炭素鋼におけるレーザ焼入れ条件の探索(第3報) ーラップ間隔と硬さ分布の関係ー

菊竹 孝文*1

Exploring Laser Hardening Conditions for Carbon Steel (III) - Relationship between Lap Spacing and Hardness Distribution -Takafumi Kikutake

近年、レーザ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 るレーザ焼入(ライン状の加工)時のラップ間隔(照射幅方向の重なり)と硬さ分布の関係を調査した。その結果、 出力が1kW, 走査速度が10mm/sでは、2mmのラップ間隔が最も硬さの低い領域が狭かった。また、1mm以下および3mm のラップ間隔では、未焼入れ領域および焼戻しによる軟化によって、硬さの低い領域が広かった。

1 はじめに

ものづくりの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。レー ザを熱処理に適用する場合,最も多い用途が「焼入 れ」である。「レーザ焼入れ」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。

レーザ焼入に関する研究は、比較的早く高出力化さ れた「CO₂レーザ」を用いた報告が多い¹⁾。しかしな がら、「 CO_2 レーザ」は波長が10 μ m程度であり、鋼に 対する吸収率が非常に低いため,表面に吸収剤を塗布 する必要がある²⁾。また、「CO₂レーザ」は波長が長い ためにファイバー伝送ができない。そのため発振器か らミラー伝送で対象物にレーザ光を照射する必要があ り,加工ヘッド(照射口)をロボット等に取り付けた 自由な加工ができない。さらに、「CO₂レーザ」は変換 効率(電気から光への変換エネルギー効率)が約10% と低い。これらの理由から、「CO2レーザ」のレーザ焼 入れに関する研究は少なくないが、実用化に至った報 告はほとんど無かった。

近年では、数kW級の高出力かつ波長が約1µmの「半 導体レーザ」,「ディスクレーザ」,「ファイバーレー ザ」等を用いた金属加工技術の開発が進んでいる。レ ーザ焼入れにおいては、比較的広範囲で熱処理が可能 な「半導体レーザ」が主流である³⁾。一方、「ディス

は少ない4)。一般に、レーザの種類が異なると、加工 条件等を直接適用することは難しい。そこで筆者は, 第1,2報において、「ディスクレーザ」を用いた炭素 鋼のレーザ焼入れにおける基礎的なレーザ焼入れ条件 (出力および走査速度の影響)について報告した^{5,6)}。 既報では1ラインのレーザ焼入れを行ったが、実際の 加工においては、ライン状の加工を連続的に実施して 面状に加工することが多く,幅方向における重なりで ある「ラップ間隔」も重要な加工条件の一つである。 また、ラップ時の深さ方向の硬さ分布も重要である。 本報では、最適なラップ間隔と硬さ分布の関係につい て報告する。

クレーザ」や「ファイバーレーザ」を用いた適用事例

2 実験方法

2-1 レーザ加工機およびレーザ焼入方法

本報で用いたレーザ加工機の発振器はトルンプ㈱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㈱安川電機製のMOTOMAN-MC2000Ⅱ を用いた。

発振器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、その後試料 自身の自己冷却により急冷されることで焼入(硬化) される。また、照射されるレーザ光は、トップハット 型と呼ばれる幅方向に比較的均一なエネルギー密度分 布を有する。レーザ焼入の模式図を図1に示す。



図1 レーザ焼入の模式図

2-2 加工条件および供試材料

照射ビームは、縦1mm、横8mmとし、40mmのライン状 に2本ずつ照射した。図2に示す様に、ラップ間隔(照 射幅方向の重なる長さ)は、 1mm毎の-2~3mmとした。 レーザの照射条件は, 第1, 2報^{5,6)}の結果を参考に, 出力1kW, 走査速度10mm/sとした。焦点距離は300mmと し, 戻り光対策として, 表面温度測定器があるため 進行方向とは逆に10°傾斜した。

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, フライス仕上げ面とした。



2-3 評価方法

試料の機械的性質は,自動測定機能付きマイクロビ ッカース硬さ試験機(㈱フューチュアテック製,FM-ARS 9000)により硬さ分布を評価した。測定面は、図2 に点線で示した長さ方向中央断面とし、走査方向と同 じ方向から見た断面(左側が2パス目,右側が1パス 目)を測定した。試験荷重は4.90N(500gf)とした。 また、試験は、表層から0.1、0.3、0.5、0.7mmの深さ を照射幅方向に0.5mm間隔で測定した。また、JIS 0559 (鋼の炎焼入及び高周波焼入硬化層深さ測定方 法)に従い、HV450以上をS50Cの有効硬化層とした。

さらに、隣り合う測定位置の硬さがHV450以上とHV450 以下の境界の場合のみ, 追加してその中間位置 (0.25mm間隔)の硬さを測定した。

3%ナイタル(硝酸エタノール)液によりエッチングし て断面組織を観察した。観察にはレーザ顕微鏡 ((株) エビデント製, OLS5100-EAT) を用いた。

3 結果

3-1 外観観察結果

図3に試験後の外観を示す。2つのラインのうち、右 側が1パス目, 左側が2パス目である。すべての条件に おいて、表面の溶融が無く、加工開始と終了までほぼ 均一な幅の焼入れができ、レーザによる加熱と自己冷 却のバランスが良い条件であった。



図3 レーザ焼入後の外観 (数値はラップ間隔を示す)

3-2 組織観察結果

図4 a)~f)に各ラップ間隔におけるマクロ組織観察 結果を示す。右側が1パス目,左側が2パス目の組織で ある。第1報5)で有効硬化層領域について、単一パス のマクロ組織は薄いレンズ形状を示した。また、ミク ロ組織は硬いマルテンサイト相であり,母相は柔らか いフェライト相とパーライト相で構成される。マクロ 組織で照射面から深さ方向に観察されるマルテンサイ ト相の深さと有効硬化層深さは概ね一致することを報 告した。これより、マクロ組織における硬化領域がレ ンズ形状のため、両端の有効硬化層深さは浅くなると 考えられる。面状の焼入れを行いたい場合は、幅方向 に均一な硬化層深さを得るために、有効硬化層の両端 を重ねることによって深さを補う必要がある。-2~ 3mmのラップ間隔において、図4 a)~f)に示すマクロ 組織観察から、ラップ間隔が2mm以上あれば、有効硬 化層深さの浅い領域を補えることがわかった。



図4 各ラップ間隔のマクロ組織;a)-2mm, b)-1mm, c)0mm, d)1mm, e)2mm, f)3mm

図5にラップ間隔2mmのパス間境界近傍のミクロ組織 観察結果を示す。点線で示す深さ0.1, 0.3, 0.5mmの 位置におけるパス間の境界は,深くなるにつれて約 0.5, 0.75mm左側にシフトした。



図5 ラップ間隔2mmにおけるパス間境界近傍のミクロ 組織観察結果

3-3 硬さ試験結果

図6にラップ間隔が-2,0,2mmにおける硬さ分布試 験結果を示す。横軸は幅方向の位置,縦軸は硬さを示 す。右側が1パス目,左側が2パス目の硬さ試験結果で ある。横軸の原点は2パス目の深さ0.1mmにおける硬さ が急激に低下する前の右端とした。

図6 a)に示す深さ0.1mm位置においては、すべての ラップ間隔に共通して、1パス目および2パス目のどち らも最高硬さは、約800HVと非常に高かった。また、 ラップ間隔が0および2mmのいずれも幅約2mmの範囲に 軟化域が見られた。最低硬さはHV400程度と最高硬さ の約半分まで低下した。一方、ラップ間隔が-2mmにお いて、最低硬さは約HV250と母材並みの硬さであった。 図6 b)および c)に示す深さ0.3mm、0.5mm位置におい ては、ラップ間隔2mmでは、最低硬さが約HV400であっ た。一方、ラップ間隔-2、0mmでは最低硬さが約HV250 と母材並みの硬さであった。図6 d)に示す深さ0.7mm 位置においては、ラップ間隔-2、0、2 mmでは幅方向 のすべてにおいて約HV250と母材並みの硬さであった。



図6 ラップ間隔0および2mmにおける幅方向の位置毎の 硬さ;a)深さ0.1mm, b)深さ0.3mm, c)深さ0.5mm, d) 深さ0.7mm

ラップ間隔毎の最低硬さを図7に示す。深さ0.1mm ではラップ間隔が0~3mmの最低硬さはすべてHV400 程度であった。一方, ラップ間隔が-1, -2mm では母 材並みの硬さであった。深さ0.3mm および0.5mm では どちらもラップ間隔2mmの最低硬さが高かった。また, ラップ間隔2mmの深さ0.3mm 以外の最低硬さはHV450 以下であった。



因 / ノノノ 向開母の取囚反し

図6の各ラップ間隔および深さについて,HV450以下で ある硬さの低い領域の最大幅を軟化幅とし,図8に示 す(白抜きは未焼入れ領域の幅を示す)。深さ0.1mmに おけるラップ間隔0~3mmおよび深さ0.3mmにおけるラ ップ間隔1~3mmにおいて,軟化幅は0mm(測定間隔の 0.25mm以下)であった。また,深さ0.5mmにおいてラ ップ間隔2mmが最小の軟化幅であった。



4 考察

レーザ焼入れで得られる硬化層が薄いレンズ形状で あるため、ラップ間隔1mm以下においては、パス間境 界近傍で焼入れされない領域が生じる。図7において 硬さが母材並みの約250HVである位置が焼入れされて いないと考えられ、図8に白抜きで示した。一方、ラ ップ間隔3mmの深さ0.5mmでは、ラップ間隔2mmと比べ て焼戻し領域の増加によって軟化領域が広がったと考 えられる。よって、ラップ間隔2mmが最も軟化領域が 狭くなったといえる。また、焼入れ端部の浅い硬化領 域は幅約2mm程度(図5)であり、これを補う事ができ る最小ラップ間隔が最も軟化領域が小さくなることが 示唆される。さらに、図6のラップ間隔2mmにおける深 さ0.1、0.3、0.5mmの最低硬さの位置は、図5における パスの境界と概ね一致した。よって、パス間境界近傍 が最も焼戻しの影響が大きくなると考えらる。しかし ながら、レーザ出力や走査速度によって硬化領域は変 化する⁵⁾⁶⁾。よって加工条件に対する適正なラップ間 隔が存在するため、今後は様々な条件下におけるラッ プ間隔を調査し、検証していく。

5 まとめ

「ディスクレーザ」を用いた,照射幅8mmのライン 状レーザ焼入において,2つのラインのラップ間隔と 硬さ分布の関係を調査し以下の知見が得られた。

- (1) 出力1kW, 走査速度10mm/sにおいて、ラップ間隔 を1mm毎に変えた材料断面の硬さ分布を測定した 結果、表層~深さ0.5mmの範囲において最も軟化 領域が小さいのは、ラップ間隔が2mmの場合であ った。
- (2) (1)の条件におけるマクロ組織観察により、薄い レンズ状の焼入れ組織が観察され、端部の曲線部 分が完全に重なるラップ間隔の最小値は2mmであった。
- (3) (1)および(2)のラップ間隔以上の場合、2パス目の加熱に伴う焼戻しの影響が大きくなるため、軟化領域が拡大すると考えられる。

5 謝辞

本研究において,硬さ試験に佐賀県工業技術センタ ーの自動硬さ試験機を使用させていただいた。設備提 供とともに,機器操作等のご助言を頂いた平井智紀部 長,永石尚昭特別研究員に感謝の意を表する。

6 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)
- 萩野秀樹,山口拓人: J. Vac. Soc. Jpn. 56
 No.8 (2013) pp315-321.
- 江嶋亮:レーザ加工の最新動向,(園家啓嗣監修, シーエムシー出版, 2022) pp. 250-258
- 4) 安田武司等:鉄と鋼, 108 巻(7), pp. 405-416(2022)
- 5) 菊竹孝文: 福岡県工業技術センター研究報告 2023, No. 33 (2023), pp. 44-47
- 菊竹孝文:福岡県工業技術センター研究報告
 2023, No. 33 (2023), pp. 48-51