

マグネシウム合金の材料特性と溶接プロセス

第1回

中田 一博

大阪大学接合科学研究所

1 はじめに

地球温暖化防止のためにCO₂排出規制が必須となっており、あらゆる産業機器で省エネルギーがキーワードとなっている。とくに多量の化石燃料を使用する自動車、船舶、航空機、鉄道車両などの輸送機器の軽量化は焦眉の急である。このため軽量化材料としてアルミニウム (Al) 合金およびマグネシウム (Mg) 合金が注目されており、Al合金に関してはすでにその適用が積極的に進められている。

一方、Mg合金はAl合金よりも軽くて比強度が大きく、優れた振動減衰性を有しており、次世代軽量化材料として注目されている。実用的にはこれまでは電子機器製品の筐体、電動工具や、自動車部品でもトランスミッションハウジング、ペダルブラケット、オイルパン、シートフレーム、ステアリングホイールなどのダイカスト製品でかつニアネットシェイプ製品に限定されており、展伸材の需要は極めて少なく、このため溶接の必要性もほとんどなかった。

しかし、自動車部品を中心に、例えばドアパネルなどの形状が複雑な製品への適用開始にともない、複数部材の組み立てのために溶接技術が不可欠となってきており、形状・合金の異なるダイカスト材同士やまた押出材との溶接、あるいはAl合金等との異材溶接技術が必要とされてきている。

Mg合金の溶接はまだ十分には確立されていないが、基本的にはAl合金と同様に実施可能である。すなわち、Al合金用の溶接設備があり、かつAl合金の溶接技能者および溶接技術者がいれば、比較的容易にMg合金の溶接ができる。もちろん、Mg合金の溶接には特有の問題があり、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

表1にMgの材料特性をAlおよび鉄と比較して示す。

表1 マグネシウムの材料特性

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℃	1.74	2.70	7.87
融点	℃	-	651	660	1536
沸点	℃	-	1107	2056	2735
表面張力	mN/m	融点	559	914	1872
比熱	J/kg·K	20℃	1022	900	444
熱容量	J/m ³ ·K	20℃	1778	2430	3494
熱膨張率	10 ⁻⁶ /K	20-100℃	26.1	23.9	12.2
熱伝導率	W/m·K	20℃	167	238	73.3
電気抵抗率	10 ⁻⁸ Ω·m	20℃	4.2	2.67	10.1
ヤング率	10 ¹¹ Pa	20℃	0.443	0.757	1.90

Mgの特徴は密度が約1.7とAlの約64%であり、きわめて小さく、比強度が高いことである。一方、ヤング率は小さい。

Mgの実用構造材としての適用を遅らせている原因は、材料コストが高いことの外に、その性質上の弱点として結晶構造が六方晶構造のために冷間における塑性加工が困難なことが上げられる。

さらに、酸化物を形成しやすいにもかかわらず酸化皮膜がAlの場合におけるように緻密ではなく、このため耐食耐候性はAlに比して格段に劣ることである。

その他の性質をAlと比較すると以下ようになる。すなわち、融点は651℃とAlと同等に低いが、沸点が約1,107℃ときわめて低いのが特徴であり、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。Alと比較すると熱伝導率はAlの約70%と小さく、かつ電気抵抗率はAlの約1.6倍と大きいために抵抗スポット溶接はAlよりも容易である。また、熱容量 (比熱×密度) も小さいために一般に熔融が容易であるが、表面張力が小さいために熔融部の溶落ちが発生しやすい。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

表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
鑄造材	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

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

- ① 酸素との高い親和力
- ② 低融点及び低沸点
- ③ 材料表面の酸化皮膜及び水素化合物皮膜

(2) 合金元素

- ① 凝固温度範囲の広さ
- ② 脆弱な金属間化合物の形成

(3) 合金の製造方法

- ① 鑄造材におけるガス含有量

溶接法を選択するときにはこのような物理的、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。表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ZK51A, ZK60AおよびZK61Aは溶接割れが発生し易いために溶接性が劣る。また、鑄造材ではこれ以外にブローホールの発生に注意しなければならない。

3.2 溶接性に及ぼす主要合金元素 (Al, Zn) の影響

図1はMg-AlおよびMg-Zn2元系平衡状態図を示す²⁾。平衡凝固ではMg固溶体中へのAlの最大固溶量は12.7%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 (Mg₁₇Al₁₂) は晶出しない。しかし、鑄造や溶接では、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-Zn2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℃とMg-Al系の場合よりもさらに低下する。

図2 (次ページ) (a) はAZ91D高圧鑄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 (図2 (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いちじるしく拡

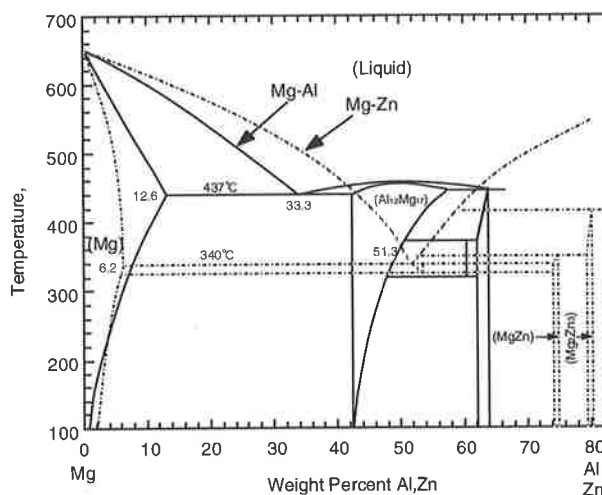


図1 Mg-AlおよびMg-Zn2元系平衡状態図 (実線: Mg-Al, 一点鎖線: Mg-Zn)

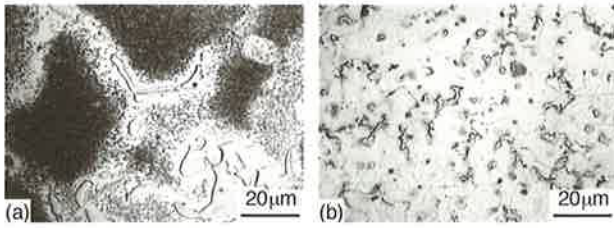


図2 AZ91D高圧鋳造材の組織例
(a) 母材、(b) ティグ溶接金属部（溶加材無し）

大し、凝固割れ感受性を高めるために4%が上限である。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。表3は代表的な溶加材とその成分を示す¹⁾。最近になってミグ溶接用のAZ31、AZ61及びAM50相当合金の溶加材ワイヤが市販されるようになった⁴⁾。

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⁵⁾。

表3 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

- ①AZ61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。
- ②Al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。
- ③Al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。
- ④Mg-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。

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に及ぼす影響はほとんどない。しかし、鋳物材、とくにダイカスト材は製造時の高度な品質管理が要求され

表4 推奨される溶加材/Mg合金の組合せ例

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	...	...	...	...	...	...	...
EK41A	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	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	EZ33

x: 溶接不可, -: 溶接データ無し

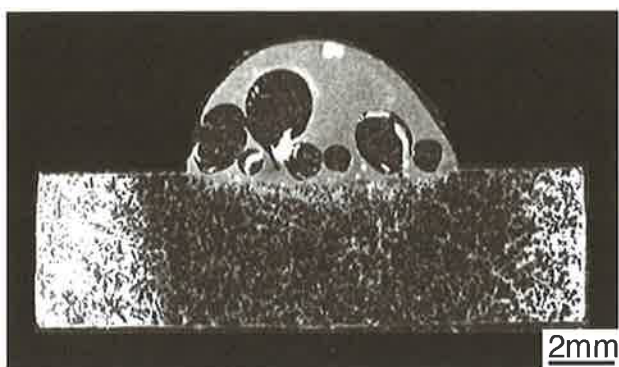


図3 AZ91Dダイキャスト部材のミグ溶接部の断面写真 (溶加材ワイヤAZ61)

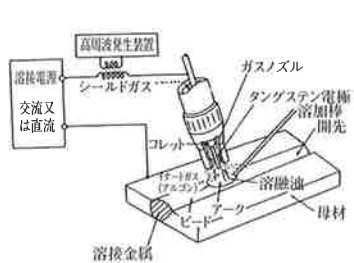
る。ダイキャスト材は一般にガス状欠陥を内包しており、その中には高いガス圧を有しているものもある。

これらのガスは主に水素ガスであり、ダイキャスト材の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3はダイキャスト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キャスト材では当然、溶接部の気孔発生量も減少することになるが、ガス量と溶接部のブローホールの発生傾向に対する詳細なデータはまだ無い。

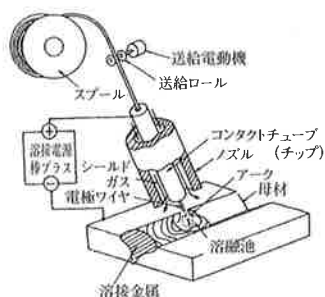
4 溶接法

4.1 Mg合金に適用可能な溶接法の分類

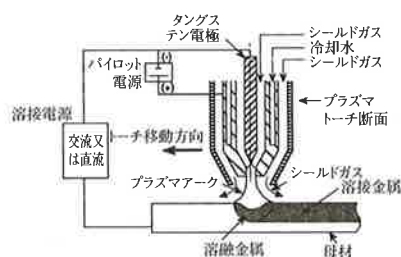
表5はMg合金の溶接に適用可能な溶接・接合法を示す。溶融溶接、固相接合、ろう付、接着、機械的接合の各方法が適用できる。しかし、実用例が少なく、またその溶接・接合部の信頼性評価は必ずしも十分に行われているわけではない。ここでは各溶接法について簡単に紹介する。



(a) ティグアーク法



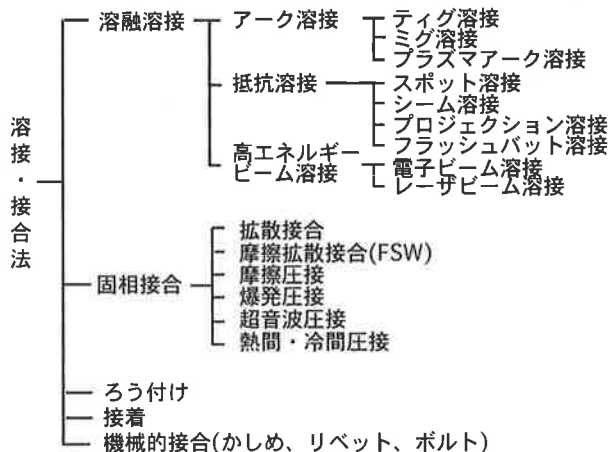
(b) ミグアーク法



(c) プラズマアーク法

図4 代表的なアーク溶接法模式図

表5 Mg合金の溶接・接合法の分類



4.2 溶融溶接法

4.2.1 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。窒素ガスや炭酸ガスは溶融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図4に示すティグ溶接、ミグ溶接及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な溶接法である。タングステン電極極性は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交流 (AC) もしくは直流逆極性 (DCEP) 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よく用いられる。変形や溶接割れ防止の観点から、母材

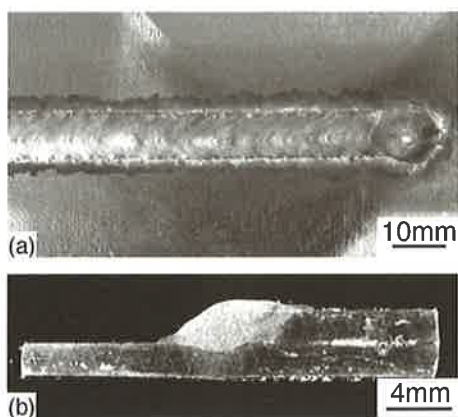


図5 AZ31材(板厚1.6mm)のパルスミグ溶接による重ね継手のビード表面外観(a)およびその断面写真(b); 溶接条件, 75A, 19V, 1.5m/min, 下向き姿勢, Ar20l/min, AZ61ワイヤ(1.2mm径)

の拘束, 溶接順序, また鋳物材などでは必要に応じて予熱(95~150℃)等に留意する必要がある。

(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合金電極ワイヤとイン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^{4), 6)}。熔融Mgの表面張力が小さいために, 電極ワイヤ先端からの安定した溶滴離脱が困難であり, 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, これがスパッタやヒュームの原因となる。これに対してパルス条件の最適化によりこれらの低減を図り, 例えば薄板の高速度溶接が可能となっている^{4), 6)}。

図5はAZ61ワイヤ(1.2mm径)を用いた板厚1.6mmのAZ31材のミグ溶接による重ね継手のビード表面外観(a)およびその断面写真(b)であり, Arシールドガスを用いて毎分1.5mの高速度溶接が可能である⁶⁾。

(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。

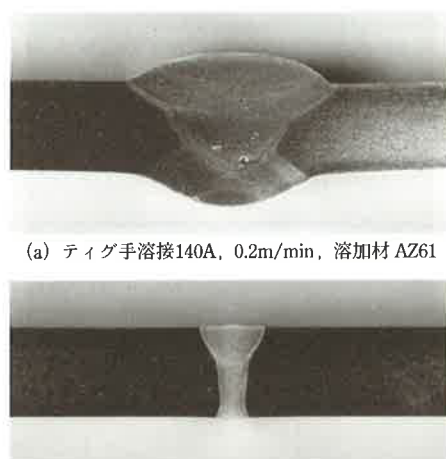
(4) アークスタッド溶接

細径棒を板の上に垂直に固定する方法として, Al合金の場合と同様に溶接可能であるが, 報告例は少ない⁷⁾。

4.2.2 高エネルギービーム溶接法

(1) 電子ビーム溶接

低入熱で, 溶接ビード幅および熱影響部が狭く, かつ深い溶込みが得られるのが特徴であるが, 高真空の溶接室中で行う必要があり, また装置も高価である。鋳物材



(a) ティグ手溶接140A, 0.2m/min, 溶加材 AZ61
(b) CO₂レーザー溶接, 3.5kW, 2m/min, 溶加材無し
図6 ティグ溶接部(a)と炭酸ガスレーザー溶接部(b)の溶込み形状の違い; AZ31押出材, 6mm

は熔融部からのガスの突出により溶接不可能である。わが国での応用例はほとんどないが, AZ31展伸材への適用研究では溶接性は良好とされている⁸⁾。

(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, 溶接ビード幅および熱影響部が狭く, かつ深い溶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, レーザ溶接はアーク溶接と同じように大気中で行えることである。

また, Mg合金はAl合金に比してレーザーエネルギー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^{9)~14)}。

図6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⁹⁾。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および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^{11), 14)}。

4.2.3 抵抗溶接

すでに述べたように, Mg合金は電気抵抗が大きいためにAl合金の場合のような大容量の電源は必要ではなく, 比較的容易に抵抗スポット溶接やシーム溶接が可能である^{1), 15)}。図7(次ページ)は抵抗スポット溶接部の継手断面組織例を示す¹⁵⁾。

4.3 固相接合

4.3.1 摩擦攪拌溶接(FSW)

図8(次ページ)にFSWの原理を示す^{16), 17)}。高速回

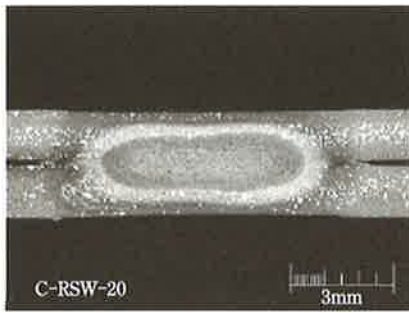


図7 抵抗スポット溶接部断面組織；AZ91チクソモールド薄板（1.5mmt）、加圧力4.0kN、溶接時間6サイクル、溶接電流19.7kA、ダウンスロープあり

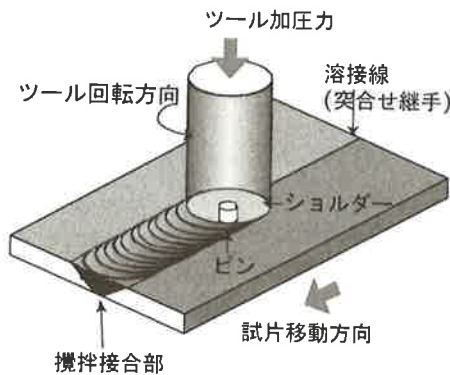


図8 FSWの原理図

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、ちょうど水あめのように塑性流動を起こし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、このため熔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^{18)~23)}。

図9はAZ91D鋳物材のFSW継手の断面組織(a)を示す¹⁸⁾。溶接欠陥の無い健全な継手を得られる。攪拌接合部(d)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。この部分(d)はミクロ的には微細な再結晶粒から成り、母材の粗大な凝固組織(b)は消滅する。このため引張強度、伸びおよび衝撃値はいずれも母材よりも向上する。したがって継手引張試験ではいずれも母材（熱影響部）部から破断し、継手効率は母材相当を示す。

また、AZ31、AZ61、ZK60などの展伸材や、鋳造材で

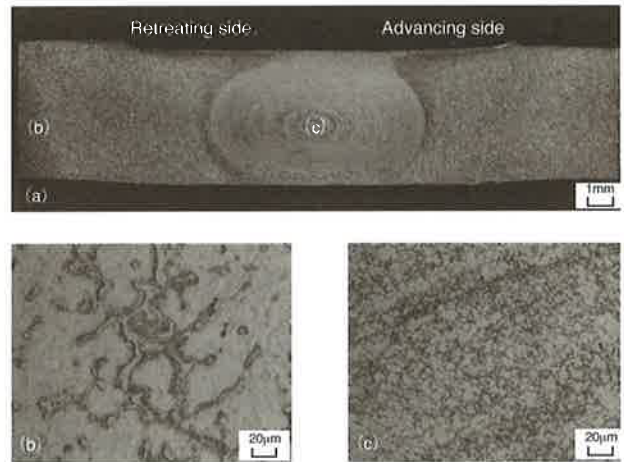


図9 AZ91D鋳物材のFSW継手断面マクロ組織(a)と各部のミクロ組織；(b)母材、(c)攪拌接合部

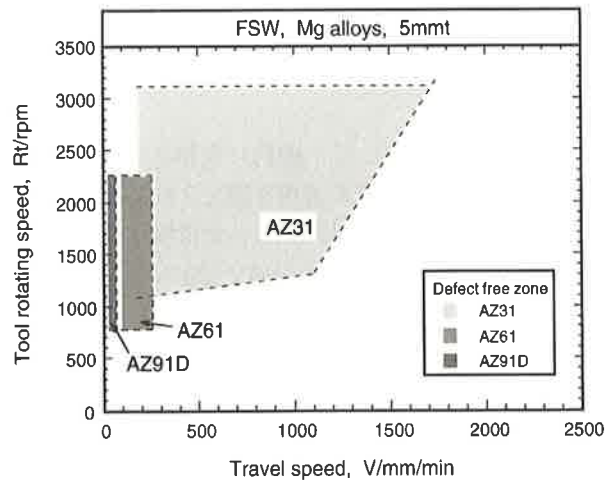


図10 AZ系Mg合金のFSW適正条件範囲

あるAZ91Dチクソモールド材薄板（板厚2mm）²⁰⁾、AM60ダイキャスト材²²⁾などの突合せ継手も同様に可能である。図10²³⁾はAZ系合金の適正FSW条件範囲を示す。これより高溶接速度もしくは低回転速度では空洞状の欠陥が発生する。塑性変形が容易な合金ほど適正条件範囲は広がる。

4.3.2 摩擦圧接

棒材どうしの突合せ継手に適しており、AZ31合金を中心に研究が行われており、良好な継手を得られている^{24)~27)}。

4.4 ろう付

Mg合金のろう付はトーチ、炉内および浸漬法のいずれの方法でも可能であり、Mg合金の融点に応じてろう付温度の異なるろう材（表6¹⁾（次ページ）が使用される。BMg-1とAZ125Aは酸化防止のために8~10ppmの

表6 Mg合金用ろう材 (AWS/ASME)

ろう材	合金成分	ろう付温度
BMg-1	AZ92A相当, Be添加	605~615°C
AZ125A	AZ125A, Be添加	580~595°C
GA432	43%Mg, 55%Zn, 2%Al, Be無添加	495~505°C

Beが添加されている。なお、ZK60Aに対してはGA432が用いられる。

また、新しいろう材の開発も進められている²⁸⁾。母材表面の前処理（アルカリ洗浄など）と適当なフラックス（塩化物系）の使用が不可欠である。

4.5 機械的かしめ

リベット接合が一般的であり、リベット材には5056や6061などのAl合金が用いられる¹⁾。異材接合時の電食防止のために相手材表面の絶縁材コーティングや継手部を湿気や水分から守るためのシーリングが不可欠である。

5 溶接施工準備

ここでは一般的なアーク溶接際しての注意事項を述べる。

(1) 溶接試片の拘束法

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、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バックングプレート（裏当板）を使用する。

(2) 継手設計（継手形状）

Mg合金の溶融金属の表面張力が小さいために（表1）溶接ビード部から溶融金属が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。

(3) 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。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、ビード形状が不ぞろいとなったり、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）

表7 Mg合金の溶接後熱処理条件（80～95%の応力除去）

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

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

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、例えばリン酸ナトリウム・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）

(4) 予熱および溶接後熱処理

溶接後の溶接部の凝固収縮や熱収縮による収縮応力および部材の大きな熱変形は、とくに鑄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、とくに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×30min)＋時効処理(215°C×4h or 170°C×16h)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。表7(前ページ)に応力除去焼鈍条件を示す¹⁾。

なお、熱処理に当たっては、以下の準備行い、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
- (5) 安全性

マグネシウム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。しかし、切り粉、チップ等の非常に細かいマグネシウム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、これらの粉末、チップ等は放置してはならない。

6 まとめ

Mg合金の構造用材料としての普及のためには溶接・接合技術を含めて解決しなければならない幾つかの障壁があるが、拙稿が少しでも読者の方々のお役に立てれば幸いである。なお、Mg合金の溶接に関する総合技術解説書^{29), 30)}および最近の解説³¹⁾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) 中田: マグネシウム合金の溶接・接合, 軽金属溶接, 39-12 (2001), 582-591.
- 4) 上山, 中田: マグネシウム合金のバルスミグ溶接, 軽金属溶接, 42-5 (2004), 203-213.
- 5) Juttner: Arc Welding of Magnesium Alloys, Seminar of IIW on Trends in Welding of Lightweight Automotive and Railroad Vehicles, 1997, Feb, Wels, Austria.
- 5) L. F. Lookwood: Pulsed-Arc Welding of Magnesium, Welding J., 49 (1970), June, 464-475.
- 6) 藤江, 全, 村上, 中田: AZ31マグネシウム合金薄板のバ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.
- 7) 平石, 渡辺, 高野: AZ31Bマグネシウム合金のスタッド溶接におけるアーク発生時間及び雰囲気と接合強さ, 軽金属, 52-8 (2002), 359-364.
- 8) 朝比奈敏勝, 時末光: 軽金属, 50 (2000), 10, 512-517.
- 9) 中田: マグネシウム合金のレーザ溶接性, レーザ熱加工研究会論文集, 34 (1995), 141-145.
- 10) D. Brungs: New Developments in Magnesium Production Technology, Proc. of Magnesium Technology 2000, TMS, (2000), 389-393.
- 11) 中田, 牛尾: マグネシウム合金鋳物薄板のレーザ溶接性, 溶接学会春期全国大会講演概要集, 66 (2000) 150-151.
- 12) 平賀, 井上, 鎌土, 小島: Mg合金薄板のレーザ溶接におけるレーザ波長とシールドガスの影響, 溶接学会論文集, 19-4 (2001), 591.
- 13) 平賀: マグネシウム合金のレーザ溶接特性, レーザ加工学会誌, 9-3 (2002), 241-245.
- 14) 中田: 製造法の異なる二, 三のMg合金のレーザ溶接, レーザシンポジウム, LMP研究委員会(溶接協会), (2004.1).
- 15) J. E. Gould, W. Chuko: Proc. of Sheet Metal Welding Conference XI, AWS, Sterling Heights, MI, USA, (May 2004), Paper1-4.
- 16) W. M. Thomas et al: International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978. 8, 6 Dec. 1991.
- 17) C. J. Dawes and M. W. Thomas: Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, Welding Journal, 75-3, (1996), 41-45.
- 18) 中田, 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.
- 19) T. Nagasawa et al: Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31, Proc. of Magnesium Technology 2000, TMS, (2000), 383-387.
- 20) 中田, 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, 51-10 (2001), 528-533.
- 21) S. H. C. Park, Y. S. Sato, H. Kokawa: Texture Effects on Tensile Properties in Friction Stir Weld of a Magnesium Alloy AZ31, Proc. of 4th FSW Symp., Park City, Utah, May 2003 (CD-R).
- 22) N. Li et al: Friction Stir Welding of Magnesium AM60 Alloy, Magnesium Technology 2004, TMS, (2004), 19-23.
- 23) K. Nakata, Y. G. Kim, M. Ushio: Friction Stir Welding of Mg-Al-Zn alloys, Trans. JWRI, 31-2 (2002), 141-146.
- 24) 加藤, 時末: 軽金属溶接, 32 (1994), 12.
- 25) 朝比奈, 加藤, 時末: 軽金属, 44 (1994), 147.
- 26) 朝比奈, 加藤, 時末: 軽金属, 45 (1995), 453.
- 27) 福本, 他: 軽金属, 51 (2001), 563.
- 28) 渡辺, 他: 溶接学会論文集, 22-1 (2004), 163-167.
- 29) 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).
- 30) Dow Magnesium Company: Joining Magnesium, 1990.
- 31) 時末: マグネシウム合金の接合, 溶接技術, 49 (2001), 58-64.