

マグネシウム合金の溶接

第1回
レーザ溶接編中田 一博
大阪大学 接合科学研究所

1 はじめに

マグネシウム (Mg) 合金は実用金属中でもっとも軽量であり、かつ、高い比剛性、電磁波遮蔽性、熱伝導性、リサイクル性などの利点を持っているため、光学機器、コンピュータ、音響機器などの筐体材料等に適用されている。また、軽量化による燃費向上・省エネルギーのために自動車産業では構造・部品材料等に適用されており、ヨーロッパではダイキャスト材やチクソモールディング材などの casting 法による薄板成型材も効果的に適用されている。このように Mg 合金は構造材料として様々な用途が可能である。

しかし、現状では Mg 合金の使用頻度は決して高くない。その主な原因の1つとして、材料コストが高いことや耐食性が劣ることなどとともに、構造材料への適用に必要な不可欠な溶接・接合法が確立されていないことが挙げられる。

これまで Mg 合金の大きな需要が我が国にはなかったこともあり、その溶接・接合技術に関する詳細な検討はほとんど行われてこなかった。このために Mg 合金は基本的に Al 合金と同様の溶接法が適用可能とされている¹⁾にもかかわらず、現在実用的に用いられている溶接

法のほとんどはティグアーク溶接法である。

本報では、高効率溶接法として特に注目されているレーザ溶接を Mg 合金押出材やチクソモールディング材に適用した検討例^{2)~4)}を紹介する。

2 Mg合金の一般的性質と溶接性

2.1 一般的性質

表1にMgの材料特性をAlおよびFe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際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気孔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。

また、図1はレーザ波長と金属のレーザ吸収特性を示すが、Mgのレーザ吸収率はAlよりもかなり大きい⁵⁾。Mg合金の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。

表1 各種金属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

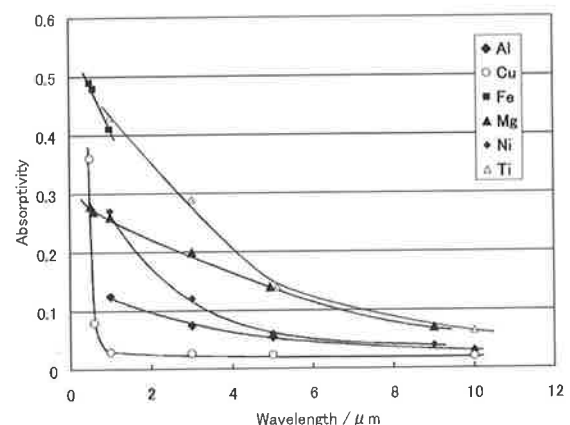


図1 金属のレーザ吸収特性

2.2 溶接性

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
 - (b) 低融点および低沸点
 - (c) 材料表面の酸化皮膜および水素化合物皮膜
- (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) 鋳造材でのガス含有量

したがって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。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ZK60A, ZK51AおよびZK61Aは溶接性が劣る。また鋳造材ではさらに気孔の発生に注意しなければならない。

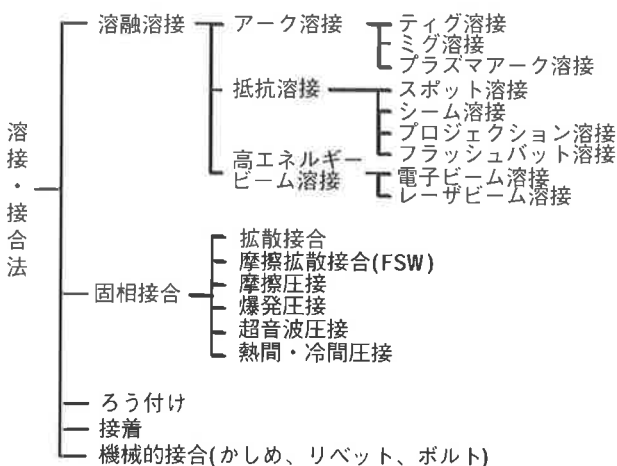
3 レーザ溶接

3.1 溶接法

Mg合金の溶接には、表2に示すようにほとんどの溶接・接合法が適用可能である。ここではレーザー溶接法を取り上げる。

Mg合金はAl合金に比してレーザー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。

表2 Mg合金の溶接・接合法の分類



3.2 純MgおよびAZ31展伸材のCO₂レーザー溶接例²⁾

Al合金のレーザー溶接性はこれまでの多くの研究により明らかにされてきているが、Mg合金に対する研究例は少ない。ここでは、表3に示す工業用純Mg (F材) およびMg合金AZ31B (F材) のCO₂レーザー溶接性をAl合金5083 (O材) と比較した結果を示す。なお、いずれも板厚6mmの押出材である。

レーザー溶接はCW CO₂レーザーにより、放物面鏡 (焦点距離254mm) を用いて、Arガスセンターシールド (流量30 l/min) で行った。溶接に先立ち、試片表面をエメリー紙#1000で研磨後アセトン脱脂を行った。溶接条件は焦点位置を試片表面に固定し、レーザー出力1.5~5kW、溶接速度1~15mの範囲で変化させた。適正条件で突合せ溶接を行い、継手強度をティグ溶接継手と比較した。

図2および図3はビード断面形状とビード表面・裏面外観ならびに溶込み特性に及ぼすレーザー出力の影響を示す。溶接ビードが形成可能な最小レーザー出力は純Mgの2.5kWに対してAZ31Bでは2.0kWと低下し、いずれも

表3 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
	鋳造材	AM100A (MC5)
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

AZ31B Mg alloy, 6mmt		
CO ₂ Laser, 2m/min, Ddf=±0mm, Ar 30l/min		
Laser power	Cross-sectional macrostructure	Top surface
		Back surface
1.5kW		
2.0kW		
2.5kW		
3.0kW		
4.0kW		

図2 ビード外観および溶込み形状に及ぼすレーザー出力の影響

Al-Mg合金5083の3.0kWよりも低い。また、レーザー出力3~4kWでは安定なキーホール溶接が可能であり、5083で見られた激しいスパッタやヒュームの発生は見られなかった。また、同一条件で比較した場合、Mg合金の方が溶込み深さが大きく、かつビード幅も小さい傾向にある。

Al合金5083ではビード部に多数の気孔が発生する傾向にあるが、Mg合金ではほとんど認められなかった。また、溶接割れはAZ31Bのクレータ部と溶接ビード幅が極端に広い場合に発生したが、良好な裏波溶接ビード部では認められなかった。

図4は、AZ31Bの突合せ溶接部の断面組織をティグアーク溶接部と比較して示す。ティグアーク溶接は共金溶加材を使用して両面各一層溶接を行った。開先形状はI形突合としたが、2層目溶接は十分に裏はつりを行った後に実施した。溶接条件は140A, 0.2m/min, Ar10l/minである。1パス裏波溶接は溶落ちのため不可能で

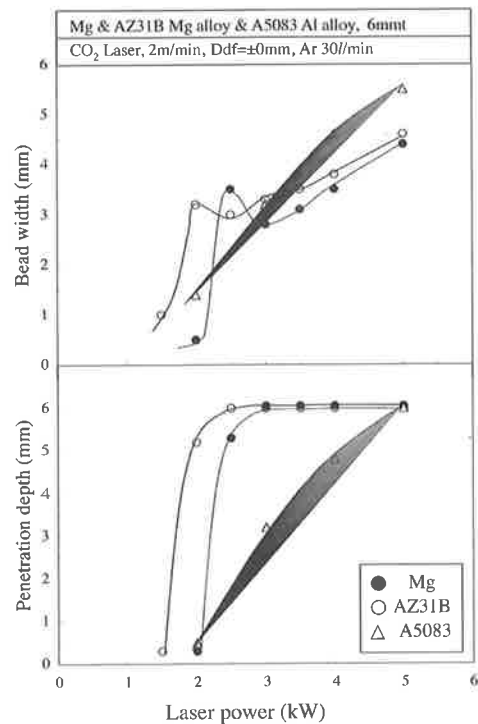
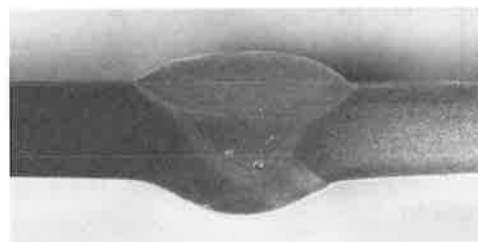
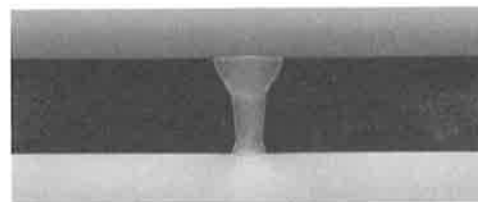


図3 溶込み特性に及ぼすレーザー出力の影響



(a) GTAW :140A, 0.2 m/min, with AZ61 filler wire



(b) LBW :CO₂ Laser, 3.5kW, 2 m/min, without filler wire

Base metal : AZ31, Extruded plate, 6mmt

図4 CO₂レーザー溶接部 (a) とティグ溶接部 (b) の溶込み形状の違い

あった。これに対してレーザー溶接では溶加材を用いずに、3.5kW, 2m/minの溶接条件で1パス裏波溶接が可能であった。また、ティグアーク溶接部では一部で気孔の発生が認められたが、レーザー溶接部では認められなかった。表4は継手引張試験結果をまとめて示す。レーザー溶接部では継手効率100%を示し、伸びも母材の約90%であり、いずれもティグアーク溶接部よりも良好であっ

表4 AZ31Mg合金のCO₂レーザおよびティグ溶接継手の引張特性の比較

Welded joint	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Bead width (mm)	Welding speed (m/min)	No. of pass
Base metal	248	18.3	-	-	-
LBW	248	16.5	3	2	1
GTAW	222	10.6	15	0.2	2

表5 AZ91Dチクソモールディング材の化学成分

Alloy	Chemical composition (mass%)							
	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	ppm Be
AZ91D	8.9	0.78	0.25	0.02	0.002	0.002	0.001	8

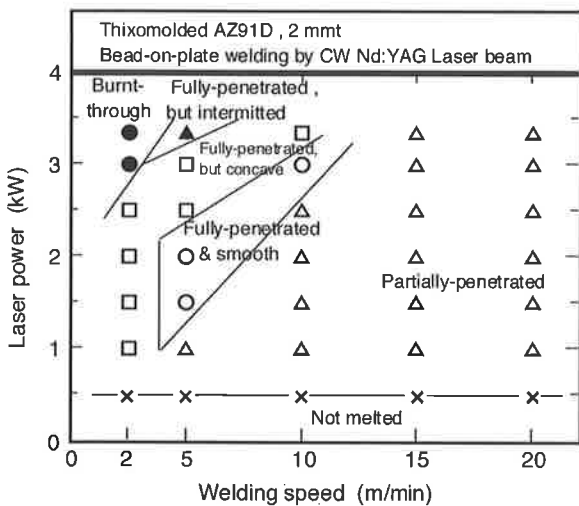


図6 ビード形成に及ぼす溶接速度およびレーザ出力の影響 (2 mm板厚材)

た。

このように純MgおよびMg合金AZ31B押出材ではCO₂レーザ溶接により安定でスムーズな裏波ビード形成が可能であり、溶接継手部の機械的性質も良好な結果が得られた。

3.3 AZ91Dチクソモールディング材のYAGレーザ溶接例^{3)~4)}

表5に示す板厚1 mmおよび2 mm、幅100 mm、長さ150 mmの市販のMg合金AZ91Dのチクソモールディング材薄板を使用した。チクソモールディング法とは射出成型機を用いて、溶融金属を高圧で精密な型に注入して、薄板の複雑形状の成型構造部材を作る casting 法の一つであり、この方法で作られたものがチクソモールディング材と呼ばれる。

最大出力4 kWのレーザ溶接装置 (MW4000, 住友重機械・ルモニクス製) を用い、ファイバー径0.6 mm、焦点位置: 試片表面、シールドガス: Ar 30 L/min、パッ

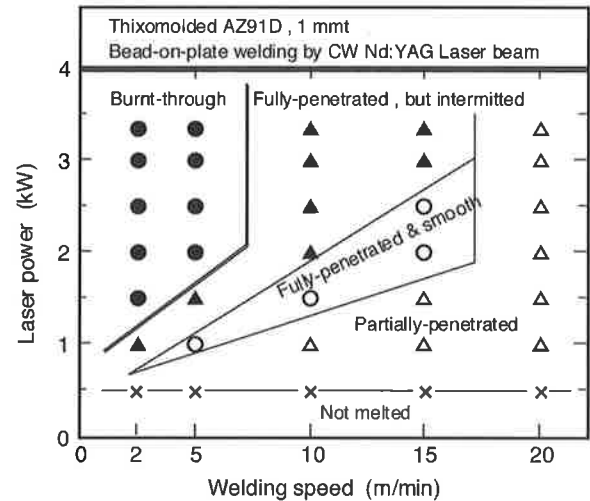


図5 ビード形成に及ぼす溶接速度およびレーザ出力の影響 (1 mm板厚材)

Designation	Surface appearance	Cross-section
Not melted		
Partially penetrated		
Fully penetrated & smooth		
Fully penetrated, But intermitted		
Burn-through		

図7 代表的なビード溶接部外観

クシールド: Ar 20 L/minとしてビード溶接および突合せ溶接を行った。開先はI型突合せとし、開先面は機械加工を行い、溶接直前にワイヤブラッシング、アセトン脱脂を行った。

図5および図6に板厚1 mmおよび2 mm材について、ビードオンプレート溶接によりレーザ出力および溶接速度を広範囲に変化させたときの溶接ビード形成条件を示す。また図7は得られた代表的なビード形態を示す。

ビード表面が滑らかな裏なみビードは溶接速度5～15m/minで得られたが、その適正条件範囲は狭い。ビード溶接で得られたデータを参考にしてI型突合せ溶接を行ったが、溶加材を使用しなかったために適正条件はビード溶接のときよりも制限された。適正条件では、スパッタも無く、安定な溶接が可能であった。

図8および図9に板厚1mmおよび2mm材について、それぞれ溶接速度3水準（5, 7, 9 m/minおよび2, 5, 9 m/min）における突合せ溶接部のX線透過写真を示

す。母材部には気孔は認められないが、溶接ビード内にはいずれの条件でも多数の小さな気孔が認められた。またこれらの気孔は溶融境界部に沿って形成される傾向にあった。一般に、鋳造材の溶接に際しては、母材に内包されたガス成分に起因する気孔が溶接ビード部に発生し易い。またこのような場合には、気孔は主として溶融境界部に沿って発生することが知られており、チクソモールディング材でも同様の傾向にある。

図10は溶接ビード中の気孔内の残留ガス分析（真空中

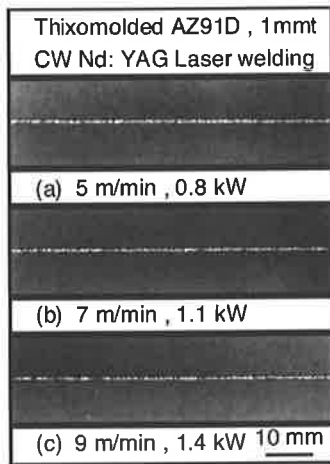


図8 突合せ溶接部のX線透過写真（1mm板厚材）

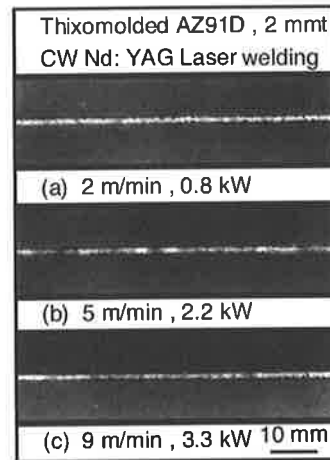


図9 突合せ溶接部のX線透過写真（2mm板厚材）

Nd:YAG Laser Welds
Thixomolded AZ91D, 2mmt

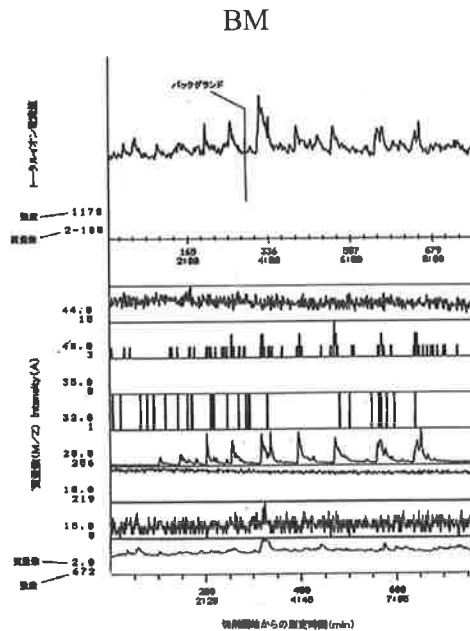
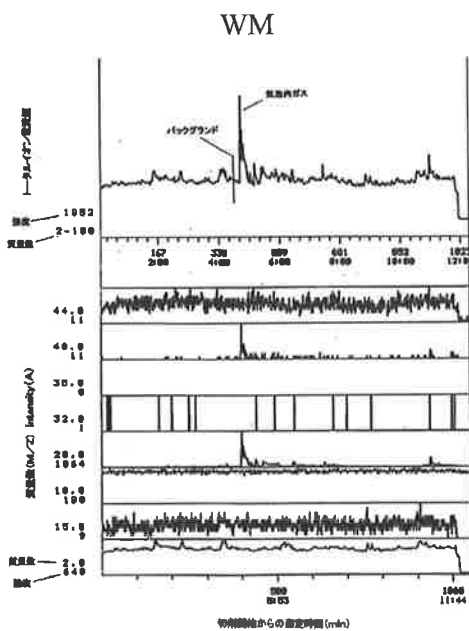


図10 母材および溶接部気孔内残留ガス分析結果例（2m板厚材）

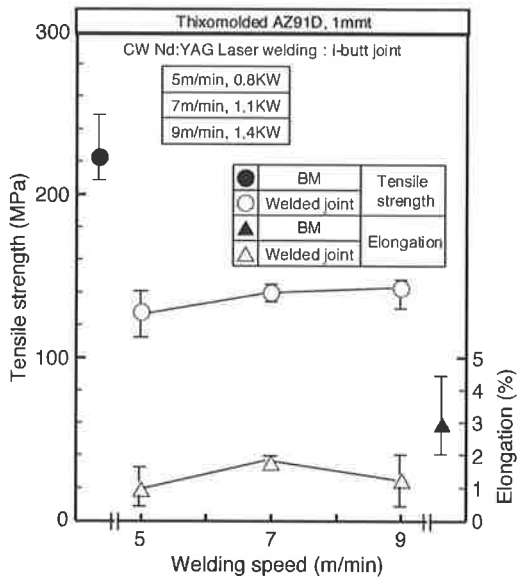


図11 突合せ溶接部の引張特性 (1mm板厚材)

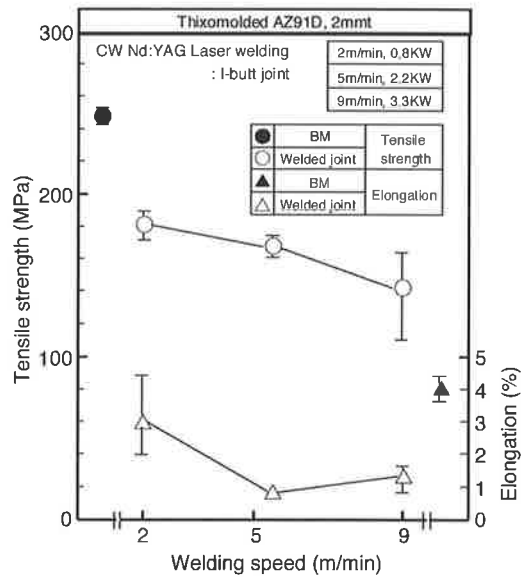


図12 突合せ溶接部の引張特性 (2mm板厚材)

ドリル切削・ガス抽出-質量分析法)を行った結果である。また比較のために、母材部の分析も行った。まず、溶接ビード部(図中WM)の気孔からは、 H_2 (質量数2)、 CH_3 (15)、 H_2O (18)、 N_2 (28)、Ar(40)、 CO_2 (44)が検出された。図は切削中の各ガスに対応する質量数におけるイオン電流(相対値)の変化をトータルイオン電流値と共に示したものである。トータル電流値におけるピークが気孔からのガス放出に対応している。トータル電流値の最も高いピークに対応して高いピークを示したのは質量数28の窒素と40のArであるが、Arの強度は極めて低く、これより残留ガスは主として窒素であると判断される。また、トータル電流値には小さなピークが幾つかみられるが、これは小さな気孔に対応していると考えられ、水素と窒素が同時に検出された。溶接ビード部の他の部分でも同様の結果が得られており、気孔内の残留ガスは窒素、もしくは窒素と水素の混合ガスを主体としていることが分かった。

次に、溶接部のガス分析位置に隣接した母材部(図中BM)についても同様の分析を行った。母材部にはX線透過写真では特に影は認められなかったが、図に示すようにトータル電流値にはガス放出を示す幾つものピークが検出された。これらのピークはすべて窒素のピークに対応しており、また一部のピークは水素にも対応していた。これより、母材中には窒素ガスが一部水素を伴って含有されていることが分かった。

以上の結果、レーザー溶接に際して、これらの母材中に含有されていたガスが溶融池に放出され、早い凝固速度に伴い、気孔として残留したものと考えられる。

次に、図11および図12にそれぞれ1mmおよび2mm

材の継手引張試験結果を示す。継手強度は1mm材で130~140MPa、2mm材で150~180MPaと、母材強度220~250MPaの約60~70%まで低下した。また、母材伸びは3~4%と比較的小さく、継手伸びでも一部低溶接速度で母材相当の値が認められたが、全体的には1~2%の低い値であった。破断位置はいずれも溶融境界部であり、継手の機械的性質の劣化は気孔が主因である。

以上の結果、Mg合金のチクソモールディング材のレーザー溶接においては、溶接ビード形成は容易であるが、気孔防止の観点から素材製造プロセスにおけるガス成分の吸収防止改善が必要であるといえる。

4 おわりに

Mg合金はレーザービームの吸収率が高く、かつ、蒸気圧が高いため、Al合金と比較して、貫通溶接ビードを安定して形成することが容易であり、またAZ31展伸材は継手強度も良好である。しかしAZ91D鋳物材(チクソモールディング材)では気孔の問題があり、これらがMg合金のレーザー溶接実用化に向けての課題である。

参考文献

- 1) ASM Special Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International, 1999.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 中田一博, 牛尾誠夫: Nd:YAGレーザーによるマグネシウム合金薄板の溶接性, 溶接学会軽構造接合加工研究委員会資料, MP-271-2000.
- 5) Metal Reference book 6th edition.