では、走査速度と出力毎の表面状態を評価し、両因子には累乗の相関が得られた。その関係図に、今回の結果を追加したものを図8に示す（点線で囲んだ部分が今回追加したデータである）。走査速度を10mm/secとし、出力を0.25kW刻みで実施したところ、1.25kWにおいて一部熔融した。よって図中の一点鎖線で示す様に一部熔融する境界はより低出力側に存在すると考えられる。また、出力が0.75kWの表面はテンパーカラーであり硬化していなかった。よって、走査速度が10mm/secにおいて、表面が熔融せず焼入が可能な最適条件は、0.75~1.25kWの範囲に存在すると考えられる。今回表面が熔融しない最適条件は、出力が1.0kWのみであり、その硬化深さは約0.5mmであった。一般的に高周波焼入の硬化深さは1mm以上であるため、高周波焼入の硬化深さと比べると浅かった。

硬化深さにおいて、第1報では走査速度、本報では出力との関係を示した。一部熔融する条件において、走査速度との関係では約1mm、出力との関係では約0.8mm以上の硬化深さが得られることがわかった。ただし、走査速度は対数スケール、出力は実スケールであるため、出力よりも走査速度の方が制御できる範囲が広いと考えられる。また、出力および走査速度以外にも、レーザーの照射領域、板厚、強制空冷方法等焼入深さに影響を与える因子が存在すると考えられる。今回明らかにできなかった最適条件範囲やその他の影響因子については、今後調査する必要がある。

硬化層やその近傍で発生した割れは、図7の分析結果からMnS等の非金属介在物が起点になったと考えられる。レーザー焼入は他の焼入方法よりも入熱量は少な

いが、急速な加熱・冷却現象であるため、割れが生じた可能性が考えられる。

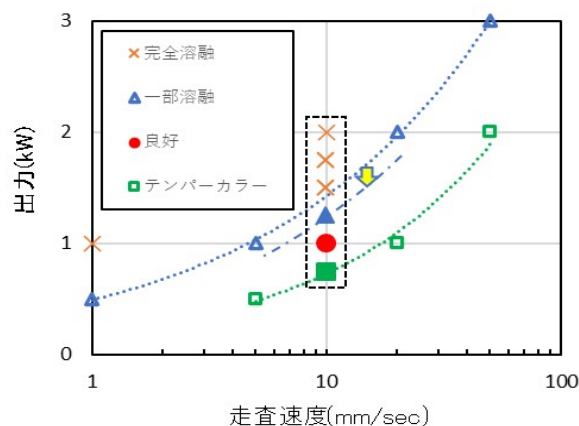


図8 レーザ焼入後の表面状態における走査速度と出力の関係（第1報で報告した図に追加）

5 まとめ

「ディスクレーザ」を用いて、走査速度が10mm/secにおける出力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) 硬化幅と硬化深さのどちらも出力と線形の良い相関がある。
- (2) 出力が1kWでは約0.5mm、出力が1.25kWでは約0.8mmの硬化深さが得られた。ただし、出力が1.25kWでは表面の一部が熔融した。
- (3) 出力が1kWにおいて、試料表面から深さ方向へかけて、徐々にマルテンサイト相からフェライト相およびパーライト相の混合組織に変化し、硬さが低下した。
- (4) 硬化層やその近傍において、非金属介在物が起点となり割れが生じた。

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)