



レーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接法の 薄板アルミニウム合金への適用

上山智之*, 全 紅軍*, 矢澤一蔵*, 平見正行*
木原貴行**, 中田一博**, 牛尾誠夫**

Aluminium Alloy Sheet Welding by Laser AC Pulsed MIG Hybrid Process

Tomoyuki Ueyama*, Hongjun Tong*, Ichizo Yazawa*, Masayuki Hirami*,
Takayuki Kihara**, Kazuhiro Nakata**, Masao Ushio**

Alternating current pulsed MIG welding is an appropriate process for joining aluminium alloy sheets because of its great gap tolerance and low heat input, which assists in avoiding burn through. However, when welding speed is higher than 33.3 mm/min (2 m/min), the low heat input is no longer an advantage since lack of penetration becomes a problem. Irradiation of the vicinity of the arc using a laser beam can solve this problem, and adjustment of the laser power can control the penetration. As a result, thin aluminium alloy sheets can be joined at a high speed of 66.7 mm/s (4 m/min) with sufficient gap tolerance. Moreover, investigation of the effect of laser beam diameter on the resulting weld for thin sheets indicates that a defocused laser beam having a diameter of several millimeters can further improve the ability to bridge joint gaps and tolerance of deviations in torch aim. Consequently, a high power diode laser having a relatively thick beam waist is suitable for this application.

Key words: Laser hybrid welding, AC pulsed MIG welding, Aluminium alloy sheet, Diode laser, YAG laser, Penetration control

1. 緒 言

近年、自動車産業を中心として車体軽量化のためアルミニウム合金の採用が進み、全アルミニウム構造の自動車が市場に登場するようになってきた¹⁾。

これらに適用される溶融溶接はレーザ溶接やミグ溶接が主力であり、最近ではこれら2つの溶接法を複合化させたレーザ・アークハイブリッド溶接法が提案され一部には溶接工程ラインで適用されている^{2),3)}。

このようにレーザ・アークハイブリッド溶接法が適用される背景としては、

- ①溶接速度の高速化とそれによる単位溶接長さ当たりの低入熱化・溶接変形防止
- ②ダイキャスト・押し出し材との異材溶接性の改善

* 株式会社ダイヘン 溶接メカトロカンパニー
Welding and Mechatronics Company, Daihen Corporation

** 大阪大学 接合科学研究所 Joining and Welding
Research Institute, Osaka University

原稿受付 2003年5月23日

③溶接継手に存在するギャップ裕度の改善があげられよう。

しかしながら、レーザとDCパルスミグアークを複合させたこれまでのハイブリッド溶接法では、ハイブリッド溶接適用の目的である低入熱・溶接変形の防止やギャップ裕度の改善を考えた場合に溶接施工上の限界が生じると考えられる。

とくに、DCパルスミグ溶接では溶接速度が33.3 mm/s(2 m/min)を超える速度で重ね隅肉溶接を行った場合、薄板アルミニウムでの板厚適用限界は約2 mm程度であり、それ以下の板厚では溶け落ちなどが発生して溶接が困難になる⁴⁾。いっぽう、最近ではEN(Electrode Negative, 電極ワイヤマイナス)極性を溶接電流波形に持たせたACパルスミグ溶接が普及し、薄板アルミニウムの溶接において溶接入熱を制御することが可能となり、継手のギャップに対してその裕度が改善されるようになった⁵⁾。

そこで、著者らはレーザとACパルスミグアークを複合させたハイブリッド溶接法を提案し、薄板アルミニウム合金の高速溶接への適用効果を検討した。さらに、レーザ照射においてはレーザビームスポットの品質がアルミニウム合金のハイブリッド溶接性に及ぼす影響についても検討し、ダイオードレーザを適用したレーザ・アークハイブリッド溶接ロボットシステムを開発した。

2. 薄板アルミニウム合金における高速溶接性の比較

薄板アルミニウム合金における高速溶接での課題としては、ギャップに対する条件裕度がない、溶け落ちやビードの穴あきが起こりやすい、ビード止端部のぬれ性が悪いことがあげられる。ここでは、各溶接プロセスを薄板アルミニウム合金の高速溶接に適用した場合の特性について述べる。

2.1 DCパルスミグ溶接

DCパルスミグ溶接は薄板アルミニウム合金(板厚2 mm以上)のアーク溶接では広く用いられており、とくに、ロボット溶接施工現場ではほとんどの場合DCパルスミグ溶接が適用されている。しかし、板厚が2 mm以下で溶接速度が33.3 mm/s(2 m/min)を超えるような場合には溶

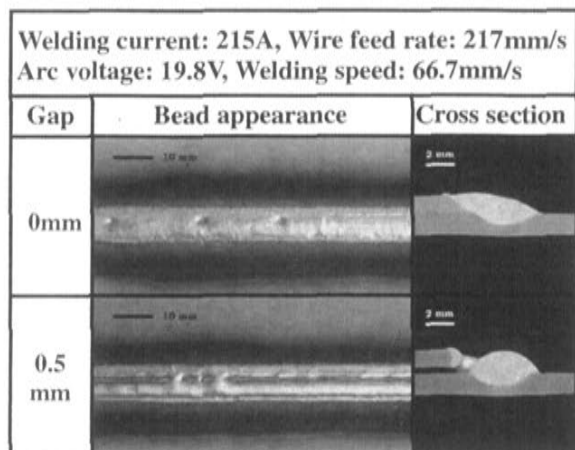


Fig. 1 DC pulsed MIG welding at a speed of 66.7 mm/s
(Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mm/1.5 mm)

け落ちやビード表面上に穴あきが生じるといった問題点がある。

Fig. 1は、上板1.2 mmおよび下板1.5 mmのAl-Mg合金(A5052)の重ね隅肉溶接をワイヤ径1.2 mmのAl-Mg合金(A5356)を用いて溶接速度66.7 mm/s(4 m/min)で実施した場合のビード外観、マクロ断面を示したものである。重ね継手のギャップが0のとき、溶接電流215 A(ワイヤ送給速度: 217 mm/s(13 m/min))にて下板への溶け込みは適正な深さが得られている。しかし、ビード表面には上板側でピット状の穴あきが数カ所認められる。また、ギャップが0.5 mm存在した継手では、過大なアーク入熱によって上板端部が連続して溶け落ち、溶接ビードが分離した溶接欠陥となっている。

上記のような穴あきを防止するには溶接電流値を下げることである程度解決できるが、下板への溶け込みが不足することがある。さらに、溶接電流設定はワイヤ送給速度と一義的な関係があり、溶接電流を下げることはワイヤ送給速度が減少することになるので、ギャップが存在する溶接継手では必要とする溶着金属量が得られなくなる問題点が発生する。

2.2 レーザ・DCパルスミグアークハイブリッド溶接

レーザとDCパルスミグアークを複合させた

ハイブリッド溶接ではそれぞれのプロセスを単独で実施した場合に比べ様々な溶接上の課題を克服できる⁶⁾。すなわち、DC パルスミグアークは継手のギャップに対する溶着金属の確保やポロシティなどの溶接欠陥の防止といったレーザー溶接の課題を補い、レーザーは溶接速度の向上や溶け込み不足の改善といったアーク溶接の課題を補う。このため、DC パルスミグアークを組み合わせたレーザー・アークハイブリッド溶接では一般に3 mm以上の板厚に適用されてきた。

しかし、板厚が2 mm以下のアルミニウム合金高速溶接ではレーザー・DC パルスミグアークハイブリッド溶接プロセスでも課題の解決には至らない。

Fig. 2はFig. 1と同様の重ね隅肉溶接継手にてレーザー・DC パルスミグアークハイブリッド溶接を66.7 mm/s(4 m/min)の溶接速度で実施したものである。ギャップが0の場合には、ビード表面に穴あきが生じない程度に溶接電流を下げて、レーザー出力を調整することによって適正な下板への溶け込みが得られていることがわかる。しかし、ギャップが0.5 mmのときには溶着金属不足から上板での穴あきが断続的に発生している。

以上の結果から、レーザーパワーはアークパワーの代替的役割を果たし、高速溶接時の入熱制御を容易にして所望の溶け込みを得ることができる。

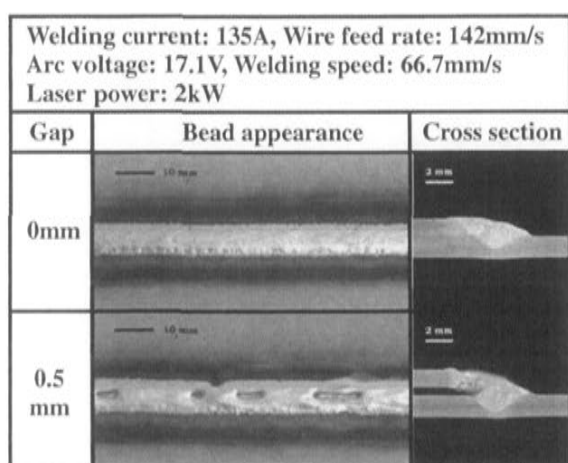


Fig. 2 Laser beam and DC pulsed MIG arc hybrid welding at a speed of 66.7 mm/s (Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mm/1.5 mm)

また、溶接電流を下げることはアーク力そのものも弱くなるので溶融池内の Metal flow の安定性を改善できるのでビードの安定性にも寄与すると考えられる。しかし、レーザーパワーで補った分だけ溶接電流を下げることは、2.1項でも述べたように溶着金属量確保の点で課題があり、ギャップの存在する継手では良好な溶接結果が得られない。

2.3 AC パルスミグ溶接

AC パルスミグ溶接は、DC パルスミグ溶接に比べて母材への入熱が少なく、同じ溶接電流におけるワイヤ溶融量が大きいいため、薄板溶接の難点となる溶け落ち、変形及びギャップ裕度に対して最も有効な消耗電極アーク溶接プロセスとして最近注目されている。

Fig. 3はAC パルスミグ溶接の電流波形をDC パルスと比較して示したものである。DC パルスミグ溶接ではワイヤプラス極性 (EP) が使われる。AC パルスミグ溶接では、DC パルス電流波形のベース期間の一部をワイヤマイナス極性 (EN) に切り換えて AC パルス電流波形となる。そして、EN 極性の電流面積と一周期の電流総面積との比によって定義される EN 比率⁵⁾が、ワイヤ溶融特性や溶け込み特性等に非常に重要なパラメータとなる。

Fig. 4は直径1.2 mmのAl-Mg合金 (A5356) ワイヤの溶融特性を示したものである。EN 比率が高いほどワイヤ溶融速度は速い。例えば、150

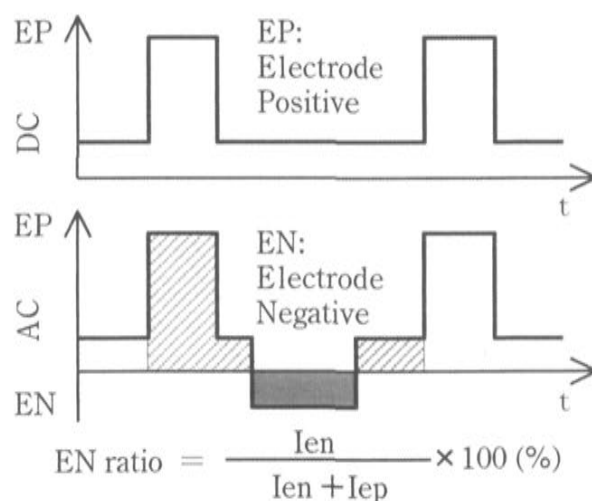


Fig. 3 AC and DC pulsed waveform

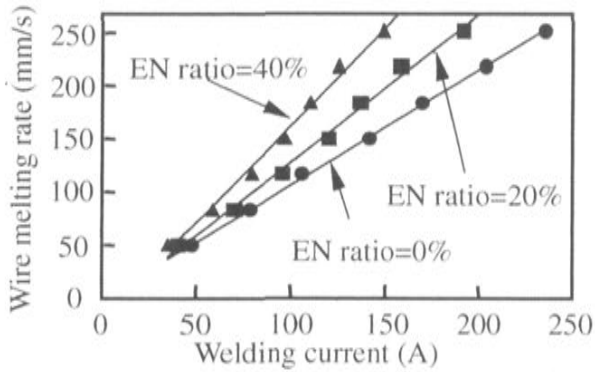


Fig. 4 Relationship between EN ratio and wire melting rate

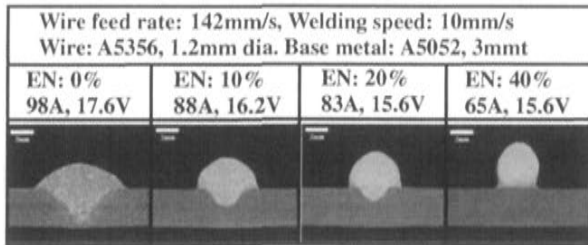


Fig. 5 Penetration depth shallows as EN ratio increases in AC pulsed MIG welding

Aの平均電流において、EN比率が40%のワイヤ溶融速度は、EN比率が0% (DCパルス) に比べて60%も増加している。

その結果、同じワイヤ送給速度において、EN比率が高いほど必要な溶接電流は小さい。

ACパルスミグ溶接では、Fig. 5に示すようにEN比率の調整でビード断面形状を制御できる。あるワイヤ送給速度において、EN比率の増加につれて、溶接電流及び溶け込み深さが激減し、ビード高さが高くなる。浅い溶け込みは薄板溶接の溶け落ち問題を解決でき、高いビード高さで低い入熱はギャップ裕度を広げることができる。

しかし、溶接速度が33.3 mm/s (2 m/min) を超える溶接条件では、ACパルスミグの特徴である低入熱溶接の効果が溶け込み不足の問題としてクローズアップされる。

Fig. 6は溶接速度50 mm/s (3 m/min) にて重ね隅肉溶接をACパルスミグ溶接で実施したものである。薄板で大きなギャップが存在するにもかかわらず

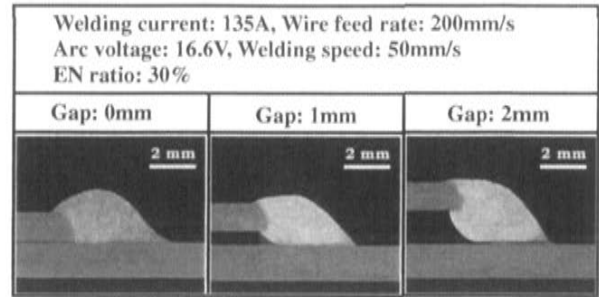


Fig. 6 AC pulsed MIG welding at a speed of 50 mm/s
(Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mm/1.5 mm)

ならず良好な溶着金属の橋絡が得られているもの、下板への溶け込みが不足しておりギャップが1 mmの場合には融合不良が生じている。

2.4 レーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接

これまで述べてきたように薄板アルミニウム合金の高速溶接における各溶接プロセスの長所・短所から、ACパルスミグアークとレーザービームを組み合わせたハイブリッド溶接は最も優れた溶接特性を発揮することが期待できる。

すなわち、ACパルスミグ溶接はギャップに十分な溶着金属を高速溶接で充填することができる。さらに、毎周期極性が交番するパルス溶接電流によってアーク力が抑えられるため溶融池内部のMetal flowが穏やかになる結果、穴あきやハンピングなどの不整ビード形成が容易に抑制される。

一方、レーザーをACパルスミグアークに加えることで、ACパルスミグ溶接の高速溶接時における短所であった浅い溶け込みを改善する。さらに、レーザーはアークに先行して照射されるので溶融池の予熱効果をもたらし、その結果溶着金属のぬれ性を改善する。

Fig. 7はレーザー・ACパルスミグハイブリッド溶接法による重ね隅肉溶接を66.7 mm/s (4 m/min) の速度で実施したビード外観とマクロ断面を示したものである。ギャップが1 mm程度存在していても良好な溶着金属の橋絡が得られている。しかも、下板への溶け込みが十分確保できて

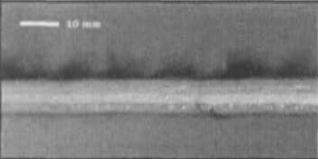
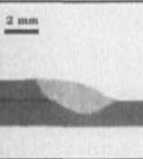

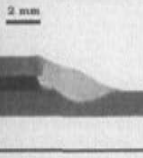
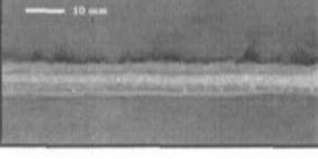
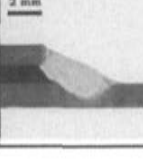
Welding current: 135A, Wire feed rate: 217mm/s Arc voltage: 16.9V, Welding speed: 66.7mm/s EN ratio: 30%, Laser power: 2.5kW		
Gap	Bead appearance	Cross section
0 mm		
0.5 mm		
1.0 mm		

Fig. 7 AC pulsed MIG arc and laser beam hybrid welding at a speed of 66.7 mm/s (Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mmt/1.5 mmt)

おり、ビード止端部のぬれ性も良好な溶接部が得られている

3. レーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接結果に及ぼすビームスポット径の影響

レーザービームスポット径はレーザービームの特性を決定する上で重要な因子であり、YAG レーザやCO₂ レーザでは小さなビームスポット径でエネルギー密度を高め、キーホール溶接を実現する。したがって、これまでのハイブリッド溶接における研究事例^{7)~9)}では、ビーム径を細く絞ったレーザーを組み合わせた溶接が多い。

しかし、薄板のハイブリッド溶接において、ビームスポット径が溶接結果にどのような影響を及ぼすかについては不明な点が残されたままである。そこで、本研究のもう一つの目的であるレーザービームスポット径が薄板アルミニウム合金のハイブリッド溶接結果に及ぼす影響について調査した。

Fig. 8 はビームスポット径の影響を調べるための実験装置を示したものである。レーザー溶接には

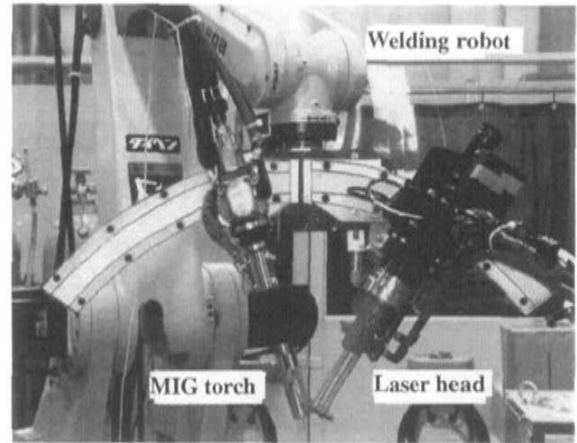


Fig. 8 Experimental setup of YAG laser and AC pulsed MIG arc hybrid welding

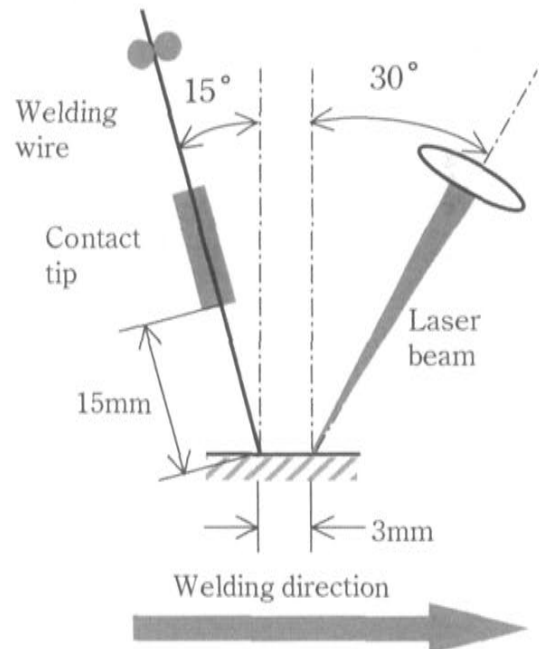


Fig. 9 Arrangement of laser head and MIG torch

ビームスポット径が焦点位置で1.09 mm が得られる2 kW のYAG レーザ溶接機を用いた。レーザーヘッドとミグ溶接トーチは、特殊なブラケットで固定されハイブリッド溶接トーチとして構成している。レーザーヘッドとミグ溶接トーチの配置はFig. 9 に示すように両者の開き角度が45度であり、レーザービーム照射時の反射が生じてミグトーチノズル、コンタクトチップ及び溶接ワイヤへの干渉が起こらないようにした。レーザー・アーク

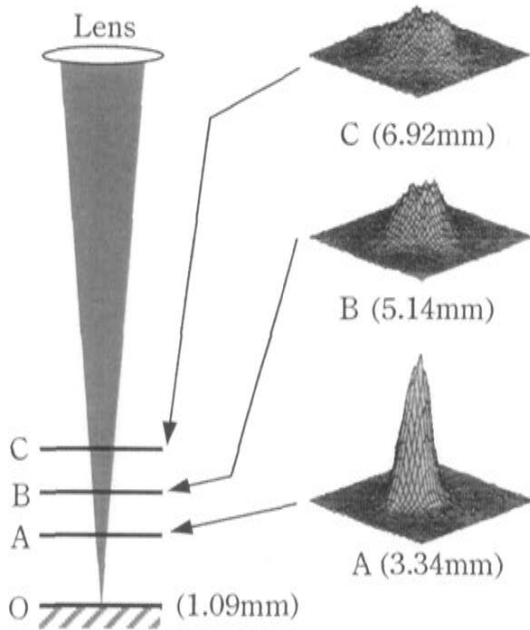


Fig. 10 The way of laser beam diameter settings

間距離は、ワイヤ突き出し長が15 mmの時にワイヤ先端からレーザービームスポットの中心までの距離が3 mmとなるように設定した。これによって、ビームスポット径を7 mmまで変化させてもレーザー反射によるミグトーチへの干渉が起こらないことを確認した。ビームスポット径の設定はFig. 10に示すようにレーザーヘッドと被溶接物間距離を変化させることで調整した。

3.1 溶け込み形状に及ぼすビームスポット径の影響

Fig. 11はレーザー・ACパルスミグアークハイブリッド溶接においてレーザービームスポット径が溶け込み形状に及ぼす影響を調べたものである。ビームスポット径が1.09 mmから6.92 mmへと変化するに従い、溶け込み深さは減少し、ビード幅は増加している。

本実験ではハイスピードビデオ撮影によって溶融池の状態を観察したが、ビーム径が1.09 mmの場合でもキーホールの形成は無かった。この事実と溶け込み形状からレーザー・ACパルスミグアークハイブリッド溶接における溶融池の形成は熱伝導によることを表している。また、ビームスポット径の変化による溶け込み形状の変化はレーザー照

Welding current: 135A, Wire feed rate: 217mm/s Arc voltage: 16.9V, Welding speed: 66.7mm/s EN ratio: 30%, Laser power: 2kW	
Beam diameter	Cross section
1.09mm	
3.34mm	
5.14mm	
6.92mm	

Fig. 11 Effect of laser beam diameter on bead shape
(Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mmt/1.5 mmt)

射による熱の入り方によることを示唆している。すなわち、ビーム径が細い場合には、レーザーエネルギーが接合部中央部へ集中して深溶け込みを形成する。ビーム径が太い場合には、広い範囲の接合部が予熱されるようになり、その結果、ビード幅が広くなり溶着金属のぬれ性が改善される。

3.2 ギャップ・トーチ狙いずれ裕度に及ぼすレーザービームスポット径の影響

Fig. 12はYAGレーザー出力が2 kW時における重ね溶接継手のギャップ及びトーチ狙いずれ裕度に及ぼすレーザービームスポット径の影響を調べたものである。溶接試験に用いた材料・継手は上板および下板ともに板厚1.5 mmのAl-Mg合金薄板であり、同図の裕度範囲は溶接後のビード外観から判定している。ギャップおよびトーチ狙いずれ裕度ともにビームスポット径が5.14 mmの方が広くなっている。

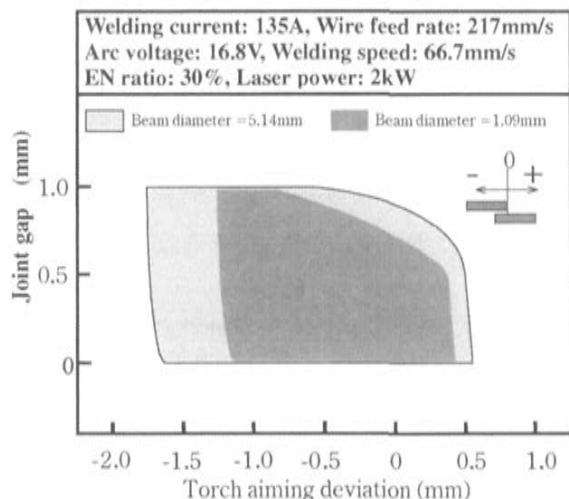


Fig. 12 Effect of laser beam diameter on tolerance for joint gap related to torch aiming deviation
(Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.5 mm/1.5 mm)

以上の結果から、デフォーカスのレーザに設定することによって溶着金属のぬれ性を改善でき、ギャップ及びトーチ狙いずれ裕度の改善効果が得られる。従って、著者らが提案する薄板アルミニウム合金のレーザ・ACパルスアークハイブリッド溶接ではデフォーカスしたYAGレーザあるいはビームスポット径を細く絞ることに制約のあるダイオードレーザの適用が可能である。

4. ダイオードレーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接ロボットシステムの開発

Fig. 13に著者らが新しく開発したレーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接ロボットシステムの外観を示す。レーザヘッドとミグ溶接トーチは、特殊なブラケットで固定されハイブリッド溶接トーチとして構成している。レーザヘッドとミグ溶接トーチの配置は、3章で述べたように

Fig. 9と同様である。ただし、レーザ・アーク間距離は、ワイヤ突き出し長が15mmの時にワイヤ先端からレーザビームスポットの中心までの距離が2mmとなるように設定した。

ミグ溶接トーチは高速時におけるアルミニウム溶接のシールド性を考慮したトーチボディおよび

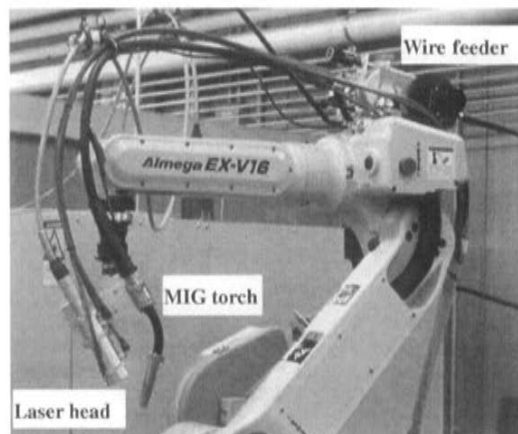


Fig. 13 Diode laser and AC pulsed MIG arc hybrid welding system

ノズル設計が施されている。また、レーザヘッドは水冷構造で、ヘッド先端部にはクロスジェットと呼ばれる圧縮エアを吹きつけることで、レーザ光学系レンズや保護ガラスをミグアーク時に発生するヒュームやスパッタの付着から保護している。

レーザ加工機はダイオードレーザを用いておりレーザパワーはファイバーにてレーザヘッドへ伝送され、ビームスポット径は約5mmである。

溶接ロボットは16kg可搬の独立多関節型アーク溶接ロボットを用いた。また、溶接電源はロボット専用のデジタルインバータ制御式AC/DCミグ溶接電源を用いた。この溶接電源ではロボット教示ペンダントから溶接電流波形のパラメータを任意に設定することができる。

さらに、ワイヤ送給装置はACサーボモータが搭載されており、安定で精度の良い送給速度でワイヤを送給することができる。

Fig. 14はそれぞれ、薄板アルミニウム合金の重ね溶接継手およびフレア溶接継手を本システムを用いて溶接速度66.7mm/s(4m/min)にてハイブリッド溶接を行った場合のビード外観および断面マクロを示したものである。重ね隅肉溶接ではギャップが存在するにもかかわらず、穴あきなどの溶接欠陥が無い。また、フレア溶接継手では溶け込みが片側に偏ったりすることなく良好な溶接部が得られている。

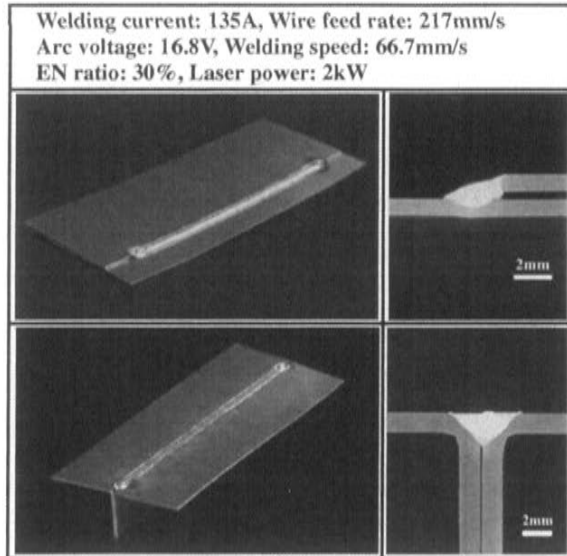


Fig. 14 Welding examples by diode laser and AC pulsed MIG arc hybrid welding system
 (Wire: A5356, 1.2 mm dia. Base metal: A5052, 1.2 mmt/1.5 mmt)

5. 結 言

レーザとACパルスミグアークを複合したハイブリッド溶接を提案し、薄板アルミニウム合金の高速溶接性について検討した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) DCパルス溶接やレーザ・DCパルスアークハイブリッド溶接では、継手にギャップが存在する薄板アルミニウム合金の高速溶接において穴あきや溶落ちが発生しやすく適正な溶接条件を選定することが困難である。

(2) ACパルスミグ溶接は継手のギャップに対して溶融橋絡部を溶け落ちを発生させることなく確保することができるが、母材への溶け込み不足が問題として残る。

(3) ACパルスミグアークにレーザを加えることによって、薄板アルミニウム合金の高速溶接においてACパルスミグ溶接で問題であった母材入熱不足を補い、溶け込み深さを容易に制御する。

(4) レーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接では、YAGレーザのビームスポット径を大きくすることで溶着金属のぬれ性を改善し、継手のギャップ裕度やトーチの狙いずれ裕度を広げ

ることに寄与する。

(5) 上記の結果から本提案のプロセスではビームスポット径を細く絞ることに制約のあるダイオードレーザを適用が可能である。

(6) ダイオードレーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接ロボットシステムを開発し、薄板アルミニウム合金の重ね継ぎ手及びフレア継ぎ手による高速溶接に適用した結果、良好な溶接結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) Dietrich Engelhart: The A2—a new Model Series From Audi, ATZ worldwide, Mar. 2000, 4-11.
- 2) U. Dilthey and A. Brandenburg: Laser-Arc Hybrid Welding—An Overview—, IIW Doc. XII-1710-02 (2002).
- 3) T. Graf and H. Staufer: Laser Hybrid Process at Volkswagen, IIW Doc. XII-1730-02 (2002).
- 4) 上山, 原田, 牛尾: 交流GMA溶接における日本の現状について, 軽金属溶接構造協会誌, Volt. 39 (2000) No. 8, P. 1-6.
- 5) H. Tong, T. Ueyama, S. Harada, and M. Ushio: Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system, Science and Technology of Welding and Joining, 2001 Vol. 6 No. 4, 203-208.
- 6) U. Dilthey and Wieschemann: Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565-99, 29-44.
- 7) 阿部, 林: レーザ・アーク複合溶接法の現状, 溶接学会誌, Vol. 70 (2001) No. 4, P. 7-11.
- 8) 石出, 名山, 渡辺, 長島: アークとYAGレーザのハイブリッド化—同軸TIG-YAG, ミグ-YAG溶接法の開発—, 溶接学会誌, Vol. 70 (2001) No. 4, P. 12-17.
- 9) 牧野, 椎原, 浅井: CO₂レーザ・アークハイブリッド溶接法, 溶接学会誌, Vol. 70 (2001) No. 4, P. 18-22.

執筆者の紹介



上山智之



全 紅軍



木原貴行



中田一博



矢澤一蔵



平見正行



牛尾誠夫



軽金属溶接 (月刊)

軽金属（アルミニウム、マグネシウム、チタン）の溶接に関するわが国唯一の月刊誌で、展望（軽金属使用の化学工業、原子炉、宇宙開発、海洋開発など）、解説（溶接関係JIS軽金属協会規格、政令など）、講座（溶接法、各種検査法、機器など）、資料（溶接製品に関する諸データ）、報告（試験研究結果など）等の、ほか国内の特許、実用新案の抄録、国内および海外の文献速報、アルミニウム溶接技術検定などに関する事項、溶接棒、電極ワイヤの統計、ならびに技術会の行事ニュースなど、豊富な内容と充実した記事を織込み軽金属溶接にたずさわる人々にとって好適の資料である。

B 5判、P約50、毎月16日発行。

¥840(会員2割引)、〒別、年間¥10,080(同2割引)、〒共、消費税込



アルミニウムブレイジングハンドブック (改訂版)

本書は平成4年1月に初版を発売し、好評のうちに完売となりました。その後、引き続いてろう付技術書の発刊の要望もあり、改訂委員会を設け、この度アルミニウムブレイジングハンドブック改訂版を刊行しました。

本書は、ろう付の原理及び手法の解りやすい解説書を編集の方針とし、開発された最新の材料、ろう付技術を盛り込んであります。

アルミニウムのろう付に係わる技術者、研究者、学生等に必携の書であります。

A5判、上製本、P.330、平成15年3月25日発行

¥7,350(会員2割引)消費税込、送料別、550g