

研究論文

鋼材へのレーザ焼入れにおける表面粗さと板厚の影響

津本宏樹*1、清水彰子*1、横山 博*1、花井敦浩*2、古澤秀雄*1

Effect of Surface Roughness and Plate Thickness
in Laser Quenching of SteelHiroki TSUMOTO*1, Akiko SHIMIZU*1, Hiroshi YOKOYAMA*1,
Atsuhiko HANAI*2 and Hideo FURUZAWA*1

Industrial Research Center*1

レーザ焼入れにおいて、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、材料の表面粗さ（フライス仕上げ、研磨仕上げ等）および板厚が与える影響について検討をおこなった。結果、特定のレーザ照射条件において、硬化層の生成有無や温度など、表面粗さが鋼材の焼入れに影響を与えることが明らかとなった。また、同じレーザ照射条件であっても板厚によっては欠陥や不完全焼入れ層が形成され、熱歪みが顕著に現れることが分かった。

1. はじめに

近年、レーザ装置の高出力化、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⁾。

レーザ焼入れは、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。

著者らはこれまでに、レーザ照射条件や焼入雰囲気はレーザ焼入れに及ぼす影響について研究をおこなってきた³⁾⁴⁾。本研究では新たな影響因子として、レーザ照射面における試験片の表面粗さおよび試験片の板厚を取り上げ、焼入れにどのような影響を及ぼすのか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検討した。

2. 実験方法

2.1 実験システム

レーザは、最大出力 4000W のディスクレーザ（Trumpf 社）を使用した。レーザの媒質には Yb:YAG（Ytterbium doped Yttrium Aluminum Garnet）ディ

スクが使われており、波長は 1030nm である。レーザ光は 15×1mm のライン状に成形されており（焦点距離 320mm）、走査速度は 300mm/分、焦点位置は試験片表面とし、試験片の固定にはバイスを用いた。よってレーザ照射面および裏面は接触物がない状態となる。試験片の材質は機械構造用炭素鋼（S50C）とし、表面仕上げと板厚の組み合わせにより表 1 の 7 仕様を製作した。サーモグラフィは、試験片表面のレーザ照射軌跡全体を撮影できるように設置し、焼入雰囲気は大気雰囲気とした。

表 1 試験片仕様

試験片 番号	大きさ [mm] (縦×横×板厚)	表面仕上げ方法
1	50×50×10	フライス加工のまま
2	50×50×10	耐水研磨紙 (80 番) 仕上げ
3	50×50×10	耐水研磨紙 (400 番) 仕上げ
4	50×50×10	バフ研磨 (鏡面) 仕上げ
5	50×50×4	フライス加工のまま
6	50×50×2	フライス加工のまま
7	50×50×1	フライス加工のまま

2.2 実験条件

表面粗さおよび板厚の影響をみるため、レーザ出力と試験片仕様を組み合わせ、表 2 (a)、(b) の条件で実験

*1 産業技術センター 金属材料室 *2 産業技術センター 金属材料室 (現産業労働部 産業振興課)

した。サーモグラフィの放射率 ϵ については、 $\epsilon=1.0$ に設定した。このため、サーモグラフィの温度表示は実温度ではなく、測定上の見かけの温度となっている。

表 2 実験条件
(a) 表面粗さの影響

試験片番号				
	1	2	3	4
レーザー出力[W]	A1	A2	A3	A4
500	A1	A2	A3	A4
600	A5	A6	A7	A8
800	A9	A10	A11	A12
1000	A13	A14	A15	A16

(b) 板厚の影響

試験片番号				
	1	5	6	7
レーザー出力[W]	B1	B2	B3	B4
300	B1	B2	B3	B4
500	B5	B6	B7	B8
800	B9	B10	B11	B12

3. 実験結果および考察

3.1 表面粗さの影響

まず、触針式表面粗さ測定機により、実際に実験に使用した試験片の表面粗さを測定した結果を図 1 に示す。この結果から、試験片の表面性状はフライス加工で仕上げた仕様の凹凸が最も大きく、バフ研磨仕上げのものが最も平滑となっていることが分かる。

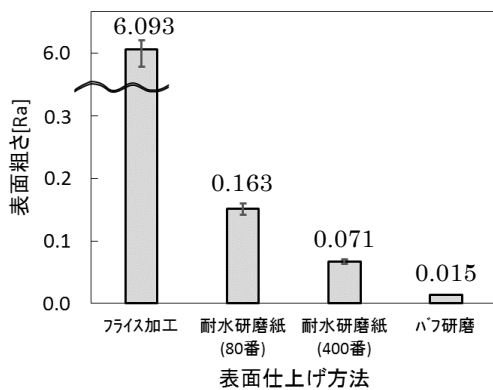


図 1 表面粗さ測定結果
(数値は n=4 の平均値)

次に、サーモグラフィ温度とレーザー焼入れにより生成された有効硬化層深さ（ビッカース硬さが 450 HV となる試験片表面からの距離）の関係を図 2 に示す。硬化層が生成された条件においては、表面の仕上げ方法に関係なくサーモグラフィ温度と有効硬化層深さにはほぼ線形の関係が得られた。レーザー出力が最も低い実験条件である A1~A4（レーザー出力 500W）では、条件 A1（フ

ライス加工）でのみ試験片表面のレーザー照射部が黒色に変色し、酸化スケールが生成した。条件 A1、A2 における実験後の試験片外観、断面組織およびレーザー照射中のサーモグラフィ像を図 3 に示す。断面組織観察から条件 A1 の表層には焼入れによる硬化層が生成していることが確認できた。

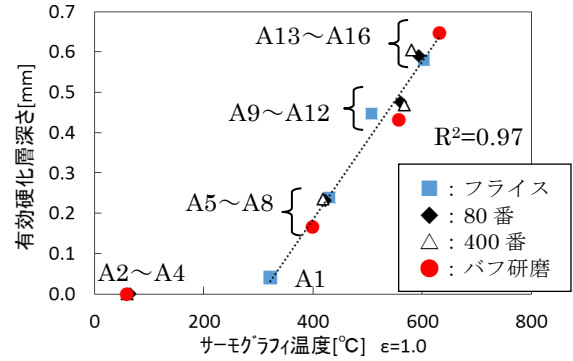


図 2 サーモグラフィ温度と硬化層深さの関係

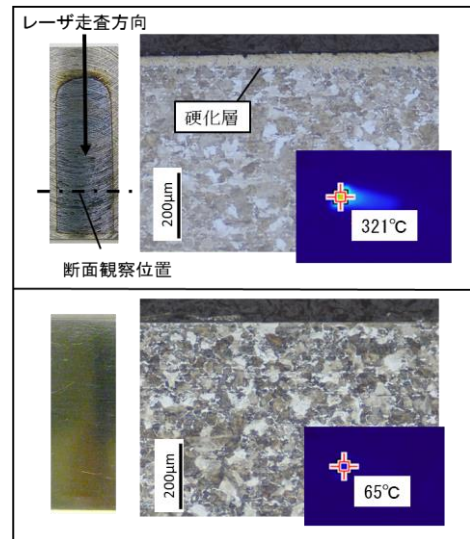


図 3 試験片外観、断面組織、サーモグラフィ像
(上：条件 A1、下：条件 A2)

条件 A5~A8（レーザー出力 600W）において、レーザー照射中にサーモグラフィが記録したピーク温度の時間的変化を図 4 に示す。t=0 においてレーザー照射を開始し、レーザー照射中は常に試験片表面のレーザー照射部においてピーク温度が記録されていた。試験片の表面温度は、レーザー照射を開始してから一定時間の後、急激に上昇し、その後ほぼ一定の値を示した。昇温は試験片表面が最も粗い条件である A5（フライス加工仕上げ）が一番早く、最も平滑な条件である A8（バフ研磨仕上げ）が一番遅かった。

表面粗さの大きい方がレーザー照射部の温度が上がりやすく（図 4）、その影響はレーザー出力が低い条件にお

いては、硬化層の生成有無にも関連している（図2、3）ことから、低入熱でのレーザー焼入れを検討する場合には、表面粗さを考慮した条件設定が必要になると考えられる。

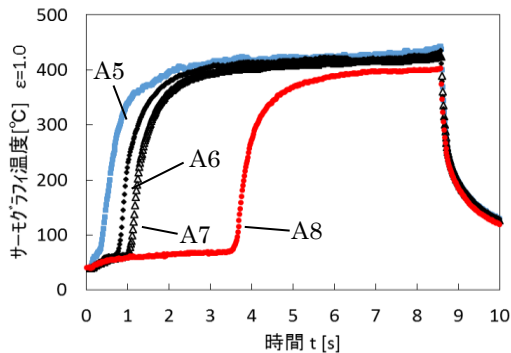


図4 サーマグラフィピーク温度の時間的变化

3.2 板厚の影響

実験条件 B5~B8（レーザー出力 500W）における試験片の断面硬さ分布を図5に示す。レーザー照射条件、表面仕上げが同じであるにも関わらず、断面硬さ分布はそれぞれ異なっており、特に条件 B7、B8 では条件 B5、B6 と比較して表面近傍の硬さが低く、硬さ分布も安定しない結果となった。

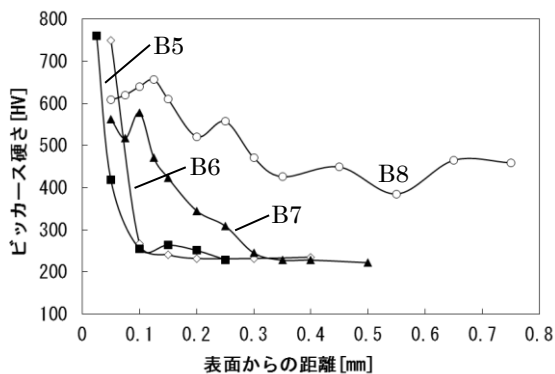


図5 断面硬さ分布（レーザー出力 500W）

条件 B6、B7 における実験後の試験片外観、断面組織およびレーザー照射中のサーモグラフィ像を図6に示す。条件 B7 の断面組織を見ると、条件 B6 と比べて硬化層の生成が不均一（不完全焼入層が生成）になっており、このことが硬さが低くなった原因であると考えられる。

条件 B9、B10（レーザー出力 800W）における実験後の試験片外観、断面組織およびレーザー照射中のサーモグラフィ像を図7に示す。どちらも焼入れによる硬化層が生成されているが、条件 B10 では表層部に過熱によると思われる欠陥が観察された。

また、条件 B1~B4（レーザー出力 300W）ではいずれも硬化層は生成されていなかった。

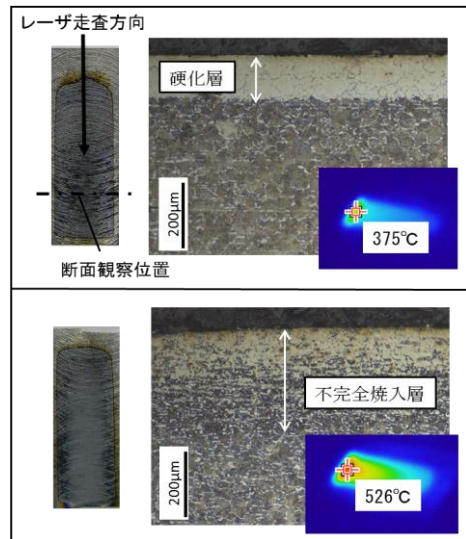


図6 試験片外観、断面組織、サーモグラフィ像
（上：条件 B6、下：条件 B7）

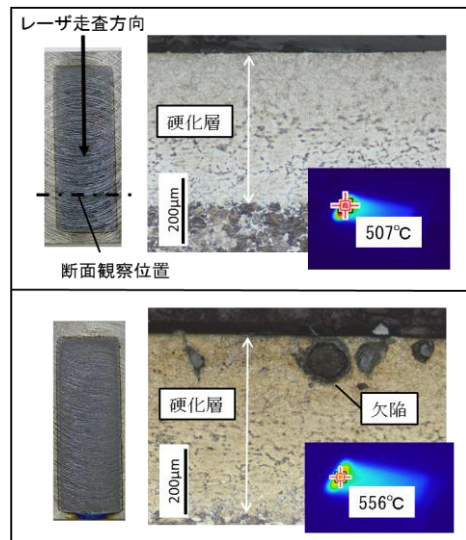


図7 試験片外観、断面組織、サーモグラフィ像
（上：条件 B9、下：条件 B10）

次に、条件 B5~B8 におけるサーモグラフィのピーク温度の時間変化を図8に示す。レーザー照射条件は全て同じであるが、板厚が薄いほど最高温度が高く、かつレーザー照射終了（ $t \approx 8.5$ ）後の冷却も十分になされていないことから、これらが図6、7における欠陥や不完全焼入層生成の要因になっていると考えられる。

今回、板厚の薄い試験片で不完全焼入層が生成したが、要因は母材内部の熱伝導のみでは焼入れに必要な冷却速度が得られなかったためと推察される。よって、板厚の小さな試験片において良好な焼入硬化層を得るためには、油など外部媒体による付加的な冷却方法も検討する必要がある。

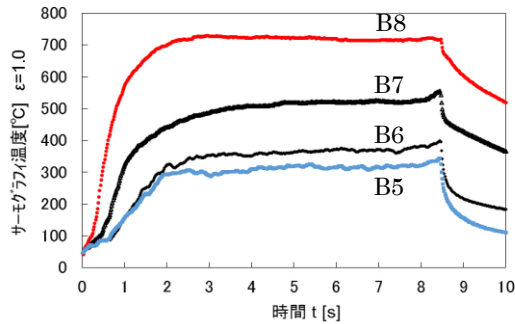


図8 サーマグラフィピーク温度の時間的变化
(レーザー出力 500W)

レーザー焼入れによる熱歪みの影響をみるため、レーザー照射前後での試験片表面のうねりを非接触式三次元表面性状測定機により測定した。条件 B10、B11 における測定結果を図9に示す。うねりの測定方向はレーザー走査方向と同一であり、データはカットオフ値 $\lambda_c=0.8\text{mm}$ のガウシアンフィルタにより短波長成分を遮断したものをを用いた。

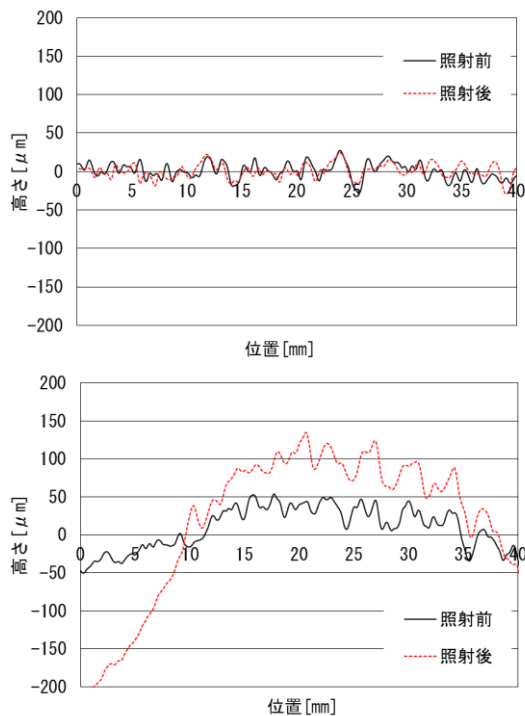


図9 表面うねり
(上：条件 B10、下：条件 B11)

図9において条件 B10 (板厚 4mm) ではレーザー照射前後で表面のうねりはほとんど変化していないが、条件 B11 (板厚 2mm) では、試験片はレーザー照射面側に上凸に変形していることがわかる。一般的にレーザー焼入れは熱歪みが小さいと言われているが、板厚が小さくなると試験片の剛性も低くなり、熱歪みが顕著に現れると考えられる。

4. 結び

今回、試験片の表面粗さおよび板厚がレーザー焼入れに与える影響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) 表面粗さの違いによる焼入れへの影響は、レーザー出力が小さい条件において特に顕著に表れ、表面粗さが大きい方がレーザー照射部の温度が上がりやすく、焼きが入りやすい傾向であった。
- (2) 同じレーザー照射条件であっても、試料の板厚によって焼入状態は変わり、板厚が薄くなると過熱による欠陥や冷却速度の低下による不完全焼入層が発生した。
- (3) 板厚が薄くなると、レーザー焼入れによる熱歪みが顕著に現れた。歪みの方向はレーザー照射面側に凸となる方向であった。

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, 26(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) 津本, 古澤, 斉藤, 花井：あいち産業科学技術総合センター研究報告, 2, 44(2014)
- 4) 津本, 清水, 横山, 花井：あいち産業科学技術総合センター研究報告, 4, 22(2015)