レーザー・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*

全 紅軍**, 上山 智之**, 木原 貴行***, 中田 一博****, 牛尾 誠夫****

High Speed Welding of Aluminium Alloy Sheets with Laser/AC Pulsed MIG Hybrid Process*

by TONG Hongiun**, UEYAMA Tomoyuki**, KIHARA Takayuki***, NAKATA Kazuhiro**** and USHIO Masao****

AC pulsed MIG welding is an appropriate process to join aluminium alloy sheets for its great gap tolerance and low heat input to avoid burn through. However, in case of very high speed welding the low heat input is no longer an advantage since lack of penetration becomes a problem. Irradiating laser beam to the vicinity of arc can solve this problem and adjustment of the laser power can control the penetration. As a result, thin aluminium alloy sheets can be jointed at a high speed of 4 m/min with sufficient gap tolerance. Moreover, investigation of the effect of laser beam diameter on the welding result of thin sheets indicates that the defocused laser beam with a diameter of several millimetres can further improve the bridging ability for joint gap and tolerance for torch aiming deviation. Consequently, high power diode laser with relatively thick beam waist is suitable for this application and a diode laser/AC pulsed MIG hybrid welding robot system has been developed.

Key Words: AC pulsed MIG, Laser, Hybrid welding, Thin aluminium alloy, High speed welding

1. 結 言

近年、二酸化炭素の大量排出による地球温暖化問題の対策として、エネルギー消費量の削減が世界的な課題となっている。自動車による二酸化炭素排出量は総排出量の21%程度にも上がるため、燃費改善が強く求められ、新技術の開発と適用が活発に行われており、特に車体の軽量化技術が注目を集めている¹⁾。この中で、アルミニウム合金は重量が軽い割に強度が高く、リサイクル性にも優れているため、アルミニウム合金への材料置換による車体軽量化が本格的に進み、全アルミニウム合金車も市販されている²⁾。

アルミニウム合金車体の普及に向かって、量産化に適したアルミニウム合金の溶接生産技術の確立が重要となっている。現在、アルミニウム合金を適用した自動車溶接構造物には、レーザー溶接やミグアーク溶接が主力であり、これら2つの溶接法を複合化させたレーザー・直流パルスミグハイブリッド溶接法も提案されて一部には溶接工程ラインで適用されている^{3,4)}。最近では、交流パルスミグアーク溶接法⁵⁾も試作生産ラインに導入されている。しかしながら、3 mm以下の薄板アルミニウム合金の使用がますます多くなっているため、高品質と高生産性を両立させた溶接が困難である。薄板アルミニウム合金の溶接における主な問題点としては、溶

接速度限界、ギャップ裕度と溶け落ち等が挙げられる。

直流パルスミグアーク溶接では、薄板アルミニウム合金の重ね隅肉溶接の適用板厚限界は約2 mm程度である⁶⁾。溶接速度が1.5 m/min以上となる場合、ギャップ裕度の確保と溶け落ちの防止の両立が極めて困難となる。ギャップを埋めるために溶着金属量を多くすると溶接電流も大きくなる。結局、強いアーク力と過大な入熱で溶融池が不安定となり、穴明きビードや上板角の焼き切れ或いは下板の溶け落ち問題が発生する。

レーザー溶接では、溶接速度が毎分数メートルと速いが、ギャップを無くすために高価なジグシステムが要求され、適用箇所も限定される。また、6000系合金の溶接では、溶加材の使用が必要となり、安定かつ均一に溶加材を供給して溶融・移行させる課題もある。

レーザー・直流パルスミグハイブリッド溶接法では、溶加材の供給が容易となりレーザー出力で入熱を調整できるので、中厚板の溶接に適切する。しかし、薄板の場合、溶け落ちを防ぐために入熱を抑制する必要がある、ワイヤ送給速度を下げなければならない。そのため、十分な溶着金属量を確保できず、大きなギャップ裕度の改善が期待できない。

交流パルスミグ溶接では、同じワイヤ送給速度において、EN (Electrode Negative) 比率を高めれば溶接電流が下がるので、溶融金属量を減らさずに入熱を抑制でき、溶け落ち防止とギャップ裕度確保を両立させることができる。板厚1 mm、ギャップ1.5 mmの重ね隅肉継手を1 m/minの速度で溶接できる⁵⁾。一方、さらに溶接速度を上げると、入熱不足で溶け込みが浅くなり、強度のある継手が得られ難い。

上述のように、ギャップを有する薄板アルミニウム合金継手の高速溶接において、現行溶接プロセスが満足に対応でき

*原稿受付 平成15年3月28日

**正 員 (株)ダイヘン Member, DAIHEN Corporation

***学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate Student of Osaka University

****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JIWS, Osaka University

ない。そこで、本研究では、レーザー・交流パルスミグハイブリッド溶接法を提案し、入熱量や溶け込み深さの増加に対するハイブリッド効果を調べ、交流パルスミグアーク溶接法の広いギャップ裕度の特徴を生かしながらその入熱不足分をレーザーで補って溶け込み深さの確保を試みた。さらに、ギャップ裕度及びトーチ狙いずれ裕度に及ぼすレーザービーム径の影響を検討した。この結果を踏まえて、ビーム品質で Nd:YAG レーザに劣るダイオードレーザの適用を試み、ダイオードレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接ロボットシステムを開発した。

2. 実験方法及び使用材料

2.1 レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接実験装置

Fig. 1 に本研究に用いた試作ハイブリッド溶接ヘッドの外観を示す。ミグトーチとレーザーヘッドは、二つの小型 XY テーブルを介してロボットの手首に装着されている特殊なブラケットに固定している。XY テーブルはミグトーチとレーザーヘッド間の相対位置を精密に調整できる。レーザー・アーク間距離 D_{LA} 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の中心線までの距離とした。レーザービームとミグトーチノズルの干渉を防ぐために、ミグトーチとレーザーヘッド間の角度を 45° とした。アルミニウム合金の溶接において、ミグアークの安定化と溶接品質の保証のために、ミグトーチが約 15° の前進角を保持する必要がある。その結果、レーザーヘッドが 30° の後退角となり、レーザービームは溶接方向に対して常にアークの前方に照射される。また、このような角度配置では、レーザービームの正反射による光ファイバー等の損傷を防ぎ、反射光とミグトーチ及び溶接ワイヤとの干渉が起こらない。

Fig. 1 Hybrid welding torch composed of Nd:YAG laser head & AC pulsed MIG torch.

シールドガスとしてのアルゴンの供給は、ガス流量 25 ℓ/min にてミグトーチノズルのみから行い、ミグアーク、熔融池及びその近傍の高温域をシールドした。レーザーヘッドの先端部で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、溶接ヒュームやスパッタのレーザーヘッド内への進入を防ぎ、光学系を保護する。また、光学系はレーザーヘッドへ供給されている冷却水で冷却される。

直径 1.0 mm の光ファイバーを用いて最大出力 2 kW のランプ励起 Nd:YAG レーザ発振器の出力ビームをレーザーヘッド部へ転送し、焦点距離 400 mm の集光レンズ 2 枚で形成された焦点距離 200 mm の光学系で溶接部にレーザーを照射する。最大出力におけるビーム転送率は約 87 % である。なお、ダイオードレーザを用いたハイブリッド溶接システムについては 3.4 で述べる。

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交直流パルス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の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。溶接ロボットは可搬重量 16 kg の独立多関節型アーク溶接ロボットを用いた。全システムの動作シーケンスは、ロボットコントローラによって制御される。

2.2 アーク現象の観察方法

交流パルスミグ溶接及びレーザーとのハイブリッド溶接のアーク現象観察には、高速デジタルビデオカメラを用いた。撮影速度は 10000 コマ/秒とした。ワイヤ先端から熔融池表面までの現象を同時に観察するため、熔融池の後右側の斜め上方にカメラを設置した。この場合、ロボットでハイブリッド溶接ヘッドの位置を決め、高速 X テーブルで板厚 3 mm の A5052 アルミニウム合金母材を移動させ、ビードオンプレート溶接を行った。

2.3 母材入熱測定装置

母材への入熱量を調べるために、試作の水カロリーメータを用いて、溶接直後の試験片の保有熱量を測定した。水カロリーメータの構造寸法を Fig. 2 に示す。ポリプロピレン材質の容器の外周を断熱処理し、100 g の純水を入れる。溶接直後の試験片を水中に入れて、その周りに配置した 4 つの K 型熱電対で純水の温度上昇を測定し、ペンレコーダ式の温度記録計で記録した。4 つの熱電対の測定値を平均して、純水の温度上昇とした。また、容器壁の温度上昇も同時に記録していた。さらに、水面から周辺空気への熱損失を計上するため、上記容器を発泡スチロール箱 (L 250×W 190×H 100 mm) 内に置き、測定中に蓋で箱を密封させ、箱内空気の温度上昇も同時に記録していた。測定中、箱を軽く振って純水の温度分布を均一化させた。純水、試験片、容器壁、箱内空気の質量と比熱及び測定した温度上昇量を以って入熱量を計算した。

試験片材料として板厚 4 mm のアルミニウム合金 A5052

Fig. 2 Measurement of heat input with calorimeter.

を使用した。長さ 100 mm、幅 50 mm の試験片三枚を長さ方向で直列し、1 m/min の速度でビードオンプレート溶接を行った。溶接中の試験片からジグへの熱伝導を可能な限り少なくするため、3 つの接触面積の小さい銅クランプで各々の試験片を固定し、それ以外の試験片表面は空気と接触していた。溶接電流は、銅クランプ経由で溶接電源へ戻る。アークスタートとアークエンドの影響を無くすため、溶接直後に試験片の一枚目と三枚目を折り捨て、試験片の全長に渡って安定に入熱できた二枚目の試験片のみを水カロリメータに投入して、入熱を測定した。同一条件での測定を 3 回行い、その平均値を取って結果とした。

2.4 使用材料及び試験片形状

本研究に使用した溶接ワイヤは、直径 1.2 mm のアルミニウム合金 A5356 であった。母材には、アルミニウム合金 A5052 を用いた。

重ね隅肉継手溶接の母材寸法は、長さ 300 mm×幅 100 mm であり、下板の板厚は 1.5 mm とし、上板の板厚は 1.2 mm と 1.5 mm の 2 種類とした。フレア継手溶接では、板厚を 1.5 mm とした。垂直方向に対するハイブリッド溶接ヘッドの狙い角度は、重ね隅肉継手の場合 10° であり、ビードオンプレート溶接及びフレア継手の場合 0° であった。

3. 実験結果及び考察

3.1 レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接のアーク現象

レーザ・ミグアークハイブリッド溶接ではキーホール形成

Fig. 3 Comparison of arc phenomena between AC pulsed MIG welding and Nd:YAG laser/AC pulsed MIG hybrid welding.

及びキーホールによる陰極点の誘導作用が溶け込み深さの増大やアーク安定性の改善に寄与するとされている⁷⁾。一方、薄板アルミニウム合金のレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接においては、設定可能なレーザパワーが比較的に小さく母材表面における反射も大きいため、キーホールが形成し難いと推測される。そこで、高速ビデオ撮影でアーク現象の観察を行い、アーク安定性に対するレーザ照射の影響を調べた。

Fig. 3 に交流パルスミグ溶接及びレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接のアーク現象を比較して示す。交流パルスミグのパラメータは、レーザ照射の有無によらず、平均アーク電流 127 A、平均アーク電圧 16.8 V、EN 比率 30% であった。母材表面におけるレーザビームのパワーは 1750 W であり、レーザビームとミグアーク間の距離は 2 mm であった。

交流パルスミグ溶接では、EP (Electrode Positive) 極性のパルスピーク電流の強い電磁ピンチ力で 1 パルス 1 溶滴移行を確保する。溶滴離脱後、ワイヤ先端の形状が整うまで極性切換えを待たせ(a)、チリの発生を抑制する。そして、EP 極性から EN 極性へ切換えて EN 期間(b)となり、EN 比率設定値が大きいほど、この期間が長い。陰極点が新しい酸化皮膜を求めて溶滴上方の固体ワイヤの表面まで這い上がり、ワイヤ先端部全体がアークルートに包まれて均一に加熱される。アーク熱が有効にワイヤの溶融に使われ、同じワイヤ溶融速度を得るために必要な溶接電流が小さくなるので、母材への入熱も小さくなり、EN 比率の調整で入熱を制御できる。その後、溶接電流極性を EN から EP へ切換え(c)、EP 極性のベース期間(d)でパルス周波数を変調させ、アーク長を一定に維持させる。EN から EP へ切換える瞬間に、陰極点が再び溶融池周辺の氧化物に形成されるが、最初の陰極点の位置がランダムであり、その近傍のアークの明るさも様々であった。

上述の交流パルスミグアークにレーザを照射すると、溶融池前方のレーザ照射位置の近傍に、アークプラズマが若干明

るようになることが認められる。特に、EN から EP へ切替える瞬間に(c), 最初の陰極点がレーザー照射位置に形成されることが極めて多く、その近傍のアークプラズマが一瞬(1 コマ, 約 100 μ s) 非常に明るくなる。しかし、この瞬間以外では、レーザー照射による陰極点の誘導作用は認められない。また、動画では、溶融金属の激しい流動が認められたが、キーホルの存在は観察されなかった。

薄板アルミニウム合金のレーザー・交流パルスミグハイブリッド溶接においては、母材が薄いので大きなレーザーパワーを必要としない。溶融池前方の母材温度は予熱効果により比較的高くなっており、レーザーの吸収に有利とは言え、アルミニウム母材の反射率が依然大きく、1750 W のレーザー照射パワーではキーホールが形成できなかった。ただし、レーザー照射点の母材温度が上がり、金属の蒸発が多くなった結果、その近傍のアークプラズマも若干明るくなったと考えられる。特に、EN から EP へ切替える瞬間に、最初の陰極点が優先的にレーザー照射点に形成されることは、金属蒸気が存在が放電しやすい経路を提供していると示唆している。EN から EP へ切替える瞬間に溶接電源内の再点弧用高電圧コンデンサが放電し、その放電エネルギーとレーザーパワーが併せてアークプラズマが一瞬非常に明るくなったと考えられる。しかし、その後は小さいレーザーパワーのため陰極点をそこに固定できず、陰極点が溶融池周辺の酸化皮膜へ分散し、レーザーの誘導作用も失っていると考えられる。

交流パルスミグ溶接では、EN から EP へ切替える瞬間に、最初の陰極点の形成位置が溶融池より遠いほど、アーク切れが発生しやすい。レーザー照射によって最初の陰極点の形成位置を固定できることは、交流パルスミグアークの安定性に寄与すると考えられる。

3.2 レーザ・交流パルスミグのハイブリッド効果

前述のように、レーザー照射は交流パルスミグアークの再点弧現象に影響する以外にはアーク現象への影響は小さい。また、レーザー照射の有無で交流パルスミグアークの平均溶接電流及び平均アーク電圧はほとんど変わらなかった。したがって、交流パルスミグアークの入熱はレーザー照射に影響され難いと考えられる。一方、溶融池近傍の状態によって、レーザー照射の入熱が影響されると推察される。その影響を調べるために、母材への入熱測定を行った。

3.2.1 レーザパワーの影響

交流パルスミグ溶接単独、レーザー溶接単独、レーザー・交流パルスミグハイブリッド溶接での入熱測定結果を Fig. 4 に示す。試験片表面におけるレーザービームの直径は 5.14 mm になるようにレーザーヘッドと試験片間の距離を調整し、レーザー・アーク間距離 D_{LA} は 3 mm とした。交流パルスミグアークの平均溶接電流が 138 A、平均アーク電圧が 16.8 V、EN 比率が 30% であった。レーザーパワーの変化範囲は、900~1750 W とした。

レーザー溶接単独では、照射パワーの増加にしたがって入熱が増加するが、レーザーの吸収率は約 6~8% に過ぎない。レーザー・交流パルスミグハイブリッド溶接では、レーザーの照射パワーの増加につれて入熱が大きく増加し、全レーザーパワー変化範囲にわたってレーザー溶接単独と交流パルスミグ溶接単独の入熱合計より明らかに大きい。交流パルスミグアークによる入熱量がレーザー照射の影響を受けないとすれば、ハイブリッド溶接の入熱増加はレーザーの吸収率増加によるものと考えられる。この場合、レーザーの吸収率が 27~34% であり、レーザー単独溶接時の吸収率の 4 倍以上となる。ハーゲン・ルーベンスの式⁸⁾によれば、レーザーの吸収率が電気抵抗の平方根に比例する。レーザー照射箇所は溶融池前方に位置するため、その温度は高くなっている。その結果、レーザー照射箇所の電気抵抗が大きくなり、レーザーの吸収率が増加すると考えられる。また、レーザービーム径が 5.14 mm と大きいいため、レーザービームの一部が溶融池表面を照射することとなり、照射部の表面状態も複雑に影響を与えていると推察される。

Fig. 4 の各溶接条件における試験片の断面マクロを調査し、ハイブリッド効果による溶け込み深さの変化結果を Fig. 5 に示す。レーザー溶接単独では、レーザーパワーが小さく、ビーム径が大きく、レーザーの吸収率が低いため、試験片には溶け込みが認められなかった。交流パルスミグ溶接単独では溶け込み深さが約 0.73 mm であるが、溶融池前方にレーザーを照射することによって、溶け込みは 1.8~2.7 倍も深くなる。また、レーザーパワー調整で、容易に溶け込み深さを制御できる。約 900 W の小さいレーザーパワーにおいても、ハイブリッド効果が明らかに存在する。レーザーの出力が小さくなるにつれて設備投資も激減するので、応用上の意味が大きい。

Fig. 4 Comparison of heat inputs among laser welding, AC pulsed MIG welding and Nd : YAG laser/AC pulsed MIG hybrid welding.

Fig. 5 Great hybrid effect of small Nd : YAG laser power on deepening the penetration of AC pulsed MIG welding.

一般的に、ある試験片の溶け込み深さは、入熱量と入熱分布によって決まる。同じ入熱量においても、熱が集中に分布して熱伝導等による分散が少なければ、熱が溶け込み深さの増加に有効に使われる。固体状態のアルミニウムの熱伝導率が約 $230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ であるが、液体状態のアルミニウムの熱伝導率が約 $100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ であり、固体アルミニウムに比べて半以下となる⁹⁾。したがって、レーザ入熱が溶融池に入れば熱伝導による分散が少なく、ハイブリッドによる溶け込み深さ増加効果が大きい。Fig. 4の実験条件では、レーザ・アーク間距離が 3 mm で、レーザビーム径が 5.14 mm であるため、レーザビームの一部が直接に溶融池内へ照射することとなる。レーザビームの残り部分が溶融池前方の固体表面に照射するが、溶融池が移動しているためその入熱を負う固体金属が次第に溶融して溶融池の一部となる。その結果、レーザ入熱の大半は、熱伝導し難い溶融池に入り、母材の溶融に有効に使われ、ハイブリッドの相乗効果が明らかに現れたと考えられる。

3.2.2 レーザビーム径の影響

Fig. 6にレーザビーム径が入熱に与える影響を示す。レーザパワーが 1318 W であり、レーザ・アーク間距離が 3 mm であった。ビーム径が $1.09 \sim 6.92 \text{ mm}$ 大きく変化しても、入熱はほとんど変わらない。これは、レーザと交流パルスミグとのハイブリッド効果が広いビーム径範囲にわたって存在することを示唆している。波長約 $0.8 \mu\text{m}$ のダイオードレーザでは、ビームウエスト（ビームが最もくびれて細くなる部分）が大きいアルミニウム金属表面での吸収率が波長 $1.06 \mu\text{m}$ のNd:YAGレーザより高い¹⁰⁾。ダイオードレーザを適用すればより大きいハイブリッド効果が得られると考えられる。

Fig. 6 Little effect of laser beam diameter on heat input for Nd : YAG laser/AC pulsed MIG hybrid welding.

3.3 レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接のプロセス特徴

3.3.1 レーザパワー調整による溶け込み制御

薄板アルミニウム合金の溶接では、重ね隅肉継手が多用される。その高速溶接において、交流パルスミグ溶接では、ビード止端部の濡れ性が悪いことや下板への溶け込み不足等が問題となる。これらの問題に対して、レーザ照射による改善効果をFig. 7に示す。重ね隅肉継手のギャップが 0.5 mm 、上板は板厚 1.2 mm 、下板は板厚 1.5 mm である。溶接速度は 3 m/min であり、ギャップ充填用溶融金属を確保するためワイヤ送給速度を 12 m/min とした。

レーザパワーが 0 W の場合、交流パルスミグ単独溶接となる。ギャップ裕度を確保するため、EN比率を 30% とした。この場合、平均溶接電流が 127 A 、平均アーク電圧が 16.5 V であるので、入熱が不足となり、下板への溶け込みはほとんど無い。また、ビードの両止端部は揃っておらず、濡れ性も悪い。

わずか 1100 W のレーザを照射すると、交流パルスミグ溶接の広いギャップ裕度の特徴を生かしながら、ビードの両側が均一となり、止端部の濡れ性も良くなった。また、下板への溶け込み深さが板厚の約三分の一となり、継手強度は保証される。さらにレーザパワーを上げていくと、ビード外観や濡れ性が改善されるとともに、下板への溶け込みが次第に深くなり、レーザパワーの調整で溶け込み深さを自由に制御できることが分かる。

下板への溶け込みが深すぎると下板裏面にビード裏波が凸状に現れ、場合によっては美観面での問題となる。一方、下板への溶け込みが浅すぎると継手の強度が弱くなる。板厚の

Welding speed: 3m/min Joint gap: 0.5mm AC MIG: 127A 16.5V EN ratio: 30% Beam diameter: 1.09mm DLA: 2mm		
Laser	Bead appearance	Cross section
0W
1100W
1500W
1750W

Fig. 7 Easy control of penetration depth with adjustment of Nd : YAG laser power.

半分に相当する溶け込み深さが望ましいが、ミグアーク溶接単独では母材が薄いほどその実現が難しくなる。レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接を用いれば、この問題が容易に解決されることが期待できる。

3.3.2 レーザビーム径変化によるビード断面形状制御

レーザビーム径は熱加工の特性を決定する上で重要な因子であり、Nd:YAG レーザや CO₂ レーザでは小さなビームウェスト径（ビームが最もくびれて細くなる部分の断面直径）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¹¹⁻¹³⁾では、細く絞ったレーザ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、レーザビーム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、レーザビーム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。

レーザビーム径が変わっても、ハイブリッド溶接の入熱量には明らかな変化がないが、入熱の分布状態の差異によってビード断面形状が影響されると推測される。Fig. 8 はレーザビーム径がハイブリッド溶接のビード断面形状に及ぼす影響を調べたものである。板厚 1.5 mm、ギャップ無しの重ね隅肉継手が用いられ、溶接速度は 4 m/min とした。交流パルスミグアークの条件として、平均溶接電流 135 A、平均アーク電圧 16.8 V、EN 極性比率 30 % を採用した。母材に照射するレーザパワーを 1743 W に固定し、レーザビーム径の設

Welding speed: 4m/min Plate thickness: 1.5mm AC MIG: 135A 16.8V EN ratio: 30% Laser power: 1743 W DLA: 3mm	
Beam diameter	Cross section
1.09mm
3.34mm
5.14mm
6.92mm

Fig. 8 Effect of Nd : YAG laser beam diameter on bead cross section of lap joint.

定はレーザヘッドと被溶接物間距離を変化させることで行った。レーザビーム径を 7 mm まで変化させてもレーザ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・アーク間距離を 3 mm に設定した。レーザビーム径が 1.09 mm から 6.92 mm へと変化するに従い、溶け込み深さが次第に減少し、ビード幅は増加している。

本実験では高速ビデオ撮影によって熔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。ビード断面においても、キーホールによる溶け込み形状の特徴を呈していない。レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接における母材の熔融はレーザ溶接のキーホール機構と異なり、薄板アルミニウム合金ではキーホールの形成が無くても合理的な溶け込み形状が得られることがわかる。

さらに、母材への入熱に対するレーザビーム径変化の影響はほとんど無いことから、レーザビーム径変化による溶け込み形状の変化は、レーザエネルギー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の中心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濡れ性が改善される。

3.3.3 レーザパワー及びビーム径の増大による狙いずれ裕度の改善

アルミニウム薄板が変形しやすいため、ワーク精度の保証は難しい。また、高速溶接では、溶接線のリアルタイム倣いも困難である。実用上、板厚に近いトーチ狙いずれ裕度が望ましい。Fig. 9 は、各レーザ出力においてトーチの狙いずれ裕度に及ぼすレーザビーム径の影響を示したものである。板厚 1.5 mm、ギャップ 0.5 mm の重ね隅肉継手が用いられ、溶接速度は 4 m/min とした。交流パルスミグアークの条件として、平均溶接電流 135 A、平均アーク電圧 16.8 V、EN 極性比率 30%を採用した。レーザビーム径は 1.09 mm と 5.14 mm の 2 種類とし、レーザ・アーク間距離を 3 mm に設定した。また、同図の裕度範囲は溶接後のビード外観から判定した。

Fig. 9 に示すように、トーチの狙いずれ裕度は、レーザビーム径が 5.14 mm の方が 1.09 mm よりも広く、レーザ出力の増加も裕度範囲を広くしている。トーチの狙い位置が重ね継手の中心より上板側に大きくずれた時には、下板への溶け込みが浅くなり、溶け込み不足でビードが剥離する。反対に、トーチの狙い位置が重ね継手の中心より下板側に大きくずれた時には、下板への溶け込みは深くなるが、上板角の溶融量が少なく、しかも溶着金属が下板側に集中するためギャップの橋絡ができなくなり、穴あき現象が生じ易くなる。

3.3.4 レーザビーム径増大によるギャップ裕度と狙いずれ裕度の改善

ギャップ裕度は、薄板アルミニウム合金の溶接においてトーチ狙いずれ裕度と同じく重要であり、両者からなる領域が

Fig. 9 Effect of Nd : YAG laser power and beam diameter on tolerance for torch aiming deviation.

広いほど実用性が高い。Fig. 10 は、重ね隅肉継手のギャップ裕度とトーチ狙いずれ裕度に及ぼすレーザビーム径の影響を調べたものである。同図の溶接条件は、レーザパワーが 1743 W に固定された以外に、Fig. 9 と同じであった。また、同図の裕度範囲は溶接後のビード外観から判定した。ギャップ裕度およびトーチ狙いずれ裕度ともにレーザビーム径が 5.14 mm の方が広がっている。これは、レーザビーム径が大きいほど、継手の両側への入熱量の差が少なくなることによるものと考えられる。

Fig. 11 は、フレア継手の場合のギャップ及びトーチ狙いずれ裕度を調べたものである。板厚 1.5 mm で、溶接速度は 4 m/min の高速とした。交流パルスミグアークの条件として、平均溶接電流 150 A、平均アーク電圧 16.8 V、EN 極性比率

Fig. 10 Effect of Nd : YAG laser beam diameter on tolerance for joint gap related to torch aiming deviation.

Fig. 11 Improvement of tolerances for torch aiming deviation and gap of flare joint with thicker Nd : YAG laser beam.

30 % を採用した。レーザビーム径を 1.09 mm と 5.14 mm の 2 種類とし、レーザ・アーク間距離を 3 mm に設定した。同図の裕度範囲も溶接後のビード外観から判定した。レーザビーム径が 1.09 mm の場合に比べて、5.14 mm のほうがギャップ裕度及びトーチ狙いずれ裕度拡大の効果があることがわかった。いずれのレーザビーム径においても、トーチの狙い位置が溶接線より片方へ大きくずれた場合、反対側母材の溶け込みが不足となり、溶接が失敗する。ギャップが広いほど反対側母材が狙い位置より遠ざかり、溶け込み不足となりやすいため、トーチ狙いずれ裕度が小さくなる。ギャップ裕度は、トーチ狙いずれ無しの時最大になるが、その最大値が約溶滴の直径に相当する。ギャップがさらに大きくなると、溶滴がギャップ内の深い所へ落下し、熔融金属不足でギャップの橋絡ができなくなる。

レーザビーム径が大きい場合、レーザビームの一部は狙いずれの反対側母材へ照射でき、反対側母材の溶け込み不足が起こりにくくなるため、トーチの狙いずれ裕度とギャップ裕度が共に改善できたと考えられる。

3.4 ダイオードレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接ロボットシステムの開発

Nd:YAG レーザのビーム径を大きくすることによって溶着金属の濡れ性を改善でき、ギャップ裕度及びトーチ狙いずれ裕度の拡大効果が得られる。したがって、薄板アルミニウム合金のレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接には、ビームウエスト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。アルミニウム金属表面におけるレーザビームの吸収率は波長約 0.84 μm の近傍でピーク値の 13.8 % になる¹⁰⁾。また、波長 1.06 μm の Nd:YAG レーザの吸収率は約 5.8 % である。本研究に用いたダイオードレーザビームは、波長 0.81 μm と 0.94 μm の複合光であるため平均波長が 0.875 μm となり、レーザの吸収率は約 12.9 % となる。このダイオードレーザのアルミニウム金属表面での吸収率は、Nd:YAG レーザの約 2 倍であり、アルミニウム合金の溶接における入熱効率の向上に対して有利と考えられる。

3.4.1 ダイオードレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接ロボットシステムの構成

Fig. 12 に新開発のダイオードレーザ・交流パルスミグ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ロボットの手首に装着されている。レーザヘッドとミグ溶接トーチ間の開き角度が 45 度であり、レーザ・アーク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ビームウエストの中心までの距離が 2 mm となるように設定した。

ミグ溶接トーチのノズルからアルゴンガスを供給し、ミグアーク、熔融池及びその近傍の高温域をシールドする。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

Fig. 12 Diode laser/AC pulsed MIG hybrid welding robot system.

トと呼ばれる圧縮エアーを吹きつけることで、レーザ光学系レンズと保護ガラスをミグアークより発生する溶接ヒューム及びスパッタの付着から保護している。

最大出力 2500 W のダイオードレーザ装置を用い、直径 1.0 mm の光ファイバーにてレーザビームをレーザヘッドへ伝送する。ファイバー及び光学系を通ったレーザビームの転送率は約 77 % であり、ビームウエスト径は約 5 mm である。

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交直流パルスミグアーク溶接電源を用いた。デジタル型のインターフェースを内蔵しており、光ファイバーを介してロボット側と通信する。ロボットの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。標準電流波形パラメータのデフォルト値も同時に教示ペンダントに表示され、パラメータ設定時の参考となる。溶接ロボットは可搬重量 16 kg の独立多関節型アーク溶接ロボットを用いた。ワイヤ送給の安定性と応答性を向上させるため、交流サーボモーター駆動の送給装置を採用した。全システムの動作シーケンスは、ロボットコントローラによって統一に制御される。

3.4.2 ダイオードレーザ・直流パルスミグハイブリッド溶接の限界性

レーザビームと直流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て様々な溶接上の課題を克服できる⁷⁾。すなわち、直流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、レーザビーム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、直流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 3 mm 以上の中厚板に適用されてきた。しかし、薄板の場合、溶け落ちを防ぐために入熱を抑制する必要があり、ワイヤの送給速度を下げなければならない。

そのため、十分な溶着金属量を確保できず、ギャップ裕度の拡大が期待できない。

Fig. 13 は、上板 1.2 mm 及び下板 1.5 mm の重ね隅肉継手を 4 m/min の速度で溶接した場合のビード外観、マクロ断面を示したものである。直流パルスミグ単独溶接では、ギャップ無しの時平均溶接電流 215 A (ワイヤ送給速度 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穴あきが数箇所認められる。また、ギャップが 0.5 mm の時、継手の熱分布条件が変わり上板への過大な入熱によってその端部が連続して溶け落ち、溶融池の表面張力差によって溶融金属が下板側へ偏って凝固するため、溶接ビードは上板端から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、溶接電流設定値とワイヤ送給速度との間に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になる。結局、薄板アルミニウム合金の高速溶接には直流パルスミグ溶接プロセスが期待できない。

レーザ・直流パルスミグハイブリッド溶接では、ギャップ無しの場合には、ビード表面に穴あきが生じない程度に溶接電流を 135 A (ワイヤ送給速度 8.5 m/min) まで下げて、レーザ照射パワーを 1540 W に設定することによって適正な下板

への溶け込みが得られ、ビード外観も良好になったことがわかる。しかし、ギャップ 0.5 mm の場合には溶着金属量が不足しているため上板側での穴あきが断続的に発生している。

以上の結果から、レーザビームパワーは直流パルスミグアークパワーの一部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。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、溶融金属の流動の安定性を改善でき、ギャップ無しの場合においてビード表面の穴あきを防止でき、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に伴って溶着金属量が減少し、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。薄板アルミニウム合金の高速溶接では、レーザ・直流パルスミグ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。

3.4.3 ダイオードレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接の優位性

レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接では、十分な溶着金属量を供給するワイヤ送給速度において EN 比率を上げることによって平均溶接電流が下がりミグアークの入熱が減少するが、レーザ照射の入熱によってミグアークの入熱減少が補われる。したがって、ギャップ裕度と溶け込み深さの確保を同時に実現できる。また、平均溶接電流が小さく、毎周期極性が交番することによってアークプラズマ気流が弱くなるため、アーク力が抑えられ、溶融金属の流動の安定性を改善でき、ビード表面の穴あき形成の防止に寄与できると考えられる。

Fig. 14 は、上板 1.2 mm と下板 1.5 mm の重ね隅肉継手を 4 m/min の速度で溶接した場合のビード外観、マクロ断面を示したものである。平均溶接電流は 135 A であり、Fig. 13 のレーザ・直流パルスミグハイブリッド溶接の場合の溶接電流と等しい。EN 比率を 30 % に設定した結果、ワイヤ送給速度は 13 m/min であり、Fig. 13 の直流パルスミグ単独溶接の場合における平均溶接電流 215 A の時の送給速度と同じである。同じワイヤ送給速度において溶接電流が 37 % も下がるため、溶け落ちが発生しない範囲でレーザビーム照射による入熱を増加させることができる。1925 W のダイオードレーザビームを照射することによって、適切な溶け込み深さと優れたビード止端部濡れ性が得られている。十分な溶着金属量、弱いアーク力及び太めのレーザビーム径などはギャップ裕度の拡大に寄与し、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。したがって、薄板アルミニウム合金の高速溶接において、ダイオードレーザビームと交流パルスミグアーク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。

4. 結 論

交流パルスミグアークとレーザビームを複合したハイブ

Welding speed: 4m/min Diode laser power at workpiece: 1540W		
Gap	Bead appearance	Cross section
0.0mm	DC MIG alone 215A19.8V	Vf=13mm/min
0.5mm	DC MIG alone 215A19.8V	Vf=13mm/min
0.0mm	DC MIG+laser 135A17.1V	Vf=8.5mm/min
0.5mm	DC MIG+laser 135A17.1V	Vf=8.5mm/min

Fig. 13 Inability of DC pulsed MIG welding process to join thin sheets at high speed even with the aid of diode laser beam.

Welding speed: 4m/min Wire feeding: 13m/min AC MIG: 135A 16.9V EN ratio: 30% Diode laser power at workpiece: 1925W		
Gap	Bead appearance	Cross section
0.0mm
0.5mm
1.0mm

Fig. 14 Applicability of diode laser/AC pulsed MIG hybrid process to high speed welding of thin sheets with great tolerance for joint gap.

リッド溶接を提案し、薄板アルミニウム合金の高速溶接についてその特性を検討した。本研究の実験条件で得られた結果を以下の通り要約する。

- 1) 交流パルスミグアークの極性が EN から EP へ切り替わる瞬間にのみ、レーザビームによる陰極点誘導作用が確認された。
- 2) レーザビーム径 5.14 mm において、レーザ単独溶接では、レーザの吸収率は約 6~8% に過ぎない。レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接では、レーザの吸収率は 27~34% であり、ハイブリッド効果によって大きく改善できる。
- 3) レーザ・直流パルスミグハイブリッド溶接では、レーザビームの照射により総入熱が過大になることを避けるために、平均溶接電流を下げてミグアークによる入熱を低減する必要がある。しかし、ギャップが存在する継手では溶着金属量が不足となり、穴あき等の溶接欠陥が生じる。
- 4) レーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接では、送給速度を下げずに EN 比率を上げることによって平均溶接電流が下がりミグアークの入熱が減少するため、溶け落ちが発生しない範囲でレーザビーム照射による入熱を増加させることができる。その結果、ギャップ裕度が広く、レーザパワーの調整で容易に溶け込み深さを制御できる。さらに、レーザ照射によってビード止端部の濡れ性も良好になる。
- 5) レーザビーム径が細くてもキーホール形成が観察さ

れなかった。ビード断面マクロ形状もキーホールの存在特徴を示さなかった。これは、薄板アルミニウム合金の高速溶接ではキーホールが不必要であることを示唆している。

- 6) レーザビーム径はハイブリッド溶接の入熱に対する影響が少ないが、ビーム径 1.09 mm から 6.92 mm へと変化するようにしたがって、溶け込み深さが次第に減少し、ビード幅は増加する。ビーム径を大きくすることで溶着金属の濡れ性を改善し、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できる。
- 7) 上記の結果を踏まえて、ダイオードレーザ・交流パルスミグハイブリッド溶接ロボットシステムを開発し、1 mm ギャップを有する板厚 1.2 mm と 1.5 mm の重ね隅肉継手を 4 m/min の高速で溶接できることを示した。ビード外観やマクロ断面形状が良好で、ダイオードレーザの適用性を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Kunio Hasegawa : Present Situations and Future Prospects of Small Gasoline Engines, Vol. 57, No.1, 2003, P 36-40.
- 2) Dietrich Engelhart: The A2 - a new Model Series From Audi, ATZ worldwide, Mar. 2000, P 4-11.
- 3) U. Dilthey and A. Brandenburg : Laser-Arc Hybrid Welding, IIW Doc. XII-1710-02 (2002).
- 4) T. Graf and H. Stauffer : Laser Hybrid Process at Volkswagen, IIW Doc. XII-1730-02 (2002).
- 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, P 203-208.
- 6) T. Ueyama, S. Harada, T. Mita, T. In-nami, M. Ushio : The State-of-the Art of AC GMAW process in Japan, Journal of Light Metal Welding & Construction, Vol. 39 (2000) No. 8, P. 1-6.
- 7) U. Dilthey and Wieschemann : Prospects by Combining and Coupling Laser Beam and Arc Welding Processes, IIW Doc. XII-1565-99, P 29-44.
- 8) 新井, 宮本: レーザ加工の基礎 (下巻), マニシスト出版, 1993, P 32.
- 9) THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER, The TPRC Data Series, Volume 1, THERMAL CONDUCTIVITY, Metallic Elements and Alloys, P 19.
- 10) 辻 : 高出力半導体レーザ (HDDL) とその加工例, レーザ協会誌, Vol. 26 (2001) No. 1, P 48-53.
- 11) ABE Nobuyuki and HAYASHI Masakazu : Trend of Laser Arc Combination Welding Method, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 70 (2001) No. 4, P 7-11.
- 12) ISHIDE Takashi, NAYAMA Michisuke, WATANABE Masao, NAGASHIMA Tadashi : Coaxial TIG-YAG & MIG-YAG Welding Methods, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 70 (2001) No. 4, P 12-17.
- 13) MAKINO Yoshinobu, SHIHARA Katsunori and ASAI Satoru : Combination Welding between CO₂ Laser Beam and MIG Arc, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 70 (2001) No. 4, P 18-22.