

レーザー・アークハイブリッド法による 亜鉛めっき鋼板の高速溶接プロセス

松坂 壮太* 上園 敏郎** 津村 卓也***
田中 学*** 渡部 武弘*

High speed welding process of galvanized steel sheets by laser-arc hybrid method

MATSUSAKA Souta, UEZONO Toshiro, TSUMURA Takuya, TANAKA Manabu and WATANABE Takehiro

* 千葉大学工学部 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

** (株)ダイヘン (〒566-0021 大阪府摂津市南千里丘5-1)

*** 大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

matuaska@faculty.chiba-u.jp

(原稿受付 2006年8月23日)

Galvanized steel plates were lap-welded by laser-arc hybrid method. The hybrid system consisted of 2kW LD or YAG laser oscillator and DC pulse MAG arc welding machine. In this experiment, the arc-welding rod traveled on the specimens following the laser beam with the interval of 2 mm. The results showed that the hybrid method had some advantages, such as deep welding depth, high welding speed and high joint gap tolerance, in comparison with the conventional arc welding. High-speed camera observation suggests that the zinc and iron vapors produced by laser ablation stabilized the arc-plasma formation. The effect of the incident angle between welding torch and specimens on molten metal flow was also discussed.

Key words: Laser-arc hybrid welding, Galvanized steel plates, Lap joint, High speed welding

1. 緒 言

従来の工業製品,中でも自動車の生産に用いられる溶接方法は,アーク溶接や抵抗スポット溶接が主流であるが,近年ではブランク材の溶接にレーザー光を用いる試みも行われている。アーク溶接は低コストでかつ,大きな入熱,高い施工裕度を得られるため広く普及しているが,溶接の高速化を図る上では問題も多い。高速溶接における代表的な問題は,高速溶接の溶け込み不足を解消するために溶接電流を増加させると,アークが不安定となりハンピングビードが生じることである。

一方レーザー溶接は,高エネルギー密度熱源であることから,熱影響部が少なく高アスペクト比の溶接が可能となる一方,低ギャップ裕度,欠陥(ポロシティ・クラック)発生,初期導入コストが高い等の理由により,生産現場で主流を占めるまでには至っていない。

しかし近年,これらの両溶接法の短所を補完し,深い溶け込みを高い施工裕度で実現することを目的として,TIG, MIG, プラズマ等のアークとCO₂, YAG, 半導体レーザーとを併用するハイブリッド溶接法が多数試みられており^{1)~5)},一部では実用化されるところまで発展してきた⁶⁾。

本研究では,半導体或いはYAGレーザーとMAGアークとのハイブリッド法を,自動車用亜鉛めっき鋼板の水平重ね隅肉溶接に適用した。高速度カメラにより,溶融現象に対するレーザー光の重畳効果を調査するとともに,溶接ヘッド

と試験片との相対位置を調整することにより,欠陥のないビードを高速に形成することを目的とした。

なお,本研究は溶接学会「薄板の高速溶接プロセス」研究会の一環として実施され,アーク溶接(ガス成分の調整,溶接ワイヤの改良を含む),プラズマ溶接,レーザー溶接の各手法と,試験片,治具等を共通とし,品質,速度,コスト等の各視点から比較・検討を目指したものである。ハイブリッド法以外の成果については,各文献^{7)~9)}を参考にして頂ければ幸いである。

2. 実験方法

2.1 実験装置および供試材料

本研究では半導体レーザー(波長:840 nm,集光ビーム径:2.0 mm)およびYAGレーザー(波長:1064 nm,集光ビーム径1.2 mm)とMAGアークのハイブリッド溶接システムを使用した。レーザー出力は共に2 kWであり,アーク溶接にはDCパルス電源を用いた。溶接ワイヤとして神戸製鋼所製MIX-ITS(YGW17相当,φ1.2 mm)を,シールドガスとして80%Ar-20%CO₂を用いた。供試材は合金化溶融亜鉛めっき鋼板JAH440-45/45(t1.8 mm×50 mm×300 mm,亜鉛目付け量45 g/m²)である。

2.2 実験方法

継手形状は, Fig. 1に示すように,重ね代30 mmの水平重ね隅肉溶接とした。溶接速度およびギャップは溶接ビードに著しい欠陥が現れる値を上限とし,それぞれ0.5~2.5

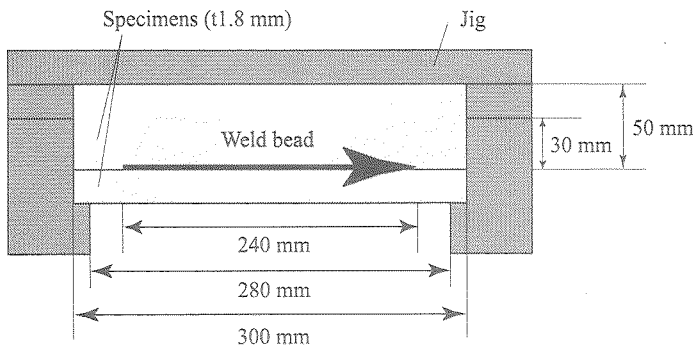


Fig. 1 Configuration of specimens and jig.

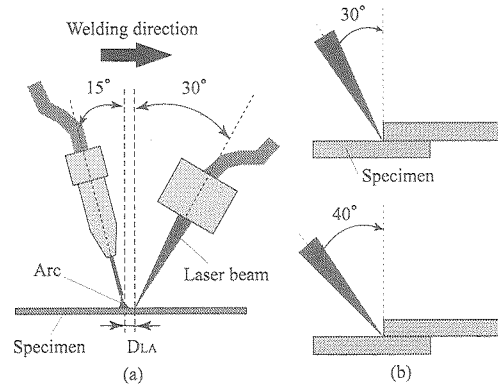
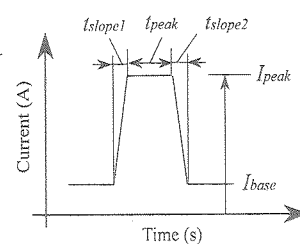


Fig. 2 Schematic illustrations of laser-MAG hybrid welding head. (a) Welding head, (b) angles between welding head and perpendicular line.

Table 1 Experimental conditions in diode laser / MAG arc hybrid welding.

| Welding speed (m/min) | Wire feed rate (m/min) | Arc current (A) | Arc voltage (V) | DC pulse frequency (Hz) | I_{base}/I_{peak} (A) | $t_{slope1}/t_{peak}/t_{slope2}$ (ms) |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1.0 | 4.5 | 130 | 22 | 93 | 40/500 | 0.5/1.6/0.5 |
| 1.5 | 6.75 | 190 | 25 | 155 | | |
| 2.0 | 9.0 | 260 | 28 | 228 | | |
| 2.5 | 11.25 | 300 | 28 | 269 | | |
| 0.5* | 3.0 | 90-95 | 21.5-22 | 52-57 | | |



* Wire feed per unit bead length is different from other conditions.

m/minおよび0~2 mmの間で実験を行った。ギャップは、試料間にスペーサを挿入することにより調整した。溶接ヘッドは、レーザー先行(後退角30度)、アーク後行(前進角15度)に設定し(Fig. 2 (a))¹²⁾、狙い位置間隔 D_{LA} は2 mmとした。溶接ヘッドは垂直方向に対して30度または40度傾け、隅肉のルート部を狙い位置とした(Fig. 2 (b))。また、溶接部斜め上方に高速度カメラ(5000 fr/s)を設置し、溶接時の溶融池、アークの挙動を観察した。

2.3 評価方法

実験で得られた試料の評価項目は、外観調査(穴あき、ピット、ビードのハンピング)、断面調査(溶け込み深さ、脚長、のど厚、ビード幅、止端角、アンダーカットおよびブローホールの有無)である。外観の評価はビード中央部から前後25 mm間で行い、ビード中央で断面評価を行った。なお、のど厚は溶接ルートからの最短距離とし、ギャップの有無によらず最も薄くなっている部分を測定した。

3. 実験結果

3.1 レーザ・アークハイブリッド効果の検討

レーザーの重畳効果を確認するため、まず、半導体レーザーとアークのハイブリッドシステムを用い、溶接ヘッドの傾斜角を30度として実験を行った。Table 1に溶接条件を示す。平均アーク電流は、単位ビード長さ当たりのワイヤ供給量が等しくなるように、95~400 Aの間で変化させ、ベース電流40 A、ピーク電流450~500 Aのパルス電流を付加して溶接を行った。なお、ここで溶接に用いたアーク溶接電源は、パルス電流波形をTable 1の挿入図に示すように、1

パルス1溶滴移行を実現するために予め定められたパルス電流を供給し、ベース電流時間は溶接電圧設定に連動し、かつ溶接中のアーク長変動を安定化させる目的で溶接電圧フィードバックによって可変する周波数変調方式のパルス溶接電源である。

Fig. 3に、溶接速度1.0および2.0 m/minの場合のアーク単独およびハイブリッド法による溶接部外観・断面写真を示す。同図に示すように、溶接速度が1.0 m/minの場合は、レーザー光の有無による顕著な品質の差は見られない。一方、2.0 m/minの場合ではアーク単独溶接においては大きなピット状の欠陥が発生しているのに対し、ハイブリッド法の場合は発生していない。また溶け込み深さも、いずれの溶接速度においてもハイブリッド法によるものはアーク単独のものより大きくなっている。これはレーザー光の高いエネルギー密度により深さ方向への溶融が促進されたためと考えられる。なお、ビード断面のマクロ観察を複数箇所で行った結果、アーク単独、ハイブリッドのいずれの場合においても、亜鉛の蒸発に起因するブローホールの発生はそれほど見られず、したがって、ビード表面に開口せず内部に閉じ込められたブローホールはほとんどないと想定される。これは、板厚、速度に対してやや高めの電流設定(ワイヤ供給速度)を採用したため、溶着金属が固まる前にガスが抜けたことがその主要因と考えられる。

Fig. 4 (a), (b)は、それぞれ溶接速度1.0 m/min, 2.0 m/minの場合の溶接部近傍の高速度撮影写真を示したものである。なお、ここではアークの揺らぎを見やすくするため、パルス電流の底部(ベース電流部)の2 ms間のみを示した。

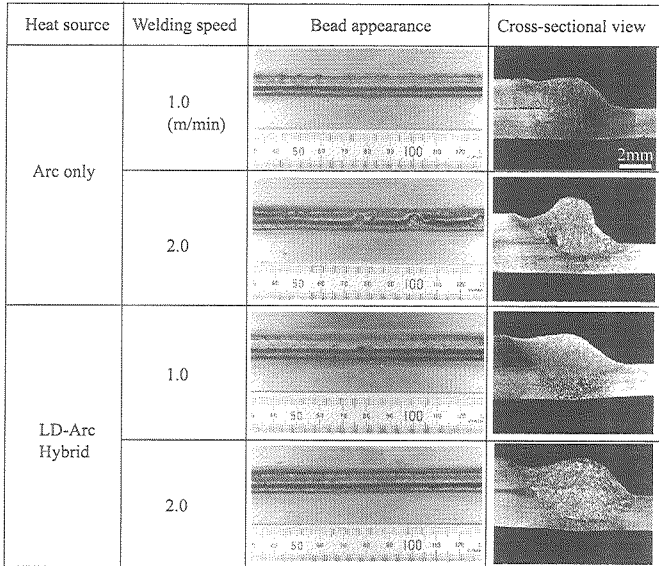


Fig. 3 Bead appearance and cross-sectional views of arc-welded and hybrid-welded specimens.

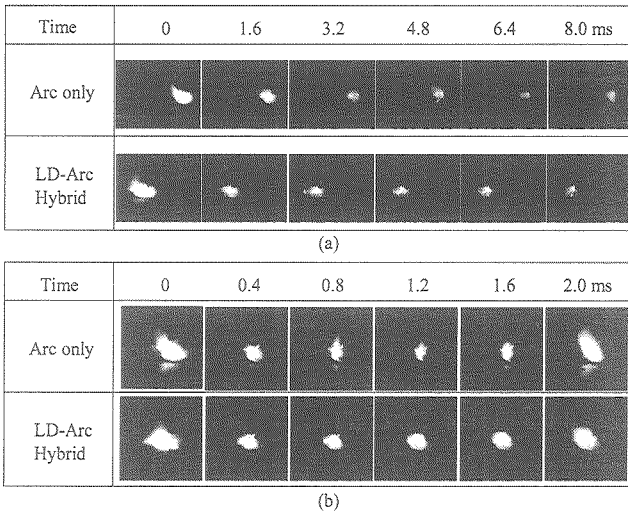


Fig. 4 Observation of arc plasma by high speed camera. (a) Welding speed: 1.0 m/min, (b) 2.0 m/min.

同図から分かるように、溶接速度が1.0 m/minの場合には、アーク単独、ハイブリッドにいずれにおいてもアーク形状は比較的安定しており、両者にそれほど大きな差は認められなかった。これに対して、溶接速度が2.0 m/minの場合、アーク単独ではプラズマの形状が非常に不安定であるのに対し、ハイブリッド法の場合、プラズマは一定形状を保ち、またその陰極点はレーザービーム照射点にほぼ一致している。したがって、ハイブリッド法の場合に高い溶接速度においても安定したビードが形成される原因として、レーザー照射に伴う母材および母材表面の亜鉛の蒸発・プラズマ化により、照射位置近傍に陰極点が形成され易くなったことがその一因として挙げられる。

一方、Fig. 5にハイブリッド溶接における、ビード形状に対するギャップの影響を示す。溶接速度はいずれの場合も1.5 m/minである。同図から分かるように、ギャップが大きくなるにつれて、下板の溶け込み深さが過剰に増加

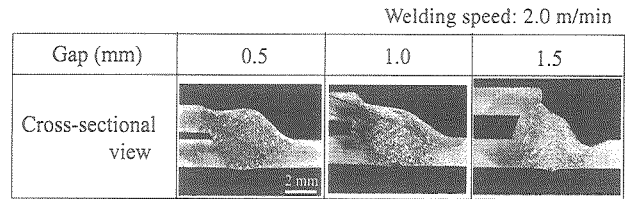


Fig. 5 Effect of gap on weld bead formation.

Table 2 Experimental conditions in YAG laser / MAG arc hybrid welding.

| Welding speed (m/min) | Wire feed rate (m/min) | Arc current (A) | Arc voltage (V) | I_{base} / I_{peak} (A) | $t_{dip} / t_{peak} / t_{skp2}$ (ms) |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 0.5 | 3.7 | 120 | 22 | | |
| 1.0 | 7.5 | 240 | 27 | | |
| 1.5 | 9.4 | 310 | 27 | | |
| 1.75 | 10.2 | 360 | 29 | 40 / 450 | 0.5 / 1.4-1.7 / 1.1 |
| 2.0 | 11.2 | 400 | 32 | | |
| 2.25 | 11.2 | 400 | 32 | | |
| 2.5 | 11.3 | 400 | 32 | | |

| Welding speed (m/min) | Gap (mm) | Head angle (degree) | |
|-----------------------|----------|---------------------|----|
| | | 30 | 40 |
| 1.0 | 2.0 | not - welded | |
| 1.5 | 1.5 | | |
| 2.0 | 0.5 | | |
| 2.0 | 1.5 | not - welded | |

Fig. 6 Improvement of gap tolerance by increase in welding head angle.

し、それに伴って、のど厚の不足および上板側のアンダーカットが目立つ結果となった。これらの結果から、今回のようにギャップが大きく、溶接ヘッドの傾きが小さい (= 30度) 場合、入熱および溶着金属が下板側に偏って供給されたものと考えられる。

3.2 のど厚、ギャップ裕度不足の改善

前節で得られた結果から、熔融金属を上板側に供給するためにはヘッド角度を増加させ、上板側に熔融金属の供給を行いやすくすることが必要であり、併せてワイヤ供給量そのものも増加させることでのど厚を確保できるものと考えられる。また、よりビーム径が小さくエネルギー密度の高いYAGレーザーを用いることで、レーザー照射による母材および亜鉛蒸気の蒸発やプラズマ化を促進して陰極点を安定化させ、高速での溶接を安定化させることも必要である。そこで、YAGレーザーとアークのハイブリッドシステムを用い、溶接ヘッドの傾き角を40度に変更し、同時にワイヤ供

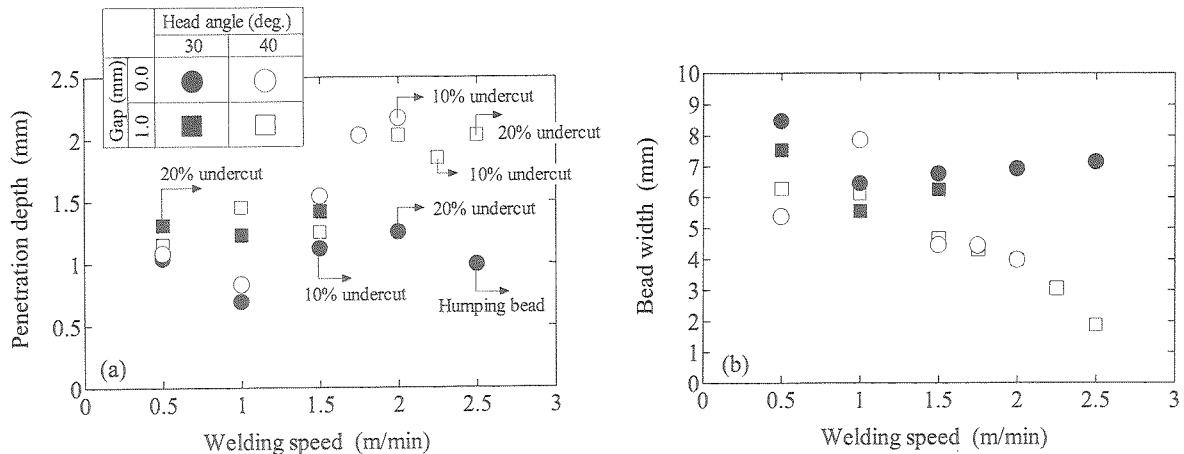


Fig. 7 Change in weld bead quality with increase of welding speed. (a) Penetration depth, (b) bead width.

給量を増加させた。Table 2 に溶接条件を、Fig. 6 に実験結果の一例を示す。前節の結果と比較すると、のど厚の不足およびアンダーカットの発生が抑制され、また、大きなギャップを有する場合においても溶接が可能となっている。但し、止端角については、溶接速度が比較的大きい場合に 120 度に満たないものが見受けられ、それに伴いにビード幅が狭くなっていた。これはアーク電流の制限による溶着金属量の不足と、溶接ヘッドの傾斜角を大きくしたことにより、上板側により多くの金属が供給されたためと考えられる。

Fig. 7 に溶接速度と溶け込み深さ、ビード幅との関係を示す。図中には、アンダーカット、ハンピングビードの発生を併せて示している。同図から、溶接ヘッドの傾斜角を 40 度に設定することで、ギャップ 0 mm で 1.75 m/min、1 mm で 2.0 m/min 程度の溶接速度まで、目立った欠陥のないビード形成が可能となった。また上述のとおり、傾斜角 40 度で高速溶接を行った場合、ビード幅は徐々に減少し、特に 2.25 m/min 付近から、急速に減少している。したがって、実際の溶接施工にあたっては、アンダーカットの許容範囲、ギャップを考慮した条件設定が必要となる。なお、同等の供試材を用いたアーク単独溶接の結果⁷⁾と比較すると、アーク単独では 1.5 m/min 付近でアンダーカットやハンピングが生じることから、高速溶接時におけるハイブリッドの効果が示された。

一方、溶接した試験片について上板と下板双方を把持して引張試験を行ったところ、表面ピット等の大きな欠陥を有するものを除き、のど厚断面積が小さい物を含めほとんどの試験片は溶接部ではなく母材部で破断した。したがって、疲労強度等は別途考察が必要であるが引張強度については十分な強度が認められた。

4. 結 論

本研究では、亜鉛めっき鋼板の重ね隅肉溶接にレーザ・アークハイブリッド法を適用した。高速度カメラによる観察を行ったところ、ハイブリッド溶接においては、レーザ照射によって母材および母材表面の亜鉛が蒸発・プラズマ化するため、照射位置近傍に陰極点が形成され易く、プラ

ズマ形状が安定することが分かった。その結果、アーク単独溶接に比べて、高速溶接時にも安定したビード形成が行われたと考えられる。また、溶接ヘッドを 40 度傾けると同時にワイヤ供給量を増加させることにより、のど厚の不足およびアンダーカットの発生が抑制され、また、大きなギャップを有する場合においても高品質な溶接が可能となった。以上の点から、ハイブリッド法の溶接の高速化への有効性が示されたと考える。今後は、シールドガス成分の調整、溶接ワイヤの改善等により、さらなる高速化が期待される。

謝 辞

実験にご協力頂いた千葉大学大学院 飯島賢介氏に感謝致します。また、本研究を遂行するにあたり、溶接学会ミニ研究会「薄板の高速溶接プロセス」研究会よりご支援頂きました。本紙面を借りて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森 清和:自動車ボディへのレーザ溶接適用, 溶接学会誌, 72-1 (2003), 40.
- 2) 陳 亮, 中野利彦, 興石房樹, 鷹尾則克, 中田一博, 田中 学, 牛尾誠夫, 上山智之: 亜鉛めっき鋼板へのレーザ・アークハイブリッド溶接, 溶接学会第187回溶接法研究委員会資料 (2004), SW-2999-04.
- 3) 小野守章, 真保幸雄, 吉武明英, 大村雅紀: レーザ・アークハイブリッド溶接法による薄鋼板重ね溶接特性, 溶接学会論文集, 21-4 (2003), 515.
- 4) 全 紅軍, 上山智之, 木原貴行, 中田一博, 牛尾誠夫: レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接法による薄板 アルミニウム合金溶接の高速化, 溶接学会論文集, 22-1 (2004), 27.
- 5) 石出 孝, 坪田秀峰, 渡辺眞生, 上城和洋: 各種TIG-YAG・MIG-YAG 溶接法の開発, 溶接学会誌, 72-1 (2003), 22.
- 6) Graf, T. and Stauffer, H.: Laser Hybrid Welding Drives VW Improvements, Welding Journal, 82 (2003), 43.
- 7) 佐藤公哉, 山崎 圭, 亀井俊和: 自動車用亜鉛めっき鋼板のアーク溶接の高速化, 溶接学会全国大会講演概要, 77 (2005), 104.
- 8) 田中 学, 田口広喜, 三田常夫: 自動車用亜鉛めっき鋼板へのプラズマ溶接の適用, 溶接学会全国大会講演概要, 77 (2005), 108.
- 9) 山本健太郎, 山崎洋輔, 宮坂史和, 黄地尚義: 高速溶接のシミュレーションモデルの開発, 溶接学会全国大会講演概要, 77 (2005), 110.