

# WAAMにおける造形状態モニタリングとフィードバックによる精度と健全性の向上

東京農工大学 ○中野 佑紀, ◎笹原 弘之

## 要旨

WAAMでの造形物お造形途中の温度管理, また冷却方法によって造形物の形状精度が変化することが知られている。そこで指定したパス間温度になるまで自動で冷却時間を延長するシステムを開発した。これにより壁面の平面度は向上し, 結晶粒径が小さくなった。また水冷において溶融池-冷却水位間距離を15mmにすることで, 沸騰を伴う水冷により冷却速度が向上し, パス間温度制御を行わない条件でも積層高さが高くなり, 平面度は向上した。

## 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・マニュファクチャリング(AM)技術への期待が高まっている。本研究では, アーク放電により金属ワイヤを溶融・固化させる技術に着目し, ワイヤ材料をアーク放電で溶融し積層することにより3次元造形を行うAM(Wire and Arc-based Additive Manufacturing: WAAM)の研究を行っている。本手法は溶接ビードを何層も重ねることによって目標形状を得るが, 被積層部の温度(パス間温度)によって, また造形物の下方を水冷することによって造形物の表面形状に違いが生じることが報告されている<sup>(1)(2)</sup>。そこで本研究では, 造形途中の被積層部の温度を計測しそれを造形条件の調整にフィードバックするシステムを開発し, 造形精度と健全性の向上を実現すること, また冷却水を使用した造形において冷却水位とパス間温度制御をすることで造形物形状や冷却速度に与える影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. WAAMシステムの概要

本研究で使用したAM装置を図1に示す。この装置ではZ軸に溶接トーチを取り付け, 直進軸(X, Y, Z軸: ストローク500mm)の運動を制御し造形を行う。各軸はCNCソフトウェアMach3によって制御され, CNCインターフェイス基板(オリジナルマインド社 CNC4Axis)によって各軸のモータドライバを動作させる。

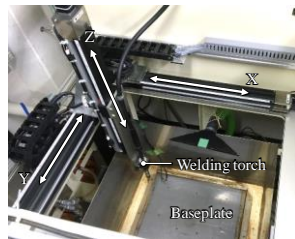


Fig. 1 WAAM machine

## 3. パス間温度制御システムの開発とその効果

### 3.1 パス間温度制御システム

開発したパス間温度制御システムには, 一層造形した後の積層終了点の温度を測定し, 任意の温度まで低下したら, 次の層の造形を自動で開始する機能を実装した。溶接トーチの-Y側に放射温度センサ(FT-40K, FT-50A KEYENCE製)を取り付け, 測温点を造形物表面頂部まで移動して温度を測定した。温度データの処理, 造形の停止・開始を指示する制御器として, ArduinoUNOを使用した。また作業者は手元のスイッチを押すことにより温度測定を開始できるようにした。

### 3.2 パス間温度制御実験

パス間温度を制御することにより, 形状や金属組織にどのような影響があるか調査する比較実験を行った。積層条件は, 溶接電流140A, 溶接電圧15.7V, 溶接ワイヤYGW16(JIS Z 3312), ワイヤ送給速度3.2m/min, トーチ送り速度300mm/min, シールドガスAr+CO2 20%, ガス流量15L/minである。長さ80mmのビードを積層した

後, 積層終了点(ビード端より13mm内側の点)の表面温度を測定できるように温度センサを移動させ停止する。パス間温度を制御する場合, 温度が150°C以下になるまで停止時間を延長してから次層ビードの積層を開始する。この操作を20層分を行った。なお, パス間温度を制御しない場合は温度測定のために停止後すぐ次層ビードの積層を開始する。また, 放射率は事前実験より0.89とした。

### 3.3 実験結果と考察

図2にパス間温度を制御しなかった造形物(A)と制御した造形物(B)を示す。まず3Dスキャナ型三次元測定機(VL-300 KEYENCE製)を使用して形状の調査を行った。A, Bの造形物高さはそれぞれ30mm, 35mmとBの方が高くなった。また, 3層目以降の側面の平面度を測定したところ, Aは1.248mm, Bは1.105mmと, Bの造形物の表面の方が, 凹凸が小さかった。パス間温度を制御した造形物の方が, 溶融金属が積層幅方向に広がらず, 安定したビード形状を保つことができ, 平面度の向上に影響したと考えられる。

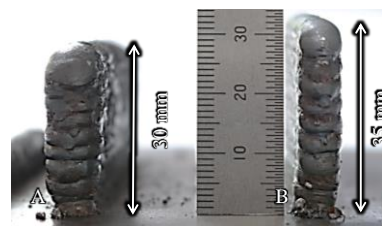
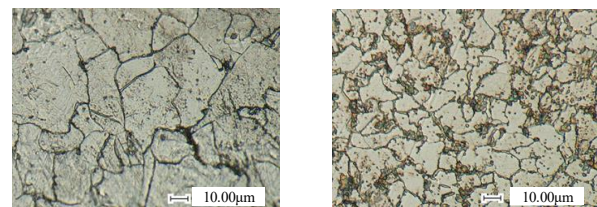


Fig. 2 Bead shape

次に, 図3に造形物のビード中心をビード幅方向に切断し, A, Bの金属組織観察を行った結果を示す。いずれもフェライト組織が見られ, Aの結晶粒径は49μm, Bの結晶粒径は19μmとなり, パス間温度を制御した方が結晶粒径は小さくなった。被積層部が高温のまま積層するよりも, 低温にしてから積層した方が, 造形物の冷却速度は高くなり, 結晶粒の粗大化を防ぐことができる。



(A)

(B)

Fig. 3 Metal structure

## 4. WAAM造形中における水冷条件とパス間温度の関係

### 4.1 冷却水位制御システム

本実験では溶融池と冷却水位の距離を一定に保つため, 造形点の高さに応じて冷却水位を指定した分だけ上昇させる冷却水位制御システムを開発した。水面に発泡スチロールを浮かし, それを水冷タンク淵に固定した小型レーザー測距センサ(AE-VL53L0X 秋月電

子通商製)を用いて、センサー発泡スチロール間距離を測定する。システムでは、作業者がスイッチを押すと水冷タンクへ注水を開始し、現在の水位から何 mm 上昇させたいかを予め設定しておけば、その高さになった時自動で注水を停止することができる。

#### 4.2 冷却水位とパス間温度が冷却速度と造形形状に及ぼす影響

効率的に造形物温度を冷却することができる水冷とパス間温度制御を組み合わせ、造形途中の溶融池-冷却水位間距離  $X$  とパス間温度が造形物形状に与える影響を調査した。実験条件は表 1 に示すパス間温度と  $X$  を変化させた 12 条件で行い、積層条件は、3.2 と同一である。パス間温度を行わない場合の層間時間は約 19 秒である。パイプに幅 80mm、厚さ 9mm のサブストレートを固定し、上面に長さ 80 mm のビードを積層できるようにした。1 層積層が終わった後は、積層終了点(ビード端より 13mm 内側の点)の表面温度を測定できるように温度センサを移動させ停止する。温度が 150°C 以下になるまで停止時間を延長してから次層ビードの積層を開始する。この操作を 20 層分行い、両造形物の比較を行った。なお、パス間温度を制御しない場合は温度測定のために停止後すぐ次層ビードの積層を開始する。パス間温度の取得は放射温度センサで行い、温度によって NC プログラムを停止・開始する作業は手動で行った。造形中の造形物表面温度はサーモカメラ (FLIR T650sc) を用いて測定した。放射率はどちらも 0.89 とした。二層造形した後は 4.1 で開発したシステムを用いて、水位を約 3mm 自動で上昇させることで溶融池-冷却水位間距離を保った。

Table 1 Experiment conditions

Temperature control	ON			OFF
Inter-pass temperature °C	100	200	300	-
Height of objects from the water $X$ mm	15	25	35	15

#### 4.3 実験結果と考察

図 4 に造形物の 13 層目、20 層目を造形し終わった後の各条件の冷却速度を示す。

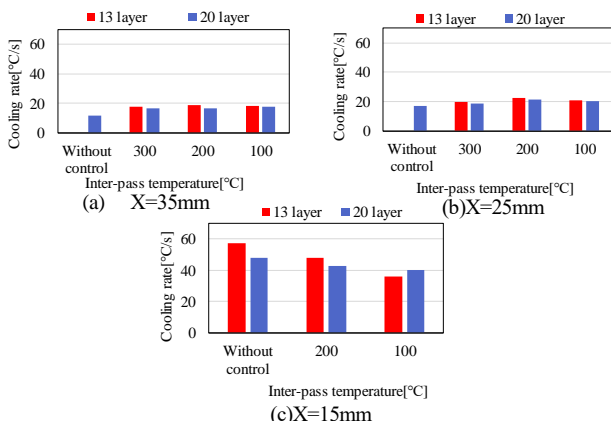


Fig. 4 Cooling rate

冷却速度は軟鋼及び高張力鋼の A3 変態点がおおよそ 800°C 前後であることから、800°C から 500°C まで冷却にかかる時間から算出した。 $X=25\text{mm}, 35\text{mm}$  の場合、パス間温度を制御した方が冷却速度はわずかに向上する。溶融池が形成されたときの温度と被積層部温度の差が大きい方が熱は下層に伝わりやすくなるため、パス間温度を制御した場合の方が熱伝導量は大きくなり、冷却速度はパス間温度を一定に保った方が向上すると考えられる。 $X=15\text{mm}$  の場合、冷却速度は、 $X=25\text{mm}, 35\text{mm}$  の場合と比べて高くなる。 $X=15\text{mm}$  の場合は他条件に比べて冷却水の沸騰が活発であった。沸騰を伴う造形物か

ら水への熱伝達量は多いため、 $X=15\text{mm}$  の場合の冷却速度が向上したと考えられる。

実験で得られた造形物の高さや側面の表面形状を、3D スキャナ型三次元測定機 (VL-300 KEYENCE 製) を使用し測定した。図 5(a) に水位 35mm (パス間温度制御なし) の造形物、(b) に水位 15mm (パス間温度 100°C) の造形物の、側面の平面度を測定した結果を示す。カラースケールは  $\pm 0.2\text{mm}$  となっており、0.2mm 以上は赤く、-0.2mm 以下は青く表示されている。平面度の値自体は 0.4mm 以上の大きい値も取得できる。造形物高さは断面測定で計測した。

Fig. 5 VL-300 measuring method (flatness)

図 6 に各条件の造形物の平面度を示す。パス間温度制御を行わない場合は  $X=35\text{mm}$  の平面度が 1.46mm であるのに比べて、 $X=25\text{mm}, 15\text{mm}$  の場合の平面度はそれぞれ 1.09mm, 1.12mm となり、約 30% 向上した。また、どの  $X$  の条件でもパス間温度を制御した方が平面度は向上した。平面度は溶融金属が溢れることによって悪くなる<sup>9)</sup>。そのため、溶融金属が凝固する時間が速くなれば均一なビードを各層で堆積させることができ、平面度の向上につながると思われる。

パス間温度を制御することによって、造形物の熱が下層に早く伝わるようになり、溶融金属の凝固する時間が短くなるためパス間温度を制御した方が平面度は向上すると考えられる。また図 7 に各条件の造形物の積層高さを示す。 $X=35\text{mm}, 25\text{mm}$  の場合、パス間温度制御を行った条件の方が積層高さは高くなった。パス間温度を制御することで溶融金属が積層幅方向に広がらず積層高さは高くなったと考えられる。しかし、 $X=15\text{mm}$  の条件では、積層高さに大きな違いは見られなかった。これは図 4 に示すように冷却速度が他条件よりも高く、すべての条件で溶融池の冷却時間が短かったことが原因だと考えられる。

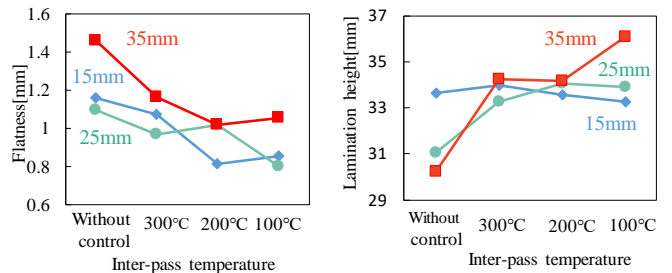


Fig. 6 Flatness

Fig. 7 Lamination height

#### 5. 結言

本研究ではパス間温度を制御し、造形を行うシステムを開発した。また、パス間温度を制御することにより表面形状が改善され、結晶粒径が小さくなることが明らかになった。水冷を用いた造形を行う際は、溶融池-冷却水位間距離を 15mm にすることで、冷却水を活発に沸騰させ造形物の冷却速度を向上させることができる。

#### 参考文献

- (1) Yang et al., "Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.244 (2017), pp.215-224
- (2) 上岡ほか, "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), pp282-291
- (3) Xiong et al., "Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing", *J. Mat. Proc. Tech.*, vol. 252 (2018), pp. 128-136.