は高くなる。

(3) T_i が最大となる溶射条件, すなわち, 溶融金属の単位重量当たりの入熱量が最大となるワイヤ送給速度条件で溶射した時, 皮膜の付着力は最大となる。

(4) 以上のことから, 付着力が最大となる溶射条件は正極及び負極ワイヤ送給速度と平均アーク電流から計算できる入熱パラメータ [S.S.H.] が最大となる条件をみ

つけることによって, 設定することができる。

参考文献

- 1) 川瀬, 森石; アーク溶射における溶融金属温度—アーク溶射法に関する研究 (第3報) —, 本誌, 2-3 (1984)
- 2) 川瀬, 森石, 前原; アーク溶射におけるアーク現象とワイヤ溶融—アーク溶射法に関する研究 (第2報), 本誌, 2-2 (1984) 82-87
- 3) 安藤, 長谷川; 溶射アーク現象, 産報 (1976)
- 4) 川瀬, 森石, 峰久; アーク溶射条件と皮膜の付着力との関係—アーク溶射法に関する研究 (第1報) —, 本誌, 1-2 (1983) 119-124

薄鋼板へのレーザビーム溶接法の適用*

益本 功**, 篠田 剛**, 石山 博之***

Application of Laser beam welding to thin steel sheet*

by Isao Masumoto**, Takeshi Shinoda**, and Hiroyuki Ishiyama***

As Laser beam can be focused to pointed area, it is suitable to apply high speed welding of thin sheet metal. This experiment was carried out to know what advantage can be expected by applying Laser beam welding to surface coated steel sheet and austenitic stainless steel.

The results obtained in this report are as follows;

- 1) Steel sheet can be welded with much smaller distortion by Laser beam welding, compared with TIG welding. For coated sheet, Laser beam welding gives less damage to coated layer than that of TIG welding. It is possible to make full penetration weld to use 3-5 times faster speed by Laser beam welding than by TIG welding.
- 2) TIG weld metal of Zn coated sheet shows Zn rich region at surface but Laser weld metal does not.
- 3) Laser beam welded joints of stainless steel show little weld decay tendency, which is almost same level as electron beam welded joint.

1. 緒 言

レーザビームは, 電子ビーム同様スポット径が小さく, アークに比べエネルギー密度が高い。しかし, 真空中の電子ビームで得られる溶接部の深い溶込みに比べ, レーザビームは光エネルギーであり, 板表面の反射等のため溶込みは必ずしも深くない。

深い溶込みを要しない薄板では, レーザビームはアーク溶接法に比べ高速溶接を行うことができる。これによって, 溶接変形量の減少, 表面処理鋼被膜損傷の減少, ステンレス鋼溶接部の粒界腐食 (ウェルド・ディケ

イ) の減少が期待される。

そこで本報告は, 自動車用表面処理薄鋼板のビード溶接をレーザビームを用いて行い, その変形量, 表面被膜への影響を TIG 溶接法と比較したものである。さらに, SUS 304 オーステナイトステンレス鋼溶接部のウェルド・ディケイについてレーザビーム, 電子ビームおよび TIG 溶接法と比較した。

2. 表面処理鋼板のレーザビーム溶接

2.1 実験方法

2.1.1 供試材料およびレーザビーム発生装置

供試鋼板は, 板厚 0.8 mm および 1.6 mm の自動車用冷間圧延鋼板 (JIS-G3141, SPCE) で, これに亜鉛被膜厚さ $4.2 \mu\text{m}$, あるいはジンクリッチプライマ厚さ $12.5 \mu\text{m}$ をそれぞれ塗布した自動車用電気亜鉛メッキおよびジンクリッチプライマ塗布鋼板である。

* 原稿受付 昭和59年5月17日 (昭和60年度 春季 全国大会 論文発表講演)

** 正 員 名古屋大学工学部 Member, Nagoya University

*** 学生員 " 大学院 Student Member, Graduate student of Nagoya University

現トヨタ自動車(株) (Present address: Toyota Motor Co.)

本実験に用いたレーザ加工機は、出力 2 kw の準シングルモード型¹⁾の炭酸ガスレーザ加工機で、焦点距離 125 mm の KCl レンズを使用した。

2.1.2 実験方法

長さ 200 mm、幅 100 mm の供試鋼板の幅中央長手方向に、下向き姿勢で種々のレーザビーム出力、台車移動速度により、ビード溶接を行った。シールドガスは、主ノズルよりレーザビームと同軸上で、板表面側に He 15 l/min を流し、裏波ビードの酸化防止の目的で試験片をスリット溝付の箱型治具上に載せ、治具内へ Ar 10 l/min を送給した。

ビード溶接実験後、外観検査、X線透過検査、変形量測定、マクロ断面観察、顕微鏡組織観察を行った。

2.2 実験結果および考察

レーザビームによるビード溶接実験の結果を Fig. 1 に示す。同図は三種類の鋼板の完全溶込みの条件範囲を台車移動速度とレーザビーム出力について示したものである。なお、レーザビーム出力は、レーザ発振管の半透過鏡を出た直後で、カロリメータにより測定した値である。

Fig. 1 Welding parameter ranges for thin sheet by Laser beam. Hatched and dotted area show full penetration welded joints.

図中、裏面まで完全に溶融しアンダカットあるいはハングの無い健全な溶接金属が得られる条件範囲を、点線あるいはハッチングで示した。いずれの鋼種もほぼ類似の条件範囲で溶接が可能であることを示している。また 0.8 mm 厚鋼板の条件範囲は、1.6 mm 厚より広く、特に高レーザビーム出力でも、また低速側でも安定して裏波ビードを形成できる範囲がある。これらの溶接金属の X線透過検査の結果、気孔あるいは割れなどの欠陥は認められなかった。

Fig. 2 は、ジンクリッチプライマ塗布鋼板を用い、種々の入熱条件でレーザビームによりビード溶接した場合のビード形状を示したものである。ここで用いた入熱は、次式によった。

Fig. 2 Effect of heat input on bead width by Laser beam welding.

Note: B_{ws} ; Surface bead width
 B_{wr} ; Root bead width

$$Q = W/V \text{ (J/cm)}$$

ただし、ここで W はレーザ加工機の出力計による値 (watt), V は速度 (cm/sec) である。

同図の左側は板厚 0.8 mm、右側は 1.6 mm の例で、それぞれ上段は表面ビード幅 (B_{ws})、中段は裏波ビード幅 (B_{wr}) で、下段は裏波および表面ビード幅の比を示す。

同図によれば、表面および裏波ビード幅共ほぼ溶接入熱に比例している。表面ビード幅は、いずれの場合もほぼ 1~2 mm で範囲であった。図の下段の裏・表ビード幅の比から、その値が 0.3 以下となると裏波を形成しなくなる。また、板厚 0.8 mm の場合はほぼ 1 KJ/cm、板厚

Fig. 3 Effect of heat input on bead width of mild steel sheet by Laser beam and TIG welding.

1.6mm の場合 2.5KJ/cm で表裏ビード幅はほぼ等しくなり, この値以下ではワインカップ状の溶込みを示した. 他の軟鋼板, 電気亜鉛メッキ鋼板でもほぼ同様の傾向が得られた.

Fig. 3 は板厚 0.8 mm および 1.6 mm の軟鋼板へ, レーザビームおよび TIG 溶接によりビード溶接した場合の表面ビード幅におよぼす溶接入熱の影響を示したものである. これらはいずれも完全溶込みの条件の場合であるが, いずれの場合もレーザービームの方がビード幅は小さく, 特に 0.8 mm 厚鋼板では, TIG の 1/2 程度となっている.

Fig. 4 Comparison of width of zinc burned zone by Laser beam and TIG welding.

電気亜鉛メッキ鋼板のビード溶接実験の際見られる亜鉛の焼失幅をビード止端からの距離で, レーザビームと TIG 溶接とを比較した. その結果を Fig. 4 に示す. これによると, 板厚 0.8 mm および 1.6 mm いずれの場合についても, レーザビームによる亜鉛メッキの焼失幅は TIG 溶接に比べ少なく, 板厚 0.8 mm では約 1/3, 板厚 1.6 mm では約 1/2 となっている.

ビード表面から溶接金属内部への亜鉛の分布を EPMA

Fig. 5 Zinc distribution in Laser beam and TIG weld metals of zinc plated sheet by EPMA analysis.

Fig. 6 Comparison of weld distortion by Laser beam and TIG welding.

により分析した結果を Fig. 5 に示す. 同図によれば, レーザビームおよび TIG 溶接金属共, 平均濃度はほとんど変化はないようであるが, TIG 溶接金属では溶接金属表面から約 30 μm は亜鉛濃度が高い. レーザビームの場合は濃度が一定であった.

完全溶込みのレーザービームおよび TIG 溶接継手は, いずれも溶接方向に鞍型の縦曲り変形および溶接線に直交する方向の角変形を生じた.

Fig. 6 は板厚 0.8 mm, および 1.6 mm のレーザービームおよび TIG 溶接により生じた変形を写真により示したものである. これらの場合の入熱は, 0.8 mm 厚の場合 0.5 KJ/cm, 1.6 mm の場合に 1.5 KJ/cm であった.

この縦曲り変形を, Fig. 7 上方に示すように, 溶接線中心線上より 5 mm 離れた試験片端部のはね上り高さを計測し, 入熱に対しプロットした. こののはね上り高さは, 板厚の大きいもの程, また同一板厚, 同一溶接法で

Fig. 7 Effect of heat input on longitudinal distortion of Laser beam and TIG welding.

は入熱の小さいもの程小さくなっている。しかし、母材の残留応力を $650^{\circ}\text{C} \times 2\text{ hr}$ の熱処理で除去した場合 (図中黒印) と、受け入れの冷間圧延のままで差は認められなかった。また溶接線に直交する方向で計測した角変形量でもほぼ同様の溶接入熱に依存する傾向を示した。

3. SUS304 オーステナイトステンレス鋼板のレーザビーム溶接

3.1 供試材料および溶接方法

供試材料は、板厚 3 mm の市販の SUS 304 オーステナイトステンレス鋼で、その化学組成を Table 1 に示す。母材寸法は長さ 250 mm、幅 100 mm とし、幅中央長手方向にレーザビームあるいは TIG 溶接でビード溶接を行った。また、比較のため電子ビーム溶接も行ったが、チャンバーの寸法の制約より、長さ 50 mm、幅 100 mm の試片寸法とした。

Table 1 Chemical composition of base metal, wt%

	C	Si	Mn	P	S	NI	Cr	Mo	N
SUS 304	0.065	0.65	0.99	0.027	0.004	8.50	18.35	0.08	0.049

Thickness : 3 mm

Table 2 Welding parameters of different welding processes

Welding process	Passes	Welding parameters	Speed (cm/min)	Atmosphere or shielding	Heat input (J/cm)
Electron beam	1	Beam current 10 mA Accelerating voltage 150 kV	200	Vacuum 5×10^{-4} Torr	450
Laser beam #1	1	Beam power 2.0 KW Focal length of lens 150 mm	100	He 10 l/min	1200
TIG #2	2	Welding current 180 A Arc voltage 15 V	40	Ar 20 l/min	8100
TIG A	1	Welding current 130 A Arc voltage 11 V	20	Ar 10 l/min	4300
TIG B	1	Welding current 130 A Arc voltage 11 V	25	Ar 10 l/min	3400
TIG C	1	Welding current 130 A Arc voltage 11.5 V	30	Ar 10 l/min	3000
TIG D	1	Welding current 130 A Arc voltage 11 V	40	Ar 10 l/min	2100

#1 Focus point was 2mm under the surface.

#2 Electrode diameter in all TIG welding was 3.0mm

これら溶接条件をまとめて、Table 2 に示す。レーザビーム、電子ビームおよび TIG A は、1パス完全溶込みであるが、TIG #2 のものは両面 1パスの完全溶込み溶接で、他の TIG 溶接条件は部分溶込みとなっている。

3.2 溶接熱影響による粒界腐食

粗粒腐食試験は、1) JIS G 0573「ステンレス鋼の65%硝酸腐食試験法」および 2) JIS G 0574「ステンレス鋼の硝酸ふっ化水素酸腐食試験法」により行った。硝酸・ふっ化水素酸腐食試験では、規格により10%硝酸3%ふっ化水素酸の70℃溶液中で2時間の腐食試験を行い、腐食減量を測定した。溶接法によるウェルドディケイ生成傾向の差を明らかにするために、さらに2時間の腐食試験をくり返した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 粒界腐食試験

a) 65%硝酸腐食試験法

JIS G 0573 の規格により、65%沸騰硝酸中で48時間毎の腐食減量を3回測定し、その単位表面積、単位腐食時間当たりの値を求め、これを腐食度として、結果を Fig. 8

Fig. 8 Effect of welding processes on corrosion rate of SUS 304 austenitic stainless steel welded joints by 65% nitric acid test.

にまとめた。腐食度は電子ビーム溶接部、レーザビーム溶接部、TIG 2パスおよび TIG 1パス溶接部の順に大きくなっている。すなわち、電子ビーム溶接部の腐食度は、 $0.249\text{ g/m}^2\text{hr}$ であり、母材の $0.239\text{ g/m}^2\text{hr}$ よりやや高く、さらにレーザビーム溶接部の腐食度は $0.254\text{ g/m}^2\text{hr}$ でこれらの値よりやや大きくなっている。1パスで完全溶込みとした TIG 溶接部では溶接入熱も大きく、腐食度は最大で $0.281\text{ g/m}^2\text{hr}$ であった。

b) 10%硝酸3%ふっ化水素酸腐食試験

JIS G 0574 の腐食試験を2回くり返した後の溶接部近傍の顕微鏡写真を Fig. 9 に示す。同図によれば、電子ビーム溶接部には全くウェルドディケイが認められないが、レーザビーム溶接部にはごくわずかな腐食が認められる。電子ビームでの粒界腐食^{2,3)} が少ないことは、すでに著者の一人によって報告されている。

3.3.2 溶接熱サイクルとウェルドディケイ

オーステナイトステンレス鋼のウェルドディケイ感受性は、溶接熱サイクルで $850 \sim 550^{\circ}\text{C}$ の温度域での保持時間、すなわち溶接熱サイクルに依存することはよく知られている。

Fig. 10 は各溶接法のウェルドディケイが生ずる個所を上述の腐食試験で求めておき、ウェルドディケイを生じた母材裏面での溶接熱サイクルを Pt-PtRh 熱電対で

Fig. 9 Micro-photograph of weld decay parts of different SUS 304 welded joints after 10% nitric-3% hydrofluoric acid test ($\times 200$)

Fig. 10 Weld thermal cycle at weld decay appearance location. Figures in brackets show location of thermo couple from weld toe of root bead.

測定した結果である。図中の () 内の数字は、熱電対の位置を止端からの距離で示したものである。これによると、冷却時間は電子ビーム、レーザービームおよび TIG 溶接の順で長くなっている。すなわち、ウェルドディケイを生ずる温度域に保持されている時間は、Table 4 に示すように、電子ビームで0.01分、レーザービームで0.04分、TIG 溶接で0.33分となっている。

本実験の腐食試験の結果も、熱サイクルの測定結果と対応している。TIG 溶接部のウェルドディケイを生じた個所の抽出レプリカによる透過電顕観察でも、炭化物の粒界析出が認められたが、レーザービームおよび電子ビーム溶接部ではこのような炭化物析出は認められなかった。

井川^{4,5)}は、この溶接熱サイクル中のオーステナイトステンレス鋼の炭化物の析出挙動を Avrami⁶⁾ の提案した加算則により予測できることを示した。

すなわち、炭化物の析出量が X_0 となるまでの恒温析出曲線を、温度 T の関数 $C_t(T_{(t)})$ として表わすと、溶接熱サイクル中において析出量が X_0 に至る時間は次式

のパラメータ τ で評価できる。

$$\tau = \int_0^t \frac{dt}{C_t(T_{(t)})}$$

析出は $\tau=1$ となる時間で開始される。恒温炭化物析出曲線の関数形を文献より求めた。これを Table 3 に示す。この関数に、本実験で得られた熱サイクルのデータを計算し、 τ の値を Table 4 にまとめて示した。

Table 3 Equations to predict starting time of carbide precipitation (Partially corroded condition)

Reference	Temperature range (°C)	Equation
Ikawa 4), 5)	$T_p < 900$	$\log t = 1.64 \times 10^{-4} \times (T - 780)^2 + \log A(C)$ where $A(C) = \frac{1}{60} \exp \left(\exp \left(\frac{2.22}{C - 0.02} \times 10^{-2} + 0.646 \right) \right)$
	$T_p \approx 900$	$\log t = 1.64 \times 10^{-4} \times (T - 780)^2 + \log A(C)$ where $A(C) = \frac{1}{60} \exp \left(\exp \left(\frac{2.22}{C - 0.02} \times 10^{-2} - 0.0599 \right) \right)$
Solomon 7)	$T_p \leq 825$	$t = 8.27 \times 10^{23} \exp \left(\frac{-5.14 \times 10^4}{T + 273} \right) + 9.69 \times 10^{-16} \exp \left(\frac{3.83 \times 10^4}{T + 273} \right)$

Note t : Starting time of carbide precipitation, min
 T : Temperature, °C
 T_p : Peak temperature of weld thermal cycle, °C

Table 4 Calculated values

Welding process	Distance mm	Peak temperature °C	Cooling time from 850 to 550 °C (min)	Calculated τ value using iso-thermal carbide precipitation curves by following authors	
				Ikawa 4), 5)	Solomon 7)
EBW	1.7	855	0.01	0.12	1.43×10^{-4}
	2.0	405	-	0	1.99×10^{-13}
Laser	1.4	1030	0.039	9.28×10^{-2}	-
	2.4	765	0.040	0.205	8.85×10^{-3}
TIG	2.6	996	0.09	1.02	4.33×10^{-2}
	3.7	870	0.159	0.982	5.98×10^{-1}
	4.7	685	0.115	2.02×10^{-2}	8.31×10^{-3}

TIG 溶接の場合、井川らの式で計算した τ の値は、1 前後となり、ウェルドディケイを生じた本実験の結果、および抽出レプリカの観察結果と一致する。なお、レーザービームおよび電子ビーム溶接では τ の値は0.1～0.2で、炭化物析出の可能性が小さいことを示している。

4. 結 論

レーザービームは、エネルギー密度が高く、ビームスポットを小さく絞ることができるので、薄板の高速溶接に適している。表面処理鋼板およびオーステナイトス

ンレス鋼の溶接に、レーザビーム溶接が利点を見出し得るかどうかについて実験を行い、次の結果を得た。

1) レーザビームは、TIG に比べ板厚 0.8~1.6 mm の表面処理鋼板の溶接で、高速で完全溶込みの継手を得ることができ、変形も小さく、表面処理被膜の焼失幅も小さかった。

2) 表面処理鋼板のレーザビーム溶接金属中の亜鉛量は、ほぼ均一に分布していたが、TIG 溶接金属では表面層から約 30 μm にわたりやや亜鉛の高い濃度域が認められた。

3) SUS 304 オーステナイトステンレス鋼板のレーザビーム溶接部のウェルドディケイ生成傾向は、電子ビーム溶接とほぼ同程度か、やや大きい。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、終始熱心に協力された奥田洋一郎工学士に感謝します。

なお、本研究は昭和56年度文部省科学研究費補助金一般研究A による助成を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 益本ら；“レーザビーム溶接のビード形状におよぼすパラメータの影響”，溶接学会誌論文集 2 (1984)，No. 2 p. 246~252.
- 2) 益本ら；“各種ステンレス鋼溶接部の Weld decay におよぼす溶接法の影響”，溶接学会全国大会講演概要集 No. 19 (1976)，p. 92~93.
- 3) 益本ら；“電子ビーム溶接部の応力腐食割れ感受性”，防食技術，29 (1980)，No. 12，p. 602~608
- 4) 井川ら；“SUS 304 におけるウェルドディケイに関する研究（第1報）”，溶接学会誌 47 (1978)，No. 3，p. 147~153
- 5) 井川ら；“同上（第2報）”，溶接学会誌 47 (1978)，No. 4，p. 252~259
- 6) Avrami, M.; “Kinetics of Phase Change II”; Journal of Chemical Physics, 8 (1940)，p. 212~224
- 7) Solomon, H.D.; “Continuous Cooling Sensitization of Type 304 Stainless Steel”, National Association of Corrosion Engineers, 34 (1978)，No. 6，p. 183~193

ろう接継手の疲労き裂成長速度*

雀部 謙**，岡根 功***

Fatigue Crack Growth Rate of Brazed Joint*

by Ken Sasabe** and Isao Okane***

It is well known that fatigue crack propagates accompanying a small scale yielding at the crack tip. In filler metal between base metals of brazed joint, fatigue crack growth rate depends possibly on the degree of restraint of crack tip plastic deformation by base metals, because the width of crack tip plastic deformation zone is nearly the same with the width of joint gap and crack tip plastic deformation can be restrained by base metals.

The theoretical discussions on correlation of crack tip plastic deformation and base metals revealed;

- 1) The degree of restraint of crack tip plastic deformation by base metals depends on yield strength of filler metal in joint gap, stress intensity factor and joint gap.
- 2) Under shear stress, crack tip deformation is restrained when joint gap is smaller than a certain scale, and fatigue life of joint becomes longer.
- 3) Under tensile stress, base metals do not restrain a crack tip plastic deformation, and fatigue crack growth rate depends on stress concentration factor range which becomes greater with the width of joint gap.

Some experiments on fatigue crack propagation rate in copper filler metal of steel butt joint showed good agreement with the theoretical assumptions.

1. 緒 言

前報において、鉄鋼の純銅ろうによる薄肉内管突合せ継手のねじり疲労試験を行い、ろうの強度に対して母材強度が十分に高いとき、接合間隙が小さい場合には継手

* 原稿受付 昭和59年8月28日 (昭和60年度 春季 全国大会 論文発表講演)

** 正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

*** 正 員 豊橋技術科学大学 Member, Toyohashi University of Technology