

マグネシウム合金の溶接

第3回
アーク溶接編中田 一博
大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

Mg合金の材料特性については連載講座第1回のレーザ溶接編¹⁾で一部述べたが、ここではAl合金と比較しながら、Mg合金のアーク溶接の特徴について、その課題などについて述べる。

2 Mg合金のアーク溶接に際しての課題

2.1 Mg合金の物理的および化学的性質の影響

Mg合金の物理的及び化学的性質が溶接性に及ぼす影響を取りまとめると次のようになる。

(1) 酸化しやすい

MgはAlよりも酸化しやすい。このために溶融池や溶加材の表面を酸化から防止するために不活性ガス (Ar, He) によるシールドが必要である。しかし、Mg合金板の表面酸化皮膜はAlの酸化皮膜のように緻密ではなく、保護性に劣るために耐食・耐候性はAlに比して格段に劣ることになる。

(2) 固相-液相間で大きな水素溶解度差がある

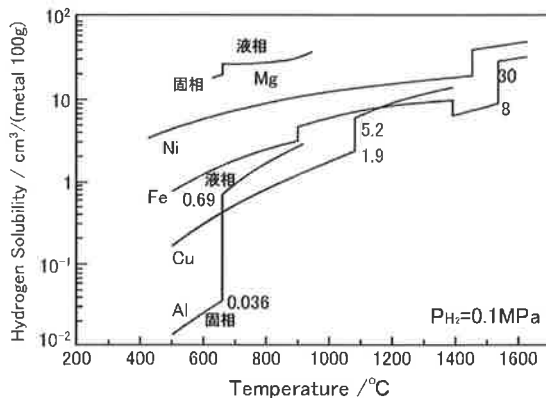


図1 Mgおよび代表的な金属の水素溶解度とその温度変化

図1は代表的な金属の水素溶解度の温度変化を示す。Alでは融点における固相-液相間で大きな溶解度差があり、これが溶接部のブローホール形成の主要な原因である。MgはAlに比して水素溶解度は固相、液相のいずれにおいても著しく大きい、Alと同様に固相-液相間で大きな水素溶解度差があり、溶接部においてブローホールが形成しやすい原因となっている。

また、Mg合金の自然酸化皮膜は水酸化皮膜の形態をとるために、アーク溶接に際しては板材や開先表面の皮膜を事前に除去する必要がある。これを怠ると、アークプラズマで皮膜中のH₂Oが分解して水素が発生し、これが溶融池内に吸収され、凝固時に溶接ビード部にブローホールを形成する原因となる。

(3) 沸点が低い

Mgの融点は651°CとAlの660°Cと同等に低い、沸点が約1,107°Cと極めて低いのが特徴であり、溶接時にMg蒸気によるヒュームやスマットが発生しやすく、とくにミグ溶接で著しい。

(4) 熱容量が小さく、電気抵抗率が大きい

Alと比較すると熱伝導度はAlの約70%と小さく、かつ、電気抵抗率はAlの約1.6倍と大きいためにミグ溶接においては溶接ワイヤの溶融速度はAl合金ワイヤよりもかなり大きくなる。

また、熱容量 (比熱×密度) が小さいために溶けやすく、かつ表面張力が小さいために溶融部の溶け落ちが発生しやすい。

(5) 熱膨張係数が大きい

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。

2.2 主要合金元素 (Al, Zn) の影響

Mg合金の主要な合金元素はAlとZnであり、いずれも固溶体形成による合金の強度増加を目的として添加される。図2はMg-AlおよびMg-Zn 2元系平衡状態図を示

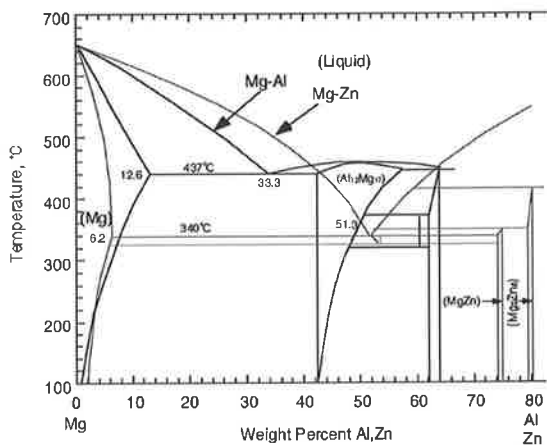


図2 Mg-AlおよびMg-Zn2元系平衡状態図

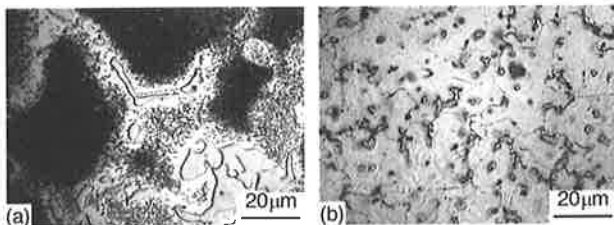


図3 Mg合金AZ91Dダイカスト材のミクロ組織：(a) ダイカスト材, (b) 溶接金属部

す^{2),3)}。いずれもMg側では固溶体と金属間化合物との2元共晶反応を示す。

Mg-Al系では、Mg固溶体中へのAlの最大固溶量は12.6%であり、これより多い添加量では金属間化合物であるβ相(Mg₁₇Al₁₂)を晶出する。しかし、鋳造や溶接では、凝固時の冷却速度が速いために非平衡凝固となり、固溶限が低下する。このため、最大固溶限以下のAl量でも、最後に凝固する結晶粒界にはβ相が共晶として晶出し、凝固温度範囲の下限温度は共晶温度まで低下する。一方、Mg-Zn系では図中の一点鎖線で示すように最大固溶限は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、その共晶温度は約340℃とMg-Al系の場合よりもさらに低下し、凝固温度範囲は著しく大きくなる。このためMg-Zn系合金はMg-Al系合金に比して溶接凝固割れが発生しやすい傾向にある。

図3 (a) はAZ91Dダイカスト材の組織例であり、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(図3 (b))は全体にサイズは小さくなるが同様の形態を示す³⁾。このようにAl量の増加は脆い金属間化合物であるβ相の生成量を増加させるために、実用的には10%が上限である。またZn量の増加は凝固温度範囲を著しく拡大し、凝固割れ感受性を高めるために4%が上限であ

表1 Mg合金の溶接性

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
	鋳 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

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といわれている。

表1は各種Mg合金の溶接性の比較を示す⁴⁾。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。Zn添加量の多いZK51A, ZK60AおよびZK61Aは溶接割れが発生しやすいために溶接性が劣るとされている。

2.3 板材の製造方法の影響

鋳物材やダイカスト材は一般にガス状欠陥(ポロシティ)を内包しており、とくにダイカスト材ではポロシティ内で高いガス圧を有しているものがある。これらのガスは主に水素ガスであり、溶融溶接に際して溶接部に気孔(ブローホール)を形成する。図4 (a), (b) および (c) はそれぞれAZ91Dダイキャスト材のティグ溶接部の表面外観、X線透過写真および断面ミクロ写真である。(b)より多数の気孔が発生しており、その部分では母材から溶融池内へのガスの突出により溶接アークが乱れて多量のスマットが同時に発生したことが(a)より分かる。また溶接部内部では溶融境界部に沿って気孔が発生しており、母材内部の内包ガスが原因であることを示している。このような多数の気孔の形成は溶接継

手の機械的性質は著しく低下させる。

これに対して押出材や鍛造材などの展伸材についてはこのようなガス状欠陥の問題はない。しかし、稠密六方晶構造に特有の(0001)面の集合組織を発達しやすく、機械的性質に異方性を有していることが多いので注意する必要がある。

3 溶加材の選定

アーク溶接に際して溶加材を使用する場合には可能な

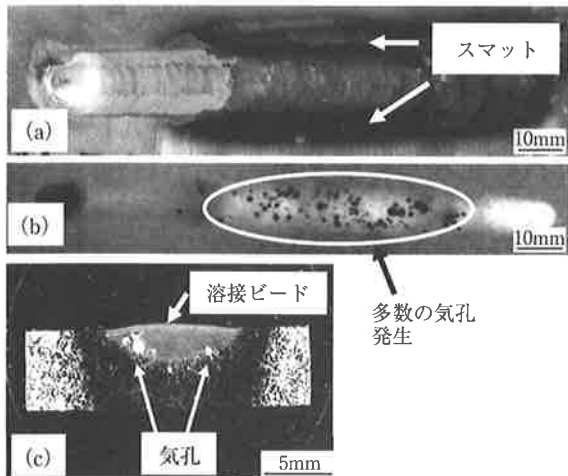


図4 Mg合金AZ91Dダイカスト材の (a) ティグ溶接部外観, (b) X線透過写真, (c) 溶接部断面マクロ写真

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。表2は代表的な溶加材とその成分を示す⁴⁾。

最近になって表3に示すミグ溶接用のAZ31, AZ61およびAM50相当合金の溶接ワイヤが市販されるようになった⁵⁾。

各種Mg合金母材の溶接に対して推奨される溶加材の組み合わせは表4のようになり、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⁴⁾。

表2 Mg合金の代表的な溶加材とその組成

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

表3 市販のMg合金溶接ワイヤとその成分

Wire diameter : 1.2mm

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.

表4 Mg合金の母材と溶加材の推奨される組み合わせ

母材	AM100	AZ10A	AZ31, AZ31C	AZ61A	AZ80A	AZ91C	AZ92A	EK41A	EZ33A or HK31A	K1A or HZ32A	M1A, MG1	ZE41A	ZK21A	ZK51A, ZK60A, ZK61A
AM100	AZ92A, AZ101	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ10A	AZ92A	AZ61A, AZ32A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ31B, AZ31C	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ61A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ80A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	...	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ91C	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A, AZ101A	...	...	...	...	...	...	...	...
AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ101	...	...	...	...	...	...	...
AZ41A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	...	...	...	...	...	...
EZ33A or HK31A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	...	...	...	...	...
K1A or HZ32A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	EZ33A	EZ33A	EZ33A	...	...	...	...
M1A, MG1	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	...	...	...
ZE41A	—	—	—	—	—	—	—	EZ33A	EZ33A	EZ33A	—	EZ33A	...	...
ZK21A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	AZ92A	AZ61A, AZ92A	...
ZK51A, ZK60A, ZK61A	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	EZ33

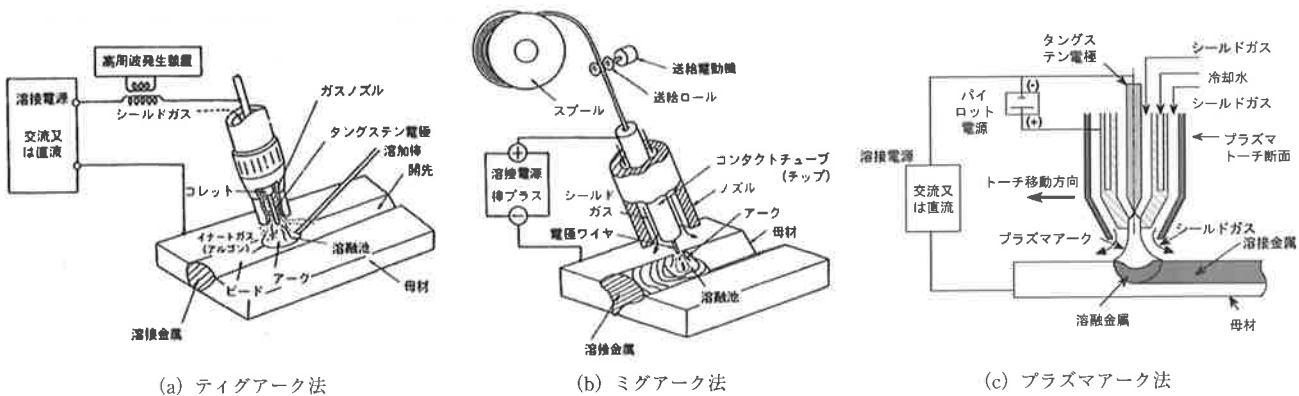


図5 各種アーク溶接法の模式図

- ① AZ61溶加材はAl量6%までの鋳物材およ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。

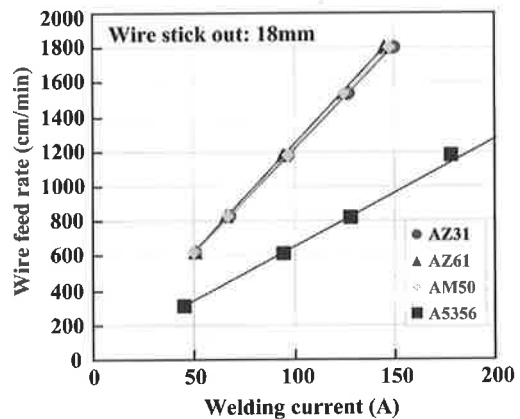


図6 Mg合金の溶接ワイヤAZ31, AZ61およびAM50と、Al合金ワイヤA5356との溶融速度の比較

4 アーク溶接法

Mg合金の溶接法としてはアーク溶接法が一般的に用いられている。アーク溶接では溶融池や溶加材の溶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) およびこれらの混合ガスが用いられる。代表的なアーク溶接法として図5に示すティグ溶接、ミグ溶接およびプラズマ溶接があるが、Mg合金の溶接にはティグ溶接法が一般的に用いられている。

(1) ティグ溶接法

ティグ溶接法はMg合金の溶接法として、とくに手溶接法として一般的に適用されている溶接法である。タングステン電極の極性はAl合金の溶接の場合と同様であり、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に、母材が陰極となる直流逆極性 (DCEP)、もしくは交流 (AC) が用いられる。交流の方が溶込み深さが大きく、かつ、電極消耗が小さいために一般的に用いられている。

Mg合金は熱容量が小さいために溶加材 (ワイヤや棒) が溶けやすいことと、さらに、溶融金属の表面張力が小さいために余盛が盛り上がりず溶接ビードが垂れ下がる傾向にあり、手動送りでは溶融池への溶加材供給量が過剰になり勝ちであり、注意が必要である。

極性比率EN/EPを変えることができるインバータ制御方式の交流電源を用いて、クリーニング作用が確保できる範囲でEN/EP比率を大きくすることが、アークの集中性や溶込み深さの確保、溶落ちの抑制などの観点からより効果的であり、かつ、パルス電流を用いることにより溶加材の添加が容易となる。

溶接変形や溶接凝固割れ防止の観点から、母材の拘束や溶接順序に留意するとともに、鋳物材では溶接部の急激な収縮応力によって母材に割れが発生する恐れがある場合には必要に応じて予熱 (95~150℃) を施す必要がある⁴⁾。

(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合金にはこれまでその適用は限定されてきた。しかし最近、信頼性の高い溶接用Mg合金溶接ワイヤとイン

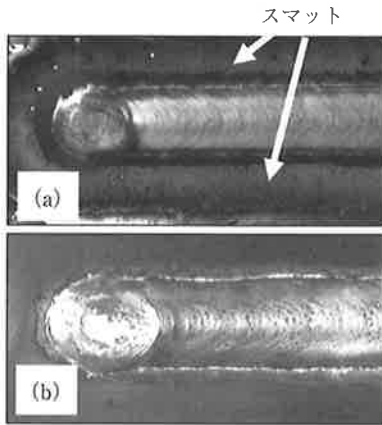


図7 Mg合金ミグ溶接部外観：(a) 溶接のまま、溶接ビード周囲表面のスマツ、(b) 布によりふき取った後

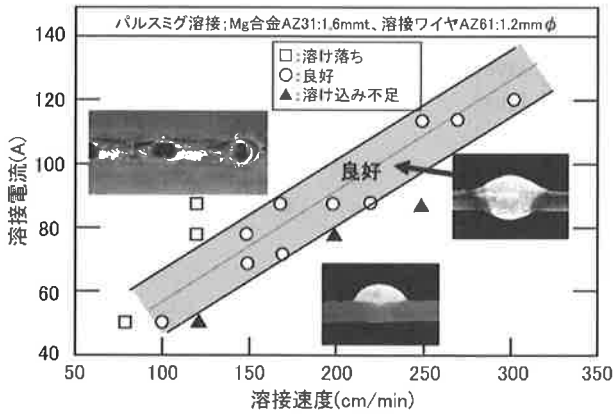


図8 Mg合金AZ31薄板のパルスミグ溶接による適正溶接条件範囲

バータ式パルスミグ溶接機の発展で安定したミグ溶接が可能となっている^{5),6)}。

Mg合金のミグ溶接の特徴の一つとして図6に示すようにMg合金溶接ワイヤの溶融速度がAl合金溶接ワイヤと比較して著しく大きく、約2倍の溶融速度を有していることが挙げられる⁵⁾。さらに溶融Mgの表面張力が小さいために、溶接ビードの溶落ちが発生しやすくなる。

また、溶融Mgの表面張力が小さいために、溶接ワイヤ先端からの安定した溶滴離脱が困難であり、Mgの沸点が低いことと相まって、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、ヒュームおよびスマツの原因となる。図7はミグ溶接部表面の外観写真を示す⁵⁾。(a)は溶接のままの状態であり、溶接ビードの周囲に黒いスス状のスマツが多量に堆積している。しかしこれらは溶接後に布等で軽く拭くことで(b)に示すように簡単に除去できる。パルス条件の最適化によりこれらの低減を図り、例えば図8に示すように薄板の高速溶接が可能となっている⁶⁾。

また、ワイヤ溶融速度が大きいことは溶着量を容易に

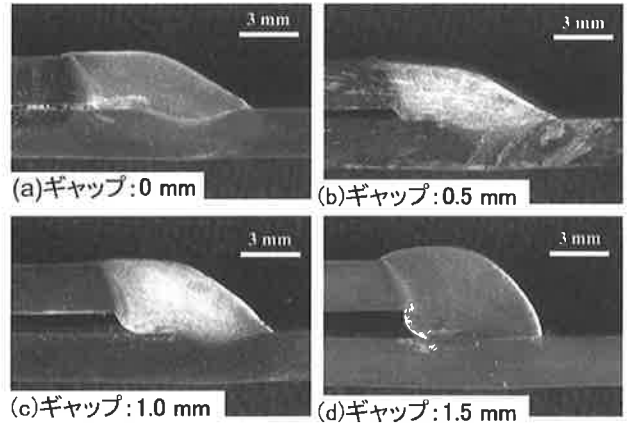


図9 Mg合金のミグ溶接重ね継手断面組織：継手ギャップ裕度

増加できることになり、図9に示すように重ね継手溶接ではギャップ裕度の拡大につながる⁵⁾。

(3) プラズマ溶接

Mg合金に対するプラズマ溶接の適用例は見あたらないが、ティグ溶接を考慮すれば、Al合金と同様に実施可能と考えられる。

5 溶接施工準備

ここではMg合金のアーク溶接に際してのとくに注意すべき事項を述べる。

(1) 溶接試片（母材）の前処理

Mg合金部材の表面は自然酸化皮膜もしくは人工的な表面処理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。すでに述べたように、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、ビード形状が不規則となったり、ブローホール形成の原因となる。このため溶接前に必ずこれらの表面層を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。

- ① 酸化皮膜・水素化物皮膜
- ② 油・離型剤（製造工程で使用されたもの）
- ③ クロメート膜（耐食保護膜として被覆されたもの）

また、これら表面皮膜の除去法は次の通りである。

- ① 機械的ブラッシング（ステンレス鋼製ワイヤブラシ）
- ② 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）
- ③ 酸洗（クロム酸、弗酸、硝酸など）

(2) 溶接試片の拘束

Mg合金は剛性が小さく（約45GPa）、かつ、熱膨張係数が大きいために、薄板の溶接では溶接変形が発生しや

すく、変形防止のために以下のような母材の適切な拘束が必要である。

- ① 溶接試片は全溶接長にわたって拘束する。
- ② 可能な限り溶接ビードに近いところを拘束する。
- ③ バッキングプレート（裏当板）を使用する。

(3) 安全性

Mgは融点が高いので発火して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。しかし、切り粉、チップ等の非常に細かいMg片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Mg合金の粉末やチップ等は放置してはならない。

なお、予熱等の熱処理に当たっては、以下の準備を行い、火災の発生に十分注意する必要がある。

- ① SF₆やCO₂ガス雰囲気炉
- ② 正確な温度管理

- ③ 溶接試片表面に付着した油、粉末、バリ等の除去

6 おわりに

Mg合金を軽量構造用材料として普及するためにはもっとも一般的なアーク溶接技術の確立が求められる。

参考文献

- 1) 中田一博：連載講座：マグネシウム合金の溶接，第1回レーザ溶接編，溶接技術，60（2012），No.1，121-126.
- 2) Massalski：Binary Alloy Phase Diagrams，2nd Edi，ASM International，（1990）.
- 3) 中田：マグネシウム合金の溶接・接合，軽金属溶接，39（2001），No.12,582-591.
- 4) ASM Special Handbook：Magnesium and Magnesium Alloys，ASM International，（1999），106-126.
- 5) 上山，中田：マグネシウム合金のパルスミグ溶接，軽金属溶接，42-5（2004），203-213.
- 6) 藤江，全，村上，中田：AZ31マグネシウム合金薄板のパルスミグアーク溶接による溶接継手の形成，軽金属溶接，42-5（2004），221-228.

定評ある産報出版の事典・用語集

国際的に通用する
溶接・接合用語を集成



溶接学会 編
A 5判・362頁
定価3,150円（税込み）

重要語句 860項目を
厳選解説



溶接学会 編
A 5判・192頁
定価2,940円（税込み）

溶接・接合用語
4035項目を解説



応和俊雄・浜崎正信 著
B6判・832頁
定価6,627円（税込み）

溶射に関わる基本用語
229語を詳述



日本溶射協会 編
A 5判・128頁
定価3,059円（税込み）

申込み先

産報出版株式会社

（ホームページ）
<http://www.sanpo-pub.co.jp>

- 東京本社／〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町1-11
TEL 03-3258-6411 FAX 03-3258-6430
- 関西支社／〒556-0016 大阪市浪速区元町2-8-9
TEL 06-6633-0720 FAX 06-6633-0840
（最寄りの書店にない場合は、お取り寄せもできます。送料は一律400円です）