

研究論文

レーザー焼入れの硬化層深さに及ぼす レーザー照射条件と焼入雰囲気の影響

津本宏樹*¹、清水彰子*¹、横山博*¹、花井敦浩*¹

Effect of Condition of Laser Irradiation and Quenching Atmosphere on Depth of Quench-hardened Case in Laser Quenching

Hiroki TSUMOTO*¹, Akiko SHIMIZU*¹, Hiroshi YOKOYAMA*¹
and Atsuhiko HANAI*¹Industrial Research Center*¹

レーザー焼入れにおいて、焼入れに影響を及ぼす因子とその影響度を明らかにするため、レーザー出力、走査速度と硬化層深さの関係、および焼入雰囲気（大気、酸素、窒素）と硬化層深さの関係について調べた。結果、前者においては、同じレーザーの照射エネルギーで比較した場合、レーザー出力が高く、走査速度が速い条件の方が、より深い硬化層が得られた。また、後者においては、酸素、大気、窒素の順に深い硬化層が得られた。

1. はじめに

近年、レーザー装置の高出力化、高品質化、低コスト化が進んだことにより、切断、溶接、微細加工など各種レーザー加工技術に関する研究が盛んに行われている¹⁾。鋼材の熱処理（特に焼入れ）においてもレーザーを適用することで、熱歪みが少ない、複雑形状への適用が可能、工程がクリーン、省エネルギーなどのメリットがあるとされている²⁾が、実製品への適用事例は他の熱処理手法と比べてまだ少ない状況である。

レーザー焼入れは、高周波焼入れなど従来の焼入れとは異なる手法であることから、本技術をより普及させるためには、焼入れに際してどのような影響因子が存在し、その因子がどの程度焼入れに影響を与えるのかを明らかにする必要がある。

また、レーザー焼入れを行う際には、例えばレーザー出力、走査速度などを設定して焼入れ条件を決めることになるが、レーザー照射条件は多岐に設定が可能のため、熱処理炉のような状態図に基づいた厳密な温度管理による焼入れ手法とは異なり、被処理物に対して、どのような焼入れが行われたかの予測が困難という一面も存在する。

本研究ではレーザー焼入れにおける影響因子として、レーザー出力、レーザー走査速度、焼入雰囲気（大気、酸素、窒素）を取り上げ、生成される硬化層深さとの関係を明らかにすることを目的とした。また、品質の予測手段としてサーモグラフィを用いて、レーザー照射時の試験片の

表面温度を測定し、硬化層深さとの相関についての検討をおこなった。

2. 実験方法

2.1 実験システム

レーザーは、最大出力 4000W のディスクレーザー（Trump 社）を使用した。レーザーの媒質には Yb:YAG ディスクが使われており、波長は 1030nm である。レーザー光は 15×1mm のライン状に成形されおり（焦点距離 320mm）、試験片（50×50×10mm）には表面を研削した機械構造用炭素鋼（S50C）を用いた。また、レーザー照射面は試験片表面とし、焦点位置と同一とした。サーモグラフィは、試験片表面のレーザー照射軌跡全体を撮影できるように設置した。焼入雰囲気については、ガスの吹き付け口をレーザーの焦点位置付近に設置し、酸素および窒素雰囲気条件の場合のみ、0.2MPa（約 20L/分）でガスの吹き付けをおこなうよう設定した。硬化層深さの測定指標には、有効硬化層深さ（ビッカース硬さが 450 HV となる試験片表面からの距離）を用いた。

2.2 実験条件

大気、酸素、窒素それぞれの焼入雰囲気において、レーザー出力および走査速度をパラメータとし、表 1(a)~(c)の条件で実験を行った。サーモグラフィの放射率 ϵ の設定については、 $\epsilon=1.0$ で測定をおこなった。

*1 産業技術センター 金属材料室

表1 レーザ照射条件

(a) 大気雰囲気

走査速度 [mm/min]

レーザー出力 [W]	200	300	400	500	600	700	800
600							
650							
700		A1					
800		A2					
900		A3		A4			
950							
1000	A5	A6	A7		A8		
1100							
1300							
1500		A9					
1800		A10					
2000		A11		A12		A13	

(b) 酸素雰囲気

走査速度 [mm/min]

レーザー出力 [W]	200	300	400	500	600	700	800
600		B1					
650		B2					
700		B3					
800		B4					
900							
950							
1000		B5					
1100							
1300		B6					
1500							
1800							
2000							

(c) 窒素雰囲気

走査速度 [mm/min]

レーザー出力 [W]	200	300	400	500	600	700	800
600							
650							
700							
800		C1					
900		C2					
950		C3					
1000		C4					
1100		C5					
1300		C6					
1500		C7					
1800							
2000							

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ照射条件の影響

3.1.1 実験結果

実験条件 A2, A9 (大気雰囲気) におけるレーザー照射後の試験片表面の外観、断面組織、サーモグラフィ像および温度を図2に示す。なお、サーモグラフィ温度については、断面組織観察をおこなった切断面近傍の試験片表面において、サーモグラフィが示した最大温度を記した。図2によると、条件 A9 についてはその表面外観からレーザー照射時に表層部が熔融したことが推察されるが、断面組織からは、熔融部を含め硬化層 (マルテンサイト層) となっていた。

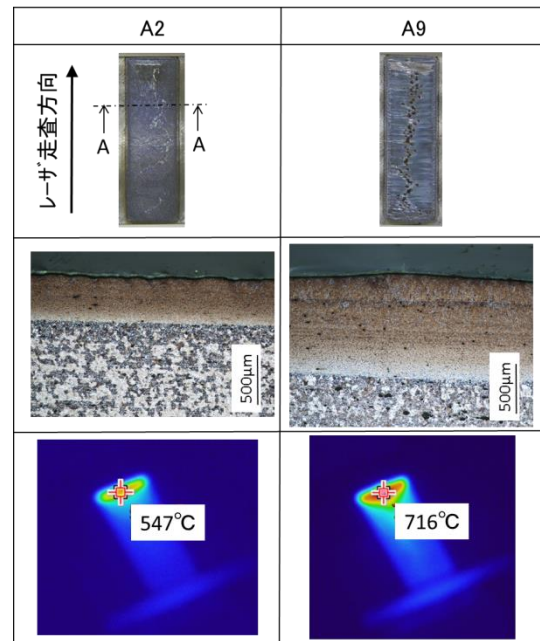


図2 実験結果 (A2, A9)

次に、実験条件 A2, A9, A11 における断面硬さ分布を図3に示す。条件 A11 は条件 A9 に対して、走査速度が同じでレーザー出力が高い条件であり、表層部の熔融も確認されたが、生成された硬化層は条件 A9 より浅くなっていた。このことは、表面が熔融する領域において、単にレーザー出力を高くすれば深い硬化層が得られる傾向ではないことを示している。

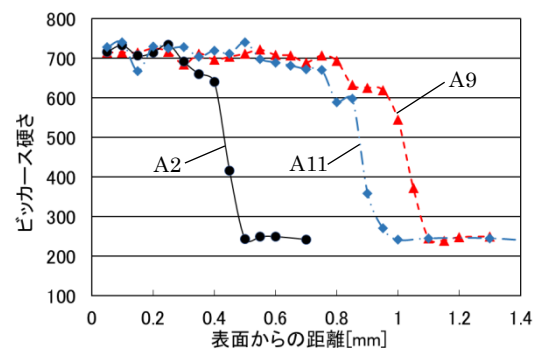


図3 断面硬さ分布 (A2, A9, A11)

3.1.2 サーモグラフィ温度と硬化層深さの関係

実験条件 A1~A13 (大気雰囲気) について、サーモグラフィ温度と有効硬化層深さの関係を図4に示す。サーモグラフィ温度と有効硬化層深さからは、基本的に直線の相関関係が得られたが、条件 A9, A10, A11 のように、レーザー出力が高く、試料表面の熔融が顕著に確認できる条件においては、そのプロットは相関線から外れる結果となった。また、今回の実験条件で得られた最大硬化層深さは、条件 A9 の場合で約 1.0mm となった。

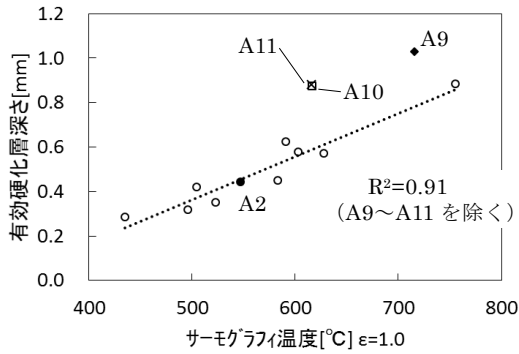


図4 サーマグラフィ温度と有効硬化層深さの関係 (大気雰囲気)

3.1.3 レーザ照射エネルギーと硬化層深さの関係

レーザーの照射条件は表1のとおり、レーザー出力と走査速度との組み合わせで決まるが、試験片に対してどのようなレーザー光を照射したか（レーザーの強弱）が分かりにくい。そこで、ここではレーザーが試験片単位面積に付与するエネルギー（レーザー照射エネルギー）について考える。

出力 P[W]、レーザー照射幅 L[mm]、レーザー走査速度 v [mm/min]とすると、試験片表面 1mm²あたりにレーザーが付与するエネルギーは、 $60P/(L \cdot v)[J/mm^2]$ で表される。

この指標を用いて、有効硬化層深さとの関係を表すと図5が得られる。

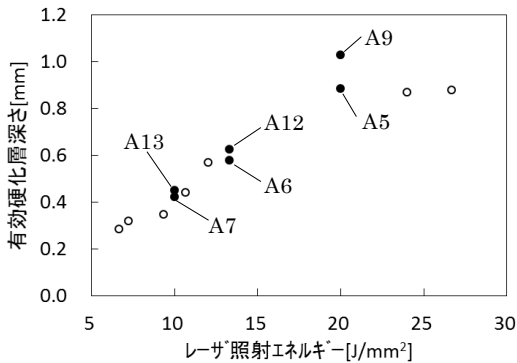


図5 レーザ照射エネルギーと有効硬化層深さの関係 (大気雰囲気)

ここで実験条件 A5 と A9、A6 と A12、A7 と A13 はそれぞれ同じエネルギーを試験片に付与したものであるが、それぞれの実験条件を比較すると、レーザー出力が高く、走査速度が速い条件の方が深い硬化層が得られていることが分かる（この傾向はエネルギーが高い条件においてより顕著に見られる）。一般に焼入れによる硬化層の生成過程では、冷却速度の影響を受ける³⁾が、今回の実験では、短時間に高出力のレーザーを照射した方が冷却速度

が速くなり、結果としてより広範な硬化層が生成されたものと推察される。

3.2 焼入雰囲気の影響

3.2.1 実験結果

実験条件 B4（酸素雰囲気）、C1（窒素雰囲気）におけるレーザー照射後の試験片表面の外観、断面組織、サーモグラフィ像および温度を図6に示す。レーザーの照射条件はともに同じであるが、条件 B4 においては試験片表面に熔融部が存在したのに対し、条件 C1 については研削痕および金属光沢が残存していた。また、断面観察による硬化層の深さやサーモグラフィ温度もそれぞれ異なる結果を示した。

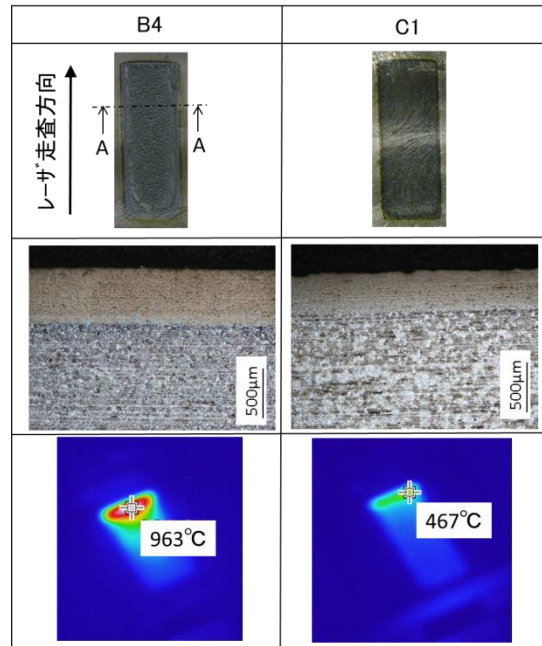


図6 実験結果 (B4, C1)

次に、レーザー照射条件が同じで焼入雰囲気が異なる B4, C1 および A2 についての断面硬さ分布を図7に示す。この図から、同じレーザー照射条件であっても、焼入雰囲気により生成される硬化層の深さが異なることが分かる。

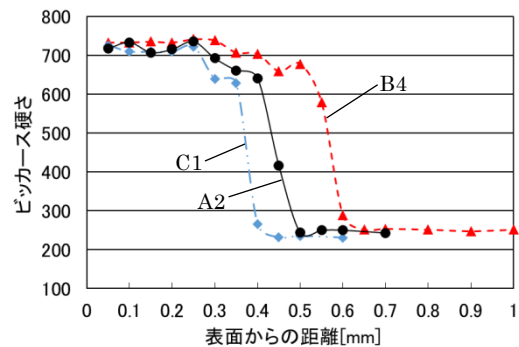


図7 断面硬さ分布(A2, B4, C1)

3.2.2 サーマグラフィ温度と硬化層深さの関係

実験条件 B1～B6, C1～C7 におけるサーモグラフィ温度と有効硬化層深さの関係を図8に示す。酸素雰囲気 (B1～B6) については、図4 (大気雰囲気) と同様、直線の相関関係が得られたが、レーザー出力が高い条件 (B5, B6) ではその相関線から外れる結果となった。また、今回の実験条件で得られた硬化層深さは最大で約1.4mmであり、大気雰囲気の場合よりも深い硬化層が得られた。

窒素雰囲気 (C1～C7) についても同様の傾向 (右上がりの直線の相関関係) はあるものの、大気、酸素雰囲気と比べてプロットがばらつく結果となった。

図4および図8を見ると、それぞれの焼入雰囲気によって、サーモグラフィで測定される温度は異なる値を示している (酸素雰囲気が最も高い温度を示す) が、これは各条件において、酸化スケールの生成等を考慮した放射率の合わせ込みができていないことが要因であると考えられ、今後検討を要する部分である。

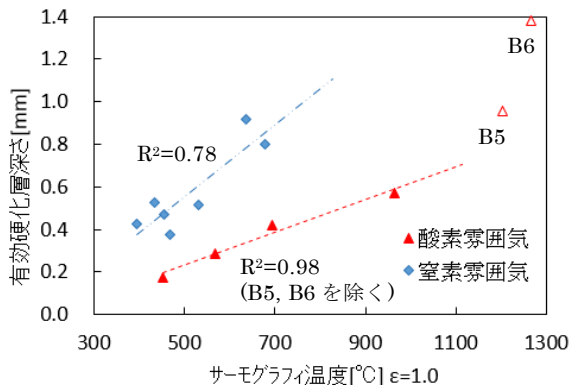


図8 サーマグラフィ温度と有効硬化層深さの関係 (酸素および窒素雰囲気)

3.2.3 レーザ照射エネルギーと硬化層深さの関係

実験条件 B1～B6, C1～C7 および A1～A3, A6, A9～A11 (大気雰囲気、走査速度 300mm/min のもの) におけるレーザー照射エネルギーと有効硬化層深さとの関係を図9に示す。今回の実験において、レーザー照射エネルギーがおおよそ 20J/mm² 以下の領域では、同じレーザー照射エネルギーであっても、酸素、大気、窒素雰囲気の順に深い硬化層が生成されており、焼入れ時の雰囲気が硬化層の生成に影響を与える結果が得られた。

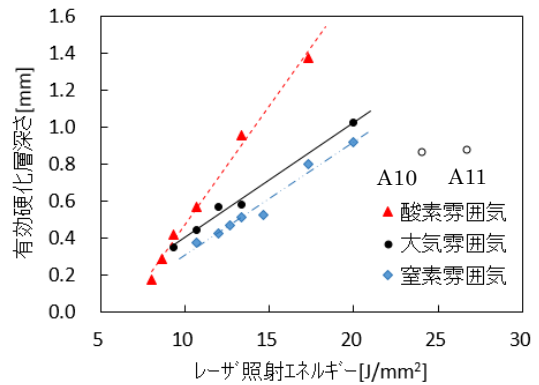


図9 レーザ照射エネルギーと有効硬化層深さの関係 (走査速度 300mm/min)

4. 結び

今回、レーザー焼入れにおいて、レーザー照射条件および焼入雰囲気と硬化層深さの関係について検討をおこなった結果、以下の事が明らかとなった。

- (1)サーモグラフィ温度と有効硬化層深さの間には (一部条件を除き) 直線の相関関係が存在する。今回の実験においては、大気、酸素雰囲気に比べて窒素雰囲気の方がそのバラツキが大きい傾向であった。
- (2)レーザーの照射エネルギーが同じ場合、レーザー出力が高く、走査速度が速い条件の方が深い硬化層が得られた。
- (3)焼入れ時の雰囲気は硬化層深さに影響する。今回の実験では酸素、大気、窒素雰囲気の順に深い硬化層が得られた。

謝辞

本研究にあたり、レーザー焼入れ試験片の作製にご協力いただいた株式会社齋藤工業に深く感謝いたします。

文献

- 1) 特許庁：平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書 (概要) レーザ加工技術, P26(2011)
- 2) 富士高周波工業株式会社：レーザー焼入れ研究所スペシャルレポート vol.1, 1(2012)
- 3) (一社) 日本熱処理技術協会：熱処理ガイドブック <基礎編>, P118(1993)