

3次元金属積層により作製されたアルミ合金構造体の機械的特性に関する研究

Study on mechanical properties of aluminum structures formed by 3D additive manufacturing

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 安齋弘樹 穴澤大樹

ワイヤーク式金属積層造形により作製した異種アルミニウム合金積層造形物の接合強度評価や結晶方位観察を行い、異種材の積層造形時に生じる課題や造形物の特性を明らかにした。また、積層造形条件と残留応力の関係を調べ、残留応力緩和手法について検討した。これにより、異なるアルミニウム合金が混在した積層造形物の作製が可能となり、A7075とA5356を組合せたインペラ等の試作を行うことができた。

Key words: 金属積層造形、WAAM方式、ハイブリッド複合加工機、機械的特性、残留応力、結晶方位

1. 緒言

金属積層造形技術が航空宇宙分野や医療等、多くの分野で活用が進んでおり、パウダーベッド方式(PBF)や指向性エネルギー堆積方式(DED)など様々な手法が開発されている。一方で、研究報告や実用化事例はPBF方式によるものが多く、その他の手法では、積層造形条件や積層造形物の特性に関する知見が少なく、実用化事例も少ない。

そこで、当所では、形状付加や異種金属積層、大型品造形に強みを持つDED方式のうち、金属ワイヤを溶融、凝固させるワイヤーク式金属積層造形(以下WAAM方式とする)を対象に研究を行ってきた¹⁾。

今後、WAAM方式の強みである異種金属積層を活かした技術支援を行うため、次の三点について検討した。なお、検討対象とする材料は、ロボット部材として注目されるアルミニウム合金とした。

一点目は、異種アルミニウム合金接合部の評価である。例えば、高強度な2000系のアルミニウム合金に、耐食性が良好な5000系のアルミニウム合金を積層できれば、両合金の特性を活かした部材作製が可能と考える。しかし、接合界面での特性劣化や積層不良が懸念される。そこで、本研究では、2000系、6000系、7000系アルミニウム合金上に5000系アルミニウム合金を積層造形した際の、溶け込み形状、積層造形物の引張特性及び硬さの評価を行った。

二点目は、積層造形時に発生する残留応力の問題である。本研究で用いた積層造形装置は5軸加工機との複合機であり、積層造形から仕上げ加工まで一貫して行えることが強みである。しかし、積層造形時の残留応力により、加工後の寸法精度が十分に確保できないことが懸念される。そのため、複合機の強みを活かすためには、残留応力の発生状況の把握と残留応力低減手法の開発が必要である。本研究では、積層造形部と母材の残留応力を測定し、積層造形条件による残留応力の変化や母材余熱による残留応力低減の可能性について検証を行った。

三点目は、積層造形物の異方性の評価及び現象の解

明である。PBF方式では、積層造形物の結晶方位を制御することで、機械的特性に異方性を付与できると報告がある²⁾。異方性を持つ材料は、使用時の負荷方向を考慮した設計を行うことで、機能性を高めることができるため、金属積層造形物の新たな強みとして注目されている。昨年度の研究では、WAAM方式においても、積層造形物の引張特性に異方性が見られている¹⁾。この原理を明らかにすることで、PBF方式と同様に、機械的特性の異方性を制御し、高機能部材を造形できる可能性がある。そこで、本研究では、WAAM方式における造形物の特性異方性の発現機構を調べるために、断面観察や結晶方位観察を行った。

最後に、これらの結果を受けて、異種アルミニウム合金を組み合わせたロボット部材の試作を行った。

2. 実験

2.1. 異材接合部の評価

2.1.1. 溶け込み評価

母材と積層造形物の接合部の溶け込み形状を評価した。積層造形にはヤマザキマザック(株)製のハイブリッド複合加工機(VARIAXIS j-600/5X AM ワイヤーク式)(以下ハイブリッド複合加工機とする)を用いた。積層造形条件は表1のとおり、入熱の大小や、1層目の積層造形時のパルスの有無について比較を行う条件とした。ここで、“CMT”は“Cold Metal Transfer”の略称であり、ワイヤ送給制御による低入熱、低スパッタを特徴とする溶接方法である。“P”は“Puls”の略称であり、周期的に高い電流を流し、深い溶け込みを得る溶接方法である。積層材は直径1.2mmのA5356ワイヤを用い、A6061母材上に積層した。図1に積層造形物の形状及びトーチパスを示す。1層毎にトーチの移動方向を反転し、6層積層造形を行った。各層間ではヤマザキマザック(株)製のサーモグラフィカメラ(VARIAXIS j-600/5X AM用サーモグラフィシステム)によって温度確認を行い、積層造形部が200[°C]以下となってから次の層を積層した。

試料は、積層造形物のおおよそ中央部から切り出し、

樹脂包埋、研磨後にケラー氏液によりエッチングした。測定項目は図2に示す溶け込み深さ、1層目のビード幅、1/2位置における溶け込み幅とした。観察には(株)キーエンス製のデジタルマイクロスコープ(VHX-7000)を用いた。

表1 積層造形条件

試料No.	溶接方法		電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]
1	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目以降	CMT	106	9.9	6	400
2	1層目	CMT+P	177	20.7	9	600
	2層目以降	CMT	160	15	10	600
3	-	CMT	106	9.9	6	400
4	-	CMT	160	15	10	600

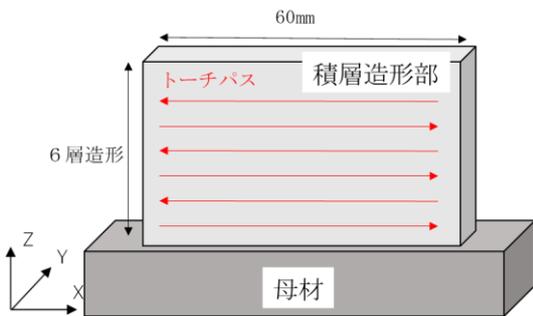


図1 溶け込み確認用積層造形物の模式図

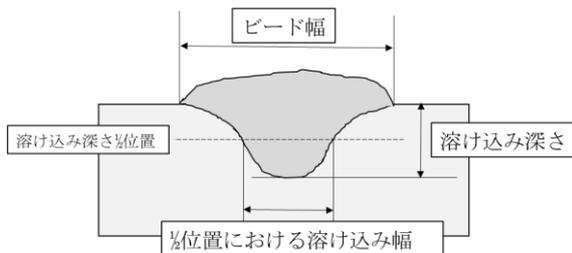


図2 溶け込み測定項目

2. 1. 2. 機械的特性の評価

アルミニウム合金 A2017、A6061、A7075 の母材上に A5356 を積層し、引張試験による接合強度評価と硬さ試験を実施した。A2017 及び A6061 への積層造形にはハイブリッド複合加工機を用い、A7075 への積層造形には、ファナック(株)製の産業用ロボット (ARC Mate 100id)、二軸ポジショナ及び フロニウス社製の CMT 溶接機 (Fronius TPS 400i) から構成される装置を用いた。表2に積層造形条件を、図3に積層造形物の模式図を示す。この積層造形物から図4の JIS13B 号引張試験片を作製した。試験片は、接合部界面が試験片平行部の中心付近となるようにワイヤ放電加工機により切り出した。切り出し後は、フライス盤により積層造形

時の凹凸部を平坦化し、サンドペーパーで加工変質層の除去を行った。

引張試験片は母材ごとに6本作製し、3本は熱処理をせずに試験を行った。母材が A2017 及び A6061 の試験片は、残りの3本を表3の条件で熱処理後に試験を行った。引張試験には(株)島津製作所製の万能材料試験機 (AG-100KNXPlus) を用い、ひずみの測定にはビデオ式伸び計を用いた。

硬さ試験片は、引張試験片と同じ積層造形物から各2個ずつ採取した。接合部を切り出し後、1個は表3の熱処理を実施し、1個は熱処理せずにそれぞれ樹脂包埋、鏡面研磨した。硬さ測定は、図5に示すとおり、溶け込み部と母材部の境界を0とし、積層造形部側を正、母材部側を負としてZ軸方向に線測定を行った。測定は(株)島津製作所製のマイクロビッカース硬度計 (HMV-G21DT) を用いた。

表2 引張試験片積層造形条件

母材	溶接方法		電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]
A2017	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目以降	CMT	106	9.9	6	400
A6061	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目以降	CMT	106	9.9	6	400
A7075	1層目	CMT	153	20.1	9	400
	2層目		144	15.4	9	400
	3層目		100	13.8	7	800
	4層目		91	13.3	6.5	800
	5層目		82	12.8	6	800
	6~15層目		67	12.1	5	800
	16~20層目		61	11.8	4.5	800
	21~35層目		61	11.8	4.5	1000
	36~45層目		54	11.6	4	800
46~62層目	54	11.6	4	1000		

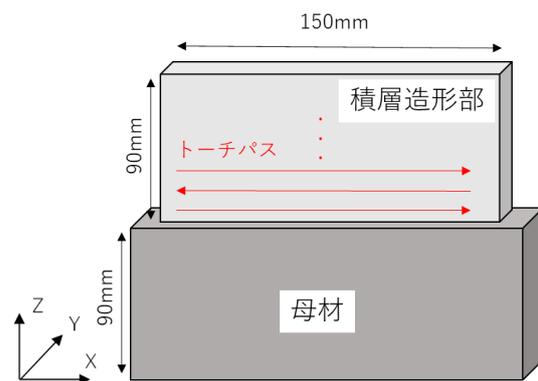


図3 引張試験用積層造形物の模式図

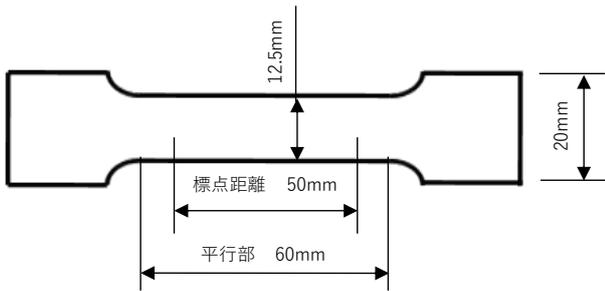


図4 引張試験片形状

表3 熱処理条件

母材	熱処理	温度	時間	冷却方法	
A2017	T4	溶体化処理	500[°C]	45[min]	水冷
		時効処理	室温	96[hr]	-
A6061	T6	溶体化処理	530[°C]	45[min]	水冷
		時効処理	175[°C]	8[hr]	徐冷
A7075	T6	溶体化処理	465[°C]	45[min]	水冷
		時効処理	120[°C]	24[hr]	徐冷

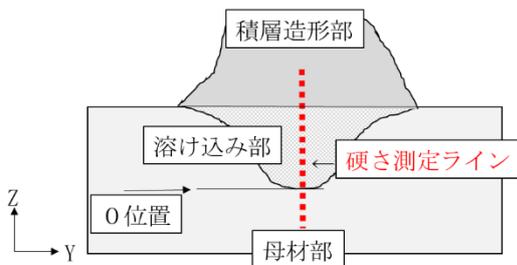


図5 硬さ測定位置の模式図

2. 2. 残留応力評価

2. 2. 1. 積層造形部残留応力測定

測定試料は、ハイブリッド複合加工機により、A5052母材上にA5356ワイヤを表4の条件で積層造形した。図6に積層造形物の模式図を示す。積層造形条件は、入熱の大小による残留応力の比較ができる条件とした。測定位置は、積層部の残留応力分布を確認するために、図7のように9点測定した。測定には、パルステック工業(株)製の残留応力測定装置(μ -X360s)を使用し、 $\cos \alpha$ 法³⁾によって残留応力を算出した。測定の前には流水で洗浄を行い、表面に付着したヒューム等を除去した。

表4 残留応力測定試料積層造形条件

試料名	溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	
入熱小	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目以降	CMT	106	9.9	6	400
入熱大	1層目	CMT+P	177	20.7	10	600
	2層目以降	CMT	160	15	9	600

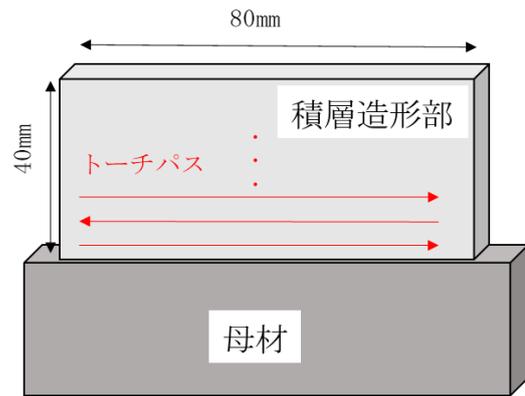


図6 残留応力確認用積層造形物の模式図

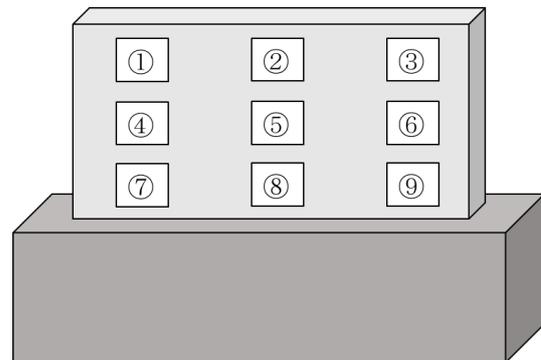


図7 残留応力測定位置の模式図

2. 2. 2. 母材部残留応力測定

測定試料は、ハイブリッド複合加工機により、A5052母材上にA5356ワイヤを立壁形状に積層造形した。図8に積層造形物の模式図を示す。積層造形条件は表5に示すとおり、入熱の大小と母材の加熱による差の比較ができる条件とした。母材の加熱は前報に示す方法¹⁾で行った。測定は、母材側の残留応力分布を調べるために、母材裏面のマッピング測定を行った。マッピング測定は図9に示すとおり、積層部真裏を中心として、120[mm]×50[mm]の範囲を10[mm]間隔とした。残留応力の測定は、前述の残留応力測定装置を使用し、 $\cos \alpha$ 法により行った。

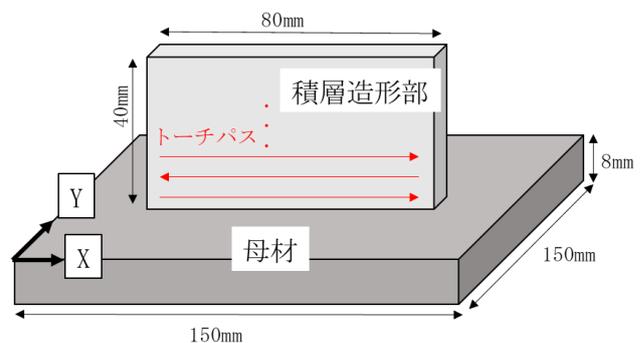


図8 残留応力確認用積層造形物の模式図

表5 残留応力測定試料積層造形条件

試料名	溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	母材温度
入熱小 母材加熱無	CMT+P	107	18.4	7	400	室温
	CMT	106	9.9	6	400	
入熱小 母材加熱有	CMT+P	107	18.4	7	400	200℃
	CMT	106	9.9	6	400	
入熱大 母材加熱無	CMT+P	177	20.7	10	600	室温
	CMT	160	15	9	600	
入熱大 母材加熱有	CMT+P	177	20.7	10	600	200℃
	CMT	160	15	9	600	

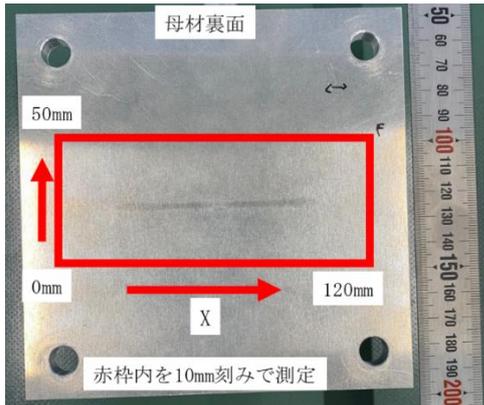


図9 残留応力マッピング測定位置

2. 3. 積層部の異方性の要因検証

昨年度実施した A5356 積層造形部の引張試験結果を表6に示す¹⁾。結果から、垂直方向と水平方向で伸びの値に差があり、異方性が確認された。この異方性が結晶異方性により生じているのか確認するために、電子線後方散乱回折 (EBSD) 法による観察を実施した。試料は、2. 1. 1. 溶け込み評価で用いた試料 No. 1 より採取した。なお、試料 No. 1 の積層造形条件は表6に示した引張試験時の試験片積層造形条件と同一である。採取した試料は、樹脂包埋、鏡面研磨仕上げを行い、観察に供した。観察には、宮城県産業技術総合センター保有の走査型電子顕微鏡 (SU5000+EDAX Pegasus EDS/EBSP) を用いた。また、(株)キーエンス製のデジタルマイクロスコープ (VHX-7000) による断面観察も行った。

表6 昨年度引張試験結果

	引張強さ [N/mm ²]	0.2%耐力 [N/mm ²]	伸び [%]
垂直方向	247	114	13
水平方向	253	107	20

3. 結果

3. 1. 異材接合部の評価

3. 1. 1. 溶け込み評価

表7、図10に溶け込み形状測定結果及び断面観察写真を示す。溶け込みは試料 No. 2 が最も大きく、次いで

試料 No. 1、試料 No. 4 が同程度であり、試料 No. 3 は不十分である。試料 No. 1 と試料 No. 4 の積層条件については、母材を A2017 として積層したのも同様に断面観察を行った。結果を図11に示す。(b)の赤枠部に示すとおり、試料 No. 4 では接合不良が生じていた。溶け込み不十分の試料 No. 3、接合不良の試料 No. 4 はいずれも CMT のみの条件であり、良好な接合界面を得るためには、CMT にパルスを加えて積層造形することが望ましいと分かった。

表7 溶け込み形状測定結果

試料No.	溶け込み深さ [mm]	ビード幅 [mm]	1/2位置における溶け込み幅 [mm]
1	1.8	7.5	2.7
2	3.4	11.9	5.0
3	0.9	4.5	1.9
4	2.8	8.3	3.1

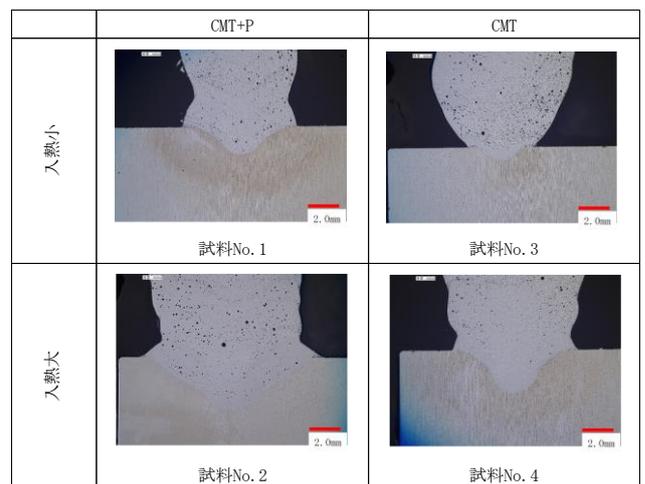


図10 断面観察写真

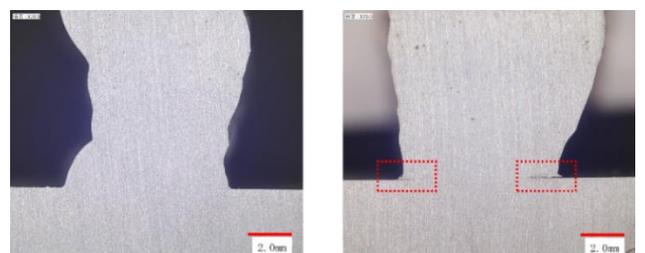


図11 断面観察写真(母材 A2017)

3. 1. 2. 機械的特性の評価

各試料の熱処理前後における溶け込み部の硬さ分布を図12～14に示す。A2017、A6061、A7075のいずれを母材としても、積層造形時の入熱により母材部の硬度低下がみられたが、熱処理によって回復した。一方で、積層部や溶け込み部は熱処理による顕著な硬度

変化は見られなかった。

次に、引張試験結果を表8に示す。A6061 母材の熱処理無の試験片のみ母材熱影響部で破断し、それ以外の試験片では積層造形部で破断した。これは、図13に示したA6061への積層造形物のみ、母材部の硬さが積層造形部より低くなっていることが原因と考えられる。図12、14に示したA2017及びA7075では母材硬さが積層造形部と同等以上であることから、積層造形部で破断したと思われる。ただし、A6061母材においても、熱処理を行うことで、積層造形部破断へと変化しており、熱処理合金上へ積層造形を行う場合には後熱処理を行うことが望ましいと分かった。

表8 引張試験結果

母材	熱処理	引張強さ [N/mm ²]	破断位置
A2017	-	224	積層造形部
A2017	T4	229	積層造形部
A6061	-	183	母材熱影響部
A6061	T6	186	積層造形部
A7075	-	237	積層造形部

また、母材がA6061の時には低い引張強さとなっている。そこで、引張試験片の破断面観察を行ったところ、図15に示すようなガス欠陥が多数現出していた。

3.1.1. 溶け込み評価の項で示した図10でも、積層造形部には多数のポイドが存在していた。一方、図11の母材がA2017の時には、積層造形部のポイドが比較的少ない。このことから、母材A6061の試験片は、ポイドにより積層造形部の強度が低下したと考えられる。

ここで、ポイドの発生原因を考察する。図10と図11では、母材が異なる以外、造形装置や積層造形条件は同一である。また、ポイドが積層造形部に発生していることから、母材の影響はないと考えられる。このことから、可能性として、積層造形当日の湿度やシールドガスの影響等が考えられるが、本研究内では十分な検証ができなかったため、今後の課題である。

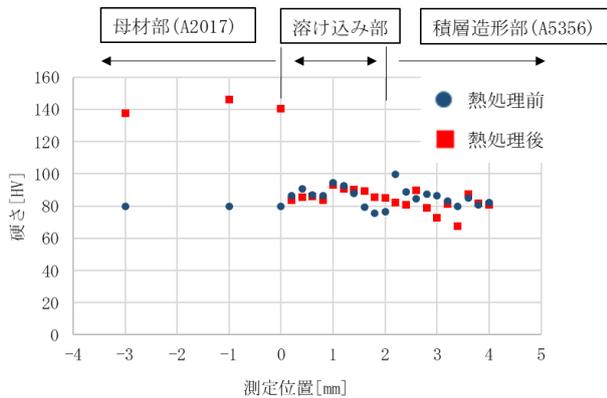


図12 硬さ試験結果(母材: A2017)

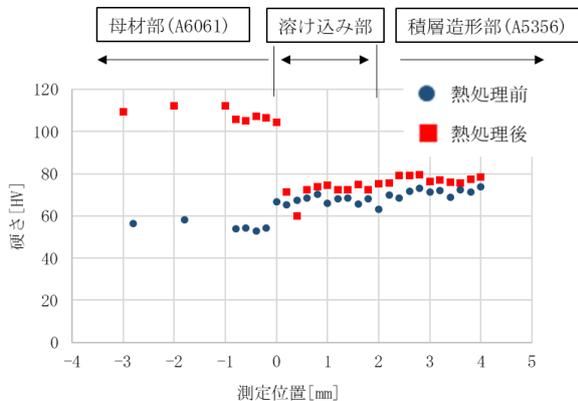


図13 硬さ試験結果(母材: A6061)

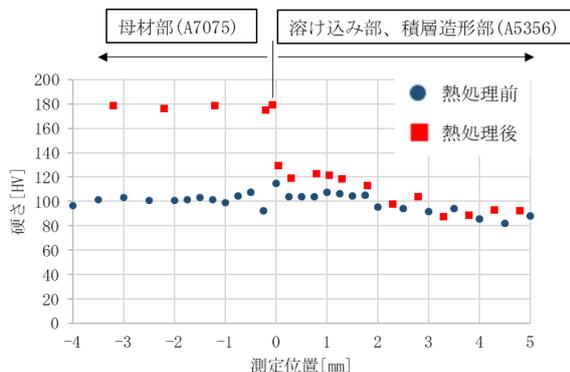


図14 硬さ試験結果(母材: A7075)

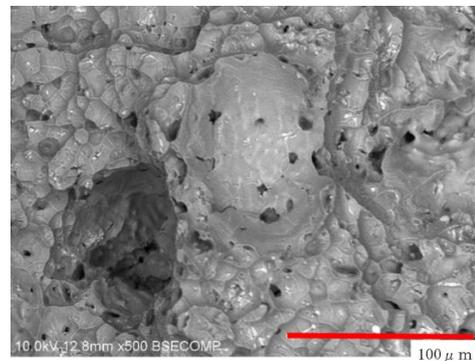


図15 破断面観察結果(母材: A6061、T6熱処理品)

3.2. 残留応力評価

3.2.1. 積層造形部残留応力測定

図16に積層造形部の残留応力分布を示す。図は数値とカラーマップで示しており、+が引張応力、-が圧縮応力である。結果から、全体的に引張の残留応力が存在し、入熱が大きいと引張残留応力が大きくなる傾向が見られる。また、積層造形部下部に比べ、積層造形部上部の残留応力が大きくなる傾向が見られる。これは、繰り返しの入熱により、積層下部が焼鈍され、応力が緩和されているためと考えられる。しかし、その差は小さく、測定位置によるバラつきも考えられる。

ため、本結果から断定的な結論を導くことはできない。

図 1 7には積層造形部の測定で得られたデバイ環を示す。cos α法では、デバイ環の歪から応力値を算出するが、この時得られるデバイ環のピーク強度の偏りが結晶異方性を示す。図 1 7からは、ピーク強度の強い偏りは見られず、結晶異方性はないものと考えられる。

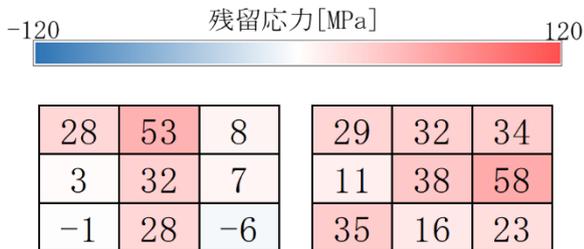


図 1 6 積層造形部残留応力分布
(左：入熱小 右：入熱大)

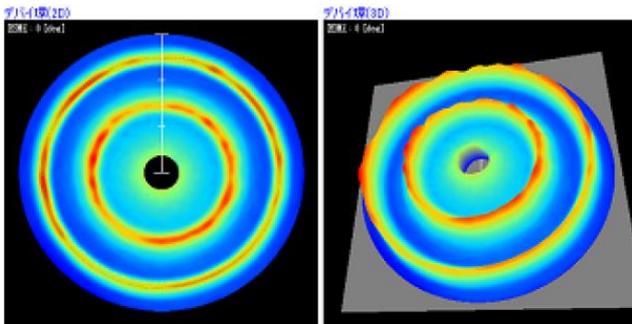


図 1 7 デバイ環(左：2D表示 右：3D表示)

3. 2. 2. 母材部残留応力測定

図 1 8に母材裏面の残留応力分布を示す。結果から、いずれの条件においても、積層造形部真裏付近では、積層造形部よりも大きな引張応力が残留しており、最大で100[MPa]程度である。これは次のように推測される。母材はアーク放電箇所を中心として局所的に加熱され、局所的な熱膨張が起き、その後母材が冷却される。母材が収縮する際、厚さ方向はある程度収縮できるが、面内方向は積層物により拘束されるため十分に収縮できず、引張の残留応力が発生する。

各条件を比較すると、入熱の大小による残留応力値や分布の変化は見られない。母材の加熱による影響は、積層部真裏付近ではあまり見られないが、その周囲では圧縮応力の有無に違いが生じている。端部付近で圧縮応力が発生する原因として、熱膨張によってボルトで固定されている端部付近が押されるためと考えられる。母材加熱有の場合には、母材全体が比較的均一に加熱、膨張し、さらに焼鈍もされるため、残留応力が緩和されていると考えられる。

以上のことから、母材側の 200[°C]程度の加熱による応力緩和効果は限定的であり、積層造形部真裏近傍の引張残留応力にはほとんど影響していないことから、

残留応力への有効な対策とはならないと考えられる。



(a) 入熱小-母材加熱無

x/y	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
50	-11	-7	3	11	25	41	46	43	27	9	6	-8	-7
40	-7	1	2	42	47	69	76	63	61	28	10	4	-3
30	-4	4	13	80	89	85	72	92	86	67	7	8	-7
20	-6	13	12	71	85	86	87	80	89	69	13	10	-9
10	-7	-3	4	43	55	73	75	78	60	33	0	-1	-6
0	-10	-9	-6	13	25	47	58	46	34	19	1	-2	-9

(b) 入熱大-母材加熱有

x/y	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
50	-20	-15	-23	3	34	44	50	53	32	13	-5	-9	-6
40	-22	-19	-8	45	79	95	85	81	75	44	-14	-11	-17
30	-1	22	-5	95	95	27	97	48	91	81	-4	10	-16
20	-2	25	1	85	101	104	92	94	94	74	7	-1	-15
10	-4	0	-9	31	74	81	81	78	67	28	-16	-23	-14
0	-12	-19	-9	-4	23	33	38	24	20	0	-19	-22	-17

(c) 入熱大-母材加熱無

x/y	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
50	-7	-11	2	13	28	36	44	48	40	18	5	0	-2
40	-17	0	14	41	71	80	74	82	74	54	9	-3	-9
30	-6	9	10	77	89	94	88	91	92	85	26	25	5
20	-10	21	7	65	102	92	87	73	98	90	24	27	0
10	-13	6	9	54	80	77	89	81	76	54	15	-2	-7
0	-6	-3	3	16	42	57	49	55	38	27	3	-4	-12

(d) 入熱大-母材加熱有

図 1 8 母材裏面残留応力分布

3. 3. 積層部の異方性の要因検証

図 1 9に A5356 積層部の EBSD 観察結果を示す。図から、結晶の異方性は見られず、ランダムな結晶方位となっていることが分かる。このことは、3. 2. 1. 積

層部残留応力測定の際の図17の結果とも合致する。結晶異方性を持つパウダーベッド方式の積層造形物と異なり、ランダムな結晶方位となる積層造形物はWAAM方式の特徴と考えられる。

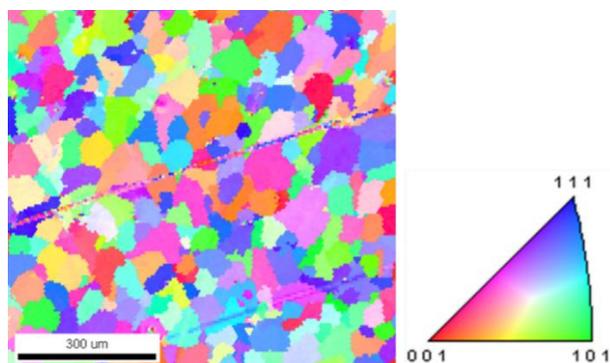


図19 積層造形部の結晶方位マップ

機械的特性に異方性が見られる一方で、結晶異方性は見られない結果となった。このことから、機械的特性に影響を与える要因として、ボイドの分布が考えられる。図20に示した積層造形部の断面観察結果では、赤枠部で示すボイドが多い部分と、少ない部分がZ軸方向に周期的に存在している。これによりZ軸方向への引張を行う垂直方向の伸びが低下したと考えられる。また、ボイドは積層ピッチと同程度の間隔であり、積層界面付近に発生していると考えられる。そのため、ボイドを低減することで、機械的特性の異方性はなくなり、垂直方向においても水平方向と同等の伸びが得られると考えられる。

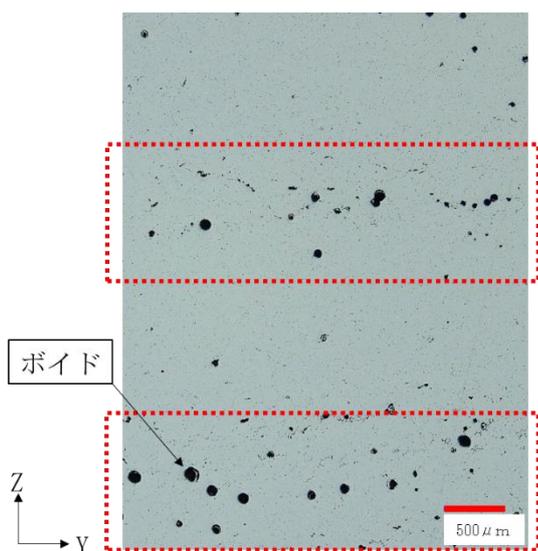


図20 積層造形部断面観察結果

また、参考までに、図21に母材と溶け込み部の界面のEBSD観察写真を示す。写真上部がA5356積層造形部であり、写真下部がA6061母材部である。結晶粒

径が変化する部分が界面となる。結果から、母材側の結晶方位を受け継いでいる様子は見られない。そのため、母材側の結晶方位が積層造形部の結晶方位へ与える影響はないと考えられる。

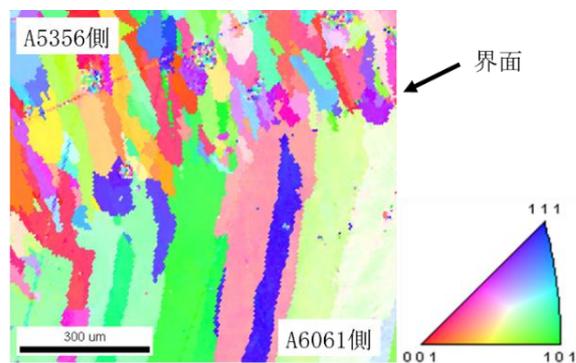


図21 積層造形部-母材界面の結晶方位マップ

4. ロボット部材の試作

4. 1. 異種アルミニウム合金による機能性の付与

これまでの実験により、A2017、A6061及びA7075とA5356は接合可能であることが確認できた。これを用いることで、異なるアルミ合金を組み合わせることで機能性の付与が可能である。今回は、丸棒の外周に積層造形を行う表面肉盛り形状とインペラ形状の試作を行うこととした。なお、装置にはハイブリッド複合加工機を用いた。

4. 2. 丸棒への表面肉盛り

A7075の直径20[mm]の丸棒外周に、A5356の積層造形を行った。図22に積層造形物にイメージを示す。これまでの結果より、溶け込みが大きくなるCMTにパルスを加えた積層造形条件を基本とし、途中で溶接を止めずにスパイラル状にトーチを動かすこととした。ここで、条件一定で積層造形した場合、母材温度が上昇し、母材が溶け落ちる結果となった。そこで、徐々に入熱を下げ、母材の過熱を抑制する条件とすることで、形状を作製することができた。図23に積層造形後の外観を、その時の条件を表9に示す。

溶接割れ等も発生しておらず、A7075上にA5356を表面肉盛りできることが確認できた。



図22 丸棒への表面肉盛りのイメージ

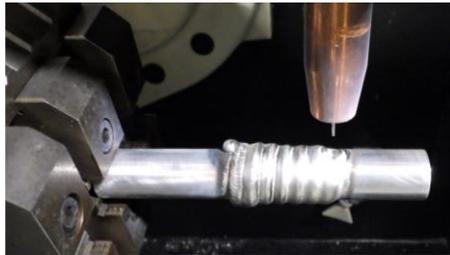


図 23 試作した丸棒への表面肉盛りの外観

表 9 丸棒への表面肉盛り時の積層造形条件

溶接方法		電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]
1周目	CMT+P	107	18.4	7	400
2周目	CMT	106	9.9	6	400
3周目					600
4周目以降					800

4. 3. インペラ形状

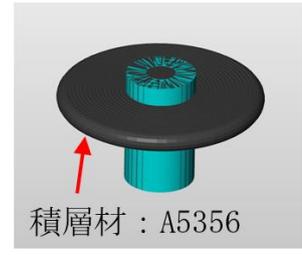
インペラ形状の作製は、図 2 4 に示すように、A7075 の丸棒の外周に A5356 で円盤形状を作製、その上に翼形状を 6 枚配置し、最後に切削加工により仕上げた。図 2 5 に試作したインペラの外観を、表 1 0 に積層造形条件を示す。ここで、円盤部の積層造形は、テーブルを 90 度傾斜させ、さらに回転させているが、その際にダレが発生したため、3 層目以降はトーチ送りを早くすることで、ダレの発生を低減させた。

完成したインペラの一部にブローホールの発生が確認されたが、割れ等の不具合の発生は見られなかった。

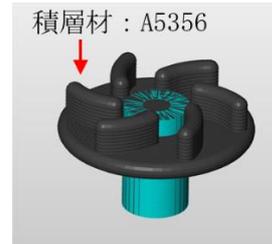
以上の結果より、A7075 と A5356 の異なる特性を有するアルミニウム合金が混在した部材の作製は可能である。一方で、3. 1. 2. の結果より、積層造形時の入熱による強度低下が想定される。今後、接合部の耐食性評価にも取り組む必要がある。実用化においては、これらの結果を踏まえて、設計及び積層造形条件の決定をする必要がある。



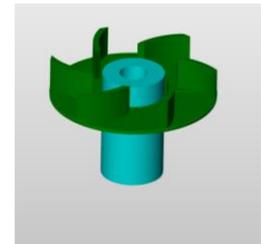
(a) 母材形状



(b) 円盤部を積層造形

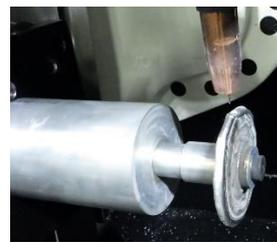


(c) 翼部を積層造形



(d) 切削加工後

図 2 4 インペラ形状の作製方法



(a) 円盤部積層造形後



(b) 翼部積層造形後



(c) 切削加工後

図 2 5 作製したインペラ形状

表 1 0 インペラ形状作製時の積層造形条件

積層造形部	溶接方法		電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤーフィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]
円盤部	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目	CMT	106	9.9	6	400
	3層目以降					600
翼部	1層目	CMT+P	107	18.4	7	400
	2層目以降	CMT	106	9.9	6	600

5. 結言

本研究では、異種アルミニウム合金接合部の特性評価、積層造形物の残留応力の評価、積層造形部の特性異方性の要因検証及び異種アルミニウム合金を組み合わせた部材試作を行った。これらの結果から下記の知見が得られた。

- ・良好な母材と積層部との接合強度を得るためには、1層目の積層造形条件として、CMTにパルスを加えて積層することが望ましい。
- ・A2017、A6061、A7075へ積層造形を行うと入熱により、母材側の硬度が低下する。熱処理によって母材硬度は回復するため、熱処理合金上へ積層造形を行った際には後熱処理を行うことが望ましい。
- ・積層部、母材部ともに全体的に引張の残留応力が発生し、母材部の方が大きな残留応力が存在する。
- ・母材側の200[°C]程度の加熱による残留応力の緩和効果は限定的であり、残留応力に対する有効な対策とはならない。
- ・A5356積層造形物に結晶異方性は存在しないが、ポイドの分布によって伸びに異方性が生じている。ポイドを低減することで垂直方向でも水平方向と同等の伸びが得られると期待できる。
- ・異種アルミニウム合金を組み合わせた丸棒への表面肉盛りとインペラの造形を行うことができた。

謝辞

本研究において、ご指導や試験データのご提供等、多大なるご協力を賜りました東京農工大学の笹原弘之教授及び合田万智様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安齋弘樹, 仲沼岳, 松浦和俊. 3次元金属積層によるアルミ合金構造体の機械的特性に関する研究. 令和3年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/652144_1827838_misc.pdf, (参照 2023-02-15)
- 2) 中野貴由, 桐原聡秀, 近藤勝義, 西川宏, 田中学. デジタル化時代の Additive Manufacturing の基礎と応用. リブロ社, 2022年1月, 307p, ISBN978-4-915697-37-1.
- 3) 田中啓介. 2次元検出器を用いた $\cos \alpha$ 法による X線応力測定その1 測定の基礎. 材料. 2017年, 第66巻, 第7号, pp. 470-478.