

## ワイヤ+アーク放電による AM を用いた Ti 合金-Mg 合金積層技術開発

埼玉大学 ○佐々木洋輝, 東京農工大学 永松秀朗  
埼玉大学 ◎阿部壮志, 金子順一, 東京農工大学 笹原弘之

## 要旨

近年, 航空機分野では機体の軽量化を目的とし, Mg 合金の適用が期待されている. 本研究では AM を用いることで Mg 合金の軽量という利点を生かしながら, Ti 合金の特徴である高い耐食性と高い比強度も併せ持った材料を開発することを目的とする. ワイヤ+アーク放電による AM を用いて Mg 合金に対する Ti 合金の異種金属積層法を提案し, 作製した造形物に対し EDX を用いて成分分析を行い造形物の評価を行った.

## 1. 緒言

近年, 複雑形状の造形が可能で材料の無駄を省くことのできるアディティブ・マニファクチャリング(AM)への期待が高まっている. 特に, ワイヤ材とアーク放電を組み合わせた, ワイヤ+アーク放電による AM (WAAM)は複雑形状を迅速に造形することができる技術であり, 高強度・軽量化が求められる航空宇宙分野では, WAAM による Mg 合金製品の開発が期待されている.

本研究では, 耐食性と耐摩耗性を向上させ Mg 合金製品の機能性を高めるために, Mg 合金表面に WAAM を用いて Ti 合金を積層する. しかし, Mg-Ti 系は 2 相分離系<sup>1)</sup>であり, 熔融接合によって接合することは極めて難しい. そこで Mg と Ti 二つの元素に対して, 親和性の高い Al 合金の中間層を形成し, Mg 合金上に Ti 合金を積層することを本研究の目的とする. 本報告では, Mg 合金-Al 合金の積層条件の調査と Al 合金-Ti 合金の積層条件を調査し, 作製した造形物に対し EDX を用いて成分分析を行った.

## 2. 実験装置

本研究で使用した実験装置を図 1 に示す. X 軸, Y 軸方向に稼働する 2 軸テーブルと, Z 軸方向に稼働する溶接トーチを使用して造形を行った. 本実験で使用した YTW340 チタンは非常に活性な金属であり, 高温時酸素や窒素と反応し脆化してしまう<sup>2)</sup>. そのため, Ti 合金の積層を行う際は, 造形物に対しトーチの進行方向から見て後方に Ar100%ガスを供給し続けて, 酸素を遮断しながら造形を行った. 金属ワイヤとして用いる Al ワイヤは A5356 (JIS Z3232), Ti ワイヤは STi0120J (JIS Z3331) を使用する. 母材及びワイヤの成分は表 1 に示す.

## 3. Mg 合金に対する Al 合金のビードオンプレート試験

Mg 合金に対する Al 合金の積層条件調査, および造形物の成分調査を目的としてビードオンプレート試験を行った.

Mg-Ti 系は 2 相分離系であり, 熔融接合によって接合することは極めて難しい. そこで, Mg 合金層と Ti 合金層の間に Al 合金の中間層を積層する. しかし, 母材中の Mg により Al 合金ワイヤが希釈され溶着金属の Mg 含有量が増加する. 溶着金属の Mg 含有量が多いと熔融金属が分離し Ti 合金を積層することができない. そのため, Mg 母材上に Al 合金を複数層積層し, Al 合金ワイヤと同等の Mg 含有量となる積層数を調査した.

表 2 に実験条件を示す. この時, 作製した Al 合金造形壁の断面の成分分析結果を図 2 に示す. 図中の点 a は Mg 母材部分, 点 b~e は積層された Al 合金ビードである. 今回の結果から積層を重ねるごとに, Al 合金造形壁内部の Mg 含有量は低下していくことがわかる. 特に, 最上部に着目すると, Mg の含有量は 5%前後, Al の含有量は 95%前後となっており, これは A5356 ワイヤの成分と同等である. 今回の実験結果から, Mg 合金母材の成分

によって溶着金属成分が希釈されるが, 4 層程度積層することでワイヤと同等の溶着金属が得られることが明らかとなった. そのため, Ti 合金積層のための中間層形成を目的とする場合, 4 層程度 Al の積層を行えば十分といえる.

一般的に, 2 種類の金属材料の界面に金属間化合物の層が形成された場合, その厚みが増加すると接合強度は低下する<sup>3)</sup>. 金属間化合物層の厚みは, 積層時の入熱の繰り返しにより成長する可能性がある. そこで, Al 合金層の積層が金属間化合物層に与える影響を調査した. Mg 合金母材に対し, 表 1 に示す条件で Al 合金を 1 層積層した場合と, 4 層積層した場合の Mg 合金と Al 合金の接合界面付近の面分析した. 測定結果を図 3 に示す. 1 層のみ積層を行った場合と, 4 層の積層を行った場合の中間層の厚みはいずれも 150 $\mu\text{m}$  程度である. 今回の実験では積層回数が増加しても, 中間層の厚みに違いは生じなかった. また, 1 層及び 4 層積層した条件共に, 中間層内部では成分に差が見られた. Mg 含有量が多い層を①, Al 含有量が多い層を②として図 3 に示す. さらに, 図 3 におけるそれぞれの層の成分を図 4 に示す. ①の中間層はその組成比から  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ <sup>4)</sup>, ②の中間層は  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ <sup>4)</sup>であると考えられる. 特に,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ は Mg 母材よりも硬度は高いが延性に乏しい<sup>5)</sup>. そのため, 熱膨張係数の異なる Mg と Al を積層した際,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ の存在する境界面で割れが発生する可能性が考えられる.

## 4. Al 合金層に対する Ti 合金の積層

Al 合金層を中間層とした場合の Al 合金造形壁に対して, Ti 合金ワイヤを用いて表 2 の条件で積層実験を行った. 作製した造形物を図 5 に示す. 造形物の断面写真と成分分析結果を図 6 に示す. 造形物の断面図からは, 2 層目の Ti 合金層が 1 層目の Ti 合金層の側面に積層されている様子が確認できる. これは, 2 層目の Ti 合金を積層する際, ワンダリング<sup>6)</sup>が発生したためであると考えられる. 造形物の成分分析結果からは, 1 層目の Ti 合金層を境に造形物の成分が急激に変化し, Ti 合金層には Al がほとんど溶け込んでいない様子がわかる. 図 6 における Al 合金造形壁と 1 層目の Ti 合金境界をエリア A として図 7 に示す. 図 7 に着目すると接合面に一部欠陥が見られるが, Ti 合金と Al 合金が接合できている様子が確認でき, Al 合金造形壁に対し Ti 合金を積層することができた.

## 5. 結言

本報告では, Mg 合金母材上に Al 合金中間層を介して Ti 合金を積層できる条件の調査を目的として実験を行った. 結果以下のことが明らかとなった.

- (1) EDX 分析結果より, Al 合金層を 4 層程度積層すると, ワイヤと同等の Al 合金含有量が得られた.

- (2) Mg 合金母材に対し Al 合金を積層すると、金属間化合物層が形成され、それらは  $Al_{12}Mg_{17}$  と  $A_{13}Mg_2$  であると考えられる。
- (3) 境界部では一部欠陥が見られるが、Al 合金造形壁に対し Ti 合金を積層することができた。

6.参考文献

- 1) 藤井英俊, 青木祥宏, 異種材料の摩擦接合技術 日本機械学会誌, 2019年, 122巻, pp8-11
- 2) 上瀧 洋明, チタン材料の特性と加工・溶接技術 真空, 2007年, 50巻, 1号, pp36-40
- 3) 小川 和博, 小溝 裕一, 泰山 正則, 池崎 寿志, 村山 順一郎 異種金属の圧延接合界面組織と諸特性に関する研究 圧力技術, 1996年, 34巻, 1号, pp17-24
- 4) 吉田 英雄, 福井 利安, Al-Mg 系合金 軽金属, 1988年, 38巻, 8号, pp496-512
- 5) 小島 陽, マグネシウムの材料特性 表面技術, 1993年, 44巻, 11号, pp866-87
- 6) 大谷 忠幸, チタン溶接技術 新日鉄技報, 2006年, 385号, pp81-pp85

Table 1. Component of material

norm	Si	Fe	Cu	Mn	V	Cr	Zn	Mg	Ti	Al
AZ31B	0.0231	0.0013	0.0017	0.282	-	-	1.033	Bal.	-	2.854
A5356	≦0.25	≦0.4	≦0.1	0.05-0.20	-	0.15-0.35	≦0.1	-	0.06-0.20	Bal.
A5052	≦0.25	≦0.4	≦0.1	≦0.1	-	0.05-0.21	≦0.2	-	-	Bal.
Z3331	-	≦0.2	-	-	3.50-4.50	-	-	-	Bal.	5.50-6.75 (mass%)

Table 2. Experimental conditions

Experimental No	1		2			
	1st	2nd to 4th	1st	2nd to 8th	9th to 11th	
Wire material	A5356		A5356 YTW340			
Wire diameter	mm 1.2		1.2			
Welding current	A	75 50	75	50	110	
Welding Voltage	V	14.5 13	14.5	13	15.4	
Torch feed speed	mm/min	250		250		
Wire feed speed	m/min	4.6	3.4	4.6	3.4	5.6
Shielding gas	Ar		Ar			
Shielding gas flow rate	L/min	15	15	15	15	15+10

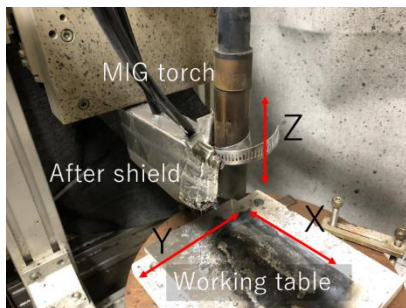
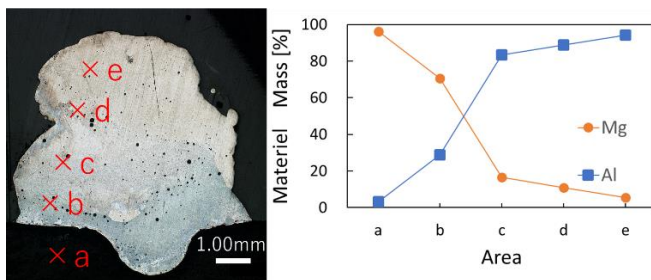


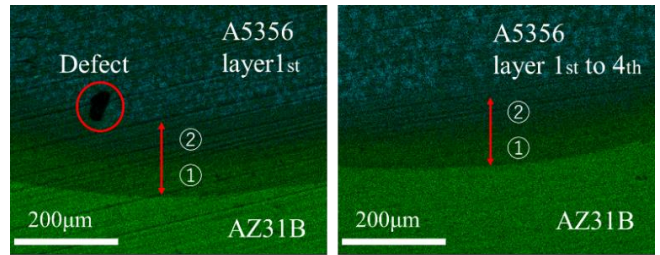
Fig1. WAAM machine



(a) Overview

(b) EDX analysis result

Fig2. Section of Al beads on Mg substrate



(a)One layer

(b)Four layer

Fig3. Boundary between a substrate and 1st layer

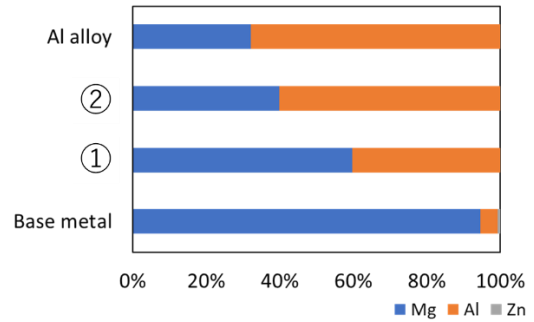
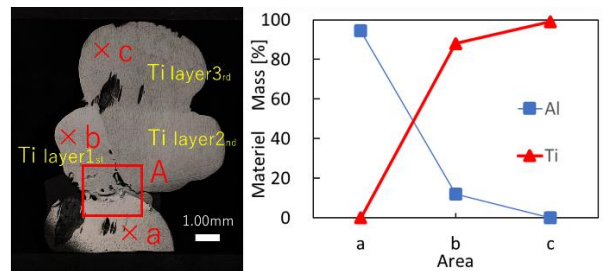


Fig4. Components of middle



Fig5. Ti beads on Al beads



(a) Overview

(b) EDX analysis result

Fig6. Section of Ti beads on Al beads

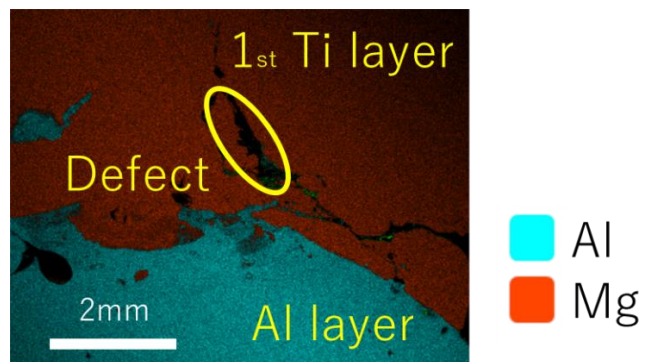


Fig7. Area A