

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よる 円筒面への複雑形状造形

東京農工大 ○吉岡 亨 ©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、回転軸を有する4軸造形装置を製作し、円筒面への積層造形における造形可能な条件を調査した。細長い円筒面に対し、軸方向に積層造形すると残留応力により変形が生じるが、4本のビードを等間隔で造形する場合の最適な造形順序を明らかにした。また、スクリュー形状の造形を行い、SiMにより取得した形状データと最終目標形状とを比較し、仕上げ加工代を残した造形が可能であることを示した。

1. 結 言

近年、3次元CADデータから直接機械部品や金型などの複雑形状を迅速に造形するアディティブ・マニファクチャリング技術への期待が高まっている¹⁾。筆者らは、溶接技術のひとつである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、溶接金属を連続積層して3次元造形を行う技術の実用化に向けた研究に取り組んでいる。本手法により、ニアネットシェイプに造形が可能であり、既存の金属材料に付加する形式で高強度かつ高機能な造形物を造形することができる。本手法を用いたオーバーハング形状の造形では、溶融した金属が固化する前に重力方向に垂れ、造形精度の低下が問題となる。そのため、造形中は溶融池を常に水平に保つことが必要である。丸棒などの円筒面へ造形するには、溶融池を常に円周上の頂点に位置させるために、工作物を回転させながらの造形が有効であると考えられる。そのためには、溶接トーチの運動と工作物の回転とを同期させて造形する必要がある。

そこで本研究では、工作物を回転させるA軸を備えGコードにより制御可能な4軸制御の造形機を製作し、工作物の回転と直進3軸による溶接トーチの運動を同時制御することで、円筒面への積層造形技術の開発を目的とする。本報告では、細長い円筒面に対して4本のビードを等間隔で造形する場合の最適な造形順序を実験的に明らかにしたことで、オーガスクリューを模した形状を造形したことについて報告する。

2. 工作物回転軸を持つ造形装置の製作

図1に本研究で使用した造形装置を示す。この装置では直進軸(X, Y, Z軸:各ストローク500mm)が制御可能であり、Z軸に溶接トーチを取り付ける。今回新たに工作物を回転させる装置を設計・製作した。図1に示した造形装置のベースプレート上に小型旋盤を流用した工作物回転軸を設置し、サーボモータにより駆動する。また、駆動用のサーボモータは回転軸中心より高く設置し、工作物を水冷することを可能とした。回転軸はタイミングプーリーとタイミングベルトを介して駆動する。造形可能な最大径は180mmである。

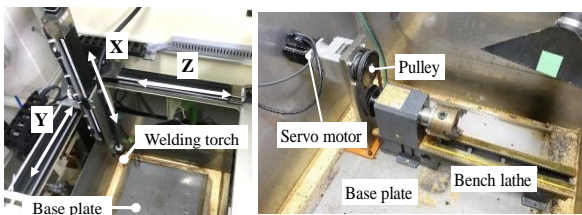


Fig.1 4-axis modeling machine

3. 直径15mm丸棒への軸方向ビード造形における軸の変形

一般的に、溶接構造物は溶接入熱による局所的な加熱、温度上昇により残留応力が発生し変形する。そのため、造形時の入熱による円筒の変形は最終的な製品の精度低下の原因になると考えられる。そこで、本研究では細長い円筒面に4本のビードを等間隔に造形した際の造形順序に着目し、それぞれのビードを造形した際の変形量を測定し、変形がどのように移行していくのかについて調査した。図2に一例として溶接電流120Aで1本のビードを造形した場合の変形した軸を示す。溶接金属が凝固し冷却される過程で線膨張係数に従って収縮することで、溶接境界部ではこれに反発する引張残留応力が発生することになり、母材である軸がビードを造形した側に反る形となる。



Fig.2 Curved bar ($I = 120 A$)

細長い円筒面に4本のビードを等間隔に造形する順序は、図3に示すように頂点を0°とした場合、0°, 90°, 180°, 270°と時計周りに造形するパターンAと、0°, 180°, 90°, 270°と対角に造形していくパターンBの2種類が考えられる。

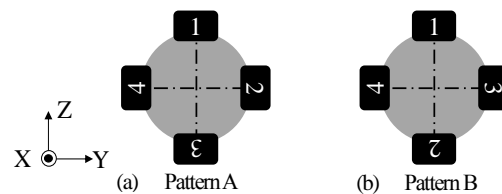


Fig.3 Modeling order

この2つのパターンについて、直径15mmのSS400丸棒に対し、溶接電流:120A、溶接電圧16.8V、溶接ワイヤ:YGW12、φ1.2mm、トーチ送り速度100mm/min、ワイヤ送り速度2.7m/min、シールドガスAr80%-CO₂20%、ガス流量10L/minでビード造形した。造形は180mmの突き出しのある片持ちの丸棒の円周上の頂点で、固定端から30mmの位置から軸方向に100mm行った。造形後はただちに水をかき急冷し全体が20°C以下になっていることをサーボカメラで確認した上で丸棒先端から10mmの位置で360°回転させることで変形量を測定した。そして、測定結果を測定点での変位とサンプリング時間当たり回転する角度から直交座標系へと変換し、円の最小二乗中心を求めた³⁾。これにより初期形状の中心からそれぞれの角度にビード造形したときに生じる軸中心の変形量を算出した。

図4および図5にそれぞれのパターンでの軸中心を示し、表1に最小二乗中心の座標(a,b)と原点からの距離Rをまとめた。

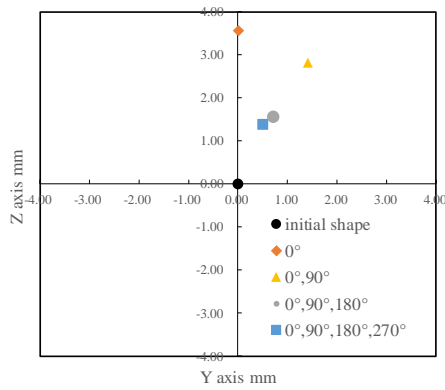


Fig.4 Deformation amount and direction (Pattern A)

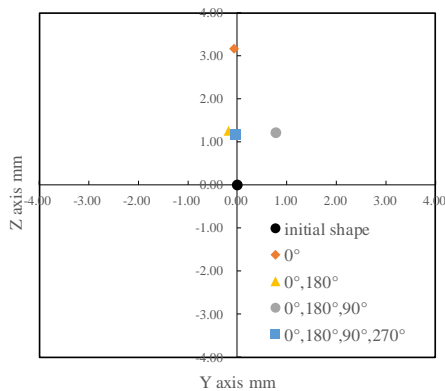


Fig.5 Deformation amount and direction (Pattern B)

Table1 Distance from the origin

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
Pattern A	0°	0.005	3.558	3.558
	0°, 90°	1.409	2.813	3.146
	0°, 90°, 180°	0.712	1.565	1.720
	0°, 90°, 180°, 270°	0.509	1.370	1.461
Pattern B	0°	-0.055	3.149	3.149
	0°, 180°	-0.190	1.257	1.271
	0°, 180°, 90°	0.794	1.199	1.438
	0°, 180°, 90°, 270°	-0.038	1.160	1.161

図4 (Pattern A : 0°, 90°, 180°, 270°の順) では、最終的に Y 軸方向 : 0.509 mm, Z 軸方向 : 1.370 mm の変形が生じた。しかし、図5 (Pattern B : 0°, 180°, 90°, 270°の順) では Y 軸方向 : -0.038 mm, Z 軸方向 : 1.160 mm と Z 軸方向への変形が大きく、Y 軸方向への変形は小さいことがわかる。Pattern B では、Y 軸方向への変形は Z 軸方向の後に進むため、既に2本のビードが造形された状態となっている。そのため、母材全体の剛性が高まり変形量が小さくなったものと考えられる。また、Y 軸、Z 軸とほぼ平行に軸中心がずれて変形していることがわかる。これより、対角に造形する場合は、対面のビード造形による変形が強く影響しているものと考えられる。0°の次に180°で造形を行ったことで、Z 軸方向の変形量が小さくなり、その後90°、270°と造形したこと90°方向への変形を小さくした。

最終的な変位を比較すると、Pattern A では初期形状から1.461 mm, Pattern B では1.161 mm となり、対角に造形した Pattern B のほうが変形が小さくなっていることがわかる。

また、最初に造形したビードによる変位が最も大きく、他の角度で造形を行ってもその変位は完全にもとに戻らない。溶接金属が母材と一体になることで母材全体の曲げ剛性が高まったことによるものと考えられる。最終的な変位を小さくするためには、1回目の造形における入熱量を小さくすることや、予熱をして造形を行うこと、3回目、4回目の造形で溶接入熱の高い造形条件を設定し造形する必要があると考える。

4. 円筒面へのスクリー形状造形

直線軸と回転軸を同期しながら動作させ、円筒面へオーガスクリューを模した形状を造形した。オーガスクリューは土木工事などで地盤を掘削する際に用いるらせん状のスクリーである。この形状は立壁と工作物の回転との組み合わせで造形可能である。目標形状は、既存の直径44 mm, 長さ200 mmのSS400丸棒に、高さ40 mm, ピッチ75 mm, 厚さ4 mm のらせん状の立壁を2回転分造形する形状とした。造形条件は溶接電流:70 A, 溶接電圧16.0 V, 溶接ワイヤ:YGW12, 実トーチ送り速度100 mm/min, ワイヤ送り速度1.7 m/min, φ1.2 mm, シールドガス Ar80%-CO₂20%, ガス流量10 L/min である。円筒面への造形では、回転軸中心からの積層点までの距離によって周速が異なるため、積層点での送り速度が100 mm/min となるように指令送り速度を各層ごとに算出した。

造形結果を図6(a)に示す。工作物を回転させながら造形を行うことで、溶融池を常に円筒面の頂点に形成することができ、溶融した金属が垂れることなく造形可能であることを示した。仕上げ切削代を残した造形ができているか確認するために、造形物の3次元形状データを Structure from Motion (SfM) により取得し、寸法解析ソフト GOM Inspect を用いて最終目標形状と比較した²⁾。

比較結果を図6(b)に示す。立壁の高さは43.4 mm, 厚さは最も幅が狭くなった1層目で5.25 mm, 最も厚い部分で8.85 mm となり仕上げ代は十分確保されているといえる。しかし、造形開始点と終了点において、目標形状よりねじり角度が小さく造形されていることがわかった。丸棒は平板に比べて熱容量が大きく、1層目のビードの幅が小さく造形され、2層目以降ではそのビード上に積層していくため、角度が小さいままで造形されたと考える。

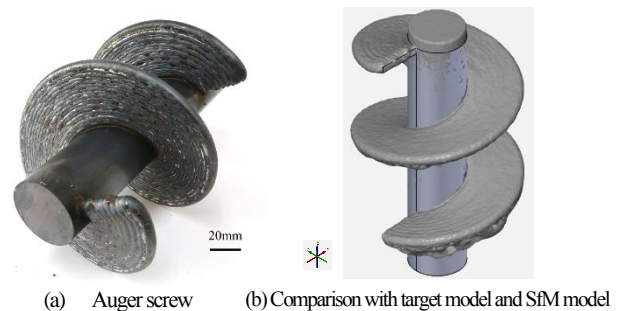


Fig.6 Manufactured object

5. 結 言

- (1) 工作物回転軸を持つ4軸造形装置を製作し、本手法での円筒面への積層造形を可能とした。
- (2) 細長い円筒面に対し、軸方向に4本のビードを等間隔に造形する順序について2種類のパターンで実験し、対角に造形した Pattern B のほうが A に比べて変形が小さくなることが明らかとなった。
- (3) オーガスクリューを模した形状の造形を行い、仕上げ切削代を残した造形が可能であることを示した。また、溶融池を常に円筒上の頂点に形成することで、溶融金属が垂れることなく造形可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) Terry Wohlers, *Wohlers Report 2016* (2016), p.236-237, Wohlers Associates Inc.
- 2) H. Nagamatsu, Y. Mitsutake, T. Hamamoto and H. Sasahara, "Development of a Cooperative System with Wire and Arc-based Additive Manufacturing and Machining", ICPE2016, USB, B105-8223
- 3) JIS B 7451:1997 真円度測定器