

TIG溶接によるマグネシウム合金の溶接継手性能

安西 敏雄（九州工業大学大学院 生命体工学研究科）* 西尾 一政（九州工業大学大学院 生命体工学研究科）
中野 正大（技術本部 技術部）

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、自動車用部品や電子機器などへの適用が急速に進んでいる。特に、自動車業界では環境問題を考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採用している。マグネシウム合金の溶接は構造物の大型化や軽量化に欠かせない技術であるが、これまでは鋳造材が主流であったため、溶接性に関する報告はアルミニウム合金に比べて極めて少ない。本研究では、各種AZ合金（Mg-Al-Zn系合金）のTIG溶接におけるアフターシールドの必要性ならびに母材と溶加材の組み合わせを替えて、その溶接継手性能について検討した。

1. はじめに

近年、限られたエネルギーの有効利用、地球環境問題などから輸送機器の燃費改善のための軽量化および各種機器のリサイクル化率の向上が余儀なくされつつある。それらを達成するための素材の切り札としてマグネシウム合金（以下 Mg 合金と記す）が注目されている。マグネシウムの密度は 1.75 g/cm^3 とアルミニウムの約 2/3 倍、鉄の 1/4 倍であり、実用金属の中で最も小さい。さらに比強度、比剛性、振動吸収性、放熱性、電磁遮蔽能およびリサイクル性などに優れるという利点を持っている。また地殻構成クラーク（構成元素の重量比）は 8 番目で、その地殻表層部における存在比重量は 1.93 mass% と資源的にも豊富にある。

このような材料特性を生かして、近年、国外では自動車部品、国内では携帯用電子機器をはじめとした家電製品への応用が急速に伸び、今後さらに拡大すると予測されている。それに呼応するように研究開発も活発になり、Mg 合金の応用に関する国際会議も開催され、研究発表件数も飛躍的に増大している。このことは Mg 合金に対する期待の大きさを物語っている。その研究内容は、複合材料を含めた合金開発、既存材料の力学的特性、振動吸収性および水素吸収性などの評価・解析、鋳造、鍛造、押出し、溶接接合などの従来の製造技術、半熔融凝固および急冷凝固などの先端製造プロセスの応用、一体化を目指した製品設計、リサイクルシステムの構築に関する研究など広範囲にわたっている。

わが国においても 1990 年代に入って、Mg 合金の持つ多様な可能性を探索する基礎的研究が活発になり、重希土類元素を含む耐熱合金、展伸性に優れたリチウム含有合金、バルクアモルファス合金、振動吸収性、超塑性、半熔融加工、プレス成型性、表面改質、切削性など幅広い研究が含まれている。国内の産業界でも 1996 年の携帯電子機器への Mg 合金の応用を起点として、研究開発が活発に進めら

れている。特に、ダイカストあるいはプラスチックの射出成型機を応用した新しいプロセスによる厚さ 1mm 以下の薄肉製品の製造技術の進展には、世界的に見ても目を見張るものがある。しかし、マグネシウムに寄せられる熱い期待と同時に、製造上の問題点の多さも指摘されている。以上のように Mg 合金の持つ高いポテンシャルを大きく膨らませようとする研究が急速に増えつつあり、かつ新しい時代に向けた超軽量材料としてのマグネシウムへの大きな期待がある¹⁾。

Mg 合金の溶接接合は構造物の大型化および軽量化には欠かせない基盤技術であるが、これまでは鋳造品が主流であったため、溶接構造物に適用された実績は少なく、溶接接合性に関する研究報告も極めて少ない。

そこで、本研究では Mg 合金および難燃性 Mg 合金を用いて TIG 溶接を行い、アフターシールドの必要性の確認および母材と溶加材を種々組み合わせで溶接継手を作製し、その溶接継手性能を検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

本研究に用いた供試材は、板厚 3mm の圧延材 AZ31、AZ61 および板厚 5mm の鋳造材 AZ91 とした。TIG 溶接では母材と同一組成の AZ31、AZ61 および AZC612 の棒径 3mm の溶加材を用いた。表 1 に供試材および溶加材の化学組成を示す。

表 1 供試材および溶加材の化学組成 (mass%)

Material	Al	Zn	Ca	Mg
AZ31	3.05	0.95	ND	Bal.
AZ61	6.21	0.89	ND	Bal.
AZ91	9.11	1.02	ND	Bal.
AZC612	7.30	0.76	1.71	Bal.

* 客員教授：(株)高田工業所休職中

2.2 溶接継手の作製

TIG 溶接におけるアフターシールドの必要性を確認するため、図1に示す寸法および開先形状のAZ31母材に対してAZ31およびAZC612の2種類の溶加材を用いて交流TIG溶接機を使用して溶接を行い、それぞれの母材と溶加材の組み合わせにおいてアフターシールドを施したものと施さないものを作製した。表2に溶接条件の詳細を示す。母材と溶加材の種々の組み合わせにおける溶接継手性能を検討するため、図1に示す寸法および開先形状の供試材を用いて交流TIG溶接機を使用して、アフターシールドは施さずに溶接を行った。表3に母材と溶加材の組み合わせを、表4に溶接条件の詳細を示す。

2.3 評価方法

TIG 溶接におけるアフターシールドの必要性については放射線透過試験、断面ミクロ組織観察、X線回折、硬さ測定および引張試験により評価した。また溶接継手の性能については断面ミクロ組織観察、引張試験および疲労試験により評価した。

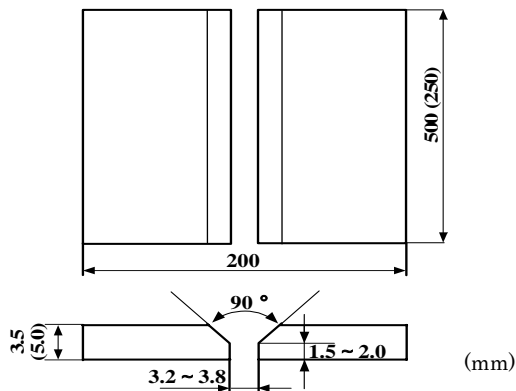


図1 試験材の寸法と開先形状

表2 アフターシールドの必要性調査のための試験材の溶接条件

Welding Current (A)	80~85
Arc Voltage (V)	10~12
Welding Speed (mm/min)	60
Torch Shielding Gas (l/min)	10
Back Shielding Gas (l/min)	10
After Shielding Gas (l/min)	20
Number of Pass	1

表3 母材と溶加材の組み合わせ

Base Metal (σ_b , MPa)	Filler Metal	After Shielding
AZ31 (233)	AZ31	With
AZ31 (233)	AZ31	Without
AZ31 (233)	AZC612	With
AZ31 (233)	AZC612	Without
AZ31 (233)	AZ61	Without
AZ61 (292)	AZ61	Without
AZ91 (129)	AZ61	Without

表4 溶接継手性能調査のための試験材の溶接条件

Welding Current (A)	80~90
Arc Voltage (V)	10~11
Welding Speed (mm/min)	80~120
Torch Shielding Gas (l/min)	15
Back Shielding Gas (l/min)	15
After Shielding Gas (l/min)	Not Applicable
Number of Pass	2

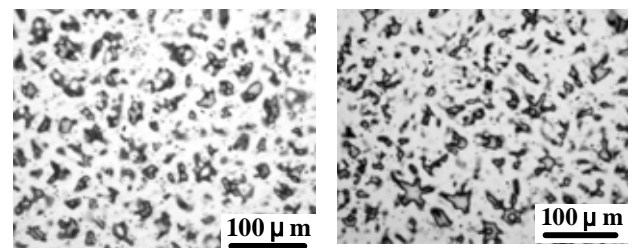
3. 実験結果および考察

3.1 TIG溶接におけるアフターシールドの必要性

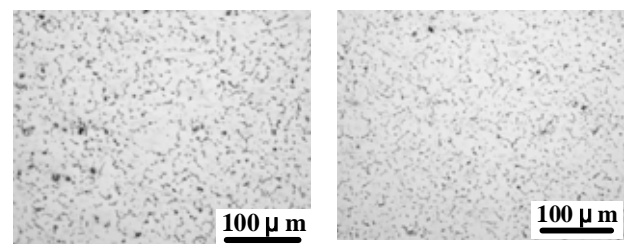
AZ31母材に対してAZ31およびAZC612の溶加材を用いた場合、アフターシールドの有無に係らず、いずれの溶接継手においても放射線透過試験においてブローホールなどの溶接欠陥は認められなかった。図2にAZ31母材にAZ31およびAZC612の溶加材を用いて溶接した溶接継手の溶接金属のミクロ組織を示す。いずれの継手においても粒状の相($Mg_{17}Al_{12}$)と考えられる晶出物が認められた。その晶出物の平均粒径を線分法により求めた。単位長さ300 μm に含まれる晶出物の数を N_L 、晶出物が単位長さ当たりに占める割合を L_L として、(1)式により晶出物の平均粒径 L_a を算出した。

$$L_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (300L_{Li}/N_{Li}) \quad \dots \quad (1)$$

表5に晶出物の平均粒径の測定結果を示す。AZ31の溶加材を用いた場合、アフターシールドを行った時の方が行わなかった時に比べて粒径が約30%小さくなっていた。またAZC612の溶加材を用いた場合も同様に、アフター



(a) AZ31 filler metal used



(b) AZC612 filler metal used

図2 溶接金属のミクロ組織

表5 晶出物の平均粒径

Combination	After Shielding	Size of Grain(μm)
AZ31/AZ31	Without	16.5
	With	12.0
AZ31/AZC612	Without	2.4
	With	2.1

シールドを行った時の方が行わなかった時に比べて粒径が約 15%小さくなっていた。これは、アフターシールドを行った時の方が行わなかった時に比べて、溶接金属部の冷却速度が速いことによるものと考えられる。

図3にAZC612の溶加材を用いた場合の晶出物X線回折の結果を示す。この場合、 $Mg_{17}Al_{12}$ の金属間化合物のピークが明瞭に認められた。AZ31の溶加材を用いた場合も同様に $Mg_{17}Al_{12}$ の金属間化合物のピークが認められた。

図4にAZ31の溶加材を用いた(AZ31/AZ31)場合のアフターシールドを行った時と行わなかった時の溶接部の硬さ分布を示す。アフターシールドを行った時のX方向(母材の板厚方向に直角な方向)の硬さは43~55HVであり、Y方向(溶接金属の板厚方向)の硬さは42~50HVであった。一方、アフターシールドを行わなかった時のX方向の硬さは45~55HVであり、Y方向の硬さは48~53HVであった。これらの両者の硬さ分布を比較しても有意差は見られなかった。またAZC612の溶加材を用いた場合のアフターシールドを行った時と行わなかった時の溶接部の硬さ分布も同様に、アフターシールドの有無による溶接部の硬さ分布に有意差は見られなかった。

図5にAZ31母材に対してAZ31およびAZC612の溶加材を用いた場合の溶接継手の引張試験の結果を示す。試験片の破断位置はすべて溶接金属部であった。AZ31の溶加材を用いた(AZ31/AZ31)場合、アフターシールドを行った時は、引張強さが216MPa、伸びが6.5%であり、アフターシールドを行わなかった時には、引張強さが202MPa、伸びが3.5%であった。一方、AZC612の溶加材を用いた(AZ31/AZC612)場合のアフターシールドを行った時は、引張強さが201MPa、伸びが5.0%であり、アフターシールドを行わなかった時には、引張強さが221MPa、伸びが6.0%であった。また図6に各継手の継手効率(継手の引張強さ/母材の引張強さ)を示す。なお、継手効率はAZ31の母材の引張強さを233MPaとして算出した。その結果、継手効率は87~95%であり、アフターシールドの有無による有意差は見られなかった。さらに引張試験片の破断面の破面観察を行ったが、いずれも延性破壊の特徴であるディンプル模様を示し、酸化物などの異物の混入は見られなかった。

以上の結果から、Mg合金のTIG溶接においてアフター

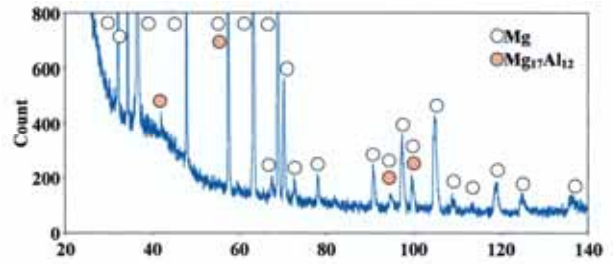
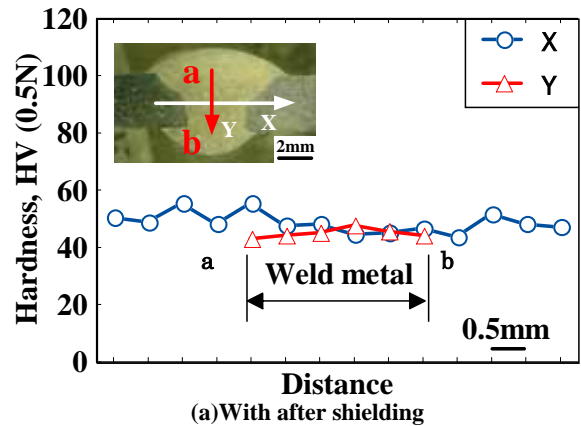
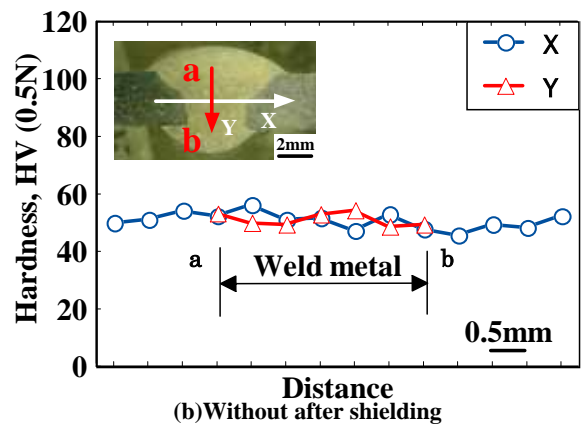


図3 AZC612を用いた場合の晶出物のX線回折



(a)With after shielding



(b)Without after shielding

図4 AZ31/AZ31の硬さ分布

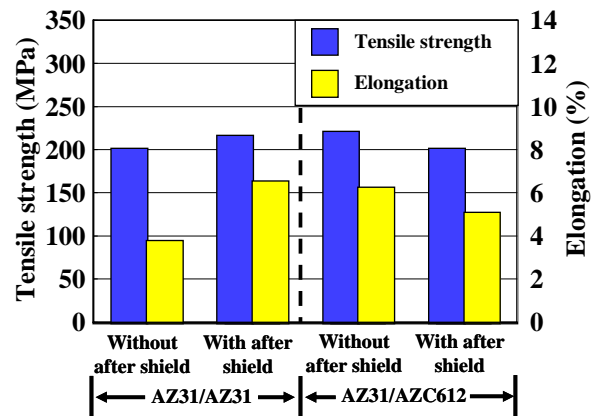


図5 AZ31溶接継手の引張試験結果

シールドの有無は、溶接継手性能に影響を及ぼさないと考えられる。

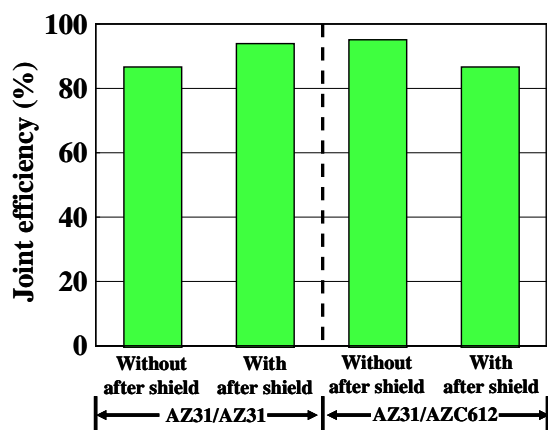


図6 各継手の継手効率

3.2 TIG溶接の母材と溶加材の組み合わせにおける溶接継手性能

ここではアフターシールドを行わずにTIG溶接を行い、各母材と溶加材の組み合わせによる溶接継手性能を検討した。

図7に、各母材と溶加材の組み合わせによる溶接継手の断面のマクロ組織と溶接金属部のミクロ組織を示す。いずれの組み合わせにおいても溶接欠陥などは認められず、健全な溶接部が得られた。またミクロ組織においても、金属間化合物と考えられる $Mg_{17}Al_{12}$ の晶出量や分布状況に違

いはあるが、溶接割れなどは見られなかった。また図8にAZ61/AZ61における溶接金属の晶出物のEPMA分析結果を示す。MgとAlの分布から晶出物は $Mg_{17}Al_{12}$ と判断される。

次に、余盛を削除せずに行った引張試験の結果について述べる。すべての組み合わせの試験片において破断位置は余盛止端部であり、図9にAZ31/AZ31の引張試験後の試験片を示す。

図10に各母材と溶加材の組み合わせにおける引張試験結果を示す。AZ31/AZ31の場合、引張強さが206MPa、伸びが6.9%、AZ31/AZ61の場合、引張強さが210MPa、伸びが7.4%、AZ61/AZ61の場合、引張強さが281MPa、伸びが6.7%、AZ91/AZ61の場合、引張強さが131MPa、伸びが2.6%であった。さらに、図11に引張強さから算出した継手効率を示す。継手効率は、AZ31/AZ31の場合89%、AZ31/AZ61の場合91%、AZ61/AZ61の場合97%およびAZ91/AZ61の場合100%であった。これらの値は、有年ら²⁾によるAZ31を用いた摩擦攪拌接合の継手効率96%、および上山ら³⁾によるAZ31のパルスMIG溶接の継手効率91%と比べても遜色なく、十分な継手強度を有していると考えられる。

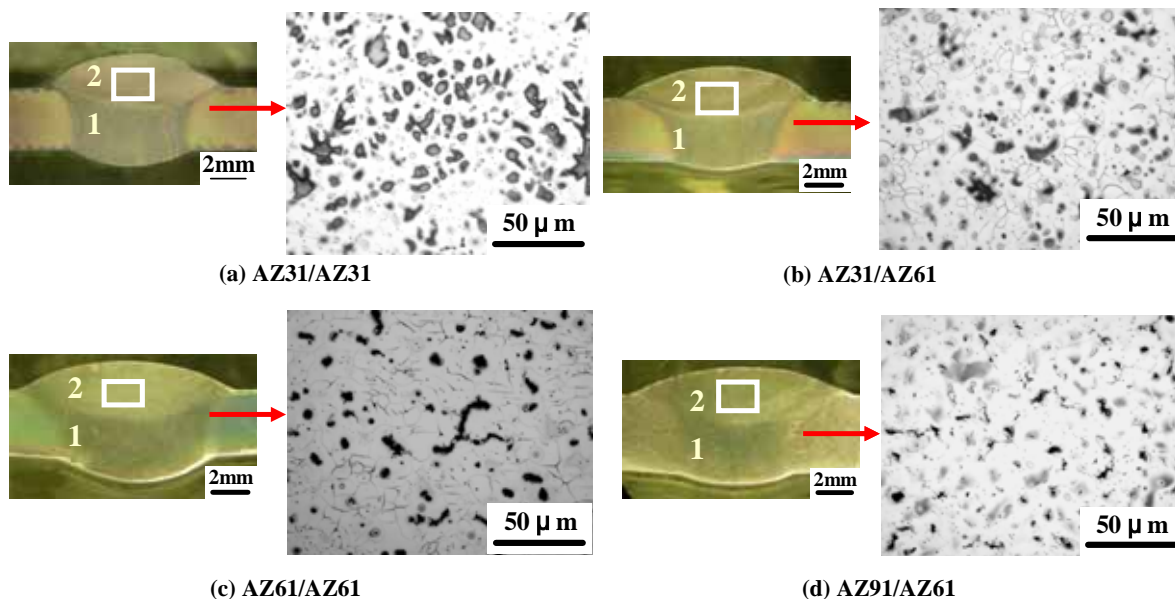


図7 各母材と溶加材の組み合わせによる溶接継手の断面マクロ組織および溶接金属部のミクロ組織

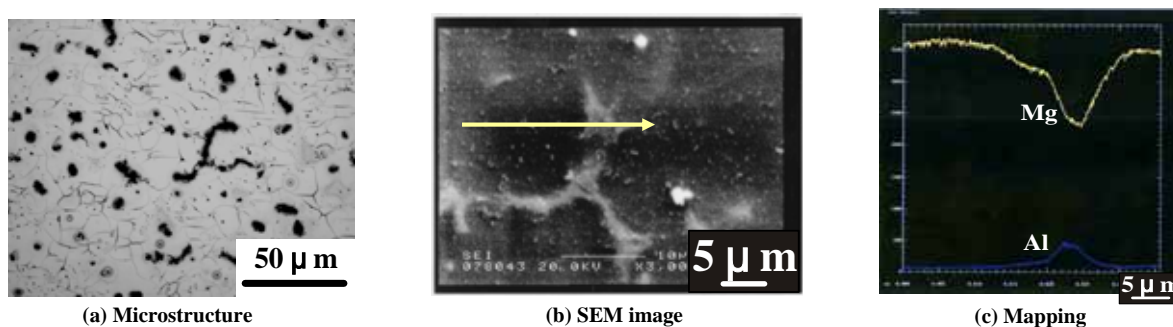


図8 AZ61/AZ61における溶接金属の晶出物のEPMA分析結果



図9 AZ31/AZ31の引張試験後の試験片

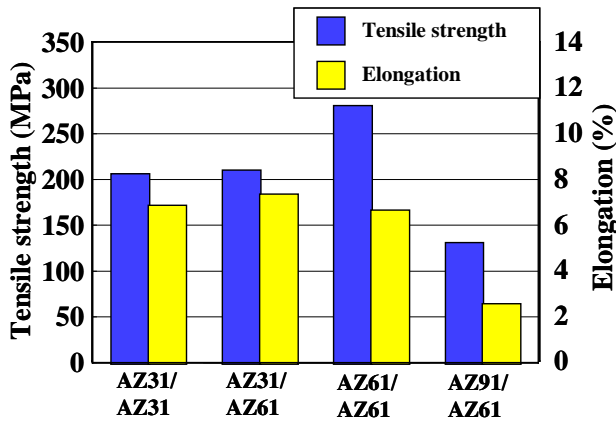


図10 各母材と溶加材の組み合わせにおける引張試験結果

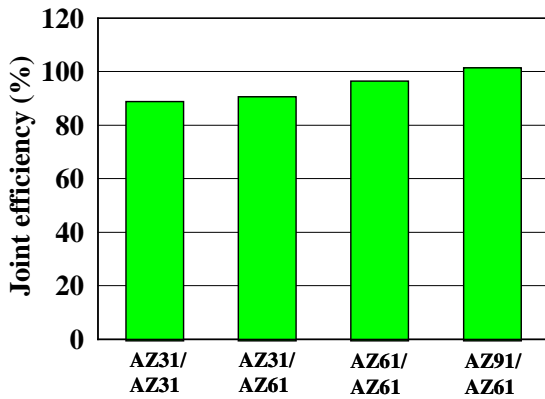
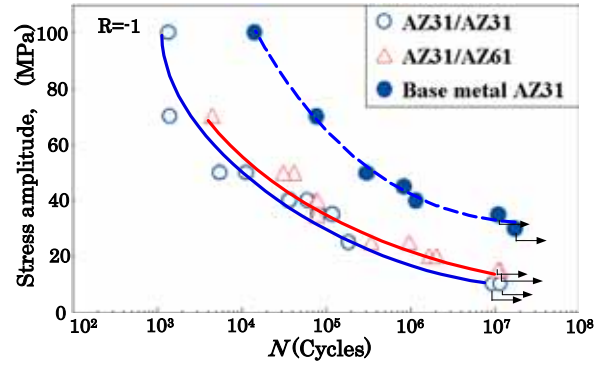


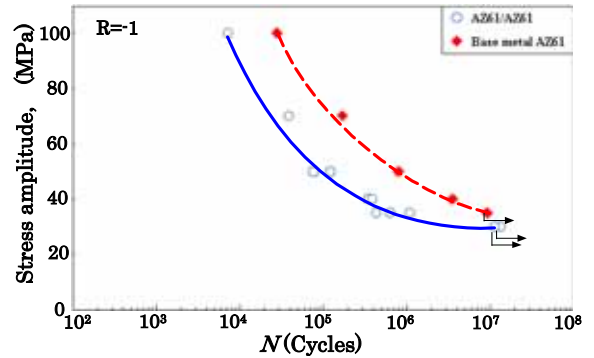
図11 引張強さから算出した継手効率

疲労試験には余盛を除去せずに溶接ままの試験片を用い、島津製作所製の曲げ・ねじり疲労試験機を使用して両振り平面曲げで行った。繰返し数 10^7 回を疲労限度とした。

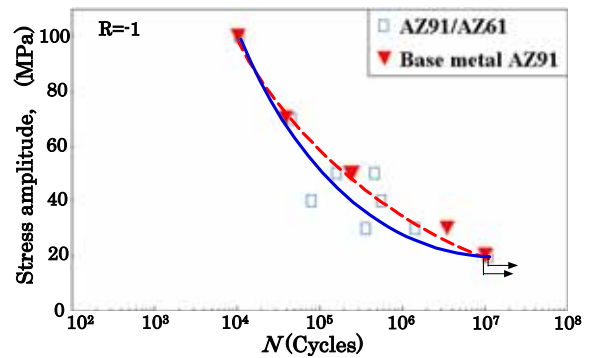
図12に各母材および各母材と溶加材との組み合わせにおける溶接継手の疲労試験の結果を示す。(a)はAZ31母材とAZ31/AZ31およびAZ31/AZ61溶接継手のS-N線図である。AZ31母材の疲労限度は34.3 MPaであり、疲れ比(疲労限度/引張強さ)は14.7%であった。他の金属材料の場合、疲れ比は30~50%程度であり、これと比べるとAZ31母材は低い値であった。またAZ31/AZ31およびAZ31/AZ61の溶接継手の場合、疲労き裂は図13に示すように余盛止端部から発生・進展し、その疲労限度はそれぞ



(a) S-N curve of AZ31/AZ31 and AZ31/AZ61



(b) S-N curve of AZ61/AZ61



(c) S-N curve of AZ91/AZ61

図12 各母材および溶接継手の疲労試験結果

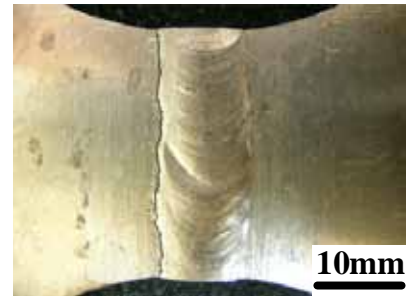


図13 AZ31/AZ31の疲労試験後の試験片

れ9.8 MPaおよび14.7 MPaで母材の約1/3であった。溶接継手の時間強度は、いずれも母材と比べると小さく、またAZ31/AZ61の方がAZ31/AZ31と比較すると大きかった。(b)はAZ61母材とAZ61/AZ61の溶接継手のS-N線図である。AZ61母材の疲労限度は34.3 MPaで、疲れ

比は12%であり, AZ31の場合と同様に他の金属材料の場合と比較すると低い値であった。また AZ61/AZ61の溶接継手の場合, 余盛止端部から疲労き裂が発生・進展し, その疲労限度は29.4 MPaで母材に比べて約14%低い値であった。また時間強度も母材より AZ61/AZ61溶接継手の方が小さかった。(c)はAZ91母材とAZ91/AZ61の溶接継手のS-N線図である。AZ91母材の疲労限度は19.6 MPaで, 疲れ比は15%であり, AZ31およびAZ61の場合と同様に他の金属材料の場合と比較すると低い値であった。またAZ91/AZ61の溶接継手の場合, 余盛止端部から疲労き裂が発生・進展し, その疲労限度は19.6 MPaで母材と等しかった。また, 時間強度も母材とAZ91/AZ61溶接継手は同程度であった。これはAZ91が鋳造材であるため, その疲労限度は圧延材に比べて小さいことによるものと考えられる。

疲労試験後の破断面の観察を行い, その一例を図14に示す。この図はAZ31/AZ31の応力振幅 $a=39.2$ MPa, 繰返し数 $N=3.68 \times 10^4$ 回で破断した試験片の破断面のSEM像である。(a)の低倍率の全体写真の上部に応力集中があったことを示すラチェットマークが認められた。(c)の破面には脆弱な擬へき開破面が見られ, この部分が最終破断部と考えられる。(d)は板厚中心部の破断面であり, 疲労破壊の場合に見られるストライエーション(縞模様)が鮮明に認められた。これらのことから疲労き裂は試

験材表面の余盛止端部から発生し, 全体写真の上部から下部へ進展して破断に至ったと推察される。

4. おわりに

本研究では, Mg合金および難燃性Mg合金を用いてTIG溶接を行い, アフターシールドの必要性および母材と溶加材を種々組み合わせて溶接継手を作製し, その溶接継手性能を検討した。得られた結果は次のとおりであった。

- (1) Mg合金のTIG溶接において, アフターシールドの有無は溶接継手性能に影響を及ぼさなかった。
- (2) AZ31/AZ31, AZ31/AZ61, AZ61/AZ61およびAZ91/AZ61の母材と溶加材の組み合わせにおいて, 89%以上の継手効率を有する溶接継手が得られた。
- (3) AZ31, AZ61およびAZ91の母材の疲れ比が小さく, そのため溶接ままの余盛付き溶接継手の疲労限度も, 他の金属材料の溶接継手のそれに比べて小さかった。

参考文献

- 1) 日本マグネシウム協会編: マグネシウム技術便覧, カロス出版, (2000)
- 2) 有年, 富田, 福本, 椿野, 大塚, 古賀: AZマグネシウム合金の摩擦攪拌接合部の金属組織と継手強度, 溶接学会全国大会講演概要集, 第69集(2001)
- 3) 上山, 中田: マグネシウム合金のパルスMIG溶接, 軽金属溶接, 42-5(2004)

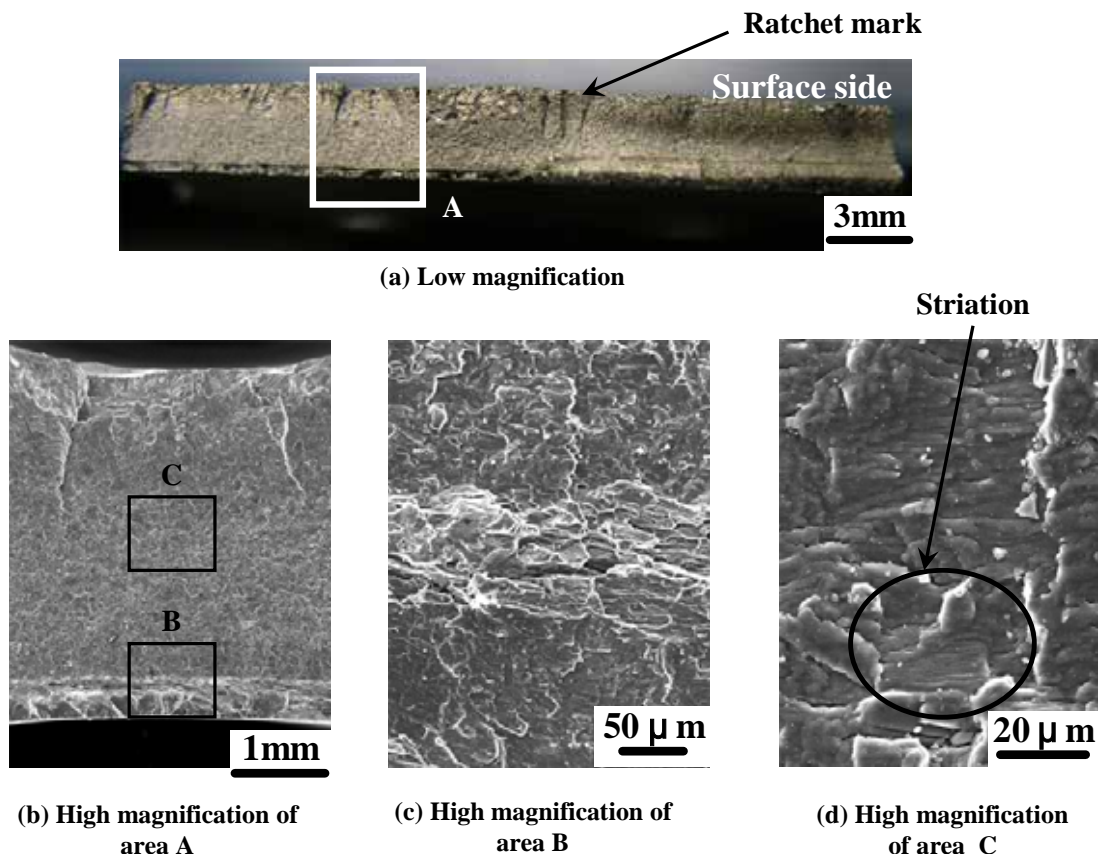


図14 AZ31/AZ31の疲労試験後の破断面のSEM観察結果 ($a=39.2$ MPa, $N=3.68 \times 10^4$ cycles)