

(技術資料)

レーザー・アークハイブリッド溶接のアルミニウム合金への適用

Characteristics of YAG Laser-MIG Hybrid Welds for Aluminum Alloys



江口法孝*
Noritaka Eguchi



笹部誠二*
Seiji Sasabe

YAG laser welding has been widely applied with aluminum alloys that are specially designed today's automobiles. YAG laser welding with aluminum alloys faces a number of problems. These problems include irregular weld bead, a low gap tolerance and laser photon loss. YAG laser-MIG hybrid welding solves all these problems. Gap tolerance was improved by increasing the melting width and volume, which has resulted in a much more stable YAG laser process.

まえがき = レーザ・アークハイブリッド溶接技術は、1980年代にレーザー出力の補強技術として研究が開始された。最近では、溶接条件の最適化でレーザー・アークハイブリッド溶接技術そのものの複合化メリットによる適用が図られてきている¹⁾。開発当初、熱加工用レーザーの出力不足で適用に制限があったが、レーザー性能が大幅に改善され、アルミニウム合金の薄板(～5mm¹⁾)溶接施工が可能になり、適用範囲が拡大したためである²⁾。なお、YAGレーザーの発振形態も進化を続け、ランプ励起方式からLD励起方式、そして波長は異なるがダイレクトLDへと変遷し高出力化も進んでいる³⁾。

一方、アルミニウム合金は自動車構造材料への適用など地球環境問題(CO₂ガス削減)の解決手段として、軽量化効果、リサイクル性などの点で環境負荷の小さい材料として着実に拡大していくと期待されている。アルミニウム合金を大きく採用したアウディ社の“A2”は、YAGレーザー溶接(3.0kW)による溶接物の高剛性化や片面施工による構造設計の自由度向上など、スポット溶接代替技術として本格的に車体組立に導入した例として記憶に新しい⁴⁾。最近では、アウディ社“ニューA8”⁵⁾やフォルクスワーゲン社“フェートン”⁶⁾で、レーザー溶接部位の溶接部強度・剛性の向上を目的に、YAGレーザー・ミグ溶接のハイブリッド溶接が適用され始めている。

このようにアルミニウム合金の自動車材適用が進展するとともに、レーザー装置の高性能化により、アルミニウム合金の接合方法のひとつとして位置づけられるようになったレーザー・アークハイブリッド溶接の現状と課題を認識することは有意義である。ここでは、アルミニウム合金の薄板分野におけるYAGレーザー溶接、ミグ溶接、そしてそれらを組合わせたYAG・ミグハイブリッド溶接の基本的溶融特性と、基本的な継手形態である突合せ継手・重ねすみ肉継手におけるハイブリッド化によるレーザー溶

接の補完効果とを報告する。

1. アルミニウム合金におけるYAG-ミグハイブリッド溶接の基本溶融特性

レーザー・アークハイブリッド溶接の構成要素のうち、レーザー溶接は、高エネルギー密度の低入熱溶接方法であり、深溶込み・高速溶接が特長である。一方で、高コスト、溶接ビードの乱れや施工誤差裕度に対する厳しい制約がある。また、アーク(ミグ)溶接は同じく溶融溶接法であり、溶接速度・溶込みなどの点でレーザー溶接には劣るが、溶着量・施工誤差裕度など施工性には優れている。レーザー溶接とアーク(ミグ)溶接をハイブリッド化することによる特長を表1に示す。ハイブリッド化によって、アルミニウム合金レーザー溶接の場合の、溶接ビードの乱れや溶接欠陥、それを安定化させるためのレーザービームの焦点外し、ツインスポット溶接法などのエネルギー密度損失の改善、継手性能の確保や耐ギャップ性などの補完効果が期待できる。

図1に基本溶融特性調査を行った際の溶接条件を示す。レーザー溶接は、YAGレーザー溶接を用い、レーザー出力4.0kW(加工点)、集光ビーム径0.45mmである。また、ミグ溶接は、直流パルスミグ溶接を用い、電流設定値は150Aである。そして、YAG・ミグハイブリッド溶接条件はこれらを組合わせたものである。レーザービームとアーク(ワイヤ狙い位置)の最適間隔は、レーザー出力、アー

表1 ハイブリッド化によるレーザー溶接の補完効果
Table 1 Advantage of hybrid welding

- Welding stability, reduced welding defects
- Improved welds mechanical properties
- Higher bridging ability, greater workpiece tolerance
- Increased welding speed, deeper penetration

*アルミ・銅カンパニー 技術部

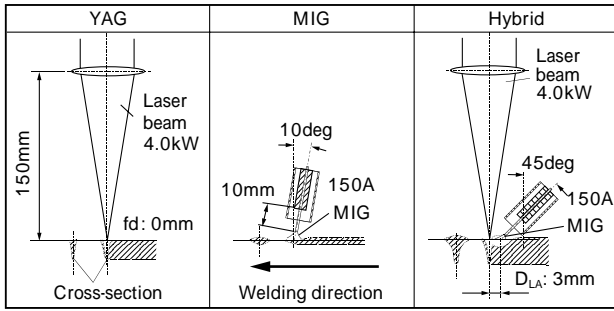


図1 基本溶融特性調査の各溶接条件
Fig. 1 Welding condition on various weldings

ク電流，溶接速度，溶接方向などの条件因子に左右される。この間隔を変化させて溶込みを調査した結果，図2に示すように，9.0mm程度では熱の相乗効果は得られず，ある程度間隔は狭い方が望ましいことがわかる。そこで，今回のYAG-ミグハイブリッド溶接条件においては，間隔を D_{LA} ：3.0mmに設定した。なお，溶融特性試験に用いた供試材は，A5182P-O（板厚3.2mm）で，溶接性および成形性に優れている。

図3にYAGレーザー溶接，ミグ溶接ならびにYAG-ミグハイブリッド溶接の溶融特性を比較して示す。YAGレーザー溶接では，高速溶接が可能で深溶込みが得られる。また，ミグ溶接では若干の溶接速度上昇においても溶込みが減少し，さらなる高速溶接時には連続的な溶着が困難となるハンピングビード状態となるが，それでも5.0m/min程度までは連続的な溶着は可能であった。図3(c)にハイブリッド化したときの溶融特性を示す。溶込みは，YAGレーザー溶接（図3(a)）のシングルスポットの焦点位

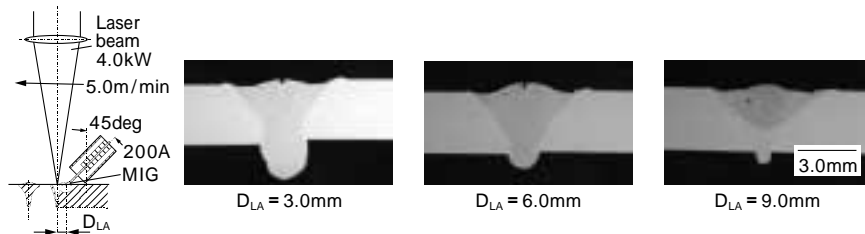


図2 レーザ・アーク間距離 (D_{LA}) の溶込みへの影響
Fig. 2 Penetration depth relation of distance from laser spot to arc column

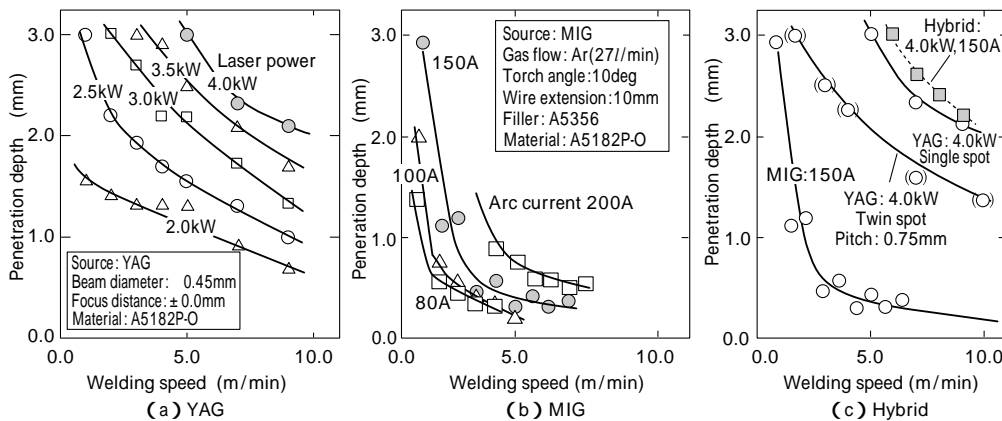


図3 各溶接法における溶込み深さと溶接速度の関係（A5182P-O，板厚3.2mm）
Fig. 3 Relationship between penetration depth and welding speed on various weldings
(Material ; A5182P-O, Thickness ; 3.2mm)

置条件に比べると大きくは増加しないが，ミグ溶接条件に比べるとその増加は大きい。この溶込み深さの増加は，レーザのエネルギー密度に起因するところが大きいことがわかる。

図4にはYAG-ミグハイブリッド溶接の溶融幅を示す。YAG-ミグハイブリッド溶接の溶融幅は，YAGレーザー溶接，ミグ溶接のおおのこの溶融幅を足し合わせた以上となる。また，溶込みの断面観察から，溶融体積が大幅に増加していることもわかり，これらのことが耐ギャップ性などを大きくできる要因となっていると類推できる。

2. 溶接ビードの安定形成と溶接条件

アルミニウム合金をYAGレーザー溶接すると溶接部表面が大きく乱れ，ときには開口した大きな穴あき欠陥が

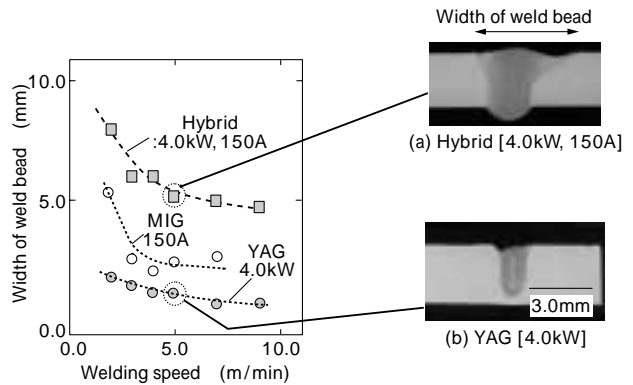


図4 各溶接法における溶融幅と溶接速度の関係（A5182P-O，板厚3.2mm）
Fig. 4 Relationship between weld seam width and welding speed
(Material ; A5182P-O, Thickness ; 3.2mm)

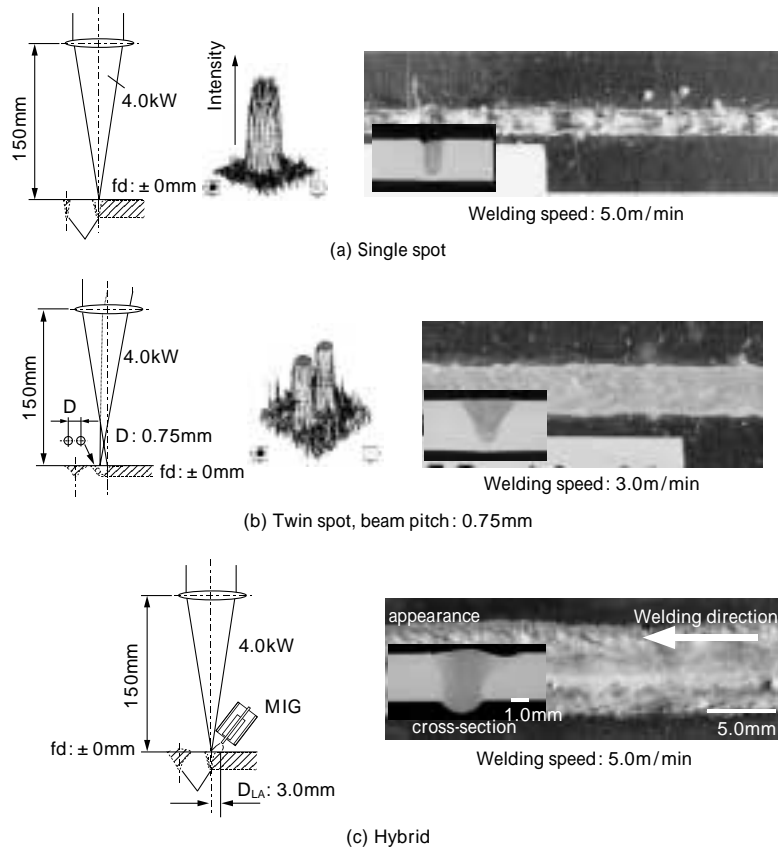


図5 YAGレーザー溶接，YAGレーザーツインスポット溶接，YAG-ミグハイブリッド溶接の溶接ビード外観と溶接条件比較
Fig. 5 Welds appearance on various laser welding

生じ、継手の機械的性質が大幅に劣化する場合がある。これら表面の乱れを改善するには、通常はレーザービームのエネルギー密度を落とす焦点外しや、集光点を複数配置するツインスポットなどの手段が用いられ、溶接速度や溶込み深さを犠牲にする場合が多い。前述の図3(c)に示したように、YAGレーザー溶接に比しYAG-ミグハイブリッド溶接の、溶込み深さ増加はあまり大きくないが、実際の突合せ継手などの実用段階での比較となると、YAGレーザーツインスポット溶接との比較となるので、YAG-ミグハイブリッド溶接の溶込み深さの増大効果は大きなものとなると期待される。図5にYAGレーザー溶接，YAGレーザーツインスポット溶接，YAG-ミグハイブリッド溶接の代表的な溶接ビード外観を示す。

図5(a)に示すYAGレーザー溶接のシングルスポットは焦点位置での施工で、焦点外しなどの方策はとっていない。また焦点位置でのレーザー強度分布は、SI (Step Index) 型ファイバ伝送での一般的な矩形形状である。溶込みは、5.0m/minの溶接条件で3.0mm程度得られるが、溶接ビード表面は大きく乱れ、溶接断面形状もアンダフィル・アンダカットが生じており、溶接継手としては不十分である。そこで、溶接ビード表面を滑らかにする目的で、図5(b)にYAGレーザーツインスポット溶接の施工を示すが、光学的に分光されたレーザー光は焦点位置でビーム間隔が0.75mmとなり、強度分布も2つのピークとなる。これらを溶接方向の前後に配置した形で溶接すると、溶接ビード外観は大幅に改善され、溶接断面形状も比較的良好である。しかし、YAGレーザー溶接シングルスポットと同等の溶込みを得るためには、溶接速度を

5.0m/min から3.0m/minに減少させる必要がある。図5(c)のYAG-ミグハイブリッド溶接では、溶接ビードが乱れていたYAGレーザー溶接条件にミグ溶接を付加することで、外観および溶接断面形状を大きく改善でき、それに伴う溶接速度、溶込みの減少はない。このように、ハイブリッド化により溶接ビード表面の乱れを抑制し、これらの改善に伴うレーザーの出力損失も低減できる。

3. 基本継手特性 (突合せ・重ねすみ肉継手)

アルミニウム合金の薄板におけるハイブリッド溶接施工の有意点を検討するために、突合せならびに重ねすみ肉継手への適用トライを以下に示す。

突合せ継手の供試材は、溶接熱影響の差異を確認するために代表的な熱処理型合金のA6063S-T5 (肉厚2.0mm) を用い、レーザー出力、溶接速度などの溶接条件の比較を行った。図6に(a)ミグ (b)YAG (c)YAG-ミグハイブリッドの断面形状および引張試験結果(JIS 5号試験片)と、溶接部横断方向(片側)の硬さ分布を示す。3つの溶接方法とも溶接部断面形状にはアンダカットなどの欠陥はなく、引張試験時の破断部はいずれも溶接熱影響部である。引張強さ、耐力、伸びの差異の傾向は、溶接熱影響部の軟化部の最低硬さと軟化部の幅から類推できる。おおむね、YAG-ミグハイブリッド溶接の熱影響は、YAGレーザー溶接によるものと同程度に抑えることができる。また本継手作製でのYAG-ミグハイブリッド溶接条件は、表2のようにYAGレーザー溶接に比べ溶接速度を1.67倍、レーザー出力も0.5倍(2.0kW)に抑えることが可能である。したがって、コストの高いレーザー熱源の有効

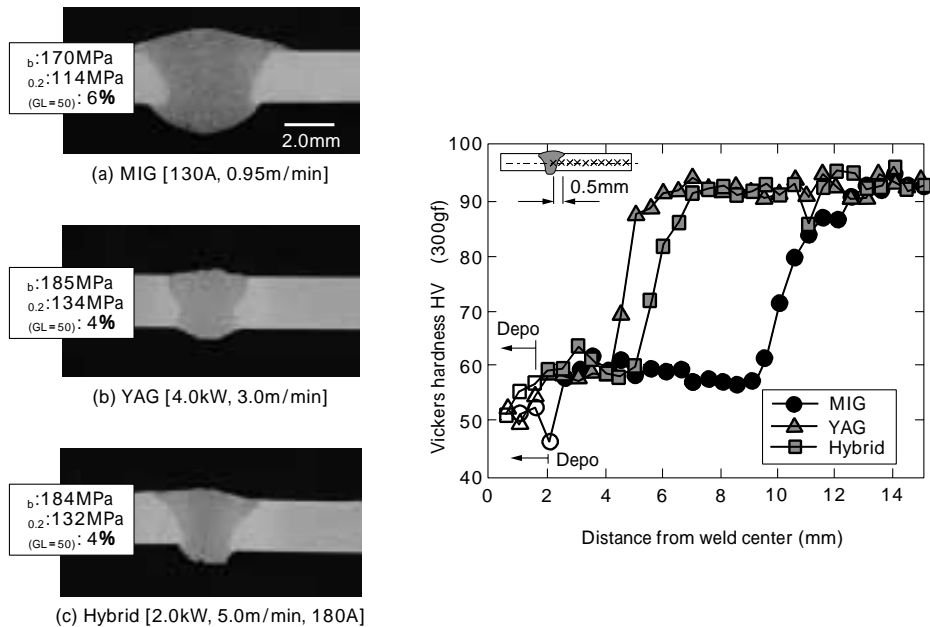


図6 突合せ継手性能と溶接部横断方向の硬さ分布 (A6063S-T5, 肉厚 2.0mm)
 Fig. 6 Mechanical properties and hardness distribution of butt welds on various weldings
 (Material ; A6063S-T5, Thickness ; 2.0mm)

利用もしくは低減効果を期待することができるほか、今まで適用が難しいとされていた領域での低出力のレーザー装置の適用を拓げる可能性もある。

次に重ねすみ肉継手においては、板間にギャップを設けたときの接合可能な限界ギャップ比較と継手の引張せん断破断荷重結果を図7に示す。用いた供試材は突合せ継手と同一のA6063S-T5(肉厚2.0mm)であり、引張せん断試験片の幅は25mmとした。YAGレーザー溶接は溶湯量が少ないため、板間ギャップに対する裕度は最も小さく

試験片の破断は溶接金属部内で生じており、板厚に対する溶接金属量が大幅に不足している。次に、ミグ溶接は、溶接速度が1/3に低下するものの、十分な溶湯量を確保できるために、大きな板間ギャップにも対応できる。また引張せん断試験における試験片の破断は、溶接熱影響による軟化部で生じ、破断荷重のばらつきも小さい。

一方、YAG-ミグハイブリッド溶接では、ミグ溶接を付加することで溶湯量を十分に確保できるため、板間ギャップをミグ溶接並みに近づけることができる。また、

表2 突合せ継手作製条件(溶接条件)の比較
 Table 2 Comparison of welding condition

	MIG	YAG	Hybrid	Hybrid/YAG
Welding speed (m/min)	0.95	3.00	5.00	1.67 (High productivity)
Laser power (kW)		4.0	2.0	0.5 (Reduced photon cost)

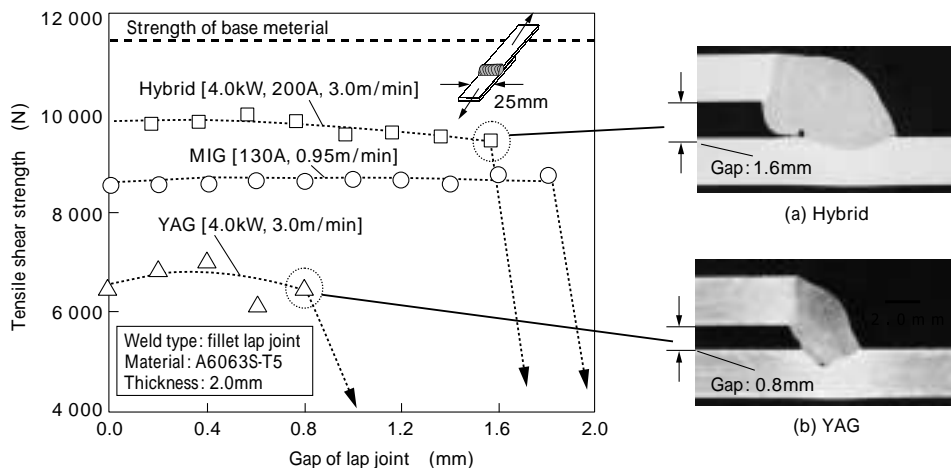


図7 重ねすみ肉継手の限界ギャップ比較と継手の引張せん断荷重の関係
 Fig. 7 Relationship between tensile shear strength and gap tolerances on fillet lap joints

YAGレーザー溶接並みの溶接速度で施工することで、熱影響の軟化低減により、引張せん断破断荷重はミグ溶接を上回った。このように重ねすみ肉継手のYAGレーザー溶接の補完効果として、2倍程度の板間ギャップ裕度と強度向上が図れた。

むすび = YAG-ミグハイブリッド溶接は、施工条件の調節により適材適所の適用を図ることができるが、何よりも、レーザー溶接の特長を活かす開発が重要である。レーザー溶接から見たハイブリッド溶接による補完効果をまとめると以下ようになる。

- (1) アルミニウム合金レーザー溶接の不安定性（溶接ビードの乱れ）の抑制
- (2) 薄板突合せ継手でのレーザー出力の低減と高速溶接化，重ねすみ肉継手でのギャップ補完能力の向上と継手高強度化
- (3) アルミニウム合金溶接の高速化・深溶込み・溶融幅の向上

参 考 文 献

- 1) 阿部信行ほか：溶接学会誌，Vol.70, No. 4 (2001) p.7.
- 2) J. Mann et al.：溶接技術10月号 (1998) p.93.
- 3) I. Miyamoto: Challenge to advanced materials processing with lasers in Japan, Proc. of LAMP2002 (HPL2002)
- 4) C. Schinzel, et al. : Laser welding of aluminum car bodies from research to production, ICALEO'98, Section F, p.56.
- 5) H. Mayer et al. : Die ASF-Karosserie des Audi A8, Sonderausgabe von ATZ und MTZ.
- 6) T. Graf et al.: LaserHybrid process at Volkswagen, IIW Doc.XII-1730-02.