



マグネシウム合金のパルスミグ溶接

Pulsed MIG Welding of Magnesium Alloy

上山 智之*, 中田 一博**
Tomoyuki Ueyama* and Kazuhiro Nakata**

1. はじめに

マグネシウム合金はアルミニウム合金の2/3程度の比重であり、実用合金としては最軽量材料である。また、比強度、比剛性が高く軽構造用材料として注目されており、自動車用部品やパソコン、AV機器などへの適用が進んでいる¹⁾。特に自動車業界では欧米を中心に環境問題を配慮してリサイクル性に優れたマグネシウム合金を積極的に扱う傾向にあり Fig. 1 に示すように車体を構成する部品にまでマグネシウム合金が適用されている²⁾。

ところで、マグネシウム合金の溶接は構造物の大型化や軽量化には欠かせない技術であるが、これまでは鋳造品が主流であったため溶接構造物の実績も少なく、溶接性に関する報告^{3),4)}についてはアルミニウム合金に比べて極めて少ない。

特に、ミグ溶接に関する情報やデータは溶接用ワイヤそのものが入手困難であった背景もあり、これまでにまとまった報告例はあまり見当たらない。しかし、最近では溶接用マグネシウム合金ワイヤが開発されており、一般にその入手が可能になった。

マグネシウム合金の溶接は、酸化が著しいといえアルミニウム合金の溶接とほぼ同じであり、



Fig. 1 Mg合金ダイキャスト製後部ドアインナーパネル

鉄鋼材料やアルミニウム合金とは異なるいくつかの溶接特性を理解しておればそれほど困難なものでは無いと考えられる。

このため、マグネシウム合金のミグ溶接ではパルス無しのミグ溶接及びパルスミグ溶接のいずれの溶接も可能である。しかし、後述するようにマグネシウム合金ワイヤの設定溶接電流に対するワイヤ溶融速度が非常に高いので、パルス無しのミグ溶接では溶接電流値が150 A以下のスプレーアークとならない短絡移行溶接域では母材入熱が不足し溶込みが浅く余盛りの高い凸ビードになりや

* 株式会社ダイヘン 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12月11日

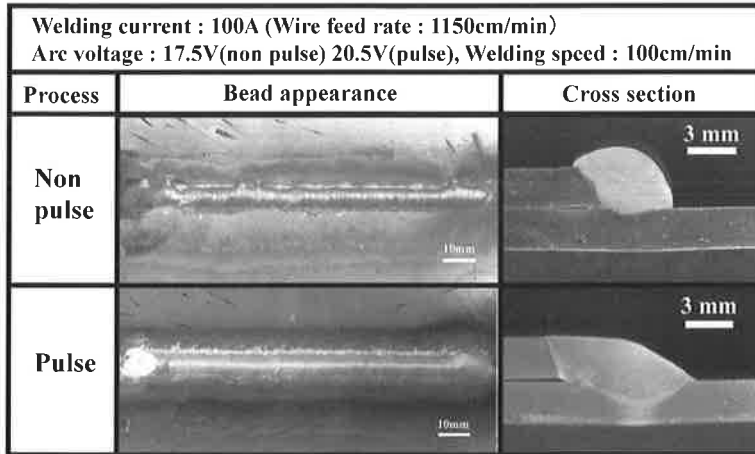


Fig. 2 ビード外観及び溶込み形状の比較



Fig. 3 マグネシウム合金溶接用ワイヤ

すい。また、アークの安定性は確保できてもスパッタが多量に発生し作業性が悪い。

Fig. 2 はパルス有りとパルス無しのミグ溶接結果を同一溶接電流で比較したものである。ビード外観及び溶込み形状ともにパルスミグ溶接の方が良好であることがわかる。

このような背景から、著者らはパルスミグ溶接法によるマグネシウム合金の溶接特性について調査を行ってきた。ここでは、これまでに得られた結果について紹介する。

2. 溶接用ワイヤ

Fig. 3 にミグ溶接用マグネシウム合金ワイヤの

外観写真を示す。これらのワイヤは、引き抜き加工により製作されている。このため、ワイヤ表面もスムーズでワイヤ径寸法公差は $+0.01\text{ mm}$ 、 -0.04 mm 以内を満足しており、市販のアルミニウム合金ワイヤと同様に安定したワイヤ送給安定性を確保できる。

但し、溶接ワイヤ開梱前はAr封入したプラスチックバックでワイヤ表面の酸化が防止されているが、開梱後は酸化が進行する前に使い切るか、デシケータ等の除湿を確保できる容器への保管が望ましい。

Table 1 にそれぞれワイヤ径 1.2 mm のAZ31, AZ61, AM50の化学成分を示す。

Table 1 Mg合金溶接用ワイヤの化学成分

Alloy	Chemical composition (mass%)						
	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Mg
AZ31	2.63	0.96	0.41	0.001	0.005	0.001	Bal.
AZ61	6.03	0.76	0.49	0.003	0.10	0.002	Bal.
AM50	4.80	0.005	0.32	0.004	0.01	0.001	Bal.

3. 溶接機器

マグネシウム合金のミグ溶接は前述したように基本的にはアルミニウム合金のミグ溶接とほぼ同じであるので、アルミニウム合金ミグ溶接仕様の溶接機器を適用することである程度の溶接は可能である。

溶接法は、パルスミグ溶接あるいはパルス無しのミグ溶接のいずれもが適用可能である。Fig. 4 はマグネシウム合金ミグ溶接プログラムを搭載し



Fig. 4 新開発のデジタルインバータ制御式パルスミグ溶接機

た新開発のデジタルインバータ制御式パルスミグ溶接機^{5),6)}を示したものである。

この溶接機ではマグネシウム合金のワイヤサイズに応じたパルスパラメータがプリセットされており、溶接オペレータは溶接電流（あるいはワイヤ送給量）を所望値に設定するだけで安定したワークのミグ溶接が行える。

4. マグネシウム合金のミグ溶接特性

4.1 溶滴移行

溶滴移行の観察は、Fig. 5 に示すようにハイスピードデジタルビデオカメラを用いて10000駒/秒の撮影速度にて行った。その際、溶接試験条件はTable 2 に示すとおりであり、以下に溶滴移行観察結果を述べる。

Fig. 6 はAZ31 ワイヤによるパルスミグ溶接時の典型的な溶滴移行観察結果を示したものである。パルスピーク通電開始直後からワイヤ先端に大きな溶滴を形成し始めその上方で電磁ピンチ力によるくびれが認められた。このとき、パルスピーク通電終了後も溶滴上方の熔融ワイヤのくびれ

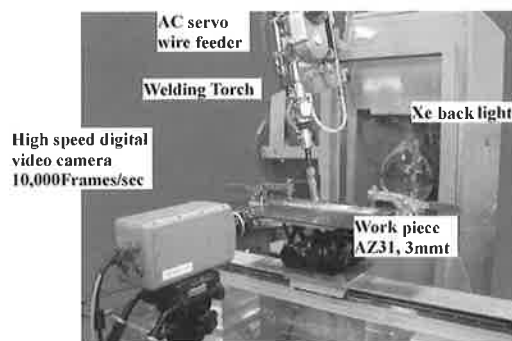


Fig. 5 溶滴移行観察装置

Table 2 溶接条件およびパルス条件

Alloy	Wire feed rate (cm/min)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/mm)	Ar gas flow rate (L/min)	Pulse current (A)	Pulse width (ms)	Base current (A)
AZ31	830	68	21.0	38	20	360	1.5	20
AZ61		70	20.6					
AM50		68	21.2					

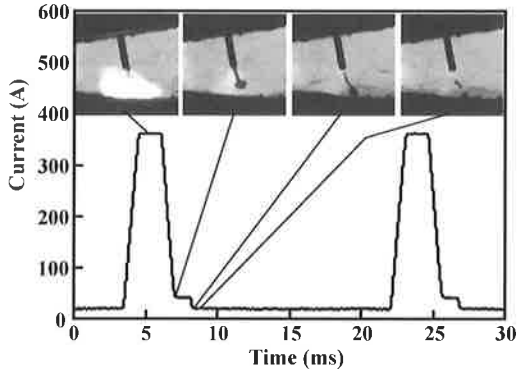


Fig. 6 AZ31 ワイヤによる溶滴移行

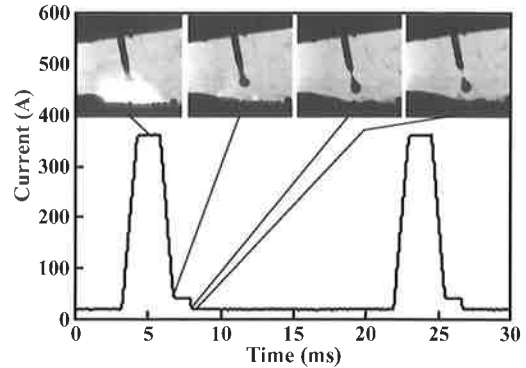


Fig. 8 AM50 ワイヤによる溶滴移行

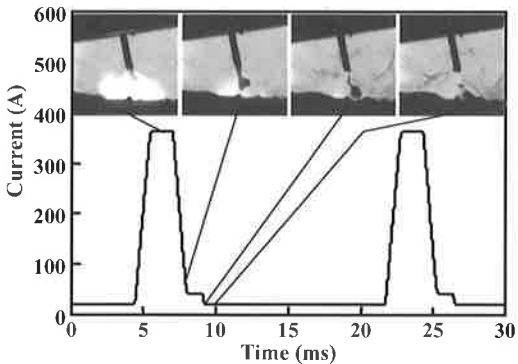


Fig. 7 AZ61 ワイヤによる溶滴移行

Wire	As weld	Smut removed
AZ31		
AZ61		
AM50		

Fig. 9 ビード外観及びクリーニング状況

部は細長く伸びており、溶滴が溶融池へ接触するか否かの時点で溶滴離脱する傾向にある。

Fig. 7 は AZ61 ワイヤによる溶滴移行を示したものである。AZ61 の場合も AZ31 とほぼ同様の溶滴移行形態を示すが、ワイヤ先端の溶滴あるいは移行中の溶滴がしばしば破裂して微小なスパッタを発生させる傾向にある。

Fig. 8 は AM50 ワイヤの場合の溶滴移行を示したものである。AM50 ではパルスピーク通電によって形成したくびれ部から容易に溶滴の離脱が始まり、AZ31 及び AZ61 に比べてスムーズなパルスに同期した溶滴移行を示した。

Fig. 9 は溶滴移行観察のためにビード溶接して得られたビード外観を示したものである。いずれのワイヤともに、ビード止端部ぎりぎりまでマグネシウム酸化物と推定されるスマットがビード周

囲を覆い、かろうじて溶接ビード上が金属光沢を示している。同様にスマットを除去した後の外観を示すが、クリーニング作用が起こっていた箇所は溶融池近傍のみであり、アルミニウムのミグ溶接に比べ極めてクリーニング発生領域が狭い。

Fig. 10 は同溶接ビードにおけるマクロ断面と X 線透過試験による内部欠陥観察結果を示したものである。いずれの溶接ワイヤともにブローホールや割れ等の溶接欠陥は認められなかった。

4.2 ワイヤ溶融特性

Fig. 11 は AZ31, AZ61 及び AM50 それぞれのワイヤ溶融特性を溶接電流とワイヤ送給速度の関係で示したものである。また、同図には比較のためにワイヤ径 1.2 mm の Al-Mg 系合金ワイヤ A5356 の溶融特性も示した。AZ31, AZ61 及び

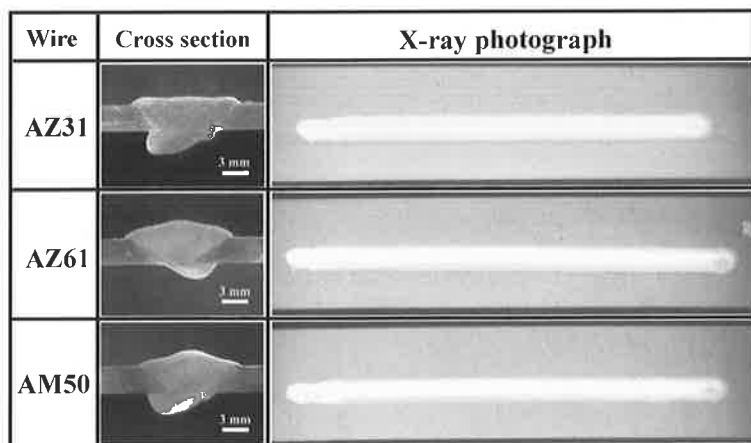


Fig. 10 横断面と放射線透過試験観察結果

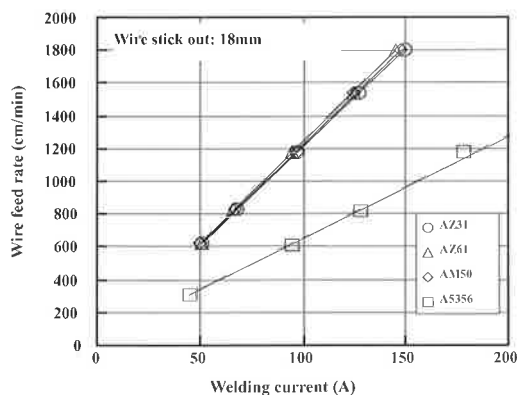


Fig. 11 ワイヤ溶融特性

AM50はいずれも高いワイヤ溶融速度を示し、A5356に対して約2倍程度のワイヤ溶融速度であった。しかし、ワイヤ材質によるワイヤ溶融速度には大きな差は認められず、Table 1に示す合金成分範囲では合金添加元素によるワイヤ溶融特性への影響は少ないと考えられる。

このような高いワイヤ溶融特性を示す理由としては、Table 3に示す物理的性質からマグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて融点はほぼ同等であるものの、熱伝導率がアルミ合金に比べて約2/3であり、電気抵抗が約2倍であること、比熱が約3/4であることから熱容量が小さく熱を蓄えやすいことが考えられる。

Table 3 マグネシウム合金の物理的性質

	AZ31X	AZ61A-F	AM50A	A5356
比重 (g/cm ³)	1.77	1.80	1.77	2.64
融点 (液相点, °C)	632	610	620	633
融点 (固相点, °C)	560	525	565	575
比熱 (J/cm ³ ·K)	180	—	—	240
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	26.8	27.2	26.0	23.0
熱伝導率 (W/mK)	77 (20°C)	79 (20°C)	65 (20°C)	116 (20°C)
電気抵抗 (mΩ·mm ² /m)	92 (20°C)	125 (20°C)	120 (20°C)	59 (20°C)
引っ張り強さ (MPa)	250	280	230	275
0.2%耐力 (MPa)	150	180	125	115
伸び (%)	7	6	10	24

Fig. 12はパルスミグ溶接によるT継手水平隅肉溶接例を示したものである。マグネシウム合金の溶接では溶接電流に対し高いワイヤ溶融量を示すので、余盛りが多く母材への溶込みが浅くなるので、短絡が頻繁に生じるような出力電圧設定は避けるなど溶込み確保に配慮した溶接条件設定が重要となる。

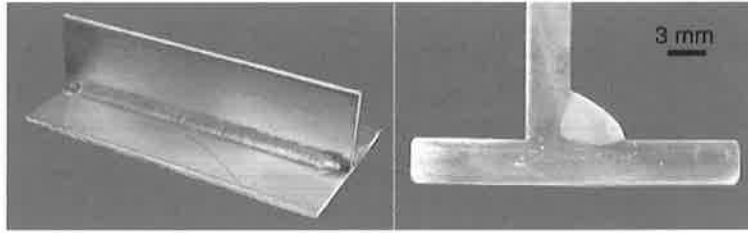


Fig. 12 板厚 6 mm の AZ61 材の水平隅肉溶接例
(パルス MIG 溶接, 145 A, 20 V, 70 cm/分)

5. マグネシウム合金溶接部の諸特性

5.1 溶接部の機械的性質

AZ31, AZ61 及び AM50 の溶接ワイヤを用いて板厚 2.5 mm の AZ31 押出材を母材とした I 型突合わせ溶接部のビッカース硬さ分布状況を Fig. 13 に示す。なお、溶接条件は溶接電流：105 A (ワイヤ送給速度：1150 cm/分), アーク電圧：22.2 V, 溶接速度：100 cm/分である。

母材と同じ合金系である AZ31 溶接ワイヤでは硬さに若干のばらつきが認められるが、場所による硬さの違いは認められなかった。

一方、合金成分の異なる AZ61 及び AM50 溶接ワイヤでは溶接金属部の硬さが上昇している。

Fig. 14 は Fig. 13 と同様の突合わせ溶接における引張試験結果を示したものである。

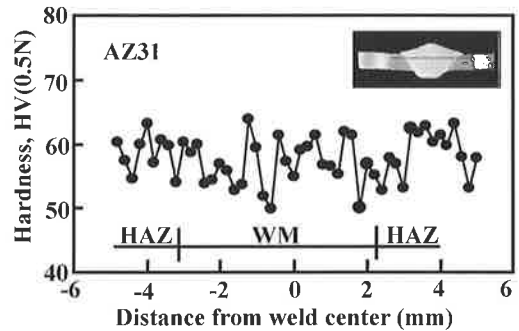
いずれの溶接ワイヤで溶接した試験片の引張強さは 214~225 MPa であり、破断箇所は溶接熱影響部あるいは母材であった。また、母材引張強さ 253 MPa の 87~91% の継手効率を示した。

一方、伸びについても溶接ワイヤ材質による差はなく 21~25% と母材の伸び 20% よりも高い値を示した。

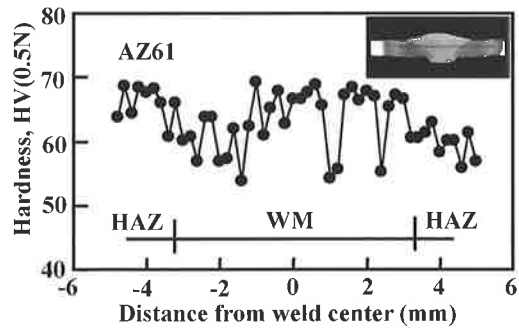
5.2 重ね継手溶接特性

マグネシウム合金の実施工溶接を想定した場合、溶接継手としては重ね隅肉継手の溶接が多く、さらに、ロボット溶接などの自動溶接を想定すれば溶接ワイヤの狙いずれや継手に存在する隙間(ギャップ)に対してどれだけの余裕度があるかが重要である。

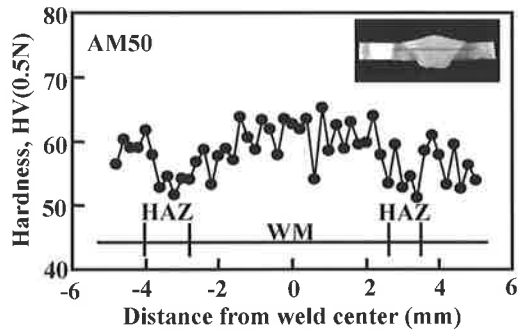
Fig. 15 は母材に板厚 2.5 mm の AZ31 押出材を用いてパルスミグ溶接による重ね隅肉溶接を行っ



(a) AZ31 ワイヤの場合



(b) AZ61 ワイヤの場合



(c) AM50 ワイヤの場合

Fig. 13 溶接部のビッカース硬さ分布

た場合の溶接ワイヤ狙いずれ裕度及びギャップ裕度を調べた結果である。なお、溶接ワイヤにはワイヤ径1.2 mmのAZ61を用いており、溶接電流

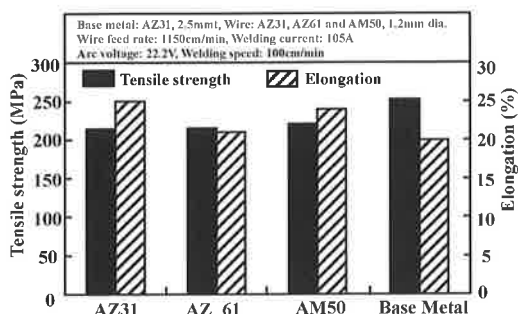


Fig. 14 引張試験結果

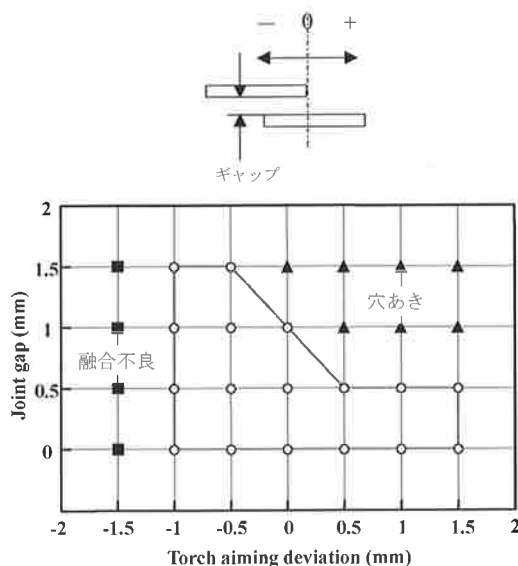


Fig. 15 ギャップ・ワイヤ狙いずれ裕度

約100 A (ワイヤ送給速度1150 cm/分)、溶接速度100 cm/分の条件を固定した。

この結果によれば、ワイヤの狙いずれの絶対量としてはギャップ量0.5 mm以下では±約1 mm程度あり、0.5 mmを越えるギャップでは±約0.5 mmである。

Fig. 16はギャップ0.5 mmでワイヤ狙いずれによる重ね隅肉溶接部の溶込み形状を示したものである。4.2項で述べたように溶接ワイヤの溶融速度が高いために、溶接ワイヤの狙いずれに対しては上板の端部から離れるほど良好な溶接結果となっており、下板への溶込みも適正なものとなっている。一方、上板側への溶接ワイヤの狙いとなるほど余盛りが大きく下板への溶込みが不足気味の溶接結果となってビード外観も悪い。また、上述した溶接条件ではギャップに対しては約1 mm程度でも溶接が可能であり、それ以上のギャップでは溶着金属不足ために生じる穴あきビードに陥りやすい。

以上の結果は、マグネシウム合金薄板の重ね隅肉溶接継手におけるギャップ・ワイヤ狙いずれ裕度範囲としてはアルミニウム合金や鉄鋼の場合と同等のレベルにあり、自動溶接性を困難なものにするレベルではない。

6. 溶込み改善に対するアプローチ

4.2項で述べたようにマグネシウム合金ワイヤは溶接電流に対するワイヤ溶融速度が極めて高いので、ギャップへの溶着橋絡が容易になり開先内への溶着金属の充填が効率よく行えるメリットがある。しかし、このような高いワイヤ溶融速度は母材への溶込みを浅くするため、溶接施工条件によっては溶込み不良などの欠陥が危惧される。そ

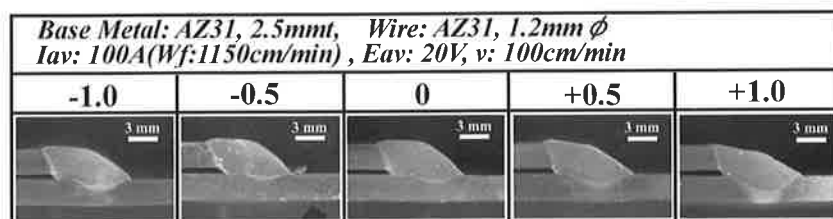


Fig. 16 溶込み形状に及ぼすワイヤ狙いずれの影響

ここで、マグネシウム合金溶接部の溶込みを確保するためにシールドガス及びレーザ・アークハイブリッド溶接法による2つの溶込み改善手法について紹介する。

6.1 アルゴン・ヘリウム混合ガスシールドによる溶込みの改善

シールドガスにヘリウムのような電位傾度の高いガスを混合するとアーク電圧が増加し、母材への溶接入熱が増加して溶込みが深くなることが知られている。Fig. 17はFig. 16と同様に0.5 mmのギャップを設けた重ね隅肉溶接におけるワイヤ

狙いずれと溶込み形状の関係に及ぼすヘリウム混合比率の影響を調べたものである。ヘリウム混合比率の増加に伴って下板への溶込み深さが増加しており、混合比が50%では上板側にワイヤが1 mm程度ずれても十分な溶込みが確保できている。

Fig. 18はヘリウム混合比率と溶接電流、アーク電圧の関係を示したものである。溶接電流はヘリウム混合比率によらずほぼ一定値であるのに対して、アーク電圧はヘリウム混合比率の増加に伴い増加している。特にヘリウム混合比率が50%ではアーク電圧は100%アルゴンに対して20%程度

Base Metal: AZ31, 2.5mm t, Wire: AZ31, 1.2mm ϕ
Iav: 100A(Wf:1150cm/min), Eav: 20-25V, v: 100cm/min

Gas	-1.0	-0.5	0	+0.5	+1.0
100Ar					
90Ar + 10He					
70Ar + 30He					
50Ar + 50He					

Fig. 17 ワイヤ狙いずれと溶込み形状に及ぼすヘリウム混合比率の影響

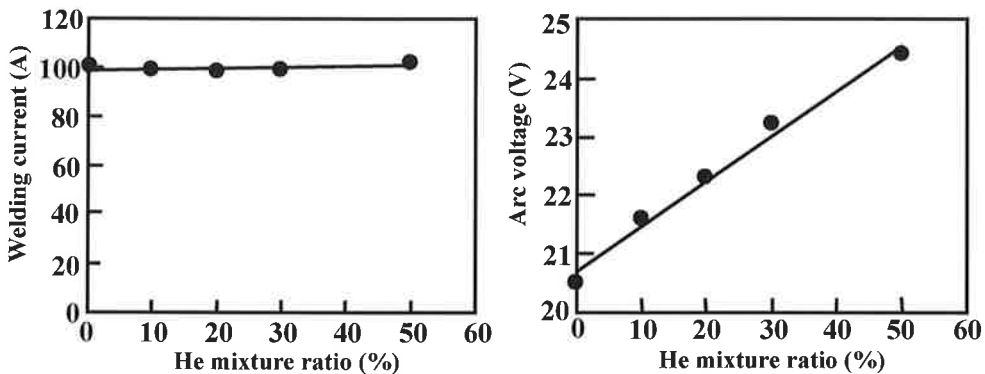


Fig. 18 溶接電流とアーク電圧に及ぼすヘリウム混合比率の影響

アーク電圧が増加しており、下板への溶込みが深くなっている。

6.2 レーザ・アークハイブリッド溶接による溶込みの改善

著者らは薄板アルミニウム合金を対象に AC パルスミグ溶接とレーザを併用したハイブリッド溶接によって AC パルスミグ溶接部の浅い溶込みを改善しながら高速溶接ができることを報告した^{7),8)}。この考え方を利用してパルスミグ溶接によって得られた溶融池にレーザを照射することによって深溶込みが得ながら溶接速度を増加させる試みを実施した。

Fig. 19は溶接速度 1 m/min にて重ね隅肉溶接を行った場合の溶込みをパルスミグ溶接とレーザ・アークハイブリッド溶接で比較したものである。レーザを照射しなかったパルスミグ溶接単独では下板への溶込みが不足気味になっているのに対し、レーザを照射したハイブリッド溶接では十分な溶込みを得られることが確認できた。

Fig. 20はレーザ・アークハイブリッド溶接による重ね隅肉溶接において、出力 2 KW のレー

ザを照射した場合の高速溶接施工性を調べたものである。パルスミグ溶接の溶接電流（ワイヤ送給速度）がこれまでに紹介した重ね隅肉溶接の条件から再調整しなくてもレーザを照射するだけで約 2 倍程度の溶接速度が向上した。

Fig. 21はレーザ・アークハイブリッド溶接においてレーザのビームスポット径及び溶接線に対するレーザ照射位置が溶込み形状に及ぼす影響について調べたものである。いずれも熱伝導形の溶込み形状を示しているが、レーザビームスポットの位置が溶接線上に設定したものは、レーザ照射による熱が下板への溶融だけでなく上板への溶融にも使われたと考えられ、上板と下板の溶融境界線の段差が観察された。また、ビームスポット径が小さいものほどその程度が大きい。しかし、ビームスポット径が 5 mm のものは上板への溶融の程度は小さく溶融境界線の不連続な段差はなく下板への溶込みも安定して得られていた。一方、ビームスポットを溶接線より下板側へ 1 mm ずらせたものはいずれのスポット径においてもレーザ照射による熱が下板側へ集中して入ったと考えら

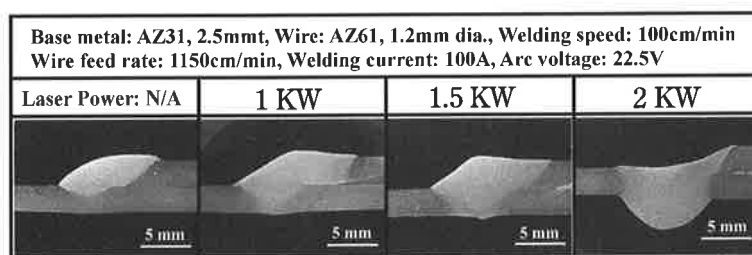


Fig. 19 溶込み形状に及ぼすレーザ出力の影響

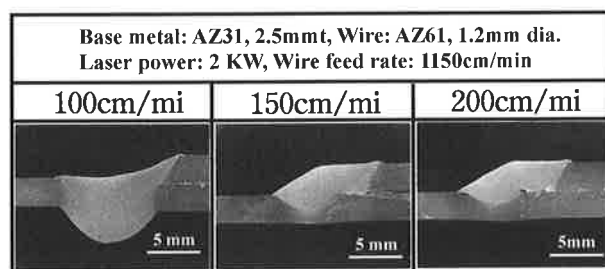


Fig. 20 溶込み形状に及ぼす溶接速度の影響

Base metal: AZ31, 2.5mmt, Wire: AZ31, 1.2mm dia. Wire feed rate: 1150cm/min, Welding current: 100A Arc voltage: 22.5V, Laser power: 2KW, Welding speed: 200cm/min			
Beam size	Bottom plate	Center	Top plate
1.2mm			N/A
2mm			
3mm			
5mm			

Fig. 21 溶込み形状に及ぼす溶接速度の影響

れ、ビームスポット径が小さいほど溶込みが深い。また、ビームスポットを上板側に1mmずらせたものは上板での溶融が著しくなり、スポット径が1.2mmの場合には上板での穴あきが発生して良好な溶接部が得られなかった。しかし、ビームスポットをデフォーカスすることで良好なビードが得られた。

7. おわりに

市販のマグネシウム合金ワイヤを用いてパルスミグ溶接によって得られた溶接諸特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) 溶滴移行観察の結果、AZ31及びAZ61ワイヤではパルスピーク電流終了後も溶滴上方のくびれ部が細長く伸び、溶滴移行離脱のタイミングが遅い。
- 2) AM50ワイヤはパルスピーク電流によって形成した溶滴上方のくびれ部から容易に溶滴離脱が始まり、スムーズな溶滴移行を示した。
- 3) AZ31, AZ61及びAM50ワイヤはAl-Mg合金系ワイヤA5356に比べて同一溶接電流値で高

いワイヤ溶融速度を示す。しかし、ワイヤ材質間でワイヤ溶融速度の差は認められなかった。

- 4) I型突き合わせ溶接によるマグネシウム合金溶接部の引張試験では、いずれの溶接ワイヤを用いた場合も、母材あるいは溶接熱影響部での破断であり、引張強さは214~225MPaと母材の引張強さ253MPaの87~91%の継手効率であった。また、伸びは21~25%と母材より高い値を示した。
- 5) 薄板マグネシウム合金の重ね隅肉溶接ではギャップ及びワイヤ狙いずれ裕度範囲はギャップ0.5mmで±1mm程度、ギャップ1mmで±0.5mmであった。
- 6) Ar-He混合ガスシールドによる溶込み深さの改善では、Heガス混合比率の増加とともに溶込み深さは増加した。特にHe混合比率が30~50%で溶込み改善効果は明瞭に認められた。
- 7) パルスミグ溶接で形成した溶融池にレーザーを照射するハイブリッド溶接では2m/分的高速溶接でも溶込みが確保できた。特に、ビームスポットサイズを3~5mm程度に設定したデフォーカスレーザーはレーザー照射の狙いずれに対しても良好な溶接部が得られ有効であった。

参 考 文 献

- 1) 清水：マグネシウム合金の溶接，平成14年度溶接学会関西支部シンポジウム資料，P. 9-20.
- 2) 神戸：マグネシウム合金の最新動向—自動車部品への適用—，金属，Vol. 71 (2001) No. 8, P. 539-542.
- 3) 中田：マグネシウム合金の溶接・接合，軽金属溶接構造協会誌，Vol. 39 (2001) No. 12, P. 582-591.
- 4) H. Wohlfahrt, M. Rethmeier and S. Wiesner: Joining of lightweight magnesium alloys by MIG welding, Proc. of the 7th Int. Symp., JWS, 2001, Kobe, P. 375-380.
- 5) 上山：最近のアーク溶接機器の動向，2002国際ウエルディングショーガイドブック，P. 120-125.
- 6) 全，西坂，上山：新型パルスMIG/MAG溶接機の開発，溶接学会全国大会講演概要集，71 (2002)，P. 234-235.
- 7) 上山，全，矢澤，平見，木原，中田，牛尾：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，溶接学会溶接法研究委

員会資料，SW-2865-02，2002.

- 8) H. Tong, T. Ueyama, K. Nakata, M. Ushio: High speed welding of aluminium alloy sheets using laser assisted alternating current pulsed metal inert gas process, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8 (2003) No. 3 P. 229-234.

執筆者の紹介



上山智之



中田一博

お知らせ

— 学術セミナー —

安全を支える技術
欠陥評価，非破壊検査，維持基準

社団法人 日本非破壊検査協会

日 時：平成16年7月9日(金) 13:00~17:00

会 場：機械振興会館 研修-2 (地下3階)

東京都港区芝公園 3-5-8 Tel 03-3434-8216

・JR 浜松町駅下車 徒歩15分

・都営地下鉄大江戸線赤羽橋駅下車 徒歩10分

・営団地下鉄日比谷線神谷町駅下車 徒歩8分

・都営地下鉄三田線御成門駅下車 徒歩8分

参 加 費：JSNDI 正会員：5,000円，一般：7,000円，学生会員：1,000円 (消費税込)

申込み先：〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸67 MBR99 4階

(社)日本非破壊検査協会 学術課 セミナー事務局 TEL 03-5821-5105 FAX 03-3863-6524

協 賛：(社)日本機械学会 (社)日本鉄鋼協会 高圧ガス保安協会 (財)電子科学研究所 (社)軽金属学会 (社)電気学会
 (社)日本溶接協会 (社)溶接学会 (社)土木学会 (社)日本高圧力技術協会 (社)日本圧接協会 石油連盟
 (社)軽金属溶接構造協会 (社)日本原子力学会 (社)日本鋼構造協会 (社)日本建築学会 (社)石油学会
 (社)日本非破壊検査工業会 (社)日本金属学会 (財)発電設備技術検査協会 安全工学協会 (社)腐食防食協会
 (社)火力原子力発電技術協会 危険物保安技術協会 (社)日本材料学会 (社)応用物理学会
 (社)ボイラ・クレーン安全協会 (社)日本プラントメンテナンス協会 (順不同，依頼中)