

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、仲沼岳、松浦和俊

ワイヤーク式金属積層造形（以下、WAAM方式とする）で作製したアルミニウム合金積層造形物の空孔の削減方法の検討及び機械的特性の把握を行った。今回使用した A5356 では、積層造形時の母材温度を高くすることで空孔の発生を抑制でき、また A5052 と同等の強度を有することが分かった。さらに、ロボット部材への利用として、軽量化と高強度を両立させるため、内部に複数の仕切りを有するパイプ形状の試作を行った。

Key words: 金属積層造形、WAAM方式、ハイブリッド複合加工機、空孔、機械的特性

1. 緒言

近年、金属積層造形装置が普及してきており、複雑な形状の部品作製にも用いられるようになってきている。普及している金属積層造形装置は、パウダーベッド方式とデポジション方式の2種類に大別されるが、我々は金属部材への形状付加及び異種金属積層が可能なデポジション方式の研究を実施している。

昨年度の研究では、金属ワイヤをアーク放電により溶融、固化させる WAAM方式を用いて、アルミニウム合金によるスクレュープロペラ形状の作製を行い、切削加工と比べて加工時間及び除去重量ともにメリットのある結果が得られた¹⁾。その一方、積層造形物には多数の内部空孔が認められた。内部空孔は引張強さ等機械的特性の低下や表面粗さ悪化の原因となることが懸念されている。また、金属積層造形を製品製造に利用するには、機械的特性の把握も重要となってくる。

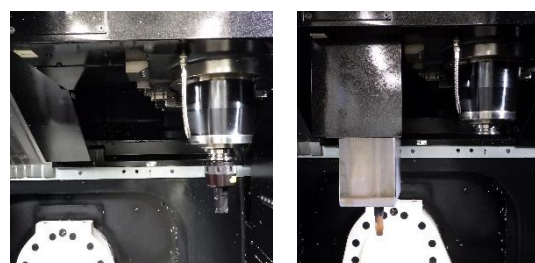
そこで本研究では、アルミニウム合金積層時の空孔削減の検討及び引張強さ、0.2%耐力、伸びの調査を行うとともに、ロボット部材への利用を検討した。

2. 実験装置

装置には、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 ワイヤーク式を用いた。本装置は、5軸加工機のツールとして MIG 溶接機を備えており、トーチ先端を切削工具先端と同一の座標系で制御することで、積層造形と切削加工を段取り替えなしに連続で行うことができる。切削加工及び金属積層造形の NC データは、OPEN MIND 製の hyperMILL を用いて作成した。図1に装置の外観を、図2に切削加工時及び積層造形時の加工室内の様子を示す。



図1 装置外観



(a) 切削加工時 (b) 積層造形時

図2 加工室内の様子

3. 空孔の把握

3.1. 実験方法

積層造形物の内部空孔の発生状況を把握するため、直径1.2mmのアルミニウム合金A5356のワイヤを用い、表1の2種類の条件により積層造形を行った。条件1は、朱らの研究²⁾を参考に設定し、条件2はアルミニウム合金積層時に使用装置で設定できる最大出力とした。また、トーチ送り速度は単位長さ当たりの積層量が条件1と2で同一となるように設定した。内部観察には東芝ITコントロールシステム（株）製X線CT装置 TOSCANER-24500AVFD を用いた。

表 1 積層造形条件

	条件1	条件2
電流 [A]	106	160
電圧 [V]	9.9	15.0
ワイヤーフィード [m/min]	6	9
トーチ送り [mm/min]	400	600
シールドガス	Ar	Ar

3. 2. 空孔の発生

ワイヤーと同系のアルミニウム合金 A5052 製ベースプレート上に条件 1 により 40×20mm の長方形を図 3 のトーチパスで 5 層積層し、内部空孔の発生状況を調べた。積層造形物の外観を図 4 に示す。

図 5 に示す高さ方向 3 カ所における X 線 CT による内部観察結果より、下部及び中部では、大きな空孔が多数発生していることが分かる。一方、上部では下部及び中部に比べて空孔は小さく、少数であった。下部と上部での積層時の大きな違いは、積層を行うベースプレートや直前の積層造形物（以下、母材とする）の温度である。これが原因となっていると考え、母材温度の空孔発生への影響を調べた。

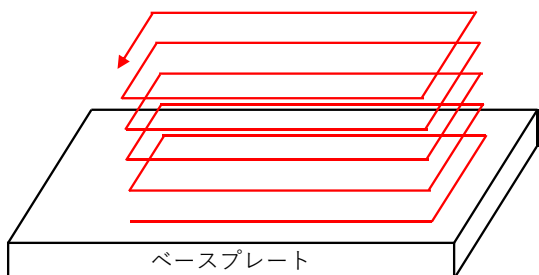


図 3 積層造形のトーチパス

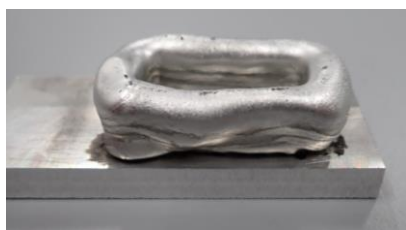
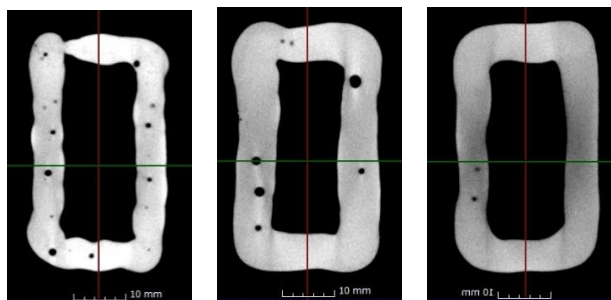


図 4 積層造形物の外観



(a) 下部 (b) 中部 (c) 上部

図 5 内部空孔の様子

3. 3. 母材温度の空孔発生に与える影響

ベースプレート温度が空孔発生に及ぼす影響を調べるため、図 6 に示す加熱機構を製作し、加熱機構のプレート上にベースプレートを設置し、ベースプレートを加熱して積層実験を行った。加熱機構のプレート温度を室温、100℃、200℃とし、空孔の発生状況を調べた。また Volume Graphics 製 VGSTUDIO MAX で求めた体積から空孔率を算出した。なお、ベースプレートは A5052 製を用い、表 1 の条件 2 で積層した。

積層造形物を X 線 CT により観察した内部空孔の様子を図 7 に、空孔率を表 2 に示す。これより母材温度を高くすることにより空孔率を減少させることが可能であることが分かった。

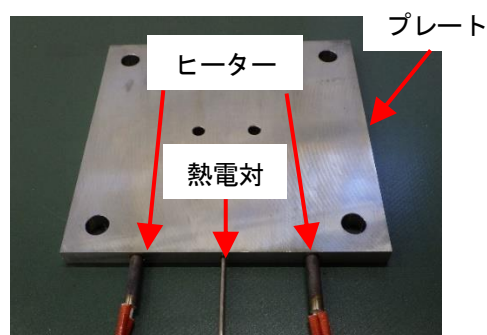


図 6 加熱機構の外観

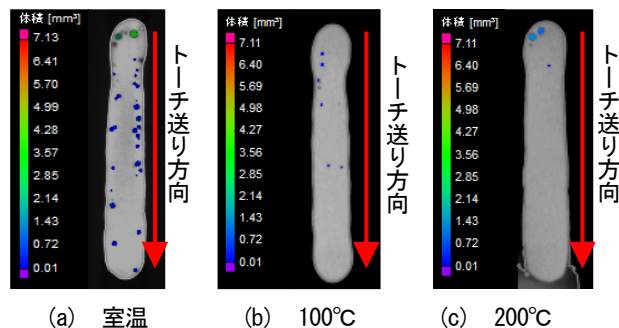


図 7 母材温度の変化による空孔の様子

表 2 母材温度による空孔率の違い

	空孔率 (%)
室温	0.173
100℃	0.008
200℃	0.043

4. 機械的特性の評価

4. 1. 実験方法

トーチ送り方向に対して直交及び平行方向の引張強さ、0.2%耐力及び伸びを評価した。

図 8 のトーチパスで A5052 のベースプレート上に幅 145mm、高さ 50mm 及び 150mm の立壁を積層した。引張

試験片は図9に示す13B号試験片とし、図10のように直交方向と平行方向に切り出した。積層造形時の凹凸をフライス盤で除去後、平行方向のものはフライス盤、垂直方向のものはワイヤ放電加工機により試験片形状とした。ワイヤ放電加工を用いた場合は、サンドペーパーにより加工変質層を除去した。試験機は、(株)島津製作所製万能材料試験機 AG-100KNXP1us を用いた。

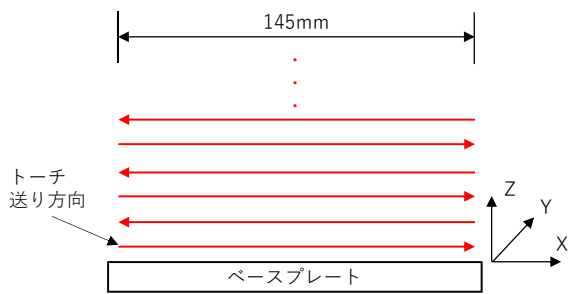


図8 積層造形のトーチのパス

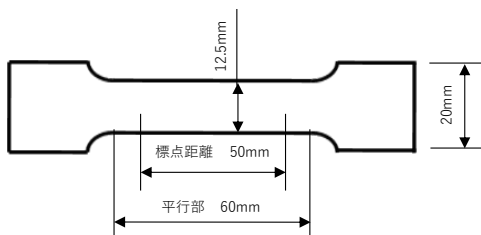


図9 引張試験片の形状

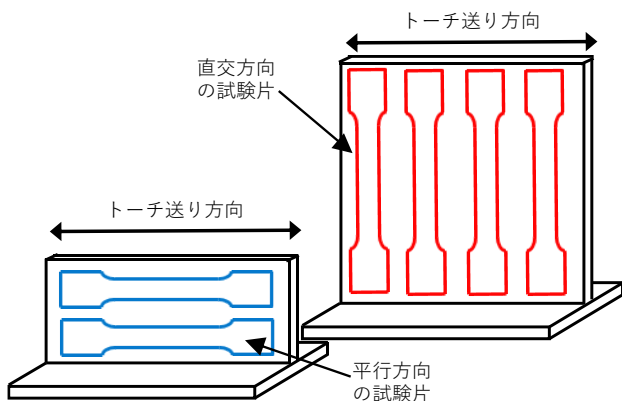


図10 引張試験片の切り出し

4. 2. 母材温度が機械的特性に与える影響

積層時の母材温度が引張強度へ与える影響を調べるため、6層積層する毎に1分程度の冷却時間を設けた各層の積層開始時の母材温度が低くなる条件（以下、冷却有とする）と、冷却時間を設けず母材温度が高く保持される条件（以下、冷却無とする）で比較した。その他の積層条件は、条件1及び条件2を用い、作製した平行方向の試験片により引張試験を実施した。な

お、評価した試験片は各条件1個である。

引張試験前後の試験片の外観を図11及び図12、内部空孔の様子を図13、空孔率を表3、引張試験の結果を表4に示す。

条件1冷却有以外では、空孔率及び引張強さ等は、ほとんど同じであり、条件1冷却有の場合のみ空孔率が高く、引張強さ及び伸びが低下した。このことより、アルミニウム合金積層造形物の機械的特性は、積層時の母材温度により変化することが分かった。前述のように母材温度で空孔率も変化するが、空孔率と機械的特性に直接の因果関係があるかは現段階では不明であり、今後の課題である。

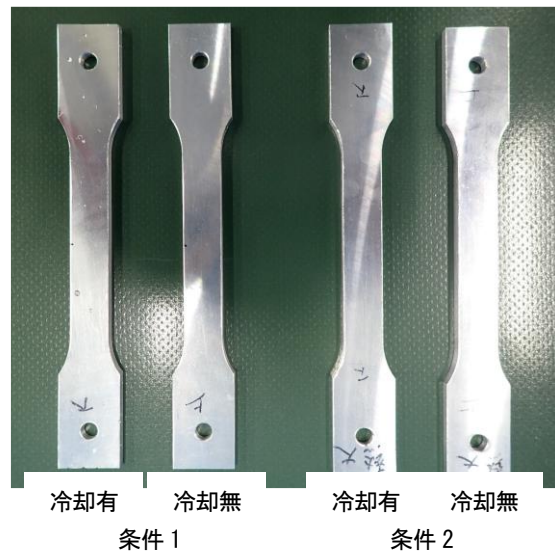
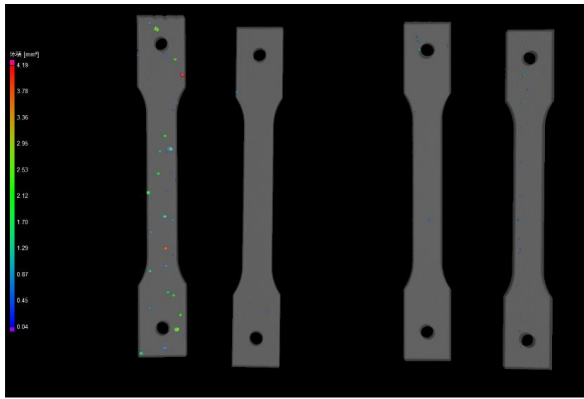


図11 引張試験前の試験片の外観



図12 引張試験後の試験片の外観



冷却有 冷却無 冷却有 冷却無
条件1 条件2
図13 試験片の内部空孔の様子

表3 積層条件及び冷却の有無による空孔率の違い

		空孔率 (%)
条件1	冷却有	0.55
	冷却無	0.02
条件2	冷却有	0.04
	冷却無	0.06

表4 積層条件及び冷却の有無による引張試験結果

		引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	伸び (%)
条件1	冷却有	224	113	10
	冷却無	256	112	23
条件2	冷却有	252	110	20
	冷却無	255	103	21

表5 平行方向の引張試験結果

	引張強さ (N/mm ²)			0.2%耐力 (N/mm ²)			0.2%耐力 (N/mm ²)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
条件1	253	256.1	250.4	107	111.8	102.0	20	22.9	17.5
条件2	260	262.5	255.1	104	110.6	99.3	25	27.4	21.5
A5052P	195 以上			110 以上			9 以上		

表6 直交方向の引張試験結果

	引張強さ (N/mm ²)			0.2%耐力 (N/mm ²)			0.2%耐力 (N/mm ²)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
条件1	247	257.0	234.7	114	115.7	112.0	13	16.2	10.0
条件2	229	241.6	217.6	106	109.1	103.5	11	12.5	8.6
A5052P	195 以上			110 以上			9 以上		

4. 3. 平行方向の機械的特性評価

トーチ送り方向と平行方向の機械的特性の評価を行った。積層条件は、条件1及び条件2の2条件とし、積層造形物がより高強度となった冷却時間を設けない条件で積層をした。評価した試験片は各条件3個とした。表5に結果を示す。また比較のため、一般的な5000系のアルミ合金であるA5052のJIS H4000に定められている数値を併せて示す。

条件1と条件2で、平行方向の引張強さ等に違いはみられず、A5052と同等以上の数値であった。

4. 4. 直交方向の機械的特性評価

トーチ送り方向と直交方向の機械的特性の評価を行った。積層条件は、前述4.3.と同じとし、評価した試験片は各条件4個とした。

結果を表6に示す。ここで、前述4.3.と同様にA5052の数値も併せて記載する。これより、条件1及び条件2ともに、A5052と同程度の値となっていることが分かった。

平行方向と直交方向の比較では、機械的特性に差がみられ、特に直交方向の伸びが小さい傾向がみられた。

パウダーベッド方式では、金属組織の異方性が原因で積層方向に対し、平行方向と直交方向で伸びに差が生じたとの報告がある³⁾。本研究でも今後金属組織の評価等を実施する予定である。

5. ロボット部材の試作

アルミニウム合金を使用するメリットに軽量化がある。さらなる軽量化には、パイプに代表されるような中空形状とすることが考えられるが、強度低下の問題が発生する。軽量化と強度を両立させる形状として、竹の節のように内部に仕切りを入れることが考えられるが、切削加工での作製は困難である。一方、今回使用している WAAM 方式では、5 軸機構と組合せることで、このような構造も作製が可能と考えられる。

そこで、外径 35mm、長さ 90mm のパイプの内部に、2 カ所に仕切りを有する形状を試作した。直径 30mm の円状にトーチを移動させ、積層高さが 30mm 及び 60mm に達した後に、テーブルを 40° 傾斜させて仕切りを作製した。積層条件は、条件 2 を用いた。作製物の外観及び X 線 CT により観察した内部の様子を図 1 4 及び図 1 5 に示す。

パイプ内に 2 つの仕切り形状が形成されており、仕切りを有するパイプ形状が作製可能であることが確認できた。



図 1 4 試作したロボット部材の外観

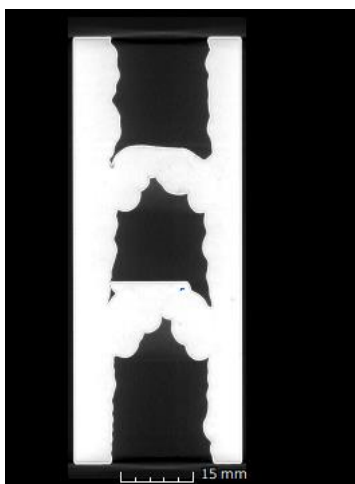


図 1 5 内部の様子

6. 結言

アルミニウム合金を用いて積層造形を行う際の空孔削減、機械的特性等の評価及びロボット部材の試作を行い、以下の結果を得た。

- ・アルミニウム合金を積層造形する際に、母材温度を高くすることで空孔削減が可能となった。
- ・機械的特性では、引張強さ、0.2%耐力及び伸びを測定した。積層条件を最適化することで、直交方向及び平行方向ともに、A5052 と同等の値となった。
- ・パイプ内に仕切りを設置した、軽量化と高強度を両立させた形状を試作できた。

参考文献

- 1) 安齋弘樹. “複雑形状加工時の切削加工と金属積層造形のコスト比較”. 令和 2 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告. pp. 21-24.
- 2) 朱小金, 阿部荘志, 高木悠貴, 笹原弘之. “アルミニウム合金を用いた熔融金属積層造形物の造形条件最適化に関する研究”. 第 2 2 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集. 2015. pp. 91-92.
- 3) 木村貴広, 中本貴之. “金属粉末レーザ積層造形法により作製した Al-10%Si-0.4%Mg 合金の組織と機械的性質”, 粉末および粉末冶金. vol. 61, 2014, pp. 531-537.