



特集: マグネシウム

マグネシウム合金の溶接・接合

中田 一博*

Weldability of Magnesium Alloys

Kazuhiro Nakata*

1. はじめに

マグネシウム (Mg) 合金の溶接は、基本的にはアルミニウム (Al) 合金と同様に実施できる。したがって、Al 合金用の溶接設備があり、かつ Al 合金の溶接技能者及び溶接技術者がいれば、比較的容易に Mg 合金の溶接が可能である。もちろん、Mg 合金の溶接にはそれ特有の問題点があり、事前に十分に準備をすることが必要である。

2. Mg 合金の一般的性質

Table 1 に Mg の材料特性を Al 及びその他の材料と比較して示す。Mg の特徴は密度が約 1.7 と極めて小さいことである。しかし、構造材料として使用するときにはヤング率が小さいことも考慮しなければならない。低い融点、小さな熱容量 (比熱×密度) および小さな熱伝導度は溶融を容易にする。低い沸点は、溶接時の金属蒸気によるブローホールの発生やヒュームの発生を助長する。小さな表面張力は、溶融部の溶け落ちを助長する。また大きな熱膨張係数は、大きな溶接変形や溶接部の残留応力を発生させる。溶接に際してはこのような Mg の性質と溶接性に及ぼす影響を理解しておく必要がある。

3. Mg 合金の溶接性

3.1 溶接性に及ぼす主要因子

Mg 合金の溶接性は本質的に次の因子で決まる。

(1) マグネシウムの物理的、化学的性質

(a) 酸素との高い親和力

Table 1 Mg, Al 及び Fe の物理的性質の比較

物性値	単位	温度範囲	マグネシウム Mg	アルミニウム Al	鉄 Fe
密度	Mg/m ³	20°C	1.74	2.70	7.87
融点	°C	—	651	660	1536
沸点	°C	—	1107	2056	2735
表面張力	mN/m	融点	559	914	1872
比熱	J/kg·K	20°C	1022	900	444
熱容量	J/m ³ ·K	20°C	1778	2430	3494
熱膨張率	10 ⁻⁶ /K	20-100°C	26.1	23.9	12.2
熱伝導率	W/m·K	20°C	167	238	73.3
電気抵抗率	10 ⁻⁸ Ω·m	20°C	4.2	2.67	10.1
ヤング率	10 ¹¹ Pa	20°C	0.443	0.757	1.90

(b) 低融点及び低沸点

(c) 材料表面の酸化皮膜及び水素化合物皮膜

(2) 合金元素

(a) 凝固温度範囲の広さ

(b) 脆弱な金属間化合物の形成

(3) 合金の製造方法

(a) casting material のガス含有量

溶接法を選択するときには物理的、化学的性質を考慮し、また Mg 合金母材を選ぶときには溶接性に及ぼす合金元素や製造方法の影響を考慮する必要がある。Table 2 は各種 Mg 合金の溶接性の比較を示す¹⁾。主として溶接割れ感受性とさらに溶接継手効率を考慮したものである。亜鉛 (Zn) 添加量の多い ZK60A, ZK51A および ZK61A は溶接性が劣る。また casting material ではさらにブローホールの発生に注意しなければならない。

* 大阪大学接合科学研究所
Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Table 2 各種 Mg 合金の溶接性の比較

製造法	ASTM 合金 (JIS 相当合金)	溶接性
展伸材	AZ10A	A
	AZ31B (MP1, MT1, MB1, MS1)	A
	AZ31C	A
	AZ61A (MT2, MB2, MS2)	B
	AZ80A (MT3, MB3)	B
	M1A	A
	ZE10A	A
	ZK21A (MP7)	B
ZK60A (MB6, MS6)	D	
铸造材	AM100A (MC5)	B ⁺
	AZ63A (MC1)	C
	AZ81A	B ⁺
	AZ91C	B ⁺
	AZ92A (MC3)	B
	EK30A	B
	EK41A	B
	EQ21	B
	EZ33A (MC8)	A
	K1A	A
	QE22A (MC9)	B
	ZE41A (MC10)	B
	WE43	B ⁻
	WE54	B ⁻
	ZC63	B ⁻
	ZK51A (MC6)	D
ZK61A (MC7)	D	

A: 優れる B: 良好 C: 普通 D: 劣る

3.2 溶接性に及ぼす主要合金元素 (Al, Zn) の影響
溶接性に関する Mg 合金の材料物性値に及ぼす Al 及び Zn の効果は同様である。

Fig. 1 は Mg-Al 及び Mg-Zn 2 元系平衡状態図を示

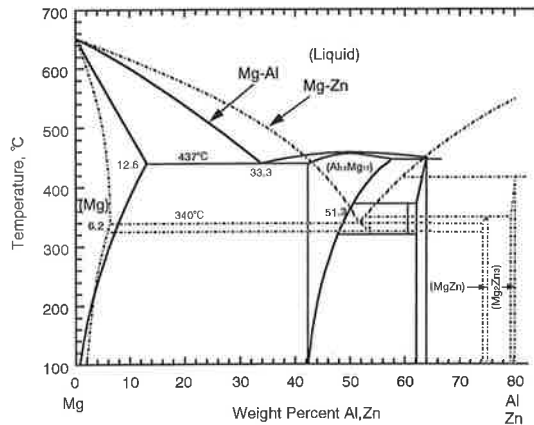


Fig. 1 Mg-Al 及び Mg-Zn 2 元系平衡状態図 (実線: Mg-Al 系, 一点鎖線: Mg-Zn 系)

す2). 平衡凝固では Mg 固溶体中への Al の最大固溶量は 12.6% であり, これより少ない添加量では, 金属間化合物である β 相 ($Mg_{17}Al_{12}$) は晶出しない. しかし, 铸造や溶接では, 凝固時の冷却速度が速いために非平衡凝固となり, 固溶限が約 2% にまで低下する. このため, この程度の少量の Al 量でも, 最後の粒界には β 相 ($Mg_{17}Al_{12}$) が共晶として晶出し, 共晶温度まで凝固温度範囲は拡大する. 図中の一点鎖線は Mg-Zn 2 元系平衡状態図を示す. 最大固溶限は 6.2% と Al の場合よりも少ないために, 非平衡凝固ではより少量の添加量でも共晶が晶出し, かつその温度は約 340°C と Mg-Al 系の場合よりもさらに低下する. Fig. 2 (a) は AZ91D 高圧铸造材の組織例であり, Al 量が約 9% と最大固溶限より少なくても粒界には塊状に β 相が形成している. また溶接金属部の組織 (Fig. 2 (b)) は全体にサイズは小さくなるが同様の形態を示す.

このように合金量の増加は脆い金属間化合物の生成量を増加させ, さらに凝固温度範囲を拡大するために, そ

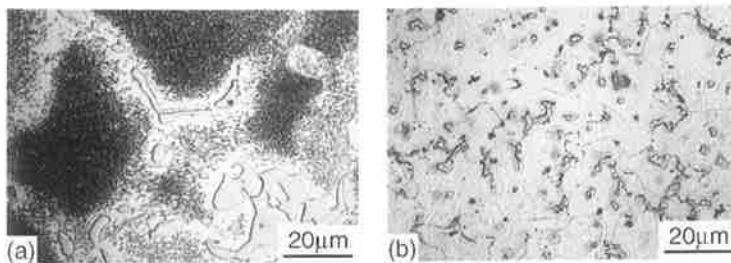


Fig. 2 AZ91D 高圧铸造の組織例
(a) 母材, (b) ティグ溶接金属部 (溶加材無し)

の添加量には制限がある。溶接に適した合金量は Table 3 に示す値が最大値である³⁾。これ以上の合金量の添加は材料を著しく脆くする。また Zn 量の増加は凝固割れ感受性を高める。なお 10% までの Al は溶接部の結晶粒を微細化し、溶接割れ防止に有効である。

3.3 溶加材の選定

溶接に際して溶加材を使用する場合には可能な限り母材と同一組成の溶加材を使用すべきである。しかし、そのような溶加材は必ずしも入手できるものではなく、入手可能な適当な溶加材を使用することになる。Table 4 は市販されている代表的な溶加材とその成分を示す¹⁾。また Table 5 は各種 Mg 合金母材とその溶接に対して推奨される溶加材の組み合わせを示す¹⁾。製造現場での経験に基づく溶加材選定指針は次のとおりである³⁾。

(1) AZ61 溶加材は Al 量 6% までの鋳物材及び展伸材に対して問題なく用いられる。

(2) Al 量 6~10% までの鋳物材では、AZ92 溶加棒が良い。これは溶接中の蒸発による Zn 量の減少を補うために溶加棒中の Zn 量を増加させたものである。AZ101A も使用できる。

(3) Al を含まない Mg-Zn 合金 (ZK41A, EZ33A, K1A, QE22A, EZ41A) では、母材と同等のレアアース量を含む溶加材 EZ33 が推奨される。

(4) Mg-Al-Zn 合金と上記の Al を含まない Mg-Zn 合金グループとの溶接には溶加材として AZ61A もしくは AZ92A が用いられる。

3.4 鋳物材質の影響

押出材や鍛造材などの展伸材についてはその材質が溶接性及ばす影響はほとんどない。しかし鋳物材、特にダイカスト材は製造時の高度な品質管理が要求される。ダイカスト部材はそれぞれ異なる量のガス状欠陥を内包しており、その中には高いガス圧を有しているものもある。これらのガスは溶接に際して溶接部に気孔（ブローホール）を形成する。Fig. 3 はダイカスト部材のミグ溶接部の断面写真であるが、多数の気孔が発生している。溶接部は外観上は一見、健全なように見えても、内部ではこのように多数の気孔を形成し、このため溶接継手の機械的性質は著しく低下する。ガス含有量の少ないダイカスト部材では当然、溶接部の気孔発生量も減少することになる。

4. 溶接法と継手特性

4.1 溶接法

Mg 合金の溶接には、既に述べたように Al 合金に対して適用されているほとんどの溶接・接合法が適用可能

Table 3 溶接可能な Mg 合金の最大許容合金量

合金系	Mg-Al-(Zn)	Mg-Zn
最大許容合金量	Al < 10 mass% Zn < 2 mass%	Zn < 4 mass%

Table 4 市販 Mg 合金溶加材とその成分

溶加材	化学成分 (mass%)				
	Al	Mn	Zn	Zr	Rare earth
AZ61A	5.8-7.2	0.15(min.)	0.40-1.5	—	—
AZ101A	9.5-10.5	0.13(min.)	0.75-1.25	—	—
AZ92A	8.3-9.7	0.15(min.)	1.7-2.3	—	—
EZ33A	—	—	2.0-3.1	0.45-1.0	2.5-4.0

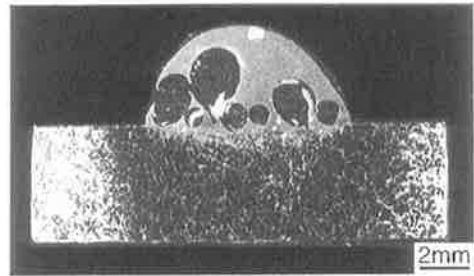


Fig. 3 AZ91D ダイキャスト部材のミグ溶接部の断面写真 (溶加材ワイヤ AZ61)

である。Table 6 は Al 合金の溶接・接合法であるがそのまま Mg 合金に適用できる。

ここでは代表的な熔融溶接法であるアーク溶接及び高エネルギービーム溶接、さらに固相接合として現在特に注目されている摩擦攪拌溶接 (FSW) を取り上げる。

4.2 アーク溶接法

Mg 合金の一般的な溶接法はアーク溶接法である。アーク溶接では熔融金属を大気から保護するために不活性ガスがシールドガスとして用いられる。これには、アルゴン (Ar) やヘリウム (He) 及びこれらの混合ガスが用いられる。窒素ガスや炭酸ガスは熔融 Mg と反応して窒化物や炭化物を形成するため、溶接継手の機械的性質を劣化させる。代表的なアーク溶接法としてティグ溶接とミグ溶接があるが、Mg 合金の溶接にはティグ溶接法がもっぱら用いられている。

4.2.1 ティグ溶接法

ティグ溶接法は Mg 合金の溶接法として最も一般的な

Table 5 各種 Mg 合金母材とその溶接に対して推奨される溶加材の組み合わせ

母材	推奨される溶加材																		
	AM100	AZ100	AZ31, AZ31C	AZ61A	AZ63A	AZ80A	AZ81A	AZ91C	AZ92A	EK41A	EZ33A or HK31A	K1A or HZ32A	LA141A	M1A, MG1	QE22A	ZE10A	ZE41A	ZK21A	ZK51A, ZK60A, ZK61A
AM100	AZ92A, AZ101	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ10A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ31B, AZ31C	AZ92A	AZ61A, AZ92A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ61A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ63A	×	×	×	AZ92A	×	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ80A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ81A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A, AZ101A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ91C	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A	AZ92A, AZ101A	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A	AZ92A	AZ101	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
EK41A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	***	***	***	***	***	***
EZ33A or HK31A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	***	***	***	***	***	***
K1A or HZ32A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	×	AZ92A	×	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	***	***	***	***	***	***
M1A, MG1	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	***	***	***	***	***
ZE41A	—	—	—	×	—	—	—	—	—	EZ33A	EZ33A	EZ33A	—	EZ33A	—	EZ33A	—	—	
ZK21A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	×	AZ61A, AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	***	AZ61A, AZ92A	***	AZ61A, AZ92A	***
ZK51A, ZK60A, ZK61A	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	EZ33

×：溶接不可，—：溶接データ無し

Table 6 Mg合金の溶接・接合法の分類

溶接・接合法	溶融溶接	アーク溶接	ティグ溶接
			ミグ溶接
			プラズマアーク溶接
	抵抗溶接	スポット溶接	
		シーム溶接	
		プロジェクション溶接	
		フラッシュバット溶接	
	高エネルギービーム溶接	電子ビーム溶接	
		レーザービーム溶接	
	拡散接合	摩擦圧接	
固相接合	爆発圧接		
	超音波圧接		
	熱間・冷間圧接		
ろう付け			
接着			
機械的接合 (かしめ, リベット, ボルト)			

溶接法である。溶接電源には市販のインバータ式交直両用溶接機が用いられる。電極極性はAl合金の溶接の場合と同様であり、交流(AC)もしくは直流逆極性(DCEP)が用いられる。この理由は、タングステン電極が正極(+)のとき、すなわち母材Mg合金が負極(-)の時に母材表面に発生する陰極点が母材表面の酸化皮膜を破壊し、蒸発・除去する作用、すなわちクリーニング作用を利用するためである。交流の方が溶け込み深さが大きく、かつ電極消耗が小さいために一般的によく用いられる。電極にはAl合金で一般に使用されている市販タングステン電極が用いられる。

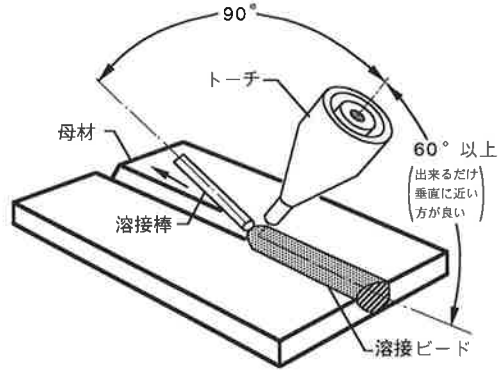


Fig. 4 手動ティグ溶接における溶接トーチと溶接棒の望ましい配置

ティグ溶接は後述するミグ溶接よりも以下の点で優れている。

- (1) Al合金の溶接の手法、溶接経験がそのまま適用できる。
- (2) 溶加棒を使用する場合、もしくは使用しない場合のいずれも溶接可能。
- (3) 電極と溶加棒が別々に独立しているので、安定な溶接が広範囲な溶接条件下で可能。

また、手動ティグ溶接においてはFig. 4に示す配置で溶接することが望ましい¹⁾。Table 7に開先形状と溶接条件例を示す⁴⁾。変形や溶接割れ防止の観点から、母材の拘束、溶接順序、必要であれば予熱(95~150℃)等に留意しなければならない。Table 8は代表的なティグ溶接継手強度を示す¹⁾。一部合金系を除いては継手効率85~100%が得られている。

Table 7 Mg合金のティグ溶接条件例

板厚 (mm)	開先形状	パス数	電流 (A)	アルゴンガス流量 (l/min)	溶加材径 (mm)
1.0		1	35	5.4	2.4
3.4		1	100	5.4	2.4
4.8		1	160	6.8	3.2
6.4		2	175	9.0	3.2
9.5		3	175	9.0	4.0
9.5		2	200	9.0	3.2
12.7		2	250	9.0	3.2

Table 8 合金のティグ溶接継手の継手強度 (室温)

合 金		溶加材	溶接継手強度			継手効率 (%)
			引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	
板 材	AZ31B-O	AZ61A, AZ92A	241~248	117~131	10~11	95~97
	AZ31B-H24	AZ61A, AZ92A	248~255	131~152	5	86~88
	ZE41A-T5	ZE41A	207	138	4	100
	ZH62A-T5	ZH62A	262	172	5	95
押出材	AZ10A-F	AZ61A, AZ92A	221~228	103~124	6~9	91~94
	AZ31B-F	AZ61A, AZ92A	248~255	131~152	5~7	95~97
	AZ61A-F	AZ61A, AZ92A	262~276	145~165	6~7	84~89
	AZ80A-E	AZ61A	248~276	152~179	3~5	74~82
	AZ80A-T5	AZ61A	234~276	165~193	2	62~73
	ZK21A-F	AZ61A, AZ92A	221~234	117	4~5	76~81
鋳造材	AZ63A-T6	AZ61A, AZ92A	214	—	2	77
	AZ81A-T6	AZ101A	234	90	8	85
	AZ91C-T6	AZ101A	241	110	2	87
	AZ92A-T6	AZ92A	241	145	2	87
	ZE33A-T6	EZ33A	145	110	2	100
	K1A-F	EZ33A	169	55	10	100

* 高い数値：余盛付，低い数値：余盛削除

4.2.2 ミグ溶接法

ミグ溶接はAl合金には一般的に使用されているが、Mg合金にはその適用は限定されてきた。Mg合金のミグ溶接の特徴は次の通りである。

- (1) 溶加材 (ワイヤ) を電極 (消耗式) として使用するために、Mg合金に限らず一般的にティグ溶接と比較すると適正溶接条件範囲が狭い。
- (2) 溶融Mgの表面張力が小さいために、電極ワイヤ先端からの溶滴離脱が困難である。さらに溶接電流が高すぎる場合には、ワイヤ先端で溶滴が爆発的に蒸発し、これがスパッタの原因となる。
- (3) 電極ワイヤが軟らかいために、ワイヤ送給性に劣る。プッシュ・プル (Push-Pull) タイプの送給装置が望ましい。

しかし、利点としてティグ溶接と比較すると溶接速度の高速化ができ、全自動溶接では毎分1m程度の高速度溶接が可能である。

ミグ溶接では、アークにより母材開先を溶融し、かつ電極ワイヤはその先端から溶融して直下の溶融池に移行することにより溶接部が形成される。このときの溶滴の移行形態は、Fig. 5に示すように溶加材ワイヤの送給速度と溶接電流によって決まる⁵⁾。もちろんワイヤの径や

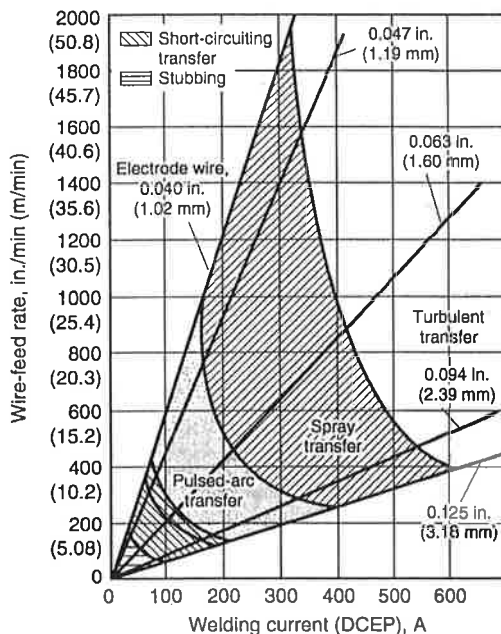


Fig. 5 ミグ溶接における溶滴の移行形態と溶加材ワイヤAZ61Aの送給速度と溶接電流との関係 (LF Lookwood)

物性値に関係することは言うまでもない。Fig. 5はAZ61Aワイヤの各ワイヤ径に対して得られたものである。一般的に、溶滴移行形態は材料に依らず、溶接電流およびワイヤ送給量の増加に伴い、短絡移行、パルス移行、スプレー移行と変化する。なおパルス移行は、溶接電流をパルス化できる溶接電源を用いる必要がある。そうでなければ、この領域はグロービュル移行となり、溶接は不安定で、スパッタも多く発生する。

適正な溶接条件下ではミグ溶接でも良好な溶接継手が得られる。Fig. 6はAZ61ワイヤ（1.2 mm 径）を用いた、板厚1.6 mmのAZ31材のミグ溶接による重ね継手のビード表面外観(a)及びその断面写真(b)であり、パルススプレー移行の条件で溶接したものである。溶接装置はインバータ式定電流溶接装置であり、下向き姿勢で、トーチ前進角6度の全自動溶接である。Arシールドガスを用いて毎分1.5 mの高速溶接が可能である。現状では信頼性の高い溶接用Mg合金電極ワイヤの入手が困難なことが問題である。Table 9にミグ溶接条件例を示す⁴⁾。

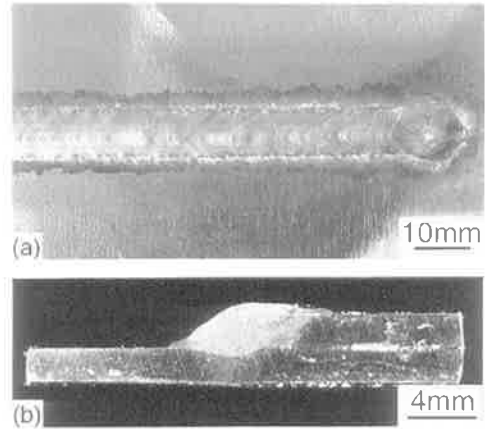


Fig. 6 AZ31材（板厚1.6 mm）のミグ溶接による重ね継手の(a)ビード表面外観及び(b)その断面写真

パルススプレー移行条件，75 A，19 V，1.5 m/min，下向き姿勢，トーチ前進角6度，Ar20 l/min，AZ61ワイヤ（1.2 mm 径）

Table 9 Mg合金のミグ溶接条件例

アーク形態	板厚 (mm)	開先形状	パス数	電極径 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴンガス流量 (l/min)
ショートアーク	0.6		1	1.0	25	13	610~915	18~28
	1.0		1	1.0	40	14		
	1.6		1	1.6	70	14		
	2.3		1	1.6	95	16		
	3.2		1	2.4	115	14		
	4.1		1	2.4	135	15		
	4.8		1	2.4	175	15		
パルスアーク	1.6		1	1.0	50	21	610~915	18~28
	3.2		1	1.6	110	24		
	4.8		1	1.6	175	25		
	6.4		1	2.4	210	29		
スプレーアーク	6.4		1	1.6	240	27	610~915	23~38
	9.5		1	2.4	320~350	24~30		
	12.7		2	2.4	360~400	24~30		
	15.9		2	2.4	370~420	24~30		
	25.4		4	2.4	370~420	24~30		

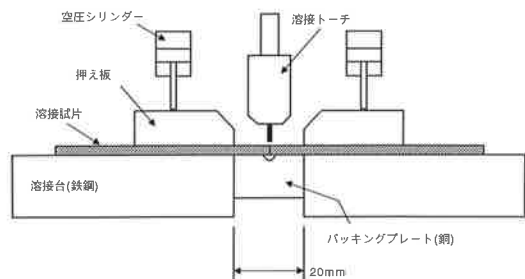


Fig. 7 Mg合金のティグ・ミグ溶接拘束ジグ例

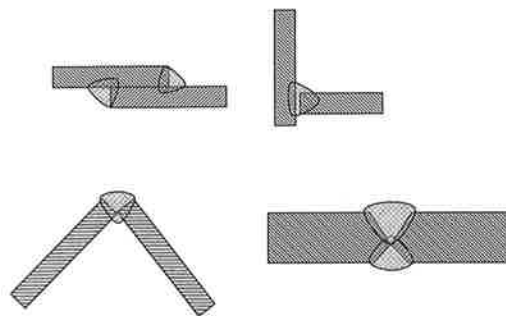


Fig. 8 Mg合金ティグ・ミグ溶接の望ましい継手形状例

4.2.3 溶接施工準備

(1) 溶接試片の拘束法

Mg合金は剛性が小さく(約45 GPa)、かつ熱膨張係数が大きいために、薄板の溶接では溶接に際してかなりの変形が発生する。変形防止のために母材の適切な拘束が必要である。Fig. 7はティグ・ミグ溶接突合せ継手に適した拘束治具を示す³⁾。

拘束のポイントは、以下の通りである。

- (a) 溶接試片は全溶接長にわたって拘束する。
- (b) 可能な限り溶接ビードに近いところを拘束する。
- (c) バックアッププレート(裏当板)を使用する。

(2) 継手設計(継手形状)

Mg合金の溶接では、表面張力の小さい熔融金属が溶接ビードからたれ落ちないように適切な継手形状を選択する必要がある。Fig. 8のような形状が望ましい³⁾。

(3) 溶接試片(母材)の前処理

Mg合金部材の表面は自然もしくは人工的な表面層に覆われているが、これらは溶接性に悪影響をもたらす。例えば、酸化皮膜を除去せずにそのまま溶接するとアークが不安定となり、ビード形状が不ろぞいとなる。

このため溶接前に必ず除去する必要がある。除去すべき表面層には次のようなものがある。

- (a) 酸化皮膜・水素化物皮膜
- (b) 油・離型剤(製造工程で使用されたもの)
- (c) クロメート膜(耐食保護膜としてコーティングされたもの)

また、これら表面皮膜のクリーニング法は次の通りである。

- (a) 機械的ブラッシング(ステンレス鋼製ワイヤブラシ)
- (b) 化学的洗浄(アルカリ洗浄剤、例えば磷酸ナトリウム・炭酸ナトリウム・活性剤水溶液)
- (c) 酸洗(クロム酸、弗酸、硝酸など)
- (4) 予熱及び溶接後熱処理

溶接後の溶接部の凝固収縮や熱収縮による収縮応力及び部材の大きな熱変形は、特に鋳物やダイキャスト材では溶接部近傍での割れ発生の原因となる。割れを防止するために部材の予熱が有効である。厚板で拘束が小さい場合には予熱は不要であるが(必要な場合は局所加熱)、薄板で、拘束が大きい場合には溶接割れ防止のために予熱を行うことが望ましく、特にZn量の多い材料では必要である。予熱温度は合金や拘束の程度により適当な値が選ばれるが、Al量が6%以上、Zn量が1%以上の合金では最高予熱温度は380~400°C(溶体化温度)である。

溶接ビード部は凝固組織を呈するが、この機械的性質を改善するために溶接後に部材の溶体化処理と析出時効処理が行われる。次の場合にはこのような溶接後熱処理を行うことが望ましい。すなわち、

- (a) 高い機械的応力を受ける鋳物の場合。
- (b) Al量が6%以上、Zn量が2%以上の合金。

例えばAZ91材では溶体化処理(415°C×30 min) + 時効処理(215°C×4 h or 170°C×16 h)である。

また、Al量が1.5%以上の合金では、使用環境によっては応力腐食割れが発生する危険がある。これを防止するためには、溶接後に完全焼鈍処理(溶体化処理)を行うか、もしくは応力除去焼鈍処理を行う。Table 10に応力除去焼鈍条件を示す⁴⁾。

なお熱処理に当たっては、火災の発生に十分注意する必要がある、以下の準備が必要である。

- (a) SF₆やCO₂ガス雰囲気炉
- (b) 正確な温度管理
- (c) 溶接試片表面に付着した油、粉末、バリ等の除去
- (5) 安全性

Mgは融点が低いので火災が起きやすいと思われているが、溶接が原因で引き起こされる火災はまれである。これは金属が燃える前に固体Mgの一部の溶融が起こる

Table 10 Mg合金の溶接後熱処理条件 (応力除去)

	合金	溶接後熱処理条件	
		温度, °C	時間
圧延材	AZ31B-O	260	15 min
	AZ31B-H24	150	1 h
	ZE10A-O	230	30 min
	ZE10A-H24	135	1 h
押出材	AZ10A-F	260	15 min
	AZ31B-F	260	15 min
	AZ61A-F	260	15 min
	AZ80A-F	260	15 min
	AZ80A-T5	205	1 h
鋳造材	AM100A	260	1 h
	AZ63A	260	1 h
	AZ81A	260	1 h
	AZ91C	260	1 h
	AZ92A	260	1 h
	EZ33	330	2-4 h
	EQ21	505	1 h
	QE22	505	1 h
	ZE41	330	2-4 h
	ZC63	425	1 h
WE43	510	1 h	
WE54	510	1 h	

注：AZ31, 61, 80の圧延及び押出材では応力腐食割れ防止のために実施

からである。しかし、切り粉、チップ等の非常に細かいMgが過熱されると火災の原因になる恐れがある。溶接に際してはしばしば高温のスパッタが飛散するので、溶接現場には一般の可燃物を含めて、これらの微粉末は絶対に置かないようにする必要がある。

4.3 高エネルギービーム溶接法

4.3.1 電子ビーム溶接

低入熱で、溶接ビード幅及び熱影響部が狭く、かつ深い溶け込みが得られるのが特徴であるが、高真空の溶接室で行う必要があり、また装置も高価である。鋳物材は溶融部からのガスの突出により溶接不可能である。応用例はほとんどなく、AZ31展伸材へ適用した研究例⁶⁾があり、溶接性は良好であった。

4.3.2 レーザ溶接

レーザー溶接も電子ビーム溶接と同様に低入熱で、溶接ビード幅及び熱影響部が狭く、かつ深い溶け込みが得られるのが特徴である。レーザー溶接装置は電子ビーム溶接と同様に高価であるが、基本的に異なる点は、レーザー溶

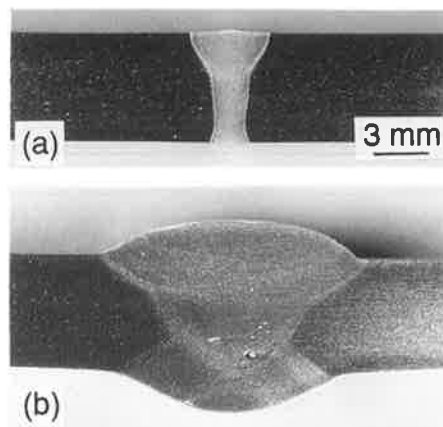


Fig. 9 炭酸ガスレーザー溶接部(a)とティグ溶接部(b)の溶け込み形状の違い, AZ31, 板厚 6 mm

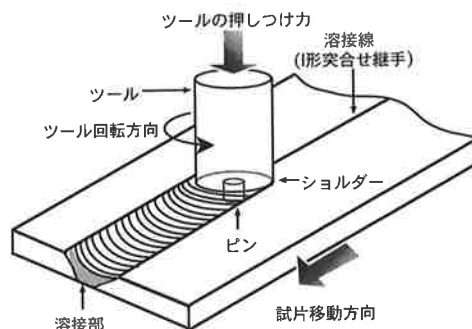


Fig. 10 FSWの原理図

接はアーク溶接と同じように大気中で行える特徴を有することである。またMg合金はAl合金に比してレーザービームの吸収特性が優れており、比較的低出力のレーザービームで溶接が可能である。このため、まだ実用例は無いが、基礎研究が進められている^{7)~9)}。Fig. 9はAZ31展伸材のCO₂レーザー溶接部断面をティグ溶接部と比較して示す⁷⁾。レーザー溶接では1パスで良好な裏波溶接部が得られており、Al合金では発生しやすいブローホールは認められなかった。また、YAGレーザー溶接によるAZ91Dチクソモールド材薄板(1及び2mm)の突合せ溶接では、鋳物材であるためにブローホールは発生するが、毎分9mの高速度溶接が可能である⁹⁾。

4.4 摩擦攪拌溶接 (FSW)

Fig. 10にその原理を示す¹⁰⁾。高速回転しているピンを突合せた2枚の板の突合せ部表面に押しつけると、摩擦熱によりピンに接触している部分の温度が上昇し、

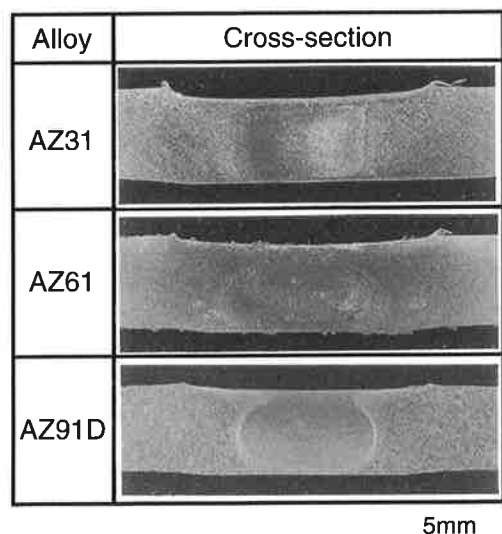


Fig. 11 AZ31及びAZ61押出材, およびAZ91D鋳物材のFSW継手断面組織

ちょうど水あめのように塑性流動を起し2枚の板が混ざり合う。このときピン(もしくは板)を突合せ部に沿って移動することにより連続した接合が可能となる。接合部の温度は固相線温度以下であり、このため溶融溶接が困難な割れ感受性の高い材料や鋳物, ダイキャスト材でも溶接が可能となる。また加熱温度が低いために溶接変形や残留応力は小さくなる。すでにAl合金では, 鉄道車両, 船舶, ロケット等の構造材の溶接に実用化されている。Mg合金への適用も期待されている^{11)~13)}。

Fig. 11はAZ31及びAZ61押出材, 及びAZ91D鋳物材のFSW継手の断面組織を示す。溶接欠陥の無い健全な継手が得られる¹¹⁾。接合部はマクロ的には玉ねぎを輪切りにしたような特徴的な模様が見られるが, ミクロ的には微細な再結晶粒から成る。引張試験ではいずれも母材部から破断し, 継手効率はほぼ100%であった。また, AZ91Dチクソモールド材薄板(板厚2mm)の突合せ継手も同様に可能であった¹³⁾。

5. まとめ

Mg合金の溶融溶接に際しての注意点をまとめると次のようになる¹⁾。

- (1) 不活性ガスによる溶融金属の完全なシールド
- (2) 変形を防止するためのクランプ(拘束)システム
- (3) 溶融金属を保持するためのバックング(裏当て板)システム
- (4) 開先の前処理
- (5) 溶接電流制御タイプの溶接電源
- (6) 鉄鋼やAl合金の溶接の場合よりも, より高度な安全システム
- (7) 溶接ヒュームを排除するための強力な排気システム

またMg合金の溶接に関する総合技術解説書¹⁴⁾および最近の解説¹⁵⁾を挙げておくのでご参照願いたい。

最後に, 以下の多数の文献を引用させて頂いたことに対して深謝致します。

参考文献

- 1) ASM Special Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International, 1999.
- 2) Massalski: Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Ed, ASM International, (1990)
- 3) Juttner: Arc Welding of Magnesium Alloys, Seminar of IIW on Trends in Welding of Lightweight Automotive and Railroad Vehicles, 1997, Feb, Wels, Austria
- 4) 軽金属溶接構造協会: アルミニウム及びマグネシウム合金鋳物の溶接, (1986)
- 5) L. F. Lookwood: Pulsed-Arc Welding of Magnesium, Welding J, 49 (1970), June, 464-475.
- 6) 朝比奈敏勝, 時末 光: 軽金属, 50 (2000), 10, 512-517
- 7) 中田一博: マグネシウム合金のレーザー溶接性, レーザ熱加工研究会論文集, 34 (1995), 141-145
- 8) D. Brungs: New Developments in Magnesium Production Technology, Proc of Magnesium Technology 2000, TMS, (2000), 389-393.
- 9) 中田一博, 牛尾誠夫: マグネシウム合金鋳物薄板のレーザー溶接性, 溶接学会春期全国大会講演概要集, 66 (2000) 150-151.
- 10) C. J. Dawes: Welding and Metal Fabrication, 1995, Jan., 13-16.
- 11) 中田一博, 他: AZ系マグネシウム合金の摩擦攪拌溶接性, 溶接学会秋季全国大会講演概要集, 67 (2000) 66-67.
- 12) T. Nagasawa, M. Otsuka, T. Yokota, T. Ueki: Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31, Proc. of Magnesium Technology 2000, TMS, (2000), 383-387.
- 13) 中田一博, 他: AZ91D マグネシウム合金チクソモールド薄板の摩擦攪拌溶接性, 軽金属, 51 (2001), 528-533.
- 14) Dow Magnesium Company: Joining Magnesium, 1990
- 15) 時末 光: マグネシウム合金の接合, 溶接技術, 49 (2001), 58-64