

# ワイヤ材料とアーク放電を用いた Additive Manufacturing による造形物の温度モニタリングと薄肉板材端部への付加造形

東京農工大学 ○鶴巻 起直, 三菱電機株式会社 千葉原 宏幸, 塚本 晋士, 東京農工大学 ©笹原 弘之

## 要 旨

ワイヤ材料とアーク放電を用いたアディティブ・マニファクチャリングにおいて、代表的な Ni 系合金である Inconel 718 を用いた際の、連続で均一なビード形状が得られる造形条件を調査した。立壁状造形物の幅は電流、トーチ送り速度、ワイヤ送給量によりほぼ定まり、造形中の前層の温度を一定にすることで精度が向上することを明らかにした。これにより熱容量の小さい板材端部への薄肉壁の付加造形を可能とした。

## 1. 緒 言

近年、機械部品や金型における複雑形状を迅速に造形し、製造コストの低減や高機能化を可能にするアディティブ・マニファクチャリング技術への期待が高まっている<sup>1)</sup>。産業用ガスタービンのタービンブレードは高温の遠心力場で使用されるため亀裂や酸化減肉などの損傷が発生する<sup>2)</sup>。そこで、本手法を用いることで損傷したタービンブレードの端部に対して同等の金属材料を堆積し補修が可能であると考えられる。その際に、必要量のみを局所的に付加し、最終形状に近いニアネットシェイプに造形することができる。これにより切削などによる除去体積を削減することもできる。タービンブレードのような薄肉材は熱容量が小さいため、造形部付近の温度が上昇しやすく、適切な積層幅で付加造形する必要がある。そのためには、溶接電流やアーク電圧、トーチ送り速度、層間温度などの積層条件を適切に設定する必要がある。

そこで、本研究では産業用ガスタービンのタービンブレード等に用いられ難削材として知られている Inconel 718 を用いて、薄肉板材端部へ補修を目的とした付加造形をするために、適切な積層条件と積層幅を決定する手法を明らかにし、薄肉の立壁形状造形を行うことを目的とする。

## 2. 実験装置

図 1 に本研究で使用した造形装置を示す。各軸のストロークが X 軸±200 mm, Y 軸±100 mm, Z 軸±75 mm の直交 3 軸に加え、テーブル傾斜の B 軸±90°の計 4 軸から構成される。各軸の送り速度は最大で 1000 mm/min である。Z 軸に MIG・MAG 溶接トーチを取り付け、NC 制御装置を用いて溶接トーチの移動軌跡を指令し、基板にビードを積層し造形を行う。

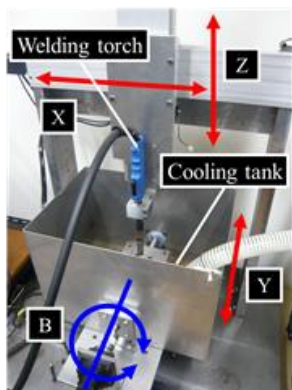


Fig. 1 Wire and arc-based additive manufacturing machine

## 3. 温度モニタリングによる造形物の積層幅の高精度化

ビードを鉛直方向に何層も積層する立壁形状造形では下層ビードがある温度まで温度低下した状態に対して上層のビードが積層される。この時の下層ビードの表面の温度を層間温度という<sup>3)</sup>。層間温度が高いと上層ビードの冷却速度が低く、溶融地の金属液相の表面張力が小さくなり、積層幅が大きくなるといった影響がある<sup>4)</sup>。そこでまず、薄肉板材端部ではなく基板上へ層間温度を一定に保ちながら立壁形状造形を行い、溶接電流およびトーチ送り速度と積層幅の関係を調査した。層間温度として下層ビードの中央の温度をスポット温度測定機能により測定した。Inconel 718 の造形物の放射率は測定した平均値である 0.365 を使用した。なお、1 層目は基板の予熱を行わずに定常温度で造形した。

表 1 に実験条件を示す。ワイヤ送給速度は溶接電流の値によって溶接機が自動で決定する。ワイヤ送給速度を  $F_W$  [m/min]、ワイヤ径を  $D$  [mm]、トーチ送り速度を  $F$  [mm/min] とすると、造形断面面積  $S_M$  [mm<sup>2</sup>] は以下の式(1)のように求められる。

$$S_M = 10^3 F_W \cdot \pi(D/2)^2 / F \quad (1)$$

造形断面面積は造形物の幅と高さの積であり、溶接電流およびトーチ送り速度によって求められるパラメータである。表 1 の溶接電流およびトーチ送り速度は、造形断面面積を変化させた組み合わせで決定した。

Table 1 Experimental conditions

Welding machine		DP 400R	
Output		DC pulse	
Substrate material		SU S304	
Wire material		Inconel 718 equivalent (JIS Z3334 SNI7718)	
Wire diameter $D$		mm	1.2
Shielding gas		Ar	% 100
Shielding gas flow rate		L/min	15
Arc voltage $V$		V	20
Interlayer temperature		°C 80, 170, 250	
Welding current	Wire feed speed	Torch feed speed	Molding cross-section
$I$ [A]	$F_W$ [m/min]	$F$ [mm/min]	$S_M$ [mm <sup>2</sup> ]
50	1.6	200	9.05
100	3.3	500	7.46
120	4.1	200	23.18
140	4.9	900	6.16
200	7.3	200	41.28
200	7.3	500	16.51
250	9.0	200	50.89
250	9.0	1000	10.18

基板上に長さ 100 mm のビードを鉛直方向に 10 層積層した立壁形状造形を行い、その立壁形状造形物の積層幅を測定した。

図 2 に溶接電流 50 A、トーチ送り速度 200 mm/min の立壁形状造形物 10 層目の層間温度 170 °C の時の熱画像を例として示す。立壁形状造形物の側面は層が重なって上面よりも黒くなり放射率が高いため、温度が高く表示される。図 3 に測定した積層幅と造形断面面積の

関係を示す。各造形断面積の条件において、層間温度が高くなるほど積層幅が大きくなることからわかる。造形断面積が大きい条件ほど層間温度の違いによる積層幅への影響が大きい。また、近似線で示すように、どの層間温度においても積層幅と造形断面積において以下の式(2)に示す累乗関係で近似できることがわかる。ただし、 $a$ 、 $b$ は実数とする。

$$w = aS_M^b \quad (2)$$

式(2)を整理すると以下の式(3)が得られる。

$$S_M = (w/a)^{1/b} \quad (3)$$

この式(3)より、所望の積層幅  $w$  に対して対応する造形断面積  $S_M$  が定まり、さらに式(1)を用いて造形断面積  $S_M$  からトーチ送り速度  $F$  およびワイヤ送給速度  $F_w$ 、すなわち溶接電流  $I$  を決定することができる。この際、ビードを造形可能な溶接電流とトーチ送り速度の関係から、造形効率がより高い、すなわち溶接電流とトーチ送り速度がどちらもより高い条件を用いる。

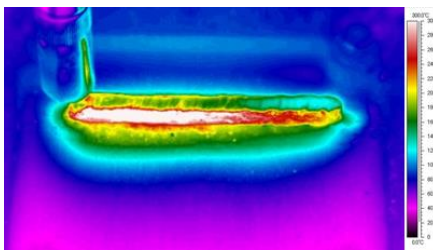


Fig. 2 Thermal image of vertical wall at interlayer temperature 170 °C

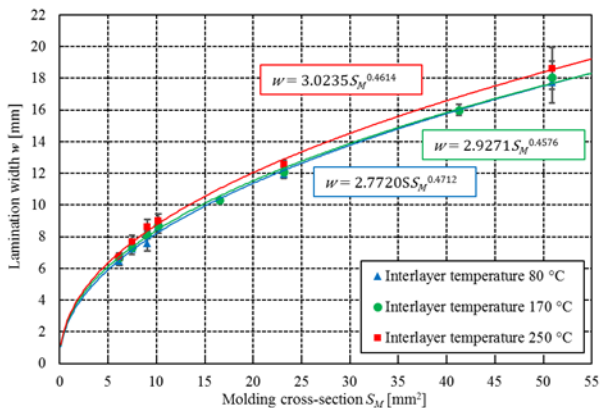


Fig. 3 Relationship with lamination width and molding cross-section

#### 4. 薄肉板材端部への付加造形

前章で示した温度モニタリングによる立壁形状造形物の積層幅制御の高精度化の手法を薄肉板材端部への立壁形状造形に適用しその有用性を明らかにする。

実験条件は表 1 とほぼ等しいが、SUS304 の基板ではなく Inconel 718 の薄肉板材 (板厚  $t_p$ : 1, 3, 5×30×50 mm) を用意した。端部への立壁形状造形物は層間温度を 170 °C 一定に保ち、板厚に対して +1~3 mm の積層幅を目標とし、トーチ送り速度を 1000 mm/min 固定で溶接電流を変化した。板厚 1 mm, 3 mm, 5 mm に対して、溶接電流と式(2)による積層幅は、それぞれ 50A/3.84 mm, 80A/4.80 mm, 140A/6.41 mm となった。

薄肉板材端部へ長さ 50 mm のビードを鉛直方向に 10 層積層した立壁形状造形を行い、その立壁形状造形物の積層幅を測定した。

図 4 に各板厚の薄肉板材端部へ造形した立壁形状造形物、測定した積層幅および 10 層目の層間温度 170 °C の時の熱画像を示す。板厚 1

mm では溶融金属の垂れがなく造形できているが、造形物の形状に乱れがある。これは溶融量に対して板厚が小さいために、ビードが不連続となり、不連続なビードが積層されていくからであると考えられる。溶融量を少なくするためには、さらに溶接電流を小さく、あるいはトーチ送り速度を高くする必要があると考えられる。板厚 3 mm, 5 mm では形状に乱れない立壁形状造形ができた。

図 4 に示す立壁形状造形物の積層幅の測定結果から、全ての板厚において積層幅は目標の +1~3 mm を満たしていることが確認された。このことから温度モニタリングによる立壁形状造形物の積層幅の高精度化の手法は薄肉板材端部への立壁形状造形に対しても有効であり、所望の積層幅で補修を目的とした付加造形が可能であるといえる。薄肉板材端部へ立壁形状造形した際の下層ビードが層間温度 (170 °C) になるまでの層間冷却時間の平均は、板厚 1 mm の場合で 60.9 秒、板厚 3 mm の場合で 79.5 秒、板厚 5 mm の場合で 102.1 秒であった。積層幅すなわち造形断面積が大きいほど層間冷却時間は長くなり、10 層積層にかかる合計時間も長くなる。

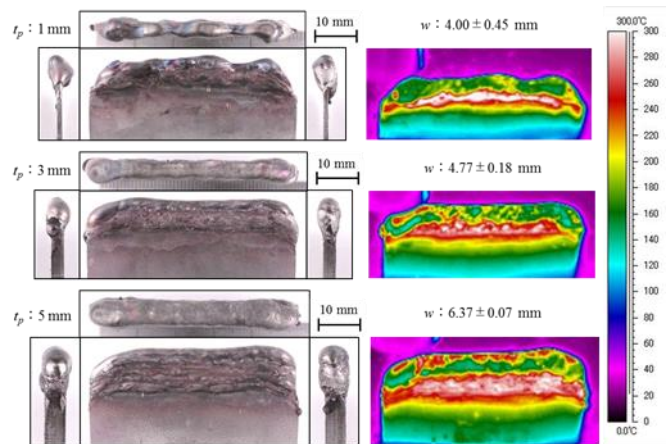


Fig. 4 Vertical wall on thin plate and lamination width of measurement, thermal image at interlayer temperature 170 °C

#### 5. 結 言

Inconel 718 を用いて、タービンブレードを模した薄肉板材端部へ補修を目的とした付加造形をするために、適切な積層条件と積層幅を決定する手法を検討し、以下の点を明らかにした。

- (1) 立壁形状造形において層間温度が大きいほど積層幅が大きくなることを明らかにした。
- (2) 層間温度をモニタリングして一定温度に保った場合、積層幅と造形断面積は累乗関係となり、所望の積層幅から溶接電流およびトーチ送り速度を決定できることを明らかにした。
- (3) 温度モニタリングによる積層幅の高精度化の手法を用いることで、所望の積層幅で薄肉板材端部へ立壁形状造形が可能であることを明らかにした。

#### 参 考 文 献

- 1) Terry Wohlers, Wohlers Report 2016, Wohlers Associates Inc., (2016), pp.15-16, 236-237
- 2) 酒井義明, 佐藤岩太郎, 斎藤大蔵, ガスタービン高温部品の寿命延伸技術, 東芝レビュー, Vol.63, No.9, (2008), pp.23-26
- 3) 一般社団法人溶接学会, 溶接・接合技術特論, 産報出版株式会社, (2003), pp.337-339
- 4) 上岡利人, 阿部壮志, 石川修平, 笹原弘之, アーク放電を用いた溶融金属積層時の溶融池の冷却方法による積層特性への影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.785, (2012), pp.282-291