レーザー焼入した鋼の硬化挙動と摩耗特性

薬師寺正雄*, 近藤喜之*, 石井孝也**, 辻井弘和***, 池永 勝****

Hardening Behavior and Property of Wear of Laser Transformation Hardened Steel

Masao YAKUSHIJI*, Yoshiyuki KONDO*, Takaya ISHII**, Hirokazu TSUJII*** and Masaru IKENAGA****

Laser transformation hardening was carried out on two types of steel that differed in hardenability, using a 1kW CO₂ laser under various conditions, and the effects of processing parameters—such as scan rate and the defocussing of the laser beam—on the hardened case depth and width, microstructure, hardness distribution and wear properties were investigated.

The results obtained were as follows :

- 1) The maximum depth and width of hardened case decreased with increasing scan rate.
- 2) A two-step change in hardness was observed, in which the second step corresponded to an incompletely hardened layer between the maximum hardness layer at the surface and the matrix.
- 3) In the hardened surface layer, X-ray diffraction analysis revealed the existence of retained austenite.
- 4) Hardening occurs independently of hardenability in the steels tested, due to the fact that the cooling rate in laser hardening is much faster than the critical cooling rate of the steels.
- 5) The wear resistance of the laser-hardened steels was much better than that of the normalized steels. The improvement produced by laser hardening was particularly marked in sliding rates of 0.8m/s or less. This was attributed to the fact that the hardened area on the sliding surface increased with decreasing scan rate.

Key Words : Laser Transformation Hardening, Microstructure, Hardness, Property of Wear

1. 緒 言

近年, 安定した大出力レーザー発振装置の開発にともなって, 切断, 溶接とともに熱加工の代表的な分野である熱処理においてもレーザーの利用が急速に進みつつある。これまでに, レーザー焼入の特性^{1), 2)}, 硬化挙動についての熱伝導モデルによる解析^{3)~6)}, 硬化層の組織学的検討^{7), 8)}, レーザー焼入による部品の耐摩耗性の向上例^{9), 10)}など多くの報告がなされているが, 焼入条件と摩耗特性との関係についての研究は見当たらないようである。

本研究では焼入性の異なる2種類の鋼についてレーザー焼入を行い, レーザービームの走査速度および焦点ずれ量が焼入硬化部の形状, 組織, および硬さなどに及ぼす影響を調べるとともに, 焼入条件とすべり摩耗特性との

関係について検討を行った。

2. 実験方法

試料としては予め焼ならしを施したS45CとSCM435を使用した。機械加工により図1(a)に示した形状の試験片を作成し, 処理面をエメリー紙0/4によって一定の表面粗さに仕上げた後, 図1(b)に示したように放射線状に8箇所, 等間隔にレーザー焼入を行い, その後160℃で1h低温焼戻し処理を施した。

連続出力1kWの東芝LAC553型CO₂レーザー加工装置を使用し, ガウス分布に近いエネルギー分布を有する直径40mmのレーザービームを用いて焼入を行った。

レーザー焼入において硬化部の形状はいろいろな因子によって影響を受けるが, レーザービームの出力を一定とした場合, 試料の焼入性と表面の反射率が同一であれば走査速度と焦点ずれ量 α_0 値によって支配される。 α_0

(a) Shape of specimen (b) Laser irradiated area

Fig. 1 Shape of specimen and laser irradiated area.

* 関西大学工学部 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)
Fac. of Eng., Kansai Univ. (3-35, Yamate-cho 3-chome, Suita-shi, Osaka 564)

** 関西大学工学部 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)
[現: 日新電機(株)]
Fac. of Eng., Kansai Univ. (3-35, Yamate-cho 3-chome, Suita-shi, Osaka 564)
[Present: Nissin Electric Co., Ltd.]

*** 神戸市立工業高等専門学校 (〒655 兵庫県神戸市垂水区舞子台8-3-1)

Kobe City College of Technology (3-1, Maikodai 8-chome, Tarumi-ku, Kobe-shi, Hyogo 655)

**** 日本コーティングセンター(株) (〒242 神奈川県大和市下鶴間3860)

Japan Coating Center Co., Ltd. (3860, Shimotsuruma, Yamato-shi, Kanagawa 242)

値は集光レンズの焦点距離と、レンズとワーク表面間の距離との比を表す数値であって、出力やビームの走査速度とともにレーザー焼入における重要な因子である。焼入条件としては、 α_b 値（集光レンズの焦点距離250mm）を1.18および1.23とし、ビーム走査速度を0.6~1.5m/minとした。なお、ビーム照射に先立って試験片の表面にAchson社製Aero 504（平均粒径2~3 μ mの人工グラファイト粉末）塗覆を施した。

レーザー焼入処理の後、試験片を切断し、断面について焼入硬化部の幅および深さを測定するとともに、断面組織の観察ならびに微小硬さ計による硬さ測定（荷重100g）を行った。また、摩耗試験には鈴木式のすべり摩耗試験機を使用し、摩擦速度を0.08~1.57m/s、接触圧力を1.96MPa、全摩擦距離を3000mとし、相手材には焼入焼戻しをしたS45C（Hv 580）を用いて無給油の乾燥摩耗の状態で試験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 焼入硬化部の形状

表1は α_b 値を1.18および1.23とし、レーザービームの走査速度を変化させた場合の焼入硬化部の幅および深さをS45Cについて測定した結果を示したものである。走査速度を速くすると、それにとまって硬化部の幅および深さはともに減少し、逆に走査速度が遅くなるほど幅広くかつ深い硬化部が得られることがわかる。また、 α_b 値が大きいほど焦点からのずれが大きくなり、照射面積は増加するがエネルギー密度が低下し、変態点以上の温度に加熱される領域は小さくなる。その結果、硬化部の幅および深さがともに減少するものと考えられる。なおSCM435についても測定を行ったが、結果はS45Cの場合とほぼ同様であって、母材の焼入性の影響はほとんど認められなかった。これはレーザー焼入における冷却速度が、自己焼入であるにもかかわらず臨界冷却速度よりもはるかに大きいため、従来の焼入方法とは異なり、焼入性の違いが影響しなかったものと考えられる。

3. 2 熱伝導モデルから算出した硬化部の深さと実測値との比較

Jimbouらは熱伝導モデルを解析し、硬化部の深さD

Table 1 Effect of laser beam scan rate on the hardened depth and width.

α_b	Hardened case	Scan rate (m/min)				
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
1.18	Depth (mm)	0.78	0.63	0.53	0.46	0.37
	Width (mm)	4.65	4.10	3.65	3.30	3.05
	Coverage rate(mm ² /s)	46.5	54.7	60.8	66.0	76.3
1.23	Depth (mm)	0.59	0.41	0.30	0.22	0.15
	Width (mm)	4.05	3.45	3.05	2.65	2.30
	Coverage rate(mm ² /s)	40.5	46.0	50.8	53.0	57.5

を(1)式のように与えている²⁾。

$$D=(d_b/2\beta)\ln(T_s/T_i)\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで

$$\beta=0.897+0.381\ln(Vd_b/4\alpha)+0.123[\ln(Vd_b/4\alpha)]^2$$

であり、D 硬化部の深さ mm

d_b ビーム径 mm

T_s 表面温度 K

T_i 変態温度 K

V ビーム走査速度 mm/s

α 試料の熱拡散率 mm²/s である。

表面温度 T_s は、GregsonおよびAshbyらによってそれぞれ(2)式²⁾および(3)式¹⁰⁾のように与えられている。

$$T_s=T_0+(P_0/d_b^{3/2}K)(4\alpha/\pi V)\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$T_s=T_0+(P_0/d_b^{3/2}K)(\alpha^{1/2}/K)\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここで、 T_0 室温 K

P_0 吸収エネルギー W

K 熱伝導率 W/mm・K である。

これらの式を使用し、本研究でのレーザー焼入条件（ $K=0.035$ W/mm・K、 $P_0=900$ W、 $T_i=996$ K、 $\alpha=7.4$ mm²/s）におけるS45Cの硬化部の深さDを算出した。その結果を実測値とあわせて図2に示す。 α_b 値1.18の場合は、低走査速度域では計算値と一致していないが、走査速度が大きくなるにしたがってAshbyらによって提案された3次元熱伝導モデルによる値と一致するようになる。これに対して α_b 値1.23の場合は、低走査速度域ではAshbyの式、また高走査速度域ではGregsonらの式を用いて算出した値と比較的良好に一致するようである。このように本研究の結果は必ずしも理論値とよく一致しているとは言えない。これは菊地ら⁴⁾が述べているように、試料表面に塗布したコーティング材のレーザー吸収率および試料表面への熱伝導の影響によるものと思われる。

3. 3 組織

レーザービームの走査速度を一定とし、 α_b 値を変えて焼入を行ったS45CとSCM435の断面組織を図3に示す。レーザー焼入の場合の加熱は表面からだけに限られるので、深さによって熱履歴が順次変化し、それに対応

Fig. 2 Comparison of the hardened depths observed and calculated from heat conduction models.

Fig. 3 Microstructures in the transverse sections of laser hardened specimens.

して硬化部の組織も変化している。すなわち、表面に近い層では、レーザー照射によって温度が相当高温まで上昇するので、短時間の加熱であっても炭素は十分に拡散し、ビーム通過後の急速なセルフクエンチングによって完全に焼入され微細なマルテンサイト組織となっている。内部の母材と接する層では変態点以上に加熱される時間が極めて短いためパーライトの部分のみがマルテンサイトに変態し、その結果フェライトとマルテンサイトが共存する不完全焼入層となっている。また、これら二つの層の間にマルテンサイトと微細パーライトが共存する層が存在しているようである。

つぎにX線回折試験によって残留オーステナイトの有無について検討した。その結果を図4に示す。丸尾ら⁷⁾は硬さ測定の結果から、SK5のレーザー焼入材では残留オーステナイトの存在は無視できると述べており、天野¹²⁾は、炭素濃度の低下にともなって残留オーステナイトは減少し、S50Cではほとんど認められなかったと報告している。また、菊池ら¹¹⁾のX線による測定でも残留オーステナイトは検出されていない。本研究の結果はこれらの報告とは異なり、S45CおよびSCM435のいずれ

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of the laser hardened specimens.

においても明らかに残留オーステナイトの存在が認められた。これは炭素量だけでなく、出力、ビームモード、走査速度および a_s 値といった焼入条件の違いによるものと考えられる。

3. 4 硬さ

図5は a_s 値を1.23とし、0.6および1.0m/minの走査速度でレーザー焼入したS45CおよびSCM435の断面における硬さの変化を示したものである。硬さの測定は硬化部の中心線にそって行った。図5からわかるように、S45Cの場合、走査速度0.6m/minでは深さ0.9mm付近で、また走査速度1.0m/minでは0.5mm付近で、それぞれ母材の硬さ（Hv約220）まで低下しているが、これ

Fig. 5 Hardness changes in the transverse sections of laser hardened specimens.

は組織観察の結果とよく一致している。SCM435についてもS45Cの場合と同様の傾向が認められる。

一般にレーザー焼入した鋼では高周波焼入の場合とは異なり、表面付近の平坦な最高硬さ域から急激に母材硬さまで変化と言われているが、比較的炭素量の低いフェライト・パーライト鋼では、最高硬さ域と母材硬さとの間に中間的な硬さを示す領域の存在が認められている^{5), 13)}。図5においても、とくに走査速度が0.6m/minの場合、明らかにこのような中間硬さ域の存在が見られるが、この中間硬さ域はフェライトとマルテンサイトが共存する不完全焼入層に対応している。

3.5 すべり摩耗特性

レーザー焼入したS45CおよびSCM435について摩擦速度を変化させた場合の摩擦距離と摩耗量の関係を図6に示す。摩擦速度に関係なく、いずれの試料も摩擦距離200m付近までは初期摩耗、その後は定常摩耗の段階にあることがわかる。

摩擦距離3000mにおける摩耗量と摩擦速度との関係、すなわち摩耗速度特性を示したのが図7である。S45CおよびSCM435のいずれにおいてもレーザー焼入材では焼ならし材に比して著しく摩耗量が少なくなるとともに、

特性曲線の極大点もやや低摩擦速度側に移っている。このようなレーザー焼入による耐摩耗性の向上には、焼入にともなう硬さの上昇のほかに、微小摩耗粉が硬化部によって非照射部の表面から掃き出される、いわゆるブラッシング作用、残留圧縮応力の存在なども寄与しているものと考えられる。約1.0m/s以上の高摩擦速度域では、摩擦速度が速くなるにともなって摩耗量がしだいに増加しているが、これは摩耗試験後の摩擦面の硬さが著しく低下していたことから、摩擦面の温度上昇によって焼戻しが急速に進行したことによるものと考えられる。

摩耗試験後の摩擦面の粗さ R_a を測定した結果を表2に示す。約0.4m/s以下の摩擦速度域ではレーザー照射によって硬化した部分は非照射部よりも滑らかであるが、摩擦速度0.4~0.9m/sの場合と比べるとやや粗いようである。これは約0.4m/s以下の摩擦速度域での摩耗は機械的破壊摩耗によって進行するが、硬化部による前述のブラッシング作用によって、それが主に非照射部で起こるためであろう。また、摩擦速度0.4~0.9m/sの範囲では、硬化部と非照射部の粗さの差がやや少なくなっているが、これはこの摩擦速度域では主に酸化摩耗が生じていることによるとと思われる。摩擦速度が約0.9m/s以上になると、焼戻しが進むとともに溶融摩耗域に入るため、硬化部、非照射部を問わず摩擦面はかなり粗くなっている。

Fig. 6 Relations between the wear loss of laser hardened specimens and sliding distance. (Scan rate 1.0m/min)

Fig. 7 Properties of wear of the laser hardened specimens.

Table 2 Roughness R_a of the wear surface of laser hardened S45C.
(Scan rate 1.0m/min, Sliding distance 3000m)

Sliding rate (m/s)	Laser hardened area (μm)	Irradiation free area (μm)
0.08	0.5	1.0
0.20	0.6	1.1
0.47	0.4	0.7
0.89	0.4	0.8
1.53	1.2	1.5

また、図7において、レーザービームの走査速度を遅くした場合のほうが摩耗量は少なくなっているが、これは摩擦面において焼入硬化部が占める面積の割合が大きいことによるものであろう。摩擦面において焼入硬化部が占める面積と摩擦面の全面積との比率を焼入部面積率とすると、この値は試験片の寸法および表1に示した焼入硬化部の幅から求めることができる。すなわち、S45Cでは、走査速度1.0m/minの場合は25.8%、0.6m/minの場合は34.3%であり、一方、SCM435では走査速度1.0m/minの場合は28.2%、0.6m/minの場合は39.3%であった。これら焼入部面積率と摩耗量の関係は図8のようになる。なお、この場合の摩耗量としては特性曲線における極大点の値を、また焼入部面積率100%の場合の摩耗量としては、同一形状の試料を840℃から油焼入し、160℃で1h焼戻した後、レーザー焼入材の場合と同じ条件で摩耗試験を行って得られた値を使用した。

図8から明らかなように、レーザー焼入材の摩耗量は焼入部面積率0%，すなわち焼ならし材から、焼入部面積率100%，すなわち全面焼入材まで焼入部面積率が増すにともなって低下しているが、約30%以上では摩耗量はほぼ一定となっている。したがって、これ以上焼入部の面積を増しても耐摩耗性の向上は期待できない。換言すれば、レーザー焼入の場合は耐摩耗性に関する限り局部的な焼入で十分効果が得られることがわかる。

4. 結 言

S45CおよびSCM435を試料として出力1 kWのCO₂レーザーを照射し、焼入硬化部の形状、組織、硬さなどに及ぼすレーザービームの走査速度および α_s 値の影響を調べるとともに、すべり摩耗特性について検討し、つぎのような結果を得た。

1) レーザービームの走査速度を速くすると、それにとともに硬化部の幅および深さは減少するが、焼入部分の面積は増加する。

2) 焼入硬化部の組織はマルテンサイトのみからなる完全焼入層、母材組織との境界付近にみられる不完全焼入層、およびその中間に存在するマルテンサイトと微細パーライトとの共存層からなっているようであった。このような組織に対応して、硬さ測定においても表面付近

Fig. 8 Relations between the wear loss and the ratio of laser hardened area in wear surface.

の最高硬さ域と母材硬さ域の間に、中間的な硬さを示す領域の存在が認められた。

3) X線回折試験の結果、レーザー焼入材の表面層には少量の残留オーステナイトの存在が認められた。

4) レーザー焼入における冷却速度は臨界冷却速度よりはるかに大きいため、鋼の焼入性の影響は組織観察、硬さ測定のいずれにおいてもみられなかった。

5) レーザー焼入材の耐摩耗性は焼ならし材に比して著しく向上していたが、これは、とくに約0.8m/s以下の低摩擦速度域で顕著であった。

6) レーザービームの走査速度が遅いほど耐摩耗性は良好であった。これは摩擦面における焼入部面積率が大きくなることによるものと考えられる。

本研究を行うにあたり、レーザー処理を引き受けて頂いた東芝衛生産技術研究所 重松 孝氏に感謝の意を表します。また、研究費の一部は日本私学振興財団学術研究振興資金の援助を受けたことを付記します。

(1989-6-26 受理)

文 献

- 1) F. D. Seaman and D. S. Gnanamuthu ; *Met. Prog.*, 108, 67 (1975)
- 2) D. S. Gnanamuthu and V. S. Shankar ; *Laser Surface Treatment of Metals*, Ed. by C. W. Draper and P. Mazzone, p. 413 (Martinus Nijhoff Publishers, 1986)
- 3) P. A. Molian ; *Surface Eng.*, 2, 19 (1986)
- 4) 菊池正夫, 久田秀夫, 森津和夫 ; *小松技報*, 26, 98 (1980)
- 5) 川澄博通, 新井武二 ; *精密機械*, 47, 669 (1981)
- 6) 川澄博通, 新井武二 ; *精密機械*, 47, 1470 (1981)
- 7) 丸尾 大, 宮本 勇, 石出 孝, 荒田吉明 ; *溶接学会誌*, 50, 208 (1981)
- 8) 川澄博通 ; *熱処理*, 23, 220 (1983)
- 9) 菊池正夫, 山西昭夫, 福田 達 ; *熱処理*, 23, 277 (1983)
- 10) J. E. Miller and J. A. Wineman ; *Met. Prog.*, 111, (5), 38 (1977)
- 11) M. F. Ashby and K. E. Easterling ; *Acta Metall.*, 32, 1935 (1984)
- 12) 天野和男 ; *鋳鍛造と熱処理*, 7, 33 (1986)
- 13) 久田秀夫 ; *実務表面技術*, 29, 170 (1982)