

## 討21 鉄鋼製造プロセスへのレーザー溶接の適用

川崎製鉄㈱ ○佐々木 弘明, 善本 毅, 古川 九州男  
柳島 章也, 小野 弘路

### 1. はじめに

レーザーの発明以来, 光を熱源としたレーザー溶接が種々の対象に対して試みられており, 最近では鉄鋼生産プロセスに対する応用も散見されるようになった。レーザーの加工用熱源としての特徴はエネルギーの輸送媒体が位相のそろったほぼ平行な光束であることから導かれており, 1) 加工点が小さい, 2) 加工点でのパワー密度が高い 3) 加工点近傍の電磁場の影響を受けない, 4) 非接触加工ができる, などである。連続生産ラインへの適用例は小出力ですむ電気部品などではよく知られているが, 出力の大きい炭酸ガスレーザーでは少なく, バッテリーの陽極板の溶接が代表的なものであった。

### 2. 鉄鋼製造プロセスでのレーザー溶接

鉄鋼製造プロセスでは, 溶接は主としてコイルを製造する過程で使われている。熱延コイルの酸洗ラインでは入側でフラッシュバット溶接が使われており, クリーニング, 連続焼鈍ラインなどでは主としてシーム溶接が使われている。スポット溶接やTIG, MIGなどのアーク溶接も用いられているが, これらは溶接のサイクルタイムが長いので生産性向上の見地からは望ましくない。レーザー溶接はサイクルタイムでいえばフラッシュバットシーム溶接にやや劣るがアーク溶接よりははるかに短かく, イニシャルコストではフラッシュバット溶接の1/2以下であり, 条件によってはフラッシュバット溶接に置き換える可能性を有している。しかし, 現状のレーザー溶接では他の溶接方法と異なり, 溶接機をブラックボックスとして扱える段階に達していないため, 溶接用治具の管理のほか発振器, 光学系の管理に意を用いる必要がある。このため, 従来の溶接方法が適用可能なところをレーザー溶接で置き換えるのは得策とは言えない。したがって, レーザ溶接を製造工程に取り入れるとすれば, レーザ溶接以外には溶接手段がないところに限定される。

従来の溶接方法の特徴は, 1) 溶接入熱が大きく, 2) ビード余盛が多いことにある。フラッシュバット溶接では高炭素鋼, 高級珪素鋼の溶接が困難であり, とくに珪素鋼, フェライト系ステンレス鋼ではフラッシュバット溶接の入熱が大きいため熱影響部の結晶粒が粗大化し, 継手の脆化が起こる。また, 突合せ溶接であるフラッシュバット溶接が適用できない薄鋼板に対してはシーム溶接が高能率溶接法として存在しているが, この溶接方法では重ね継手となるため, 継手部の板厚が大となりコイルビルドアップ時に腰折れを起こすため冷延製品コイルにはほとんど用いられず, 余盛の少ないTIG溶接も溶接速度が遅いため, 積極的に用いられるに致っていない。

レーザー溶接では前節で述べたレーザー加工の一般的特徴から推測されるように, 1) 溶接入熱が小さく, 2) 余盛がほとんどない溶接ビードが得られる。したがって, レーザ溶接は従来の溶接方法の欠点を補完し, 珪素鋼の溶接, 製品コイルのビルドアップに対して有効な溶接方法であるといえよう。

### 3. 適用事例

鉄鋼製造プロセスで用いられているレーザー溶接機で詳細が公表されているものは当社・阪神製造所と千葉製鉄所のものだけである。当社では1977年にレーザー発振器を導入して以来, 鉄鋼ライン用のレーザー溶接機の開発を続けており, 1981, 1982年と続いてレーザー溶接機をラインで稼働させた。これらは, いずれも, レーザ溶接のビード余盛が少ないことを生かした製品コイルのビルドアップ用のものである。

#### 3.1 電磁鋼板製品コイルのビルドアップ

阪神製造所では電磁鋼板製品コイルの長尺化の要求に対応するためにコイルビルドアップ用の新ラインを建設した。継手に対する条件は以下のとおりであった。

- 1) 溶接継手での板厚変動は板厚公差以内
- 2) ビード終, 始端部に切込みがない
- 3) 強度は母材と同等で反復曲げ回数 2 以上

TIG 溶接ではビード終, 始端部に切込みが生じることと反復曲げ回数が 2 に達しないために, レーザ溶接の採用を検討した。

レーザー溶接のパラメタは被溶接物の物性, レーザ出力, 溶接速度に加え, 被溶接物表面の吸収率, ビームモード, 焦点位置, ビーム径など数多くある。このうち, 一般的に用いられているパラメタは発振器, 被溶接物の物性に依存するものを除いた  $f$  値 (焦点距離/集光レンズに入射するビーム径), 焦点位置, 出力, 溶接速度である。この場合には対象板厚が 0.5 mm 以下であることに加え, 鋼板表面に絶縁皮膜が施こされていることから焦点外しの条件で溶接することを基本としたために  $f$  値は比較的大きい 1.0 を用いた。

溶接上の問題点は絶縁皮膜の種類によって変わる被溶接材の吸収率, 継手の機械強度の確認およびビード終, 始端部の処理条件を見出すことである。図 1 が同一投射エネルギー下では吸収率に応じた溶込み深さが得られるものと仮定して焦点外し量, ビーム走行速度を一定とし, 溶込み深さを絶縁皮膜の種類を変えて調べた結果である。

絶縁皮膜の種類に応じて溶込み深さは大きく変わっており, 皮膜に応じた溶接条件を設定する必要があることがわかる。表 1 はレーザー溶接継手の強度を TIG 溶接継手のものと比較した結果であるが, 反復曲げ回数では大巾な改善が認められる。ビード終, 始端部の切込み長さはビード巾を狭くすることによって減少させることができるが, 端部を部分溶込みビードとすることによって更に減少させられることがわかった。ビード終, 始端部でレーザー出力を変化させ終端部の処理を行なった結果が図 2 である。 $L_1$  はレーザー出力の増減を行なり区間長さであり,  $\Delta L_1$  を被溶接物上の長さとする, 区間長さ  $L_1 = 5$  mm の場合に  $\Delta L_1/L_1 \approx 0.9$  で継手にほとんど未溶融部を残すことなく, 切込み長さも 0.1 mm 以下である図 3 のようなビード端部を得ることができる。

以上のような溶接ソフト面のアプローチのほか, レザビームの集光スポット径が小さいために治具に他の溶接方法で要求される値よりも厳しい精度が要求される。

とくに溶接線の直線性, 開先間隙に対する制限と溶接

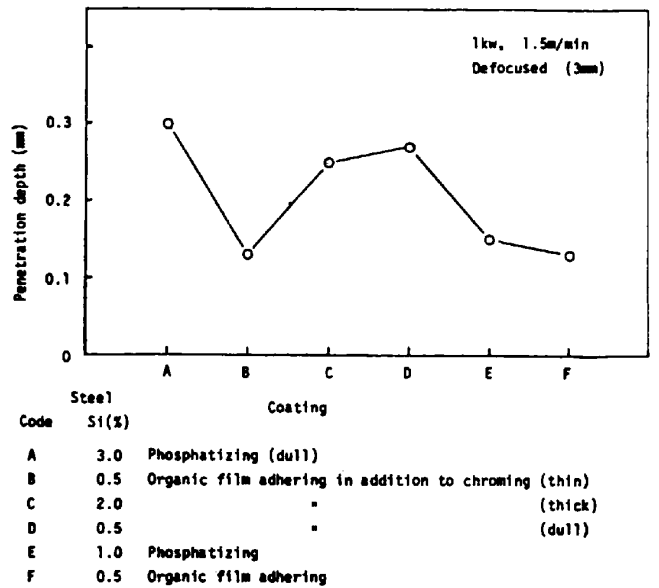


図 1 絶縁皮膜の種類と溶込み深さ

表 1 レーザ, TIG 溶接の継手強度

Method	Steel	Thickness (mm)	Welding condition Power (kW)	Speed (m/min)	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Average number of repetition*
Laser	A	0.3	1	2.9	34	7
		0.35	1	2.1	34	11
TIG	A	0.3	0.77	0.7	34	0.7
		0.35	0.88	0.6	34	0.5

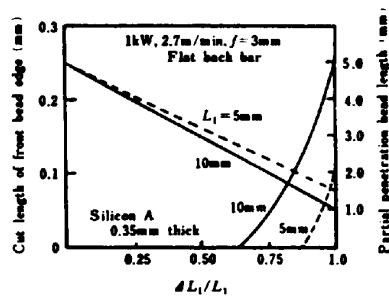


図 2 ビード始端部の処理

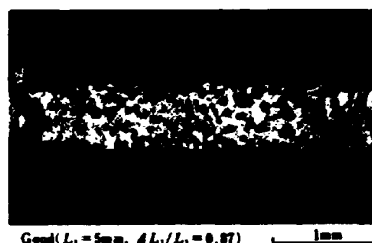


図 3 ビード端部

線の倣い精度が問題となる。開先間隙を 0.1 mm 以下とするため、先、後行板端の切断線の直線からのずれを 500 mm の切断長に対して 0.03 mm 以下とし、その精度を確保するために、シャアのレイキ角、刃先角を小さくした。倣いは溶接用クランプを含む加工台を溶接線の一端を中心として回転できるようにし、炭酸ガスレーザの光軸と一致させた可視光線である He-Ne レーザ光の軌跡に溶接線を合わせることで行なった。図 4 がレーザ溶接機の概要であり、表 2 がその仕様である。

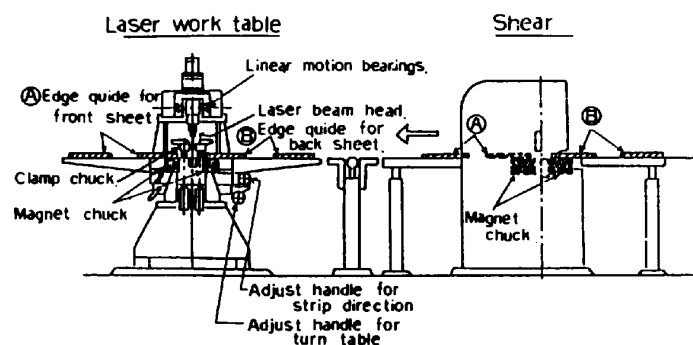


表 2 レーザ溶接機の仕様

Laser torch	Max. power	1kw (10.6μm)
	Travel speed	0.3~9.9m/min
	Straightness of traverse	0.05mm/650mm
Clamp	Oil pressure	400kg
	Magnet	
Shearing machine	Shearing angle	1°30'
	Straightness of shearing	0.03mm/500mm
	Cutter angle	86°
	Max. strip width	0.2~0.7mm
	Thickness of strips	

図 4 電磁鋼板製品コイル用レーザ溶接機

### 3.2 冷延コイルのビルドアップ

千葉製鉄所では冷延コイルの単重調整のためにコイルビルドアップを行なっている。溶接継手の満たすべき条件としては 1) 母材と同等の強度、2) 余盛がないことであった。電磁鋼板コイルのビルドアップではストリップ巾が 500 mm の薄鋼板であることからシングルカットシャアを用いて、溶接線の直線性を確保したが、一般冷延コイルのラインではストリップ巾が 1000 mm 以上になるために溶接線の倣いに人間の介入が困難となり、シャアを組込んだ溶接機の自動運転が要請されるうえ、精度確保上装置の動作が単純であるほうが望ましいのでダブルカットシャアが採用されている。また、この場合には対象板厚が電磁鋼板に比べて大となるうえ、吸収率を上げる絶縁皮膜がないため、f 値を 5 以下とし、焦点を鋼板表面近傍に置くこととした。したがって、最小ビームスポット径を用いて溶接することになるので、対象板厚が厚いとはいえ、電磁鋼板の場合と同様の高精度の治具が要求される。開先間隙を極小とし、溶接線の倣いを積極的に行なわないとすれば、シャアによる切断線の真直度が問題になる。ダブルカットシャアの真直度を対応する切断線間の距離、L、で  $(L_{max} - L_{min}) / 2$  と定義すると通常のダブルカットシャアでは図 5 のような切断線形状となり、板厚と真直度の関係を示すと表 3 のようになる。開先間隙は先、後行板のダブルカットシャアの切断線が一对のシャア刃の中心線に対称だと仮定すれば、最大開先間隙は真直度の 2 倍となり、板厚 2.2 mm で許容開先間隙 0.1 mm 以下の条件は満たされない。ダブルカットシャアで切断線の真直度に影響を与えると思われる要素の変位を調べた結果が表 4 である。変位の大き

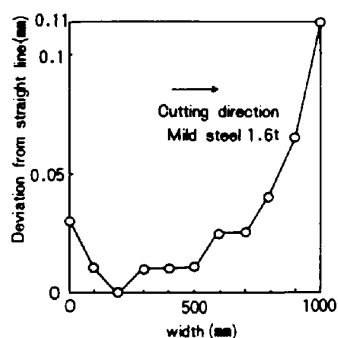


図 5 切断線のプロファイル

表 3 切断板厚と切断線の真直度

Thickness (mm)	Straightness: $\frac{L_{max} - L_{min}}{2}$ (mm)
0.8	0.03~0.06
1.6	0.05~0.11
2.2	0.08~0.12

い下刃の下降とクランプのずれを極力防止するとともにクランプされていない鋼板の動きを押える構造とし、さらに後行板を先行板に対してわずかに傾けて突合せる機構とすることによって表5のように、2.2mm厚の鋼板に対しても十分な真直度、突合せ開先間隙を得ることができた。図6が溶接機の構成を示したものであり、表6がその仕様である。

表4 ダブルカットシャー各部の変位

Factor	Displacement and deviation (μm)
Shift of clamp	20~45
Slip of sheet	≒0
Straightness of blade	10~20
Clearance between upper and lower blade	10~20
Deformation of blade	≒0
Down of lower blade holder	60~115
Deformation of clamp free part	—

表5 レーザ溶接機用ダブルカットシャーの真直度

Thickness (mm)	$\frac{L_{max}-L_{min}}{2}$ (mm)	Fit up gap (mm)
0.8	0.02~0.03	0~0.02
1.6	0.02~0.03	0~0.02
2.2	0.03~0.04	0~0.04

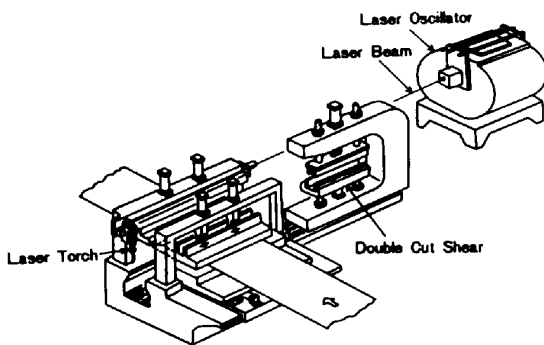


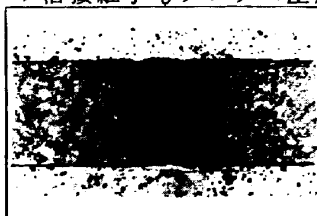
図6 冷延コイル用レーザー溶接機

表6 レーザ溶接機の仕様

Strip thickness	0.4~2.3mm
Strip width	508~1270mm
Welding speed	0.5~10m/min
Laser power	1.5kw max

#### 4. レーザ溶接継手の圧延

レーザー溶接では継手強度は母材と同等であり、継手断面形状は図7のように余盛がほとんどない。軟鋼のレーザー溶接継手をタンデム圧延した結果が表7である。圧延速度568m/minで圧延が可能で、溶接部の硬化にもかかわらず、圧延時の板厚変動はほとんど認められない。また、3%珪素鋼、SUS430ステンレス鋼のレーザー溶接継手もタンデム圧延が可能であることが確認されている。



Thickness : 1.0mm  
Power : 1kw  
Welding speed : 3m/min

図7 レーザ溶接継手

表7 レーザ溶接継手の圧延結果

