

# 鋼板製造プロセス用レーザー溶接設備の開発 技術報告

弦田 登\*・相原 正樹\*・佐々木弘明\*<sup>2</sup>  
田淵 衛\*<sup>3</sup>・菅沼七三雄\*<sup>3</sup>

## Development of Laser Welder for Production Process of Steel Sheet

Noboru TSURUDA, Masaki AIHARA, Hiroaki SASAKI,  
Mamosu TABUTI and Namio SUGANUMA

### Synopsis :

Two 5 kW CO<sub>2</sub> Laser welders developed by Kawasaki Steel Corp. have been installed for pickling lines at both Mizushima and Chiba Works in 1983.

Those are the first 5 kW Laser welder for sheet steel production floor, which can weld automatically any kind of steel strip measuring up to 1 880 mm in width and up to 6 mm in thickness, bringing about high yield of production on cold rolling process.

### 1. 緒 言

酸洗ラインでは、コイル状の鋼帯をライン入側で溶接し、連続的に酸洗処理するが、従来、この溶接には、溶接処理時間が短く、比較的信頼性の高い継手が得られるフラッシュ溶接機が主流を占めており、多くのラインに採用されている。しかし、フラッシュ溶接機は、溶接時の入熱量が大きいことから、被溶接材に限界があり、特に、高級珪素鋼や、フェライト系ステンレス鋼に対しては、継手強度が確保できず、冷間圧延での板破断を生じることがもちろん、酸洗ラインを通すことさえ困難であった。

パワー密度が高く、入熱量の低いレーザー溶接がこれらの被溶接材の溶接に適しているが、酸洗ライン用としてのレーザー溶接機を実用化するには、以下の諸課題を解決する必要があった。

- 1) 被溶接材の板厚が厚く、溶接長も長い。(板厚 6 mm Max, 溶接長 1 880 mm Max)
- 2) 抗張力(材料の破断強さ)が高い。(Max 120 kgf/mm<sup>2</sup>)
- 3) 熱延材でありトップ・エンドの形状が悪い。(急峻度 Max 4%)

これらの項目は、レーザー溶接を行うために、必要な剪断突合せ精度の確保<sup>1)2)</sup>が困難であることを意味している。さらに、酸洗ラインを通るあらゆる種類の鋼帯に

対して溶接継手強度<sup>3)</sup>を確保する必要があり、また、設置場所の環境が悪いために粉塵、ヒュームがレーザー発振器、ビーム伝送経路内のミラー、レンズ等に付着し、性能を劣化させないように配慮する必要もあつた。

以上の課題を、不安定型高出力レーザー発振器の採用と、高精度剪断<sup>4)6)</sup>、突合せ技術の開発<sup>4)6)</sup>、ファイアーワイヤ使用技術の開発<sup>9)</sup>、研削技術の開発、レーザー溶接操業技術の開発、環境対策の充実により、解決し、世界で初めて酸洗ライン用レーザー溶接機の実用化に成功した。

水島製鉄所 No. 2 酸洗ラインに S 58 年 5 月、千葉製鉄所 No. 4 酸洗ラインに同年 7 月に設置し、溶接品質の向上、歩留りの向上等において、多大な効果を発揮している。本報では、本溶接機の紹介と操業状況の概要について報告する。

### 2. 炭酸ガスレーザー溶接の特徴

レーザー溶接は、レーザー発振器から出た広がり角の小さい(平行光線に近い)レーザー光を、レンズなどの光学系を用いて、微小スポットに集光させ、被加工物に照射、熔融させることによつて行われるため、以下の様な特徴がある。

- (1) 集光されたビームを用いるため、加熱領域が小さく、熔融速度も速いので、局部加熱、急冷が行える。
- (2) 異種金属間の溶接が容易である。

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 1 月 24 日受付 (Received Jan. 24, 1985)

\* 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)ハイテク研究所 (High-Technology Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

また、レーザー溶接では、溶接部が清浄化されるうえ、溶接入熱が小さく、結晶粒も粗大化しにくいいため、通常の溶接方法では、十分な継手強度が得られない場合でも、高品質の溶接継手が得られる。

しかし、集光されたビームを用いるために、被溶接物に高い位置精度が要求されることと、開先間隙の許容値が小さいために、高精度の溶接用治具、開先面の機械加工が必須要件となる<sup>4)~8)10)11)</sup>。

### 3. 酸洗ライン用炭酸ガスレーザー溶接機の概要

#### 3.1 設備構成と設備仕様

レーザー溶接機は Fig. 1 に示すように、酸洗ライン入側セクションに設置されており、熱延鋼帯（特に珪素鋼、高炭素鋼等、特殊鋼）の溶接を行つている。Fig. 2 にレーザー溶接機の構造を、Table 1 にその主な設備仕

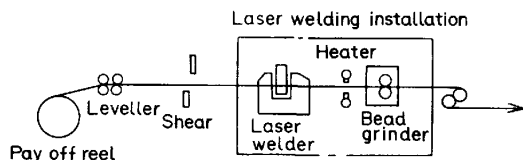


Fig. 1. Arrangement of pickling line at entry section.

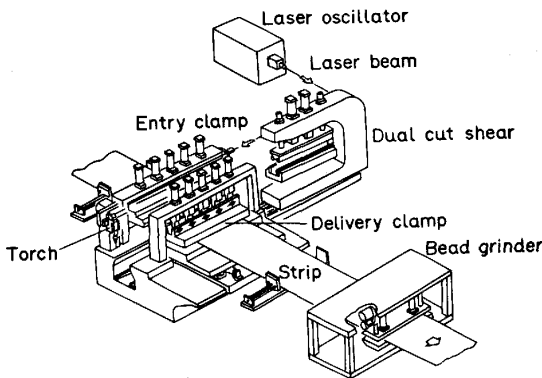


Fig. 2. Schematic diagram of laser welder and bead grinder.

Table 1. Specification of laser welding installation at pickling line.

Item		Welder	Mizusima works'	Chiba works'
Dimension of material	Thickness (mm)		1.6 - 6.0	1.2 - 4.5
	Width (mm)		600 - 1650	610 - 1880
Laser Oscillator	Type		CO <sub>2</sub> - Gas laser	CO <sub>2</sub> - Gas laser
	Output power (kW)		5	5
Laser Welder	Shear type		Dualcut - Shear	Dualcut - Shear
	Welding speed (m/min)		Max. 10	Max. 10
	Filler wire speed (m/min)		1.0 - 10	1.0 - 10
Bead Grinder	Type		One pair headstone	Two pair head stone
	Grinding speed (m/min)		1.0 - 5	1.0 - 5

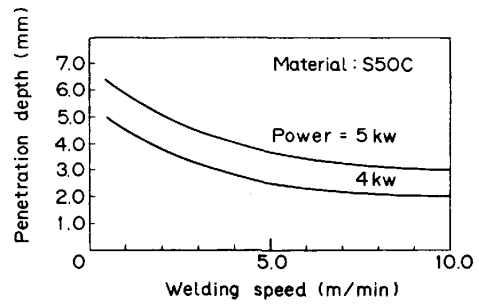


Fig. 3. Variation of penetration depth with laser power and welding speed.

様<sup>12)13)14)</sup>を示す。

レーザー溶接機はレーザービームを発生させるレーザー発振器、ビームを溶接機本体まで伝送する光学伝送径路、被溶接材の事前処理としての切断を行う切断機、溶接を行う溶接機本体、および溶接部分の研削を行う研削機で構成されている。

Fig. 3 には溶接速度と溶け込み深さの関係を示しており、5 kW 出力のレーザー発振器で板厚 6 mm のものの溶接が可能である。突合せ溶接時の実際の溶接速度は、Fig. 3 の溶込曲線より得られる溶接速度より若干速くなる。

#### 3.2 炭酸ガスレーザー溶接機の特徴

##### 3.2.1 高精度切断、および突合せ

レーザー溶接はレーザービームを集光レンズで集光し、それを被溶接材の突合せ線上を移動させ溶接を行う。集光されたビーム径は  $\phi 0.3 \sim \phi 0.5$  mm となり、パワー密度が高いため高速での溶接ができ、溶接入熱量が少ない。機械的性質の良好な溶接継手が得られる。その反面突合せギャップが 0.1 mm 以上あれば集光されたビームのパワー密度が高い部分が抜けてしまい鋼板が熔融されない。また Fig. 4 に示すように、鋼板の突合せ面が熔融接続されるためには、ビード幅と突合せギャップの関係からレーザービームのずれは 0.15 mm 以下にしなければならない。安定した溶接を行うために、機械精度としては突合せ部とレーザービームのずれを 0.1 mm 以下で設計した。

この精度を達成するためには、鋼板切断時に切断線の曲がりが発生させないことが重要であり、切断精度におよぼす要因として、シャーレーキ、クランプの状況、シャークリアランスの変動、シャープレードの加工精度がある。

シャーレーキを小さくすれば切断精度は向上するが、切断荷重が大きくなり、シャーフレームが大きくなるという問題がある。このためシャーレーキを変えて切断実験を行つた結果を Fig. 5 に示す。この結果シャーレー

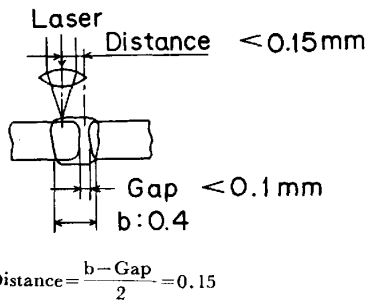


Fig. 4. Permissible distance between cutting line and laser beam.

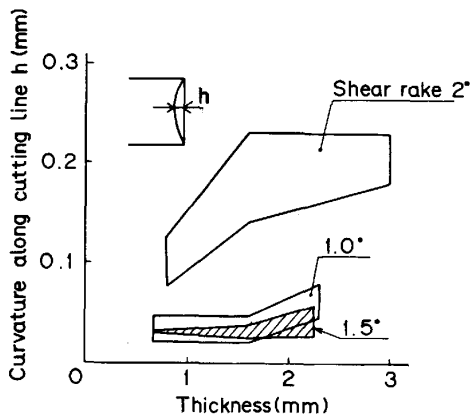


Fig. 5. Effect of shear rake and thickness on curvature along cutting line.

キ 1.5° と 1° では切断精度に差がなく、切断荷重の小さい 1.5° を採用した。

従来の溶接機で採用されているクランプは、シャアの切断位置とクランプ位置が離れているため、切断時の側方力により板の変形が発生し切断線の曲がりとなるため、Fig. 6 に示すようなクランプ構造とし、できるだけ切断線の近くをクランプする方式とした。

切断時の切断荷重および側方力はシャーフレームで受けるが、これらの荷重によるシャーフレームの変形は、シャークリアランスの変動、シャーブレードの真直度の変化となるため、Fig. 7 に示すような、シャーガイドピン、コネクトピンを取付けシャーフレームの変形を防止する構造とした。

### 3.2.2 溶接機の機械精度

レーザービームと切断線のずれを ±0.1 mm 以下にするためには、切断精度のほかにシャアの移動、トーチの移動の精度が必要であり、かつこれらの精度が実用設備として、維持できる機構でなければならない。

従来シャア、トーチの移動機構としては、メタル方式が採用されているが、メタル方式ではレールの機械加工誤差と摺動部のギャップを加算したものが、シャア、トーチの移動誤差となり、高精度なものとならない。また

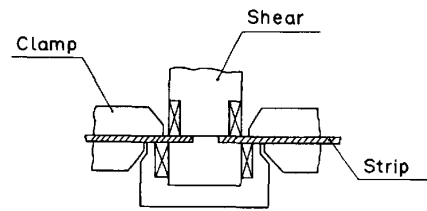


Fig. 6. Schematic diagram of clamp.

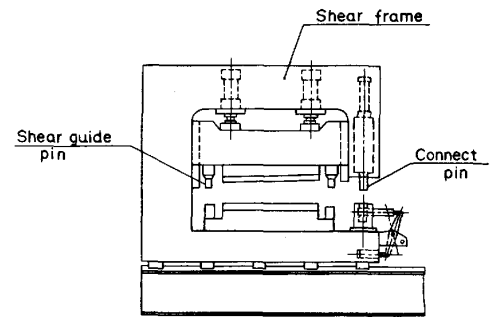


Fig. 7. Schematic diagram of shear guide pin and connect pin.

メタルの摩耗による精度低下が問題となった。

そこでこれらのメタル方式の問題解決のため、今回のレーザー溶接機の移動機構には直線運動軸受を採用した。直線運動軸受の採用によつて、下記の問題を解決した。

- (1) ベアリングに予圧をかけて使用することによつて、摺動部のギャップを 0 とし移動精度が向上した。
- (2) 摺動部のベアリング化による耐摩耗性向上により精度維持が容易になった。

レーザービームと切断線を一致させるために、トーチはライン方向に調整代をもっている。しかし平行度の狂いに対しては、調整代をもつことができないため、各部の精度で平行度を目標値内にする必要がある。Fig. 8 は各部の誤差要因を示しているが、レーザービームと切断線のずれを ±0.1 mm 以下にするためには、シャア側、トーチ側の誤差の累積を 0.1 mm 以下にする必要がある。

レーザー溶接機稼働後の機械精度については、Fig. 9 に示す方法により機械精度のチェックを行つているが、Fig. 10 に示すように稼働 1 年後でも精度に関するトラブルはなく、機械精度の低下は認められない。

### 3.3 フィラーワイヤー供給装置

フィラーワイヤーは主に高炭素鋼等の溶接強度向上の目的に使用され、Fig. 11 に示す方法で突合せ部に供給・溶接される。

フィラーワイヤー使用時は突合せギャップを 0.1 mm ~ 0.5 mm とし溶接を行うため、突合せギャップ精度が

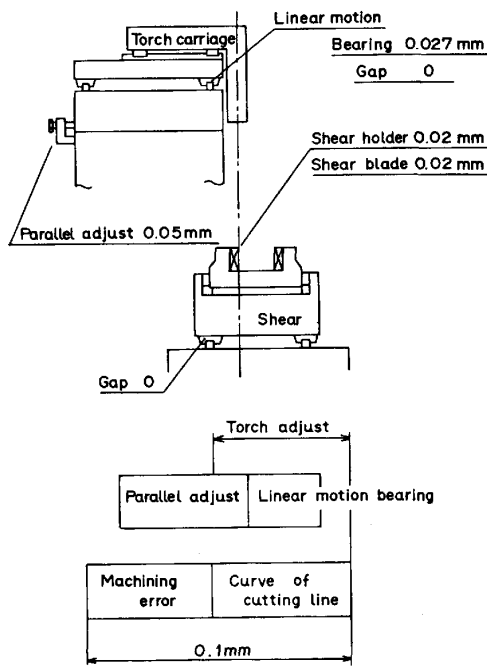


Fig. 8. Relation between assembly accuracy and parts accuracy of laser welder.

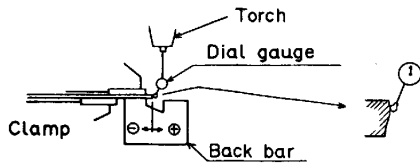


Fig. 9. Schematic view of measuring device of assembly accuracy.

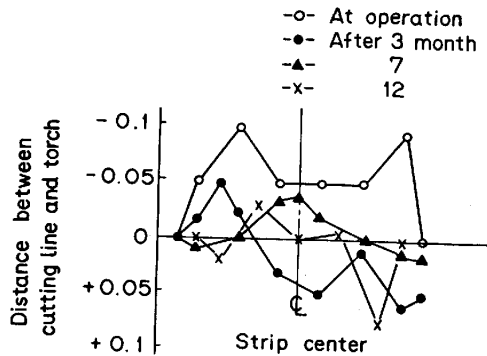


Fig. 10. Measured results of accuracy.

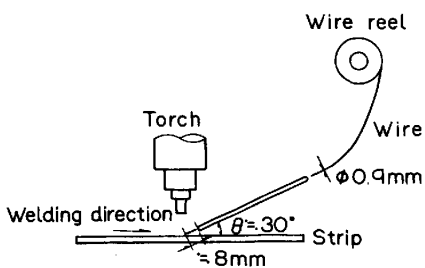


Fig. 11. Schematic diagram of filler wire supplier.

緩和される。しかしレーザービームのずれについては緩和されない。またフィラーワイヤーなしで溶接を行った場合には、溶接部には窪みができるが、適量なワイヤーを供給することによつて、溶接部の窪みを防止できる。したがつてフィラーワイヤーは高炭素鋼だけでなく、あらゆる材料に使用することによつて、溶接品質の維持、向上が計られる。

3.4 ビード研削装置

溶接後のビード表面部は、微視的に粗い状態にあり、特に高珪素鋼等の脆性材料は、これがノッチとなりこのままでは、タンデム圧延時この部分から破断する恐れがある。このため余盛を除去する目的にて研削を行うが、研削後のビード部表面性状が溶接強度に与える影響を調査した結果、Fig. 12, 13 に示すように、表面粗度および研削幅が大きく強度に影響することが判明した。

従つて

- (1) 研削後の鋼板表面粗さ(研削表面粗度)を  $R_{max}$

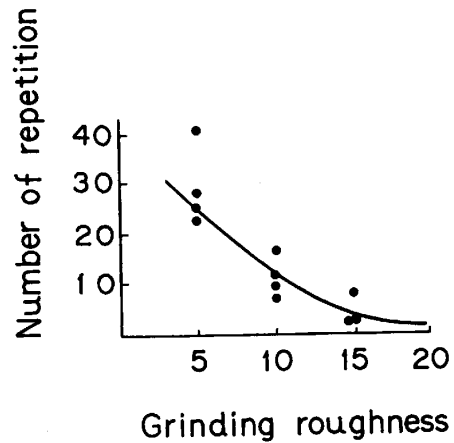


Fig. 12. Relation between number of repetition and grinding roughness.

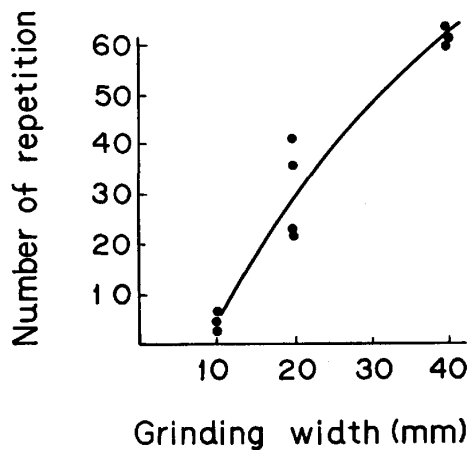


Fig. 13. Relation between number of repetition and grinding width.

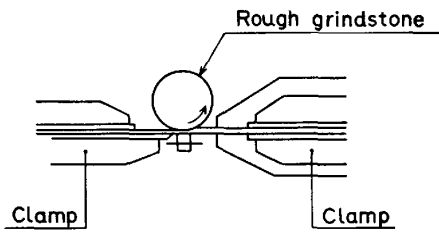


Fig. 14. Schematic diagram of roughgrinding.

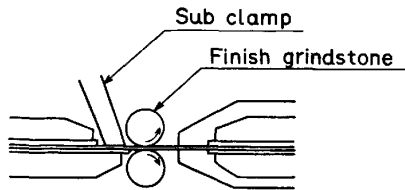


Fig. 15. Schematic diagram of finishgrinding.

Table 2. Materials unsuitable for flash welding process.

Material	Note
Electrical steel (more than 1.5% Si)	1) SiO <sub>2</sub> film in welded joint 2) Coarse grains in HAZ
High carbon steel (0.4% ≤ C ≤ 1.5%)	1) Unstable flashing 2) Hardened reinforcement
Mediumcarbon steel (0.3% ≤ C ≤ 0.4%)	Unstable flashing
Low alloy steel	Unstable flashing
High tensile steel	Unstable flashing

10 μm 以下にする

(2) 研削時の鋼板表面での研削焼け，熱変形を生じさせない。

(3) 研削深さ 0.1 mm~0.2 mm に対して研削幅を 20 mm 以上とする。

以上を満足させるため，粗と仕上砥石を使用した，2 段研削装置 (Fig. 14, 15) にて研削を行っている。

#### 4. 操 業 状 況

Table 2 に示すように，従来のフラッシュ溶接では，溶接が不安定であつたり，継手強度が足りないため，溶接部の冷間圧延ができない鋼種の溶接も本溶接機では可能である。

これらの代表鋼種について，レーザー溶接による溶接品質，操業状況について述べる。

##### 1) 珪素鋼

川鉄では，高珪素鋼から低珪素鋼まで，板厚も，阪神の薄物 (0.1~0.2 mm) から，千葉・水島での厚物 (2.0~3.0 mm) まで，レーザー溶接を実施しているが，溶



Photo. 1. Laser welding of hot strips.

Table 3. Welding conditions.

Material	Conditions	Power	Welding speed	Filler wire	Gap
Low carbon steel	≤ 2.5 mm	5 kW	4~7 mpm	—	0 mm
	> 2.5 mm	5	1~5	—	0
High carbon steel	< 0.5% C	5	1~5	○	0.1~0.3
	≥ 0.5% C	5	1~5	○	0.3~0.5
High alloy steel		5	1~5	○	0.1~0.5
High silicon steel		5	3~6	○	0.1~0.3
SUS 430		5	2~5	○	0.1~0.3

接継手強度を得るための要点は，以下のとおりである。

a) 溶接入熱を低くすることにより，熱影響部での結晶粒の粗大化を防止する。

b) ギャップ，焦点位置 (フィラーワイヤーを使用する場合には，供給量) 等をコントロールすることにより，余盛の小さい均質な溶接継手を得る。

代表的な溶接条件を Table 3 に示す。Photo. 2 に方向性珪素鋼板 (Si : 3%) の溶接部断面写真を，MIG 溶接と比較して示す。レーザー溶接の場合は，溶接部も狭く，熱影響による結晶粒の粗大化もほとんど見られない。冷間圧延した溶接継手部の断面写真を Photo. 3 に示す。

##### 2) 中高炭素鋼，合金鋼，ステンレス鋼

これらの鋼種についても，レーザー溶接を実施し，継手部の圧延を行っているが，溶接時，以下の 2 項目に注意する必要がある。

a) 特に，C含有量が高い材料に対しては，ブローホールの発生を防ぐため，フィラーワイヤーにより適当な希釈を行う。Fig. 16 に溶接部の C含有率と，溶接強度 (強度指標として反復曲げ回数値を示す) との関係を示

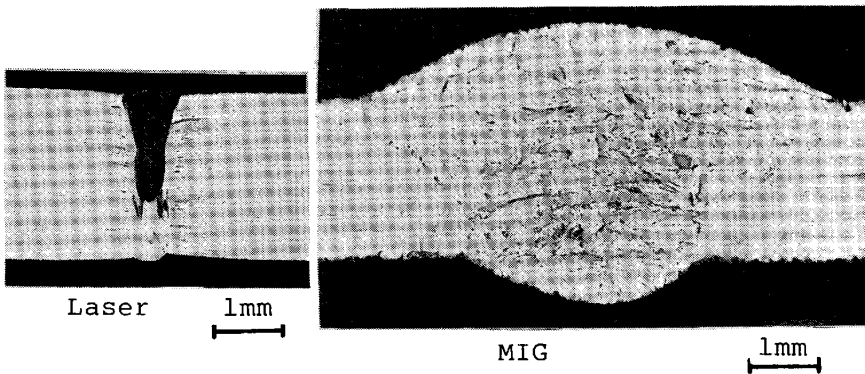


Photo. 2. Microscopic view of cross sections of welded joints by laser and MIG welding. Material : High silicon steel

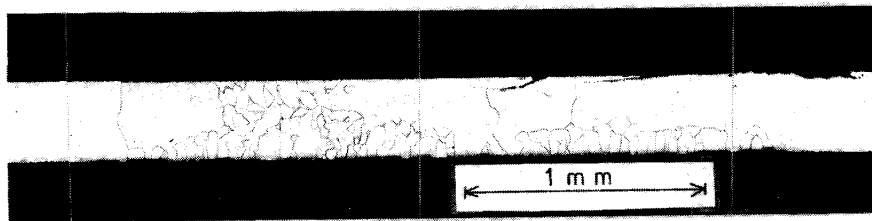


Photo. 3. Microscopic view of cross section of laser-welded joint after cold rolling.

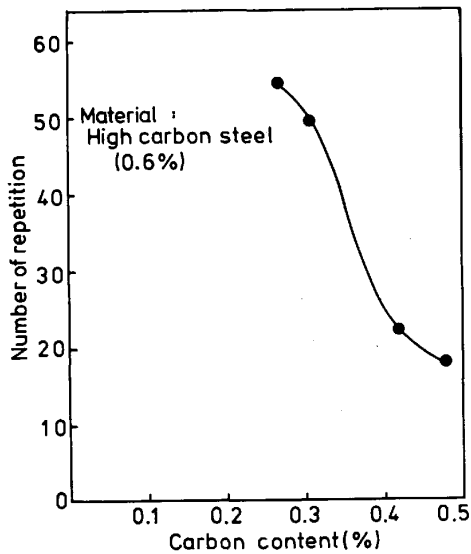


Fig. 16. Relation between number of repetition and carbon content of weld metal.

す。

b) 母材と、フィラーワイヤーとの混合を最適にするためギャップ、溶接速度、ワイヤー供給量をコントロールする。

0.6% 炭素鋼溶接継手の断面写真を Photo. 4 に示す。珪素鋼板と同様の良好な溶接継手が得られている。

Fig. 17 に中炭材のレーザー溶接継手の溶接強度（反復曲げ回数値）をフラッシュ溶接継手と比較して示すが、フラッシュ溶接に比べ、4～5倍の溶接強度を有してい

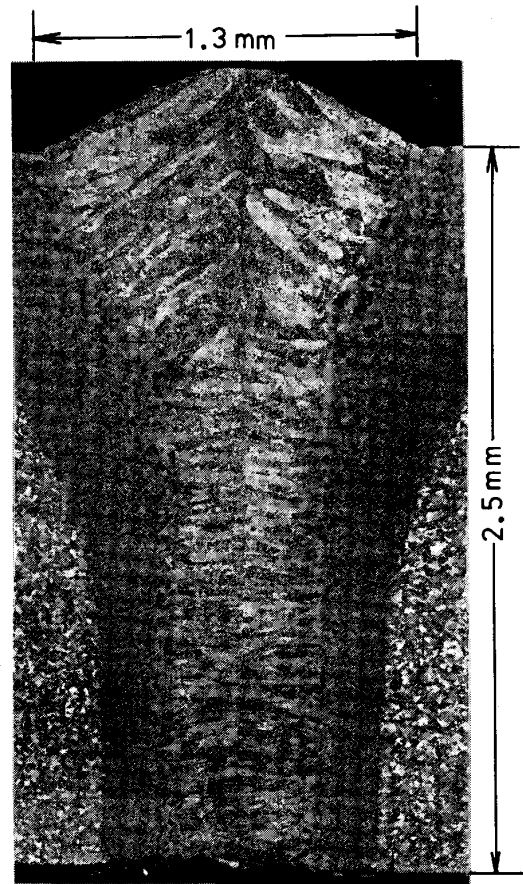


Photo. 4. Microscopic view of cross section of laser welded joint of high carbon steel.

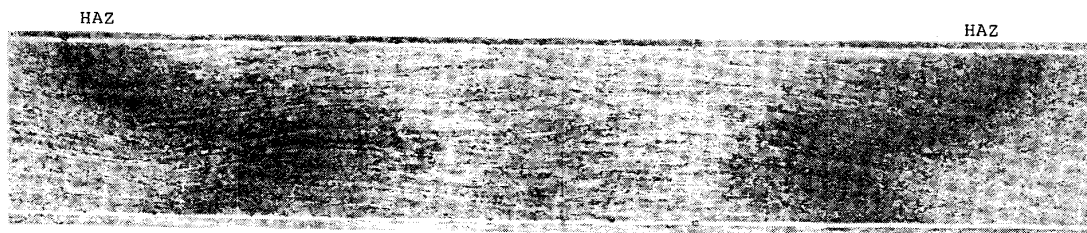


Photo. 5. Microscopic view of cross section of high carbon steel laser-welded joint after cold rolling.

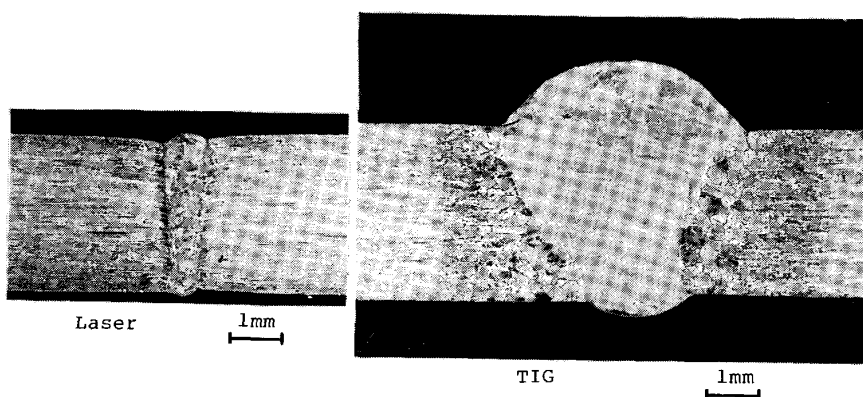


Photo. 6. Microscopic view of welded joints by laser and TIG welding. Material : 430

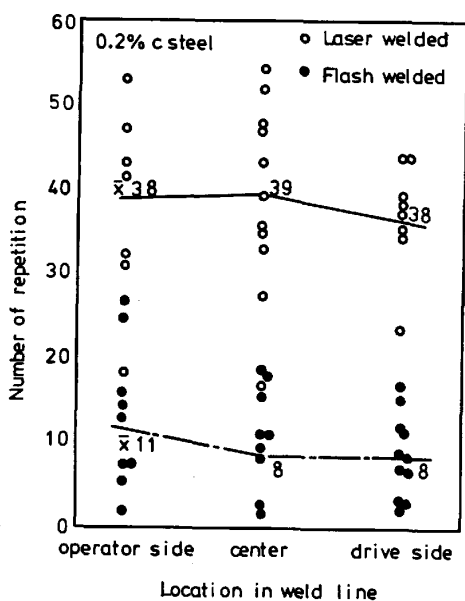


Fig. 17. Comparison of welded joint fatigue strength by reverse bend test (JIS Z 3126) in both laser and flash welding of a medium carbon steel.

る。冷間圧延後の溶接部断面写真を Photo. 5 に、また冷間圧延時のオフゲージ発生量を Fig. 18 に示す。レーザー溶接の場合、溶接部前後 200 m/m のオフゲージ量(最終製品 cut 量)ですんでおり、歩留りの向上に大きな効果が現れている。Fig. 19 に、SUS 430、板厚 3 mm 厚材を、溶接した場合の継手強度を、従来溶接法

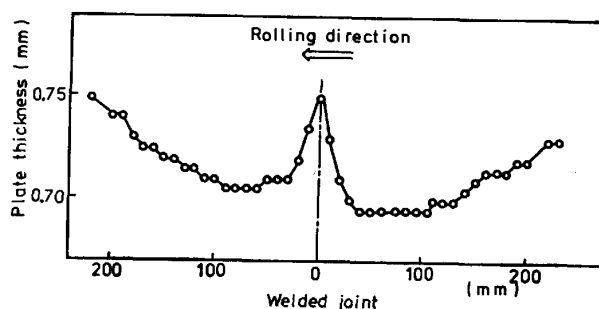


Fig. 18. Plate thickness in the vicinity of laser-welded joint after cold rolling.

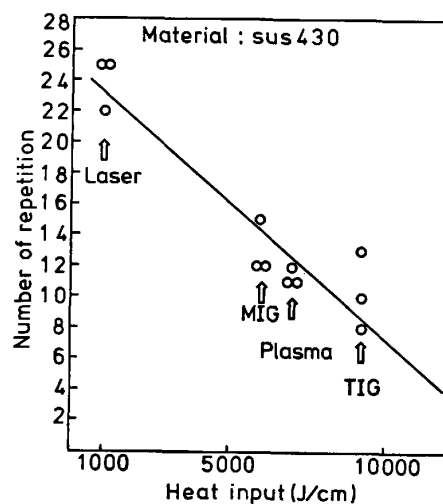


Fig. 19. Influence of welding heat input on reverse bend fatigue strength.

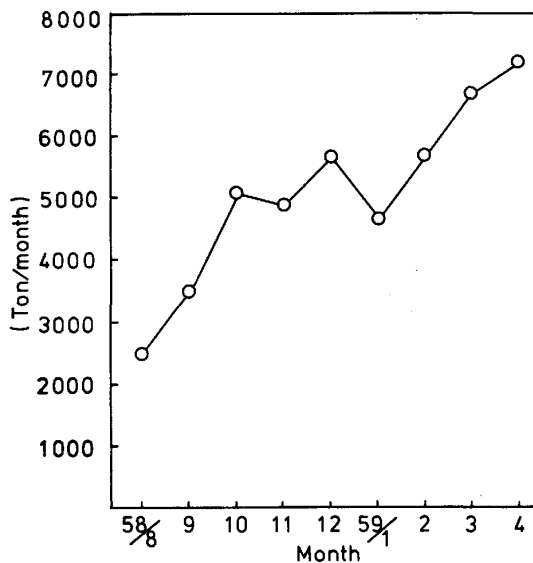


Fig. 20. Amount of monthly product of Laser welded steel strips.

Table 4. Cycle time in laser welding and flash welding of mild steel.

Weider Item	Laser welder			Flash welder		
	0	60	120 s	0	60	120 s
Cycle time	[Bar chart showing cycle time for Laser welder]			[Bar chart showing cycle time for Flash welder]		

(MIG, TIG, プラズマ) による溶接継手強度と比較して示す。レーザー溶接継手は、溶接入熱が極めて小さく、結晶粒の粗大化が防止されるため、従来法の2倍以上の、溶接強度を得ることができる。Photo. 6 に、TIG とレーザー溶接継手の断面を示す。

現在、水島、千葉合わせて、約 8000 t/月の熱延材を処理している。これまで、大きなトラブルもなく、歩留り、原単位、その他ビルドアップによるハンドリング性の向上に、寄与している。溶接時間についても、最新式のフラッシュ溶接と同じレベルのサイクルタイムが期待でき、一般低炭素鋼材でも、良好な溶接品質が得られている。特に、0.15 mm のテスト溶接にも成功しており、極薄物の処理にも利用可能である。

## 5. 結 言

川崎製鉄(株)水島製鉄所、No. 2 酸洗ライン及び、千葉製鉄所 No. 4 酸洗ラインに設置された(水島 S58/5月、千葉 S58/7月)高出力レーザー溶接機は、以下のような特徴と、効果があることが判明した。

(1) シャーレーキ 1.5° の剪断刃採用、ほかにより、切断精度を上げ、同時に、シャー移動、トーチ移動

の精度、突合せ精度を 1/100 mm の精度で、管理することにより、総合的にレーザービームと切断線のずれを、 $\pm 0.1$  mm 以内に納められた。

(2) レーザー溶接は、溶接点のパワー密度が大きいため、低入熱で溶接することができ、従来の溶接法以上の溶接品質が得られる。

(3) 低・中・高炭素鋼、珪素鋼、ステンレス鋼等、あらゆる鋼種の溶接が可能であり、かつ、溶接継手は、タンデム圧延に耐え得る強度をもつ。

(4) フィラーワイヤーを連続的に供給することができ、溶接継手の冶金的制御が可能で、かつ、溶接部形状も自由に、制御することができる。

今後、川崎製鉄は、レーザー溶接機を使つて、ステンレス、珪素鋼、特殊鋼の連続圧延を実施していく計画である。

## 文 献

- 1) 佐々木弘明, 西山 昇, 坪井潤一郎: 川崎製鉄技報, 13 (1981) 3, p. 104
- 2) 佐々木弘明: 精機学会シンポジウム資料 (1981-3), p. 50
- 3) 佐々木弘明, 西山 昇, 鎌田晃郎: KWH 委員会資料 (1981-11)
- 4) 藤井 守, 多鹿 洋, 田中 茂, 小野弘路, 長坂省治, 佐々木弘明: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 2, p. 46
- 5) 藤井 守, 多鹿 洋, 田中 茂, 小野弘路, 佐々木弘明: 鉄と鋼, 68 (1982), S 398
- 6) 谷口茂樹, 佐々木弘明, 柳島章也, 善本毅, 古川九州男: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1077
- 7) 佐々木弘明, 西山 昇, 鎌田晃郎: 溶接学会講演概要, 31 (1982), p. 236
- 8) 佐々木弘明, 善本 毅, 古川九州男, 柳島章也, 小野弘路: 鉄と鋼, 69 (1983), A 81
- 9) H. SASAKI, N. NISHIYAMA and A. KAMADA: Laser welding with filler wire, 3rd International colloquium on Welding and Melting by Electrons and Laser Beams (1983)
- 10) H. SASAKI, N. NISHIYAMA, A. KAMADA, F. YANAGISHIMA, K. FURUKAWA, T. YOSHIMOTO and S. TANIGUCHI: CO Laser welding for steel strip production process, 3rd International colloquium on Welding and Melting by Electrons and Laser Beams (1983)
- 11) H. SASAKI, K. ISHII and K. FURUKAWA: CO Laser welding for steel production process, AISI Technical Symposium No. 12 (1983)
- 12) 河合義人, 相原正樹, 石井功一, 田渕 衛, 佐々木弘明: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 1, p. 53
- 13) 弦田 登, 湯浅博康, 相原正樹, 石井功一, 福島巖: 鉄と鋼, 70 (1984) S 405
- 14) 田渕 衛, 内藤 肅, 中原久直, 河合義人, 佐々木弘明: 鉄と鋼, 70 (1984), S 406