鋼片のレーザきず手入れのための要素技術の開発*

市 古 修 身** 吉 田 三 男*** 藤 沢 淳 一***

Development of Core Technologies for Laser Repairing of Surface Defects of Steel Billet

Osami ICHIKO, Mitsuo YOSHIDA and Junichi FUJISAWA

Laser repairing of surface defects of steel billet was studied. Four core technologies necessary for developing the new method were extracted and developed. First, a new optical system focusing a laser beam to line-shape was developed, in order to melt off surface defects. Secondly, laser melting method with O_2 -gas blow was developed for removing molten parts of the surface not to remain bad effects on the billet quality. Thirdly, it was made possible by laser heating process simulation model and experiments, to predict the required laser power for repairing both cold and hot billet. Fourthly, a flying optical system, which focuses a laser beam at each position of surface defects of the fast running steel billet, was discussed. It can also decrease the required laser power by running along the same direction of the billet. Thus, core technologies have been prepared. So, the laser repairing method for steel billet will be realized as a total system.

Key words: repairing surface defect, laser melting, steel billet, O_2 -gas blow, flying optical system

1. は じ め に

鉄鋼製造プロセスにおいて、スラブ、ビレット等の鋼片の精整工程におけるきず手入れの無人化・省力化は、3 K 対策の一環としても、鉄鋼業において極めてニーズが大きい。無人化のためにはきずの自動検出技術と自動手入れ技術の両方が不可欠である。前者については実用化に近い技術ができていますが、後者については自動グラインダ等が報告されているが問題点が多い。そこで棒線用ビレットに対してレーザのきず手入れ技術への適用性を検討した。きず手入れを必要としたラインの条件を表1に示す。

きず手入れは、ビレットが高温のまま行う熱間でのきず手入れと、冷えてから行う冷間でのきず手入れがある。また、きずの状況は幅、長さ、深さ等種々あり、一概には言えないが、手入れ幅としては約10 mm、手入れ深さとしては最大1 mm あれば、棒線用ビレットの場合十分である。このような条件のもとで、レーザの適用を可能とするための課題として以下のものを抽出した。

- (1) 長さ約10 mm の線状の高密度集光ビーム形成用光学系の開発
- (2) レーザきず手入れにおける材料品質の確保
- (3) 高速(30 m/min 以上)での表面溶融能力の増大とその推定モデルの作成
- (4) フライング光学系の開発

以下、上記課題を順次解決し、レーザきず手入れのための要素技術を開発した。

2. 高密度集光ビーム光学系の開発

高速で走る鋼片の表面を、10 mm 幅にわたってほぼ均一に、融点以上に昇温させるためのレーザビーム集光光学系の開発が第1の課題である。従来このような目的のための集光光学系としてインテグレーションミラー¹⁾があるが、通常のは集光

ビーム形状が1辺10 mm 程度の正方形なので、集光部のパワー密度が必ずしも高くない。そこで図1(a)に示す一方向インテグレーションミラー B と円柱凹面ミラー C を組み合わせ

Table 1 Process conditions

Billet grade	Low, Middle, High carbon steel Free cutting carbon steel
Size	120×120, 162×162 mm (7-8 m length)
Temperature	Cold billet; $\leq 100^\circ\text{C}$ Hot billet; 700-1100 $^\circ\text{C}$
Process speed	≥ 30 m/min
Repaired depth	Max. 1 mm

Fig. 1 An optical system developed for focusing a laser beam

* 原稿受付 平成6年11月2日

** 正 会 員 新日本製鐵(株)エレクトロニクス研究所(相模原市淵野辺 5-10-1)

*** 日鉄北海道制御システム(株)(室蘭市仲町 12)

Fig. 2 Beam profile measured by acril burn pattern method (Laser power; 5 kW, Irradiation time; 3 s)

Table 2 Specifications of experimental equipment

CO ₂ laser oscillator	Resonator type, Unstable type (Cross flow) Output power; 15 kW (CW mode) Beam diameter; ϕ 70 mm (Ring mode) Beam divergence angle; 2 mrad (Full)
Beam shaping optics	Type; One-directional integration mirror and cylindrical concave mirror Beam size at focal plane; 2×10 mm
Electric furnace	Heating ability; max. 1 200°C Furnace volume; 100×400×200 mm
Work table	Type; X-Y table with numerical control Traveling speed; max. 6.0 m/min

Fig. 3 Experimental set-up

た線状ビーム光学系を設計した。集光形状を光線追跡法²⁾によるシミュレーションにより予測した結果をあわせて図1(b)に示す。

本光学系による集光ビームの断面形状を、よく知られたアクリルバーンパターン法³⁾により測定した結果を図2に示す。

3. レーザきず手入れにおける材料品質の確保

前記線状ビーム光学系を用いて、鋼片表面のきず手入れ実験を行い、第2の課題である手入れ後の鋼片の材料品質の確保が可能か否かの検討を行った。実験に用いたレーザ加工装置の仕様を表2に示す。

S 50 C 鋼片から切り出した試験片 (20×50×100 mm) を加工テーブルの上に置きレーザを照射した。熱間でのきず手入れ実験の際は、試験片を図3に示す小型加熱炉に入れて、目標温度に保持したまま、加熱炉ごとレーザビーム直下を走行させた。

3.1 冷間でのきず手入れ

冷間できず手入れを行った場合は、レーザ手入れ部が熔融後急速に凝固するため硬化する。しかしながら冷間手入れ材は圧

Fig. 4 Hardening by laser melting and recovering by reheating

Fig. 5 Defects in solidified part of melted hot billet by a laser beam

延工程に送られる前に、必ず再熱処理を受けるので、そこで母材並みの硬度に復帰すれば問題は生じない。実際、図4に示すようにレーザ手入れ後の硬化部が、再熱処理後母材並みの硬度に復帰することが確認された。

3.2 熱間でのきず手入れ

熱間できず手入れを行った場合は、手入れ部の硬化は無いが、図5に示すように熔融凝固部に結晶粒の粗大化と凝固割れが発生する場合がある。これは次の圧延工程において重大な欠陥を生ずるので、熔融部分を除去する必要がある。通常のスカーフによるきず手入れでは、O₂ ブローにより生じた熔融部分を高圧水ジェットで吹き飛ばしている。レーザきず手入れでも熔融部分を吹き飛ばせば品質を確保できると考えられる。そこでガスジェットで飛ばせる程度の小さな体積の熔融部をレーザ光で作成し、O₂ ブローで除去した。除去後の材料組織は図6(a)に示すように、変態部分は残るものの熔融部分は除去されており、同図(b)に示す通常のスカーフ後の材料組織と同じものが得られることが確認された。

4. 表面熔融能力の増大と必要レーザ出力の算定

冷間および熱間での鋼片のレーザきず手入れが実験的に可能であることがわかったが、実験における試験材の走行速度は冷

(a) By laser melting and O_2 blowing (b) By conventional scarfing

Fig. 6 Elimination of defects by blowing off

Fig. 7 Comparison of experimental data and calculation

間、熱間ともに 1m/min 程度であり、表 1 に示したきず手入れラインの要求速度よりはるかに小さい。そこで要求速度実現のための必要レーザ出力の推定、レーザ出力増を抑えるための表面熔融能力の増大策の検討、およびそれらを取り込んだ熔融能力推定モデルを作成した。

4.1 必要レーザ出力の推定

3章で述べたきず手入れ実験と同じ要領で、レーザ出力を $1\sim 10\text{kW}$ 、試験片の走行速度を $0.1\sim 2\text{m/min}$ まで振って、表面熔融深さを調べた。次に既に開発済みのレーザ加熱解析プログラム⁴⁾を用いて、表面熔融深さ 1mm を実現するためのレーザ出力と走行速度の関係を求めた。この際、表面吸収率 α として 0.2 , 0.3 , 0.4 を仮定した。これらの計算結果と実験値を比較して図 7 に示す。

図より α を 0.3 に選ぶことにより、計算値から実測結果を推定できることがわかる。この図から鋼片の走行速度 30m/min において表面熔融深さ 1mm を実現するためのレーザ出力を求めると、 250kW となり実現不可能な値となってしまう。

4.2 表面熔融能力の増大

レーザ光による表面熔融能力を増大する方法として O_2 ブローの併用と、予熱の効果を検討した。

1) O_2 ブローの併用

既に述べたように通常の鋼片きず手入れで採用されているスカーファは O_2 ブローによる鋼片表面の酸化発熱反応により表面熔融を行っている。そこでレーザ照射と共に O_2 ブローを併用することで、酸化発熱分に相当する熔融能力の増大が期待できる。 O_2 ブローにより鋼片表面で酸化発熱反応が生じるためには、その表面を覆っているスケールの熔融除去と、酸化反応が進むに十分な温度まで鋼片表面が加熱されていることが必要

Fig. 8 Estimation of required laser power

である。現行のスカーファでは表面温度 1000°C で、走行速度 $20\sim 50\text{m/min}$ で行われている。したがって、レーザ加熱により表面スケールを熔融除去できれば、表面は当然 1000°C 以上に達しているの、鋼片表面の温度条件も満たされると考えてよい。そこで、表面が融点まで加熱される条件が酸化発熱反応が開始する条件（計算上は表面下 0.1mm が 1500°C となる条件）として、先のレーザ加熱解析モデルを用いて計算した結果を図 8 に示す。 O_2 ブローによる酸化反応が始まると輝度の高いスパッタが生じるので、実験的には容易にわかる。 O_2 ブロー 100l/min の場合に実験的に求めた開始点は走行速度 2m/min でレーザ出力 5kW , 5m/min で 10kW と、図 8 の予測結果と良く一致している。

次に O_2 ブローにより酸化発熱反応が生じている際の発熱量の推定を行う。 O_2 ブローにより鉄の酸化反応が起こり、スケールが発生する。酸化発熱量の $\eta\%$ がスケール生成に有効に利用されたとして、スケール生成熱より酸化発熱量を推定する。鉄鋼におけるスケール生成熱については日本学術振興会製鋼第 19 委員会等の報告⁵⁾があり、スケール 1kg 当たりの生成熱 h は 1.006kcal すなわち 4.2kJ である。また同文献によるとスケールの見掛け比重 ρ は約 5 である。 O_2 ブローにより幅 W 、長さ L 、厚さ τ のスケールが生成したとすると、その際のスケール生成熱 H は

$$H = \rho \tau W L h$$

したがって、 O_2 ブローによる酸化発熱量 B は

$$B = \frac{H}{\eta} = \frac{\rho \tau W L h}{\eta}$$

となる。したがって生成スケールの厚さ τ がわかれば、単位面積、単位時間当たりの酸化発熱量を推定できる。しかしながら、レーザによる入熱と酸化による発熱が同時に働く上、生成スケールの相当部分は吹き飛ばされるので、 O_2 ブローのみにより生成したスケール厚を直接知ることは難しい。そこで、スケール厚 τ を仮定して発生する酸化発熱量 B を計算し、これを投入レーザパワーに上乗せして、先のレーザ加熱解析モデルにインプットした。計算結果から仮定スケール厚に対する走行速度と熔融深さの関係がそれぞれ得られるので、それらをレーザ照射+ O_2 ブロー併用加熱実験のデータと比較した。実験データに近い結果の得られるスケール厚が実際に生じたスケール厚と推定できる。 τ を 0.1 , 0.2 , 0.5mm とした時の計算結果と実験データを比較して図 9 に示す。同図より高速の場合は生成スケールが薄く、遅くなるに従い厚いスケールが生成すると仮定すれば、実測値に近づき妥当である。

この考え方に基づき O_2 ブロー併用時に、表面熔融深さ 1

Fig. 9 Relationship between traveling speed and molten depth
Laser power : 10 kW, O_2 : 100 l/min, α : 0.3
(a) Equivalent scale thickness 0.5 mm, (b) 0.2 mm, (c) 0.1 mm

Fig. 10 Estimation of required laser power
(a) Equivalent scale thickness 0.9 mm, (b) 0.6 mm, (c) 0 mm

mm を実現するためのレーザ出力と走行速度の関係を、生成スケール厚が 0, 0.6, 0.9 mm として求めた結果を図 10 に示す。

同図より、厚いスケールが生成すれば当然スケール生成熱も大きく、その分レーザ出力を減らせるが、それでも走行速度 30 m/min の場合は、0.9 mm 厚のスケールでも 100 kW のレーザ出力が必要である。図中には比較のため、図 8 に示したスケール溶融のための必要なレーザ出力も並べて示した。この場合は、必要レーザ出力は大幅に下がる。

2) 予熱

熱間でのレーザきず手入れのように、鋼片が既に 700°C 以上の高温であれば、当然必要なレーザ出力は減少する。その上、鋼片等の場合レーザエネルギーの吸収率が熱間の方が一般に高いので、その点からも有利である。したがって冷間でのきず手入れにおいても、予熱は有効な溶融能力増大策となり得る。そこで 3 章で述べた小型加熱炉を用いた実験装置で、予熱温度 700°C, 900°C, 走行速度 0.6~1.4 m/min, レーザ出力 10 kW において、走行速度と溶融深さの関係を調べた。実測結果を先に用いたレーザ加熱解析プログラムによる計算結果と比較した例を図 11 (a), (b) に示す。予熱温度 700°C, 900°C とともに、レーザエネルギーの吸収率を 0.7 に選べば実測値を予測することができる。

4.3 O_2 ブロー, 予熱効果を取り込んだ必要レーザ出力の推定

冷間でのきず手入れにおいて、 O_2 ブロー効果をも取り込んだ場合の必要レーザ出力は図 10 によってわかる。一方、予熱した場合は、レーザ加熱解析プログラムを用いて、表面吸収率 $\alpha=0.7$ のもとで、表面 1 mm 深さまで溶融するのに必要な

(a) Initial temperature : 700°C

(b) Initial temperature : 900°C

Fig. 11 Determination of absorption coefficient α
Laser power; 10 kW, Traveling speed; 1.2 m/min

Fig. 12 Estimation of required laser power
(a) 1100°C pre-heating, (b) 900°C, (c) 700°C

レーザ出力として計算できる。結果を図 12 に太線で示す。さらに O_2 ブローを併用すれば、4.2 項の結果から表層 0.1 mm 深さまで溶融できれば良いから、同図に細線で示すように必要レーザ出力はさらに小さくなる。

図 12 より 700°C 予熱の場合、レーザ出力 10 kW により、きず手入れラインの要求する 30 m/min を実現することが可能である。

5. フライング光学系の開発

レーザきず手入れ装置の構成を考える。きず検査装置からの、きずの位置、サイズ等の情報を得て、レーザ照射位置、照射時間等を変えねばならない。装置のイメージは図 13 に示すようなものになる。ただし、1: ビレット, 3: きず, 5: レーザビーム, 13: 計測スタンド, 21: ビーム変換ポスト, 29: 溶

Fig. 13 Scheme of a laser repairing system of steel billet

Fig. 14 Scheme of a flying optical system

削ヘッド，31：レーザ発振器，35：集光光学系，37： O_2 ガス吹付けノズル，41：演算処理装置である。

図中集光光学系 35， O_2 ガス吹付けノズル 37 は，きずの位置に応じて，鋼片表面上を動き回れなければならない，通常のレーザ加工機における固定光学系では対応できず，フライング光学系を用いねばならない。フライング光学系の原理図を図 14 に示す。

図 14 において M_2 - M_3 - L を相対位置を保持したまま X 方向へ動かすことにより，鋼片の幅方向への集光光学系 L の移動を可能とし，また M_3 - L を相対位置を保持したまま Y 方向へ動かすことにより，鋼片の走行方向への集光光学系 L の移動を可能とする。特に後者の移動は必要レーザ出力をさらに小さくできるので重要である。すなわち，集光光学系を鋼片と同じ方向に鋼片より少し遅い速度で走らせれば，相対速度は原理的にはいくらでも小さくできるので，図 10，図 12 の縦軸の速度は下がり，必要なレーザ出力も小さくなる。ただし相対速度を落とし過ぎると，有限長のきずの長さ分だけ熔融させるのに要する時間が長くなり，フライング光学系の Y 方向の移動距離が大きくなり過ぎて設備的に難しくなるので，妥当な相対速度を選ぶ必要があることは言うまでもない。

このようなフライング光学系開発のポイントは，

- (1) ビーム伝送距離の変動による集光特性の変化への対策
- (2) フライング光学系各部分の正確な移動とその際の伝送ミラー等の傾き，ずれ等の発生防止
- (3) フライング光学系動作の際の応答速度の遅れ対策
- (4) きず検査装置に追従したフライング光学系の位置設定，移動動作プログラムの作成

である。

- (1) については，レーザ発振器から出るビームが発散角を有

するために，伝搬距離によってビームサイズが変化する。したがって集光系までの距離が変わると，入射ビーム径が変わるので集光特性が変わるという問題が生ずる。この問題に対しては，光路の途中に凹面ミラーと凸面ミラーの組合せより成るコリメータ光学系を設けて，発散角を有するビームを平行ビームに矯正することにより，以後のビーム径の伝搬距離による変化を無くすことで解決できる。このようなコリメータ光学系の位置は図 14 における発振器と M_1 の間または M_1 と M_2 の間に選べば， M_2 以降の可動部とは独立となるので望ましい。

(2) については，レーザ出力が大きくなるほど伝送光学系の各ミラーに冷却機構が必要となるなど，各部の重量も大きくなり技術的な難しさは増すが，エンジニアリング的に解決できる問題である。

(3) については，一つのきずから他のきずの位置への光学系の移動および一つのきずの長さ方向に沿ってのある一定速度での光学系の移動の際の問題として，指令が出てから動作を開始するまでの時間，動作を終了するまでの時間およびきずの長さ方向に沿っての光学系の移動において一定速度に達するまでの過渡時間および停止する際の過渡時間をそれぞれゼロにはできないという問題である。しかしながらこれらについては，その過渡時間を見込んで，早めに移動指令を出す，早めに走行開始指令を出す，逆に停止の場合には若干遅らせて停止指令を出す等のプログラム上の操作で容易に解決できる。

(4) については，通常の自動制御に関するプログラムと同様の考え方で作ることができる。

以上，フライング光学系の開発に原理的な問題点は無く，新たに開発すべき要素技術は無いことがわかった。

6. 結 言

鋼片のきず手入れへのレーザ応用を検討し，レーザきず手入れ装置実現のための要素技術として以下を開発した。

- (1) 高速で走る鋼片の表面を熔融できる高エネルギー密度の線状ビームに集光できる光学系の設計・製作
- (2) 熱間でのレーザきず手入れ後の材料品質を確保するための熔融部の除去技術
- (3) 高速ラインへのレーザきず手入れ適用のための O_2 フロー，予熱併用によるレーザ熔融能力増大策と必要レーザ出力の算定

加えて，新たな要素技術開発を必要とすることなく実現可能なフライング光学系について，そのレーザ出力抑制効果を指摘した。

以上により鋼片のレーザきず手入れのための要素技術は整った。次のステップとして冷間でのオンラインきず手入れ用の現場実験設備として組み上げ，総合システムとしてレーザきず手入れ技術の完成を目指したい。

参 考 文 献

- 1) S. L. Ream : A Convex Beam Integrator, Laser Focus, 11, (1978) 68.
- 2) 三宅和夫：幾何光学，共立出版，(1988) 100.
- 3) 山田昭政，小梶好隆，川手康郷：レーザビームプロファイル測定機の試作，超高性能レーザ応用複合生産システム・レーザ技術研究成果中間発表会論文集，(1982) 67.
- 4) N. Hamada, O. Ichiko and H. Soga : Development of the Simulation Model for Laser Materials Processing, Trans. SICE, 23, 5, (1987) 512.
- 5) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会ほか：鉄鋼熱計算用数値，日刊工業新聞社，(1966) 42.