

難燃性マグネシウム合金の溶接性

Welding Performance of Noncombustible Magnesium Alloy

上山 智之*, 中田 一博**
Tomoyuki Ueyama*, Kazuhiro Nakata**

1. はじめに

マグネシウム（以下、Mg）合金はリサイクル性に優れた次世代の軽量構造物材料として注目されているが、Mgは非常に活性な金属であり、溶解・鋳造や切削・研磨などの加工時に発火する可能性がある。このような特性はとくに輸送機器の構造物への適用を妨げるものであり、実用化への課題となっていた。近年、カルシウム（以下、Ca）を添加して既存のMgよりも約200~300℃も発火温度を上昇させた難燃性Mg合金が開発され^{1),2)}、難燃性Mg合金における各方面での研究開発が実施されるようになった³⁾。とりわけ溶接技術については溶接材料の開発が進んでおらず、アーク溶接性能に関するデータは非常に少ない^{4),5)}。そこで、著者らは試作の難燃性Mg合金ワイヤを用いて難燃性Mg合金溶接特性をティグ溶接、ミグ溶接を主体として調査したので紹介する。

2. 試作溶接材料

本調査では、試作難燃性Mg合金AMCa602およびAZCa912を使用し、ティグ溶接用溶加棒は棒径2.4mmの試作難燃性Mg合金AMCa602およびAZCa912を、ミグ溶接用ワイヤはワイヤ径1.2mmの試作難燃性Mg合金AMCa602をそれぞれ線引き加工して使用した。その化学成分をTable 1に示す。

溶接に供した母材は板厚2mmのAMCa602および

Table 1 試作難燃性マグネシウム合金の化学成分

	化学成分 (mass%)					
	Al	Zn	Mn	Si	Ca	Mg
AMCa602	5.68	—	0.16	—	2.16	Bal.
AZCa912	8.3~9.7	0.35~1.0	0.15~0.5	0.10	1.5~2.5	Bal.

* 株式会社ダイヘン溶接メカトロカンパニー
DAIHEN Cooperation

** 大阪大学接合科学研究所
OSAKA UNIVERSITY Joining and Welding Research Institute

原稿受付：2011年8月23日

AZCa912であり、いずれも押し出し材である。これらの化学成分はTable 1と同様である。

3. 溶接法および溶接装置

難燃性Mg合金のアーク溶接においては、Fig. 1に示すように交直両用のデジタルインバータ制御式ティグ溶接機を用いて交流パルスティグ溶接法にて溶加棒を低周波パルスに同期させて手動にて供給した。

ミグ溶接においてはFig. 2に示すようにMg合金専用



Fig. 1 デジタルインバータ制御式交直両用ティグ溶接機



Fig. 2 デジタルインバータ制御式ミグ溶接機

の溶接プログラムを搭載したデジタルインバータ制御式パルスミグ溶接機を用いてパルスミグ溶接法にて調査を実施した。パルスミグ溶接を適用した理由は、通常の Mg 合金のミグ溶接と同様に⁶⁾、スパッタ付着の少ないフラットなビード外観が得られることや溶け込み形状が深く良好な溶け込み形状を確保しやすいためである。

4. 各種溶接法による難燃性 Mg 合金溶接性

4.1 ティグ溶接結果

Fig. 3 は交流低周波パルスティグ溶接による板厚 2 mm の AMCa602 および AZCa912 材の突合せ溶接結果を示したものである。

溶接条件は平均溶接電流：60 A（ベース電流40 A，ピーク電流80 A，パルス周波数 1 Hz），EN 比率⁷⁾：70%，溶接速度：20 cm/min，溶加材供給速度：約10 cm/min である。

いずれの母材・溶加棒の組み合わせにおいてもビード外観は良好であり，X 線透過試験による溶接金属の内部の調査においても割れや気孔などの内部欠陥の存在はない。

4.2 パルスミグ溶接におけるワイヤ溶融特性

Fig. 4 は AMCa602 のワイヤ溶融特性を溶接電流とワイヤ送給速度の関係で示したものである。比較のため Mg 合金ワイヤ AZ61（ワイヤ径：1.2 mm）および Al-Mg 合金ワイヤ A5356（ワイヤ径：1.2 mm）のワイヤ溶融特性

も示した。同一溶接電流で比較した場合，AMCa602 は A5356 と比較して約 2 倍のワイヤ溶融速度であった。AZ61 との比較では同一溶接電流に対するワイヤ溶融速度の差はほとんどなく，Ca 添加やその他の合金成分がワイヤ溶融特性に影響する要因はなさそうである。Fig. 5 は AMCa602 ワイヤのパルスミグ溶接時における溶滴移行を示したものである。基本的にパルスに同期して溶滴が移行するが，パルスピークからベース電流へ切替っても溶滴は

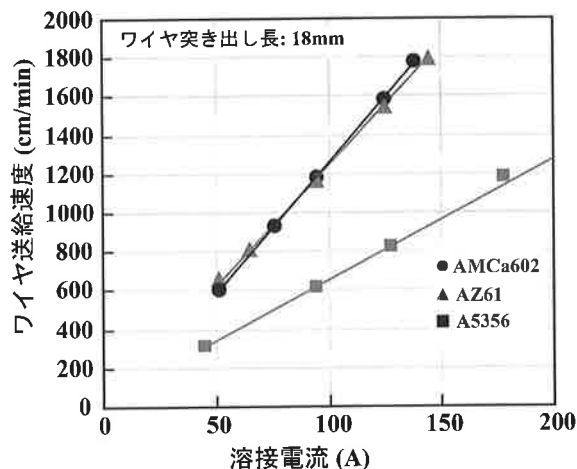


Fig. 4 難燃性 Mg 合金のワイヤ溶融特性

溶接電流: 60 A (パルス電流: 95 A, ベース電流: 40 A, 周波数: 1 Hz), EN 比率: 70% 溶接速度: 20 cm/分, 溶接棒 (2.4 mm 径) 送給速度: 10 cm/分		
母材+ワイヤ	ビード外観	放射線透過写真
母材: AMCa602 (板厚: 2 mm) 溶接棒: AZ61		
母材: AMCa602 (板厚: 2 mm) 溶接棒: AMCa602		
母材: AZCa912 (板厚: 2 mm) 溶接棒: AZ61		
母材: AZCa912 (板厚: 2 mm) 溶接棒: AZCa912		

Fig. 3 難燃性 Mg 合金の突合せパルスティグ溶接結果

大きくなり続け、ベース電流の途中から溶滴は溶融池に離脱する。このような形態は著者らが以前に報告⁶⁾した Mg 合金ワイヤの溶滴移行とほとんど変わらない。

4.3 パルスミグ溶接結果

Fig. 6 はパルスミグ溶接による板厚 2 mm の AMCa602 および AZCa912 材の突合せ溶接結果を示したものである。溶接条件は溶接電流：75 A (ワイヤ送給速度：9 m/

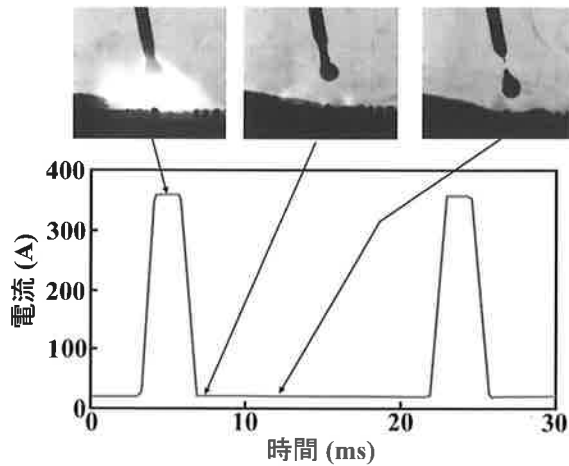


Fig. 5 難燃性 Mg 合金溶接ワイヤの溶滴移行

min), アーク電圧：24 V, 溶接速度：100 cm/min である。いずれの母材・ワイヤの組み合わせにおいてもビード外観は、ビード止端部までマグネシウム酸化物と推定されるスマットが付着しているがビード表面上におけるスマット付着はない。また、横断面のマクロ観察からスマットの巻き込みもなく良好な溶接結果が得られている。

4.4 レーザ溶接結果

Fig. 7 はファイバーレーザーによる突合せ溶接結果を示したものである。レーザー出力 3 kW において、溶接速度：400 cm/min から 1000 cm/min まで、完全溶け込み溶接が実現している。しかし、本溶接では溶加材の供給なしで突き合せ溶接を実施しており、アンダーカットやアンダーフィルなどのビード形状欠陥が生じている。

4.5 機械的特性

Fig. 8 は各溶接プロセスにおける AMCa602 溶接部のビッカース硬度分布状況を、Fig. 9 には溶接部のミクロ組織観察結果を比較したものである。母材は金属間化合物 (Al₂Ca) の存在によると考えられる硬さのばらつきが認められる⁵⁾。いずれの溶接法においても溶接金属部のほうが母材の平均硬さ (Hv：64) より硬度が高く、ティグ溶接で Hv8~10, ミグ溶接で Hv10~12, レーザ溶接では Hv20 程度の硬度上昇が認められた。これらの結果はよく知られているように結晶粒微細化によるものと考えられる。

母材	溶加材	ビード外観	断面マクロ
AMCa602	AZ61		
	AMCa602		
AZCa912	AZ61		
	AMCa602		

溶接電流：75 A (ワイヤ送給速度：9m/分), アーク電圧：24 V, 溶接速度：1 m/min

Fig. 6 難燃性 Mg 合金突合せパルスミグ溶接結果

レーザー出力 (kW)	溶接速度 (m/min)	ビード外観		放射線透過写真	横断面
		表面	裏面		
3.0	4				
	6				
	8				
	10				

Fig. 7 難燃性 Mg 合金突合せレーザー溶接結果

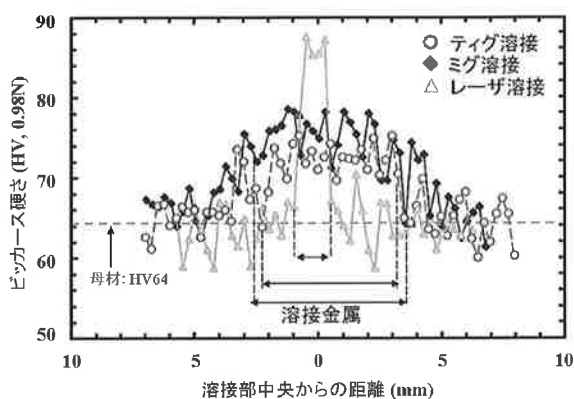


Fig. 8 各種溶接法による AMCa602 溶接部の硬さ分布

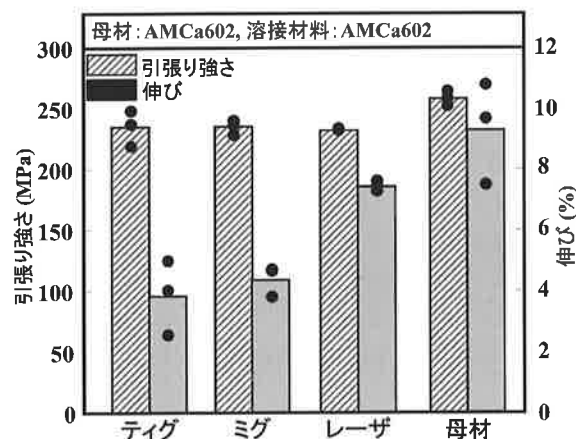


Fig. 10 難燃性 Mg 合金溶接部の引張試験結果

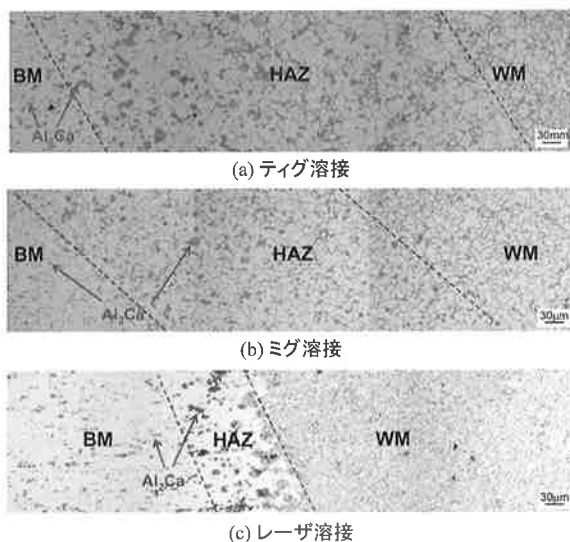


Fig. 9 難燃性 Mg 合金溶接部の組織

Fig. 10は引張り試験結果を示したものである。各溶接法による引張り強さは、ティグ溶接およびミグ溶接ともに240 MPa、レーザー溶接で235 MPaであり、母材引張り強さ250 MPaに対して95%程度の継手効率を示した。一方、伸びについてはティグ溶接が3.9%、ミグ溶接が4.2%であったのに対してレーザー溶接では7.5%と最も高い値を示した。なお、継ぎ手破断位置は、ティグ溶接、レーザー溶接はいずれも溶融境界部であったが、ミグ溶接では主に溶融境界部であり一部溶融金属部を含む破断であった。

4.6 溶接割れ感受性

押し出し材や高アルミニウムに代表される三元系や四元系のアルミニウム合金の溶接では、溶接部に凝固割れや液化割れが発生することがある。難燃性 Mg 合金においてもカルシウム (Ca) をはじめアルミニウム (Al)、亜鉛 (Zn) やマンガン (Mn) など微量添加元素を複数種合金

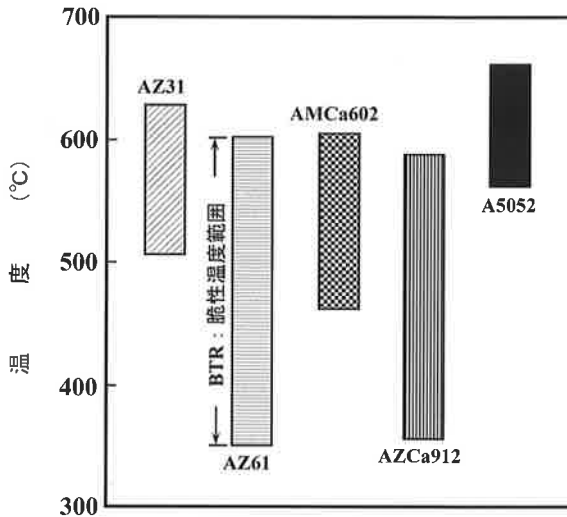


Fig. 11 凝固脆性温度範囲の比較

成分として含み、低融点の共晶合金を形成するため溶接凝固割れの発生が懸念される。

Fig. 11は凝固割れ感受性の指標を示す一つとして割れ発生温度領域（凝固脆性温度範囲，BTR）について比較したものである⁸⁾。

Mg合金の凝固脆性温度範囲は，Al-Mg系合金（A5052）に比較すると低温域まで広がっている。しかし，難燃性Mgと一般Mg合金（非難燃性）との比較においては，凝固脆性温度範囲に大きな差異は無いと考えられる。Mg合金におけるZn量の増加は凝固割れ感受性を高めることが知られており⁹⁾，同図においても，Znが添加されたMg合金において広い凝固脆性温度範囲を示すようである。

5. まとめ

各種溶接方法による難燃性Mg合金の溶接性について紹介させていただいた。本稿のデータは未だ不十分なところも多い。とくに，疲労強度特性などはアーク溶接による溶接継ぎ手でまとまった報告がなされていない。

また，アーク溶接の実用化を考えれば，たとえば，ミグ溶接において安定送給可能な溶接ワイヤの開発が進んでいないのが現状である。

このような課題を早期に克服することが望まれる。

参考文献

- 1) 上田：難燃性マグネシウム合金押し出し製品（ノコマロイ），近畿車輛技報，(2004) No. 11, 38-41.
- 2) 上野：マグネシウム合金の難燃化と応用技術，マテリアルステージ，Vol. 4 (2004) No. 8, 41-47.
- 3) 上田，谷州：難燃性マグネシウム合金利用による新幹線用腰掛の開発，鉄道車両と技術，No. 141 (2008), 15-18.
- 4) 小川，佐藤，上野：難燃性マグネシウム合金のTIG溶接，溶接学会全国大会講演概要第82集 (2008), 96-97.
- 5) Y. Sakai, K. Nakata, T. Tsumura, M. Ueda, T. Ueyama and K. Akamatsu: Fiber Laser Welding of Noncombustible Magnesium Alloy, Material Science Forum, Vol. 580-582 (2008), 479-482.
- 6) 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，Vol. 42 (2004) No. 3, 203-213.
- 7) 山本，原田，上山，小川，近藤，井手：AC/DC切換GTA溶接法の開発とその効果，軽金属溶接，Vol. 30 (1992) No. 3, 1-4.
- 8) 中田，藤井，嶋田：AZ系マグネシウム合金のトランスバレストレイン試験，溶接学会全国大会講演概要第83集 (2008), 364-365.
- 9) 中田：マグネシウム合金の溶接・接合，軽金属溶接，Vol. 39 (2001) No. 12, 582-591.