

特集

## レーザー・ACパルスミグアークハイブリッド溶接法による 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\*, 中田一博\*\*, 牛尾誠夫\*\*

\*株式会社ダイヘン溶接メカトロカンパニー (〒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)

Aluminium Alloy Sheet Welding by Laser/AC Pulsed MIG Hybrid Process

UEYAMA Tomoyuki, TONG Hongjun, YAZAWA Ichizo, NAKATA Kazuhiro and USHIO Masao

(Received April 7, 2003)

**Key words:** AC pulsed MIG, laser, hybrid welding, aluminium alloy sheet, high speed welding

### 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<sup>1)</sup>。

図1はアルミニウム車体の自動車の例を示したものであるが、これらに適用される溶融溶接はレーザー溶接やミグアーク溶接が主力であり、最近ではこれら2つの溶接法を複合させたレーザー・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<sup>2)3)</sup>。

このようなレーザー・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
- ③ 溶接継手に存在するギャップ裕度の改善



図1 レーザー・アークハイブリッド溶接を適用したアルミニウム合金製自動車の例

があげられよう。

しかしながら、レーザーと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パルスミグアーク溶接では溶接速度が2m/minを超える速度で重ね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2mm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<sup>4)</sup>。

一方、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パルスミグアーク溶接が普及し、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<sup>5)</sup>。

したがって、著者らはレーザーと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、レーザーにおいてはレーザー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、レーザー・アークハイブリッド溶接法へのダイオードレーザー適用について紹介する。

### 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よう。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紹介する。

#### 2.1 DCパルスミグ溶接

DCパルスミグアーク溶接は薄板アルミニウム合金(板厚2mm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

スミグアーク溶接が適用されている。しかし、板厚が2mm以下で溶接速度が2m/minを超えるような場合には溶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。

図2は、上板1.2mmおよび下板1.5mmのAl-Mg合金(A5052)の重ね隅肉溶接をワイヤ径1.2mmのAl-Mg合金(A5356)を用いて溶接速度4m/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215A(ワイヤ送給速度:13m/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穴あきが数カ所認められる。また、ギャップが0.5mm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。

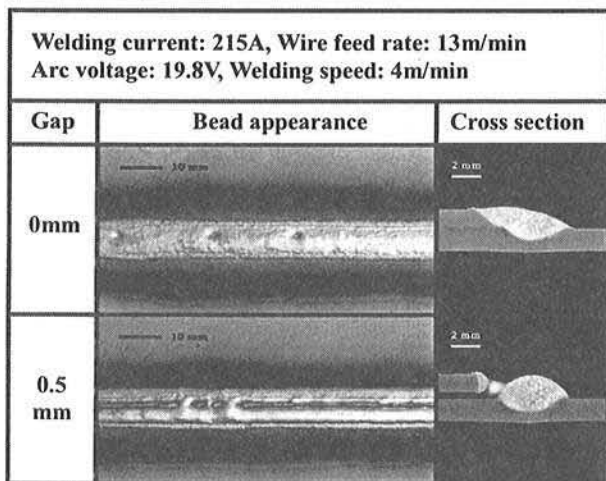


図2 DCパルスミグアーク溶接による薄板アルミニウム合金の重ね隅肉溶接結果

### 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<sup>6)</sup>。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溶接の課題を補い、レーザ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・アークハイブリッド溶接では一般に3mm以上の板厚に適用されてきた。しかし、板厚が2mm以下のアルミニウム合金高速溶接では同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。

図3は図2と同様の重ね隅肉溶接継手にてレーザ・DCパルスミグアークハイブリッド溶接を4m/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0.5mm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出来る。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、ビードの安定性にも寄与すると考えられる。しかし、レーザパワーで補った分だけ溶接電流を下げることは、2.1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。

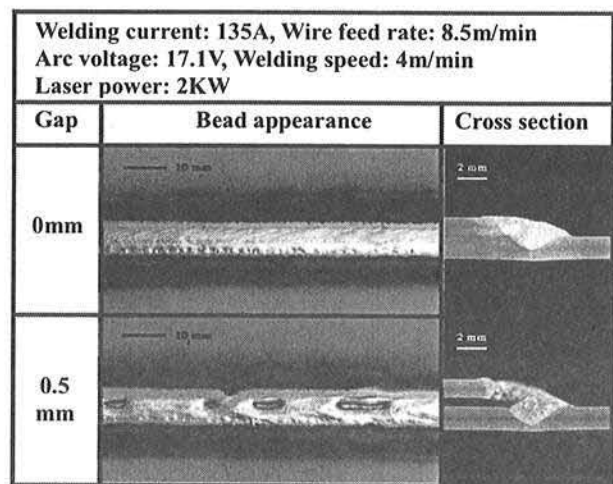


図3 レーザ・DCパルスミグアークハイブリッド溶接による薄板アルミニウム合金の重ね隅肉溶接結果

### 2.3 ACパルスミグアーク溶接

ACパルスミグアーク溶接は、DCパルスミグアーク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ため、薄板溶接の難点となる溶け落ち、変形およ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。

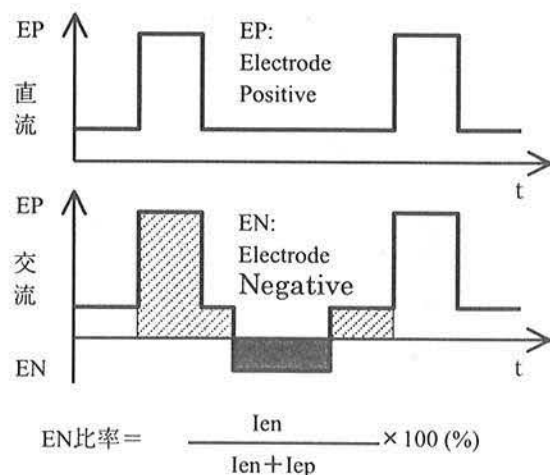


図4 AC・DCパルスの電流波形比較

図4はACパルスミグアーク溶接の電流波形をDCパルスと比較して示したものである。DCパルスミグアーク溶接では、ワイヤプラス極性(EP)が使われる。ACパルスミグアーク溶接では、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<sup>5)</sup>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。

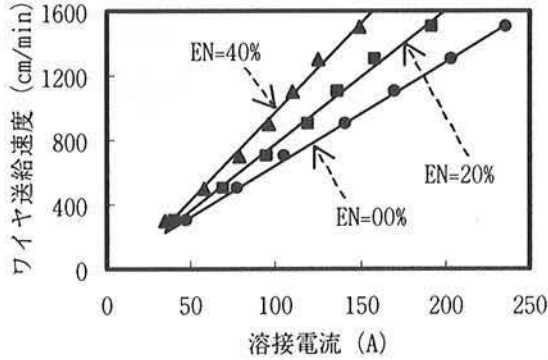


図5 ACパルスミグアーク溶接のワイヤ溶融特性

図5は直径1.2mm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。たとえば、150A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パルスミグアーク溶接では、図6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、溶接電流およ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2m/minを超える溶接条件では、ACパルスミグアーク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。

図7は溶接速度3m/minにて重ね隅肉溶接をACパルスミグアーク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良好な溶着金属の橋絡が得られているものの、下板への溶け込みが不足しておりギャップが1mmの場合には融合不良が生じている。

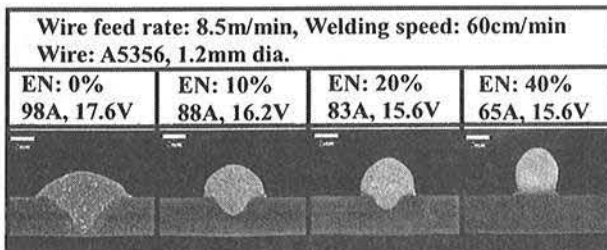


図6 EN比率によるビード断面形状制御

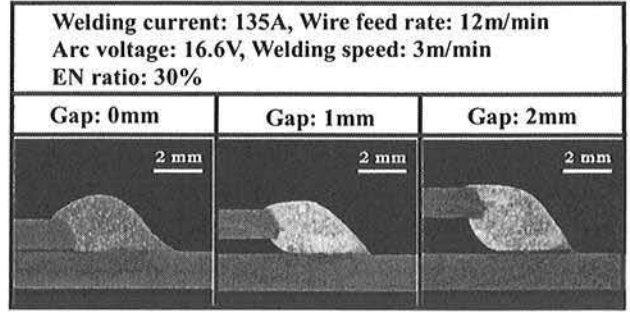


図7 ACパルスミグアーク溶接による薄板アルミニウム合金の重ね隅肉溶接結果

#### 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パルスミグアーク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、穴あきの形成が容易に抑制される。

一方、レーザをACパルスミグアークに加えることで、ACパルスミグアーク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。

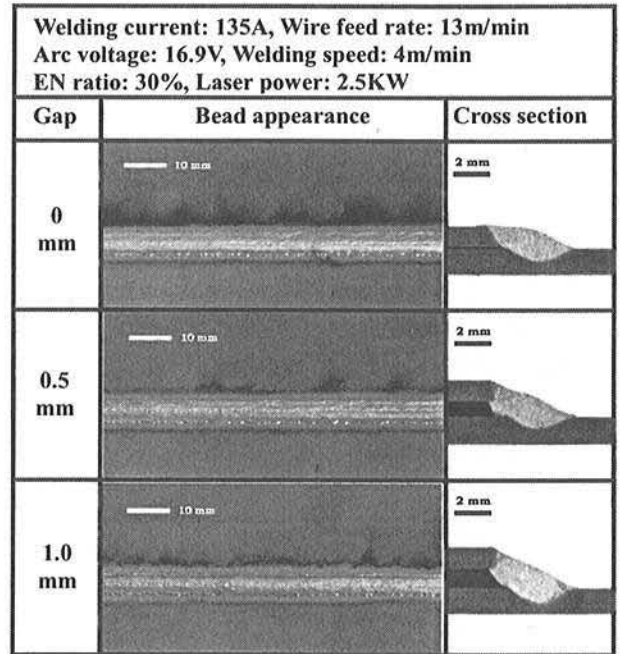


図8 レーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接による薄板アルミニウム合金の重ね隅肉溶接結果

図8はレーザ・ACパルスミグアークハイブリッド溶接法による重ね隅肉溶接を4m/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1mm

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 CO<sub>2</sub> 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<sup>7-9)</sup>では、ビーム径を細く絞ったレーザービーム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、本稿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。

図9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。レーザー溶接にはビームスポット径が焦点位置で1.09mmが得られる2KWのYAGレーザー溶接機を用いた。

ビームスポット径の設定は図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。なお、本実験ではビームスポット径を7mm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ようにレーザー・アーク間距離を3mmに設定した。

3.1 溶け込み形状に及ぼすビームスポット径の影響

図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1.09mmから6.92mmへと変化するに従い、溶け込み深さは減少し、

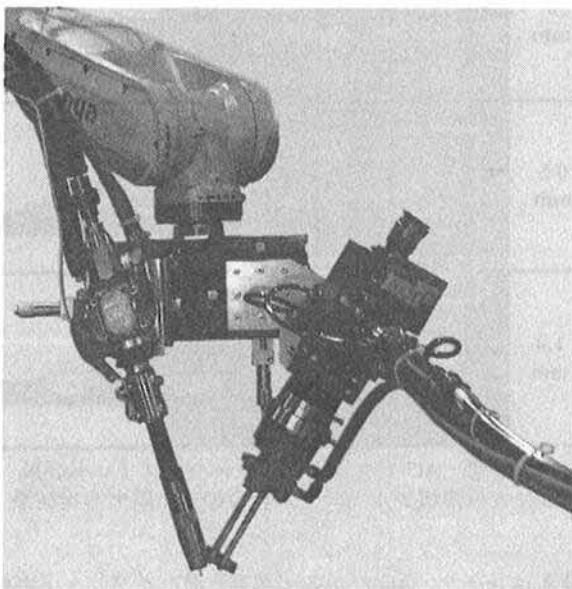


図9 YAGレーザー・ACパルスミグアークハイブリッド溶接実験装置

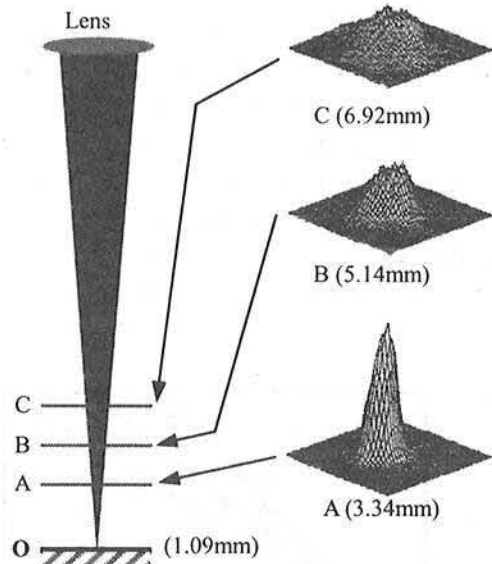


図10 ビームスポット径設定方法

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1.09mmの場合でもキーホールの形成はなかった。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。

なお、本実験ではビームスポット径を変化させても母材への入熱はほとんど変化しないことを確認している。この

Welding current: 135A, Wire feed rate: 13m/min Arc voltage: 16.9V, Welding speed: 4m/min EN ratio: 30%, Laser power: 2KW	
Beam diameter	Cross section
1.09mm	
3.34mm	
5.14mm	
6.92mm	

図11 溶け込み形状に及ぼすレーザービームスポット径の影響

ことから、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照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ビームスポット径の影響

図 12 はレーザ出力が 2KW 時における重ね溶接継手のギャップおよびトーチ狙いずれ裕度に及ぼすレーザ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 1.5mm 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 5.14mm の方が広がっている。

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、ギャップおよびトーチ狙いずれ裕度の改善効果が得られる。したがって、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。

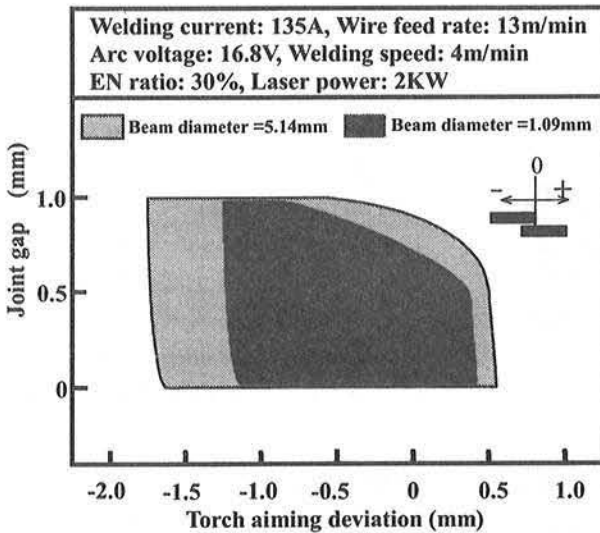


図 12 重ね隅肉溶接継手のギャップ・トーチ狙いずれに及ぼすレーザビームスポット径の影響

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

図 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図 14 に示すように両者の開き角度が 45 度であり、レーザビーム照射時の反射が生じてミグトーチノズルやコンタクトチップおよび溶接ワ

イヤへの干渉が起これないようにした。レーザ・アーク距離は、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の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。

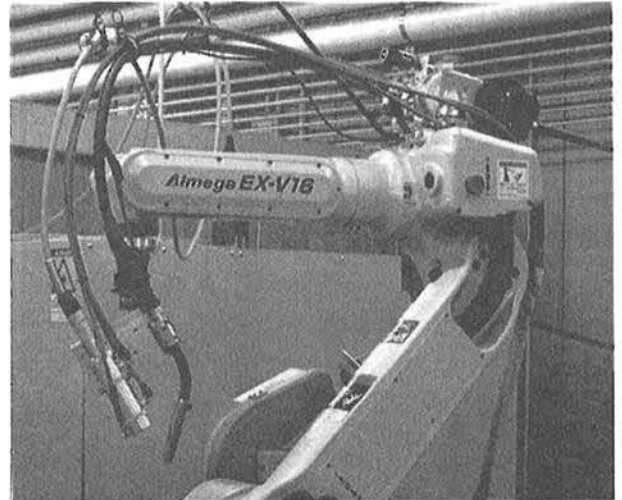


図 13 ダイオードレーザ・AC パルスミグアークハイブリッド溶接ロボットシステム

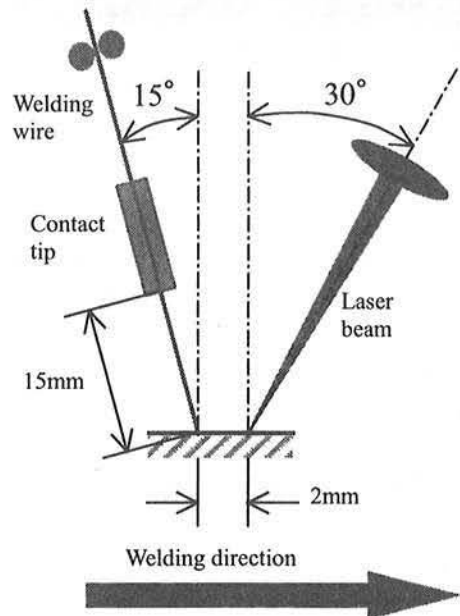


図 14 レーザヘッド・ミグアークトーチの配置

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

アーク溶接電源を用いた。

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。

図 15 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 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ない。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。

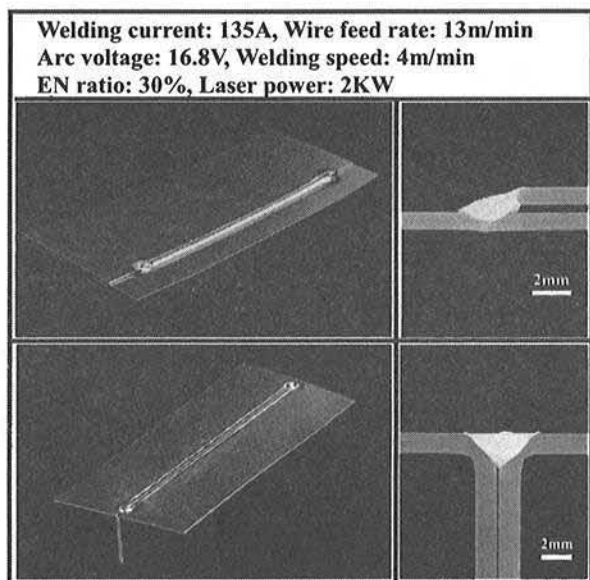


図 15 ダイオードレーザー・ACパルスミグアークハイブリッド溶接ロボットシステムによる溶接例

## 5. 結 言

ACパルスミグアークとレーザー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その特性を紹介した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) DCパルスアーク溶接やレーザー・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け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パルスミグアーク溶接は継手のギャップに対して熔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ー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パルスミグアーク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レーザー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した。

(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ーの適用が可能である。

## 参 考 文 献

- 1) Dietrich Engelhart: The A2—a new Model Series From Audi, ATZ worldwide, (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. Stauffer: 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, 39-8, (2000), 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, 6-4, (2001), 203-208.
- 6) U. Dilthey and Wieschemann: Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565-99, (1999), 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, 70-4, (2001), 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, MIG-YAG 溶接法の開発—, 溶接学会誌, 70-4, (2001), 12-17.
- 9) 牧野, 椎原, 浅井: CO<sub>2</sub> レーザ・アークハイブリッド溶接法, 溶接学会誌, 70-4, (2001), 18-22.

## 著 者 紹 介



上山智之

UEYAMA Tomoyuki

1961年5月生, 1987年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年株式会社ダイヘン入社。現在に至る。

E-mail: ueyama@daihen.co.jp

TEL: (06) 6317-2508 FAX: (06) 6317-2590



全 紅軍

TONG Honjun

1962年9月生, 1995年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年株式会社ダイヘン入社。現在に至る。

E-mail: tong@daihen.co.jp

TEL: (06) 6317-2508 FAX: (06) 6317-2590



矢澤一蔵

YAZAWA Ichizo

1967年1月生, 1992年日本大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年株式会社ダイヘン入社。現在に至る。

TEL: (06) 6317-2508 FAX: (06) 6317-2590

E-mail: yazawa@daihen.co.jp



中田一博  
NAKATA Kazuhiro  
1949年4月生(工博), 1977年大阪大学工学研究科博士課程単位取得退学, 同年大阪大学溶接工学研究所助手, 2002年大阪大学接合科学研究所教授. 現在に至る.

E-mail: nakata@jwri.osaka-u.ac.jp  
TEL: (06) 6879-8656 FAX: (06) 6879-8689



牛尾誠夫  
USHIO Masao  
1942年1月生(工博), 1964年大阪大学工学部電気工学科卒業, 同年三洋電機入社. 1970年大阪大学工学部助手, 1976年大阪大学溶接工学研究所助教授, 1990年同所教授,

2000年大阪大学接合科学研究所所長. 現在に至る.  
E-mail: ushio@jwri.osaka-u.ac.jp  
TEL: (06) 6879-8640 FAX: (06) 6879-8689