

(技術資料)

自動車用アルミニウム合金の新しい接合技術

Advanced Welding Technologies for Automotive Aluminum Alloys



江間光弘
Mitsuhiko Ema



松本 剛
Tsuyoshi Matsumoto



江口法孝
Noritaka Eguchi



笹部誠二
Seiji Sasabe

Laser beam welding, laser/arc hybrid welding, friction stir welding and double wire GMAW are highly suitable for the assembly of aluminum automotive structures. Since they are very low heat input processes, they minimize softening and avoid micro-cracking in weld heat affected zone of Al-Mg-Si alloys. Furthermore, they reduce welding distortions. Tensile testing of Al-Mg-Si alloy (SP540-T5) butt joints was carried out in order to compare the degree of heat affection in these processes with conventional GMAW and GTAW. The results are presented in this paper to assess these processes in regard to welding heat input and productivity.

まえばき = 近年、アルミ材適用による自動車の軽量化が進められつつある。エンジンやホイールだけではなくフードなどのパネル類もアルミ化が急速に進んでいる。オールアルミ車である Audi A2 のスペースフレームのように¹⁾、量産車の構造部材までアルミ化するためには、アルミ溶接技術のさらなる開発・進展が必要である。

自動車用のアルミ合金としては、押出性・リサイクル性の観点から 6000 系合金が指向されているが、6000 系合金の溶接性は、溶接熱により溶接部近傍が軟化し継手強度が母材に比べ低くなることや溶接熱影響部にマイクロ割れが発生しやすいなどの技術課題がある²⁾。

一方、レーザ溶接や摩擦攪拌接合など母材への熱影響が少ない溶接・接合法が最近話題となっている。これらの方法によれば、溶接熱による軟化が少なく品質の高い継手が得られる。また、エネルギー密度の高いレーザ溶接は、溶接速度が速く生産性が高いため自動車分野における適用の期待が高まっている。

本稿では、自動車分野における構造用アルミ材料の接合法として最近話題となっているレーザ溶接や摩擦攪拌接合、レーザ/アーク複合溶接などの特長を紹介し、溶接熱影響という観点から従来法であるミグやティグなどのアーク溶接と比較検討した結果を報告する。

1. 比較的新しいアルミ溶接技術

1.1 レーザ溶接

レーザ溶接は、集光された数百 kW/cm² のパワー密度を有するビーム光を照射することでキーホール型溶融となる溶接部を形成する。大出力化の容易な CO₂ レーザに比べやや遅れをとったものの、近年、光ファイバ伝送による 3 次元加工システム化が可能で 3 ~ 5kW 級の YAG レーザ (図 1) も登場し、短波長による光の高吸収率の点からアルミ材料の溶接にも積極的に検討されるように

なった。

実施工では、板厚 2 ~ 3mm 程度のアルミ材料を 3 ~ 10m/min の高速度で溶接することができるため、溶接熱が低減し母材への熱影響が少なくなることから、6000 系などの熱処理型アルミ合金の継手性能が向上するだけでなく、アーク溶接に比べて溶接変形が少ないという長所もある³⁾。

このようにレーザ溶接は、エネルギー密度が高く溶かしたい所だけを溶かすことができるという理想的な溶接法であるが、その反面溶融幅が狭いため、開先に多少のギャップがあっても溶接できるという耐ギャップ性が劣る。また、エネルギー密度が高いため溶湯が安定せず、ポロシティ、割れ及び溶落ちなどの溶接欠陥が発生する場合があるなどの課題が残っている。しかし、アルミ製量産車 (Audi A2) への適用も既に始まっており¹⁾、また、高速度で熱影響が少なく、余盛高さも低い溶接部が得られることから、写真 1 のようなアルミ製テラードプランクなどには適した溶接方法であると思われる⁴⁾。

1.2 レーザ/アーク (ミグ) 複合溶接

レーザ/アーク複合溶接は、図 2 に示すようにレーザとアークの 2 つ以上の熱源を同一溶接部に作用させ溶接する方法である。これは 1980 年ごろから研究⁵⁾が始めら

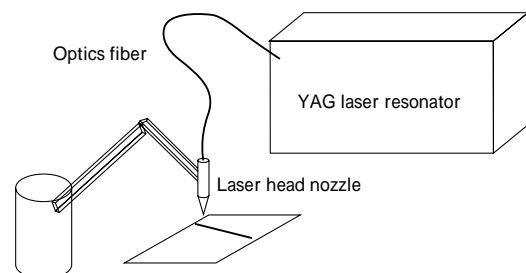


図 1 YAG レーザ溶接
Fig. 1 Schematic of YAG laser system

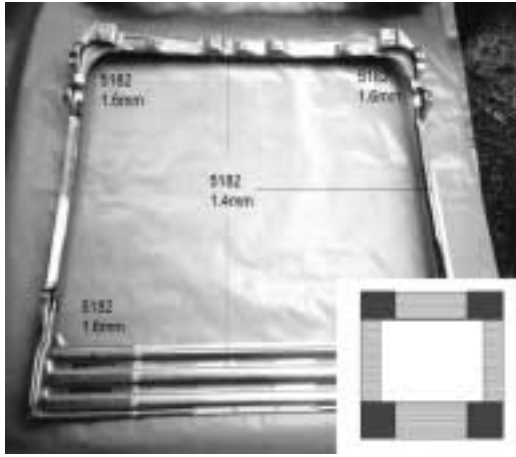


写真1 アルミ製テーラードブランク
Photo 1 Tailored welded blank of aluminum alloy

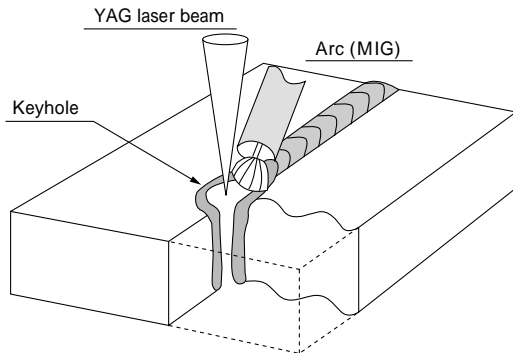


図2 レーザ / ミグ複合溶接
Fig. 2 Schematic of laser / MIG hybrid welding

れ、当初は低いレーザー出力を補う目的でアーク熱源を利用することが試されていたにすぎない。しかし、本来の複合化の効果は、レーザー及びアークという異なるエネルギー密度をもつ熱源の入熱量をそれぞれ調整することにより様々な溶融溶接部を形成せしめ、それぞれの短所を補うとともに長所を相乗させ得ることにある。

具体的には、比較的溶融幅が狭く溶着量も少ないレーザー溶接と、溶加材供給と同時に適度なアークの広がりをもつミグ溶接を複合することにより、耐ギャップ性に優れた溶接部を得ると同時に、高エネルギー密度・高速溶接におけるレーザー溶接の溶湯の不安定をミグ（アーク）が解消する効果もある。さらに、レーザー出力をミグの熱源（アーク）が補完するため、比較的低出力のレーザーでも高速度で溶込みが深く、幅の広い溶接部が得られる。

写真2に、YAGレーザー溶接単独での溶接速度を維持したまま耐ギャップ性が向上できるという一例を示した⁶⁾。このように適用部位に応じた最適な条件を選定することにより、特長的な溶接部を形成することができる。

1.3 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：FSW）は、1990年代初頭に英国溶接研究所（TWI）において発明・開発された⁷⁾。この接合概念は、図3に示すように丸棒状の回転ツールにより、素材との間で摩擦熱を発生させ、ツール先端の特殊な形状を持ったピンで塑性流動を起こしながら継手の開先を攪拌することにより接合する方法である。

この接合法は、溶融を伴わないため素材の温度上昇が

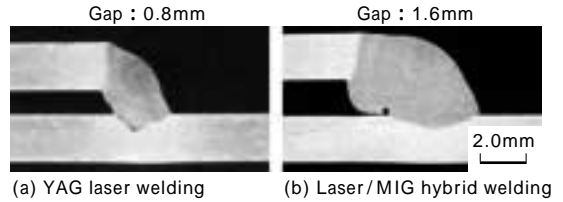


写真2 重ね継手における耐ギャップ性の比較例
（溶接速度：3.0m/min）
Photo 2 Gap tolerance of lap joints on typical welding processes
（Welding speed：3.0m/min）

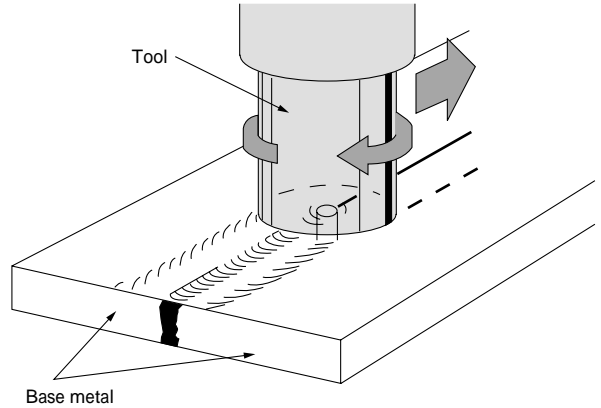


図3 FSWの概念図
Fig. 3 Concept of FSW

アーク溶接に比べて小さくなり、その結果として熱影響が少なく、溶接変形も小さく抑えることができる。また、接合に伴う前処理が不要であり、アーク溶接のようなシールドガスや溶加材などの消耗品も必要ないという特長をもつ。

摩擦熱を発生させるため被接合材に剛性がない場合は裏当てが必要となるものの、適切なツールと接合条件を選定することにより欠陥のない安定した継手性能を得られることから、長尺のアルミ合金製鉄道車両の製造などに適用されている⁸⁾。

1.4 タンデムミグ溶接

アルミのアーク溶接は、船舶や鉄道車両をはじめ種々の分野において多くの実績があり、信頼性の高い溶接法である。ミグ溶接はティグ溶接に比べ溶接速度が速く、トーチがコンパクトでありロボットによる自動化も容易で、量産性を追求する部位の溶接に適している。

最近、溶接速度のさらなる高速化や1パスあたりの溶着量増大などによる飛躍的な生産性向上を目指した1トーチに2本のワイヤを用いたダブルワイヤミグ溶接法が注目されている。その手法の一つであるタンデムミグ溶接（図4）は、2つの溶接電源を有し、それぞれから送給された2本の溶接ワイヤ（先行・後行）でもって異なる溶接条件を設定できるという特徴がある。

2. 各種溶接法の特性比較

以上の最近話題となっているレーザー溶接（LBW）、レーザー/ミグ複合溶接（L&M）、摩擦攪拌接合（FSW）、タンデムミグ溶接（W-MIG）の4種類の溶接・接合法について、実際に6000系押出形材を溶接し継手の静的引張特性を調査することにより、母材に与える溶接熱影響の大き

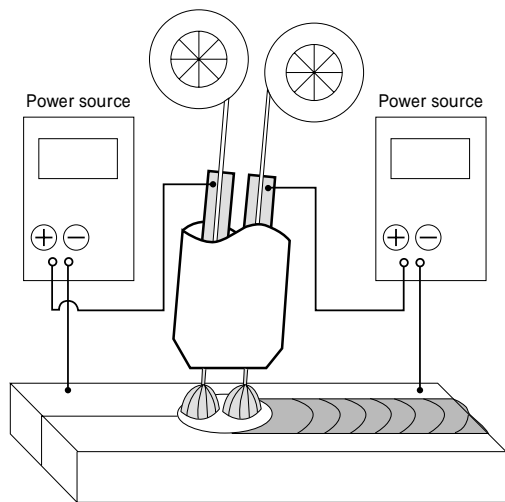


図4 タンデムミグ溶接
Fig. 4 Schematic of tandem MIG welding

さを従来のミグ (MIG) 溶接やティグ (TIG) 溶接と比較した。

2.1 実験方法

供試材には、衝突時のエネルギー吸収性に優れ、自動車クラッシュプルフレーム材あるいはスペースフレーム部材として適用可能な当社開発の 6000 系押出形材 SP540 を用いた。調質は T5 で、サイズは肉厚 3.0mm、幅 150mm の平板状押出形材である。

供試材を長さ 100mm に切断し、押出方向と垂直に突合わせ、上記 6 種類の溶接法により継手を作製した。溶接条件を表 1 に示すが、FSW 以外は A5356 溶加材を用いた。

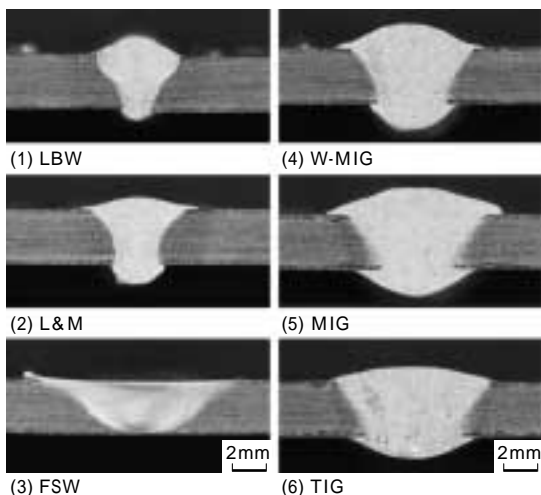


写真3 各種溶接法による代表的な溶接部断面
Photo 3 Typical welding sections by various welding processes

継手の引張試験は、余盛有りのままで JIS Z 2201 5 号試験片を用い 1 カ月以上室温放置したあとに実施した。なお、繰返し数は各溶接法につき $n = 2$ とした。

2.2 試験結果と考察

各種溶接法による代表的な溶接部の断面形状を写真 3 に示す。いずれの溶接法も最適と思われる溶接条件を選定したが、溶接速度は $L\&M > W\text{-MIG} > LBW > MIG > FSW > TIG$ の順になり、 $L\&M$ 、 $W\text{-MIG}$ 、 LBW が比較的速い速度で溶接可能である。特に $L\&M$ は、レーザとミグアークの相乗効果により 5.0m/min という速い溶接速度で安定したビードが得られた。

一方、溶融部の幅は LBW が最も狭く、 $W\text{-MIG}$ 、 MIG 、 TIG などアーク溶接の方が広い。耐ギャップ性の観点からは LBW よりもアーク溶接の方が有利である。 $L\&M$ は溶接速度が速いにもかかわらず、 LBW よりも広幅のビードが得られている。 FSW は通常溶加材を添加しないので、もしギャップがあった場合には溶接できないか、溶接できたとしても欠陥が多く実用的な溶接部は得られない。

各種溶接法による継手の引張試験結果を図 5 に示す。継手の引張特性は $LBW > L\&M > FSW > W\text{-MIG} > MIG > TIG$ の順になり、 LBW は溶接速度が 1.5m/min と $L\&M$ や $W\text{-MIG}$ よりも遅いものの、最も高い継手強度が得られた。

破断位置はいずれも溶接熱影響部である。引張強さの母材比である継手効率は、 TIG が 70% であるのに対し、 LBW は 85% である。

次に溶接部断面の硬さ分布を図 6 に示す。 LBW 、 $L\&M$ 、

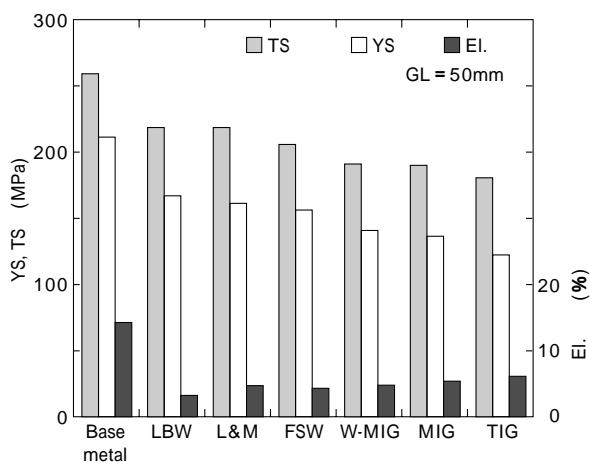


図5 SP540-T5 母材及び各種溶接継手の引張特性
Fig. 5 Tensile properties of base metal (SP540-T5) and butt joints by various welding processes

表1 溶接方法と溶接条件
Table 1 Welding processes and conditions

Symbol	Welding process	Filler metal	Welding speed	Other welding conditions
LBW	YAG laser beam welding	A5356-WY 1.2	1.5m/min	Laser power = 4.0kW Wire feed = 4.0m/min
L&M	YAG laser and MIG hybrid welding	A5356-WY 1.2	5.0m/min	Laser power = 3.5kW MIG: 210A, 19V
FSW	Friction stir welding	-	0.5m/min	Tool rotation speed = 2 400rpm
W-MIG	Tandem MIG welding	A5356-WY 1.2	3.0m/min	Master : 250A, 21V Slave : 180A, 20V
MIG	DCEP-MIG welding	A5356-WY 1.2	0.75m/min	150A, 22V
TIG	AC-TIG welding	A5356-BY 3.2	0.2m/min	150A

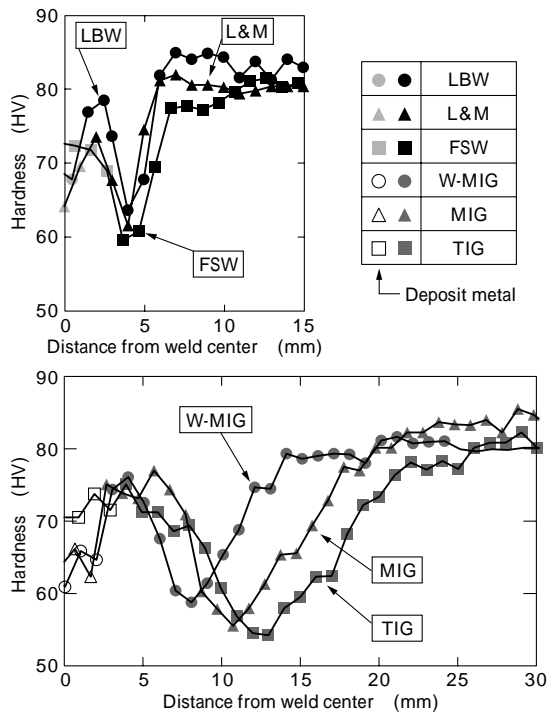


図6 各種溶接法による突合わせ溶接部の硬さ分布
(母材: SP540-T5, 3mm¹)
Fig. 6 Hardness distributions of various welding processes in butt joints (Base metal: SP540-T5, 3mm¹)

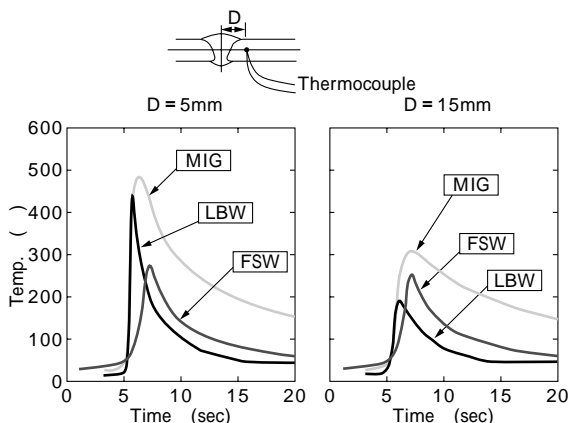


図7 代表的な溶接部近傍の熱サイクル
Fig. 7 Typical thermal cycles near welding line

FSW は、W-MIG、MIG、TIG のアーク溶接に比べ、溶接熱影響部が狭く、溶接中心から約 4mm 離れたところに最軟化部があり、その最低硬さは LBW > L&M > FSW の順である。一方、W-MIG、MIG、TIG は、溶接中心から約 8mm 以上離れたところに最軟化部があり、W-MIG > MIG > TIG の順に最低硬さが低くなる。

したがってこの硬さ分布から溶接熱影響は、LBW < L&M < FSW < W-MIG < MIG < TIG の順に大きくなると推定され、この差異により各種溶接法による継手の引張特性が説明できる。すなわち、LBW よりもエネルギー密度の低いアーク溶接は、溶接速度が遅くなるにしたがい溶接熱影響が大きくなり、継手強度が低くなるが、エネルギー密度の高い LBW や溶接速度の速い L&M は溶接

熱影響が小さく、継手強度も高い。

図7は溶接熱影響部の熱サイクル測定結果の一例であるが、LBWの場合、溶接中心から5mm離れた所では約450まで昇温されるものの、昇温開始から10秒後には約50まで冷却される。これに対しMIGは450以上に昇温され冷却速度も遅い。溶接中心から15mm離れた所では、LBWの最高到達温度は約200である。

FSWは最高到達温度が溶接中心から5mm離れた所でも約300と、LBWやMIGよりも低い。しかし、溶接中心から15mm離れた所の最高到達温度はLBWよりも高くなり、FSWは、最高到達温度は低いものの熱影響部の幅は広くなり、LBWよりも溶接熱影響が大きいのと思われる。

むすび=以上のように自動車用アルミ合金の接合法、特に構造用アルミ材料の溶接・接合法として最近話題となっているレーザ溶接や摩擦撈拌接合、レーザ/アーク複合溶接、タンデムミグ溶接について、従来法であるミグやティグなどのアーク溶接と比較検討した。

母材に与える熱影響は、エネルギー密度の高いレーザ溶接が比較的少なく、熱処理型の6000系合金では、溶接熱による軟化が少ないため高い継手強度が得られることを確認した。

溶接トーチの大きさや耐ギャップ性、初期の設備投資コストなど利便性・経済性の面では、アーク溶接より劣るものの、熱影響が少なく溶接速度が速い点はレーザ溶接の大きな長所である。

ツール形状のコンパクト化やさらなる装置価格の低減など解決すべき課題が残されているものの、レーザ溶接とアーク溶接の長所を相乗した耐ギャップ性に優れ高速度で安定した溶接ビードが得られるレーザ/ミグ複合溶接は、比較的適用範囲の広い溶接法であると考えられる。

参考文献

- 1) K. Koglin: Proceedings of International Symposium held in Celebration of the 50th Anniversary of the Japan Institute of Light Metals, Tokyo (2001) p.9.
- 2) 田中一雄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.34, No.2(1984) p.73.
- 3) 松本 剛: 軽金属溶接, Vol.36, No.3 (1998) p.1.
- 4) 松井邦昭ほか: 平成11年度塑性加工春期講演会論文集(1999) p.17.
- 5) J. Alexander et al.: Proc. Int. Conf. Welding Research in the 1980's Osaka (1980) p.121.
- 6) 江口法孝ほか: 溶接学会全国大会講演概要(2002) Vol.71, p.346.
- 7) W. M. Thomas et al.: European Patent Specification 0 615 480 B1.
- 8) H. Takai et al.: Proceedings of 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Kobe (2001) Session 8.