

WAAM 方式によるステライトの積層造形条件の検討

Examination of additive manufacturing conditions of stellite by wire and arc 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 小林翼 佐藤善久

ワイヤアーク式金属積層造形（以下 WAAM 方式とする）によりステライト No.6 合金系を積層造形した際の、積層造形条件による溶接割れや内部空孔発生とともに、硬さへの影響を評価した。その結果、今回実施した積層造形条件では、溶接割れ及び内部空孔の発生が確認されなかった。また、ベースプレートへの溶け込み深さと積層造形物の硬さは、使用する溶接プログラムの影響が大きいことが確認できた。

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、金属組織

1. 緒言

近年、金属積層造形装置が普及してきており、複雑形状を有する部品等の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には、大きく分けてパウダーベッド方式とデポジション方式の2種類がある。デポジション方式は、必要な個所のみ金属素材を供給、溶融させる方式であり、形状付加が可能である。当所では、5 軸加工機と組合せた装置を保有しており、複雑形状のニアネットシェイプ形状を作製することで、切削加工時の材料除去量の削減が可能である。これまでの研究では、WAAM 方式を用い、アルミニウム合金、ステンレス鋼及びニッケル合金の積層造形条件の検討、機械的特性の評価及び異種金属接合の検討を行ってきた¹⁾²⁾。高強度及び高耐食性を有する金属としては、ニッケル合金の実績があるが、積層造形後に熱処理を行う必要がある。ニッケル合金と同じように、高強度と高耐食性を有する金属として、コバルト合金がある。これは熱処理の必要がないことが特徴であるが、十分な熱管理が必要である。

そこで、本研究ではコバルト合金の一種であるステライト積層造形において、積層造形条件による溶接割れの発生や内部空孔への影響とともに、積層造形物の硬度についても評価した。

積層造形条件は表2のとおりである。条件の設定方法は、電流、電圧及びワイヤフィードが異なる2条件（条件a、bとする）に対し、トーチ送りを3段階変化させている。なお、条件aは溶接機に登録されているFCW Hardfacing のプログラム、条件bはstellite6 のプログラムを用いている。ここで、表中の“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。また、予熱は行わず、パス間温度は150[°C]とし、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）によって測定した。

積層造形後、外観及び内部空孔の有無の評価を行った。外観は目視による割れの発生の有無を確認し、内部空孔の評価には、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。また、各条件による溶け込み状態を確認するため、（株）キーエンス社製のデジタルマイクロスコープ（VHX-7000）により観察を行った。測定項目は、図2に示す溶け込み深さ、1層目のビード幅、溶け込み深さの1/2位置における溶け込み幅とした。

表1 KST-6FCW の化学成分

	単位 %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	W	Co
KST-6FCW	1.03	0.70	0.55	28.73	1.18	4.94	4.26	残

2. 積層造形条件の検討

2. 1. 実験方法

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 ワイヤアーク式）を用いた。ワイヤには、ステライト No.6 合金系である（株）鳥谷溶接研究所（現（株）ウェルマテック）製 KST-6FCW を使用した。KST-6FCW の化学成分（一例）を表1に示す。積層造形物は図1に示すように、SUS304 のベースプレート上にトーチを直線上に50mm 送り1層目を積層造形し、2層目以降はその上に積層造形した。トーチ送り方向は、1層毎に反転している。

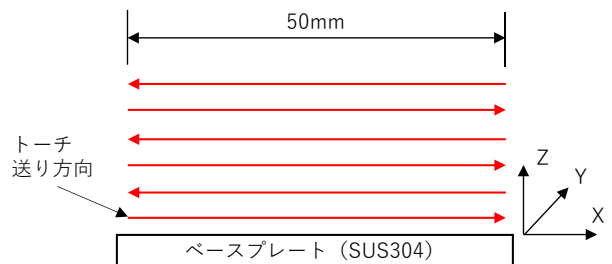


図1 積層造形のトーチパス

表 2 積層造形条件

条件No.	溶接方法	電流 [A]	電圧 [V]	ワイヤ フィード [m/min]	トーチ送り [mm/min]	バス間温度 [°C]
a-1	CMT	200	20.0	6.8	300	150
a-2					400	
a-3					600	
b-1		201	13.8	6.0	300	
b-2					400	
b-3					600	

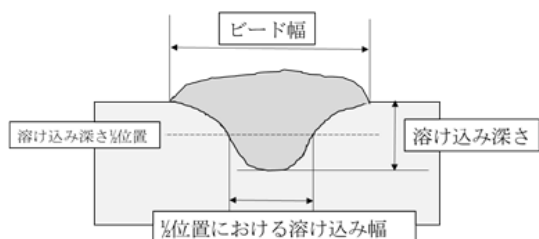


図 2 溶け込み測定項目

2. 2. 結果

積層造形時の様子及び造形物の外観を図3及び図4に示す。いずれの条件においても、積層造形中及び積層造形後において、割れの発生は確認されなかった。

次に、積層造形物の ZX 平面及び YZ 平面の CT スキャン結果を図5に示す。使用した装置の分解能より、直径 0.5 [mm] 以下の検出は困難であるが、いずれの条件でも大きな内部空孔は確認されなかった。

このことより、今回実施した積層造形条件を用いる場合、母材予熱を行うことなく、積層造形が可能であることが確認できた。

次に、溶け込み状態の一例を図6に、測定結果を表3に示す。条件 a と b を比較すると、条件 a の方が溶け込み深さ及びビード幅が大きい結果であった。溶け込み深さは、溶接プログラム、電流、電圧及びワイヤフィードが同じであれば、トーチ送りの影響による差は少ない。一方で、ビード幅は、トーチ送りが速くなるほど小さくなる傾向が見られた。

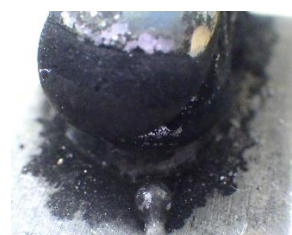


(a) 1層目 (b) 2層目 (c) 6層目

図 3 条件 a-1 による積層造形時の様子



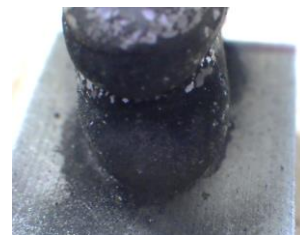
(a) 条件 a-1



(b) 条件 a-2



(c) 条件 a-3



(d) 条件 b-1

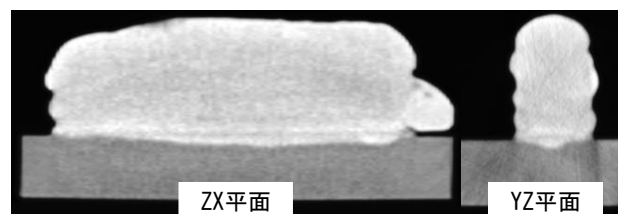


(e) 条件 b-2

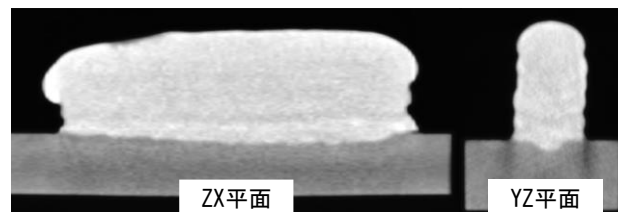


(f) 条件 b-3

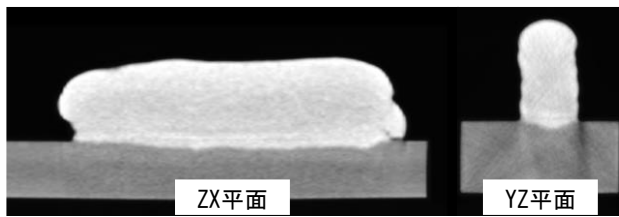
図 4 積層造形物の外観



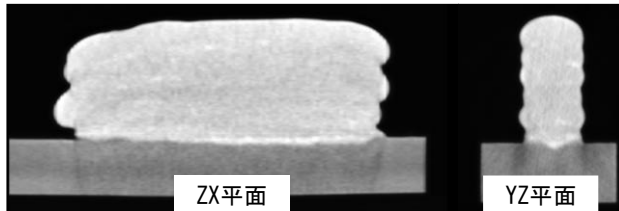
(a) 条件 a-1



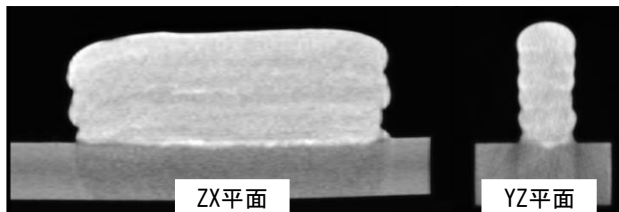
(b) 条件 a-2



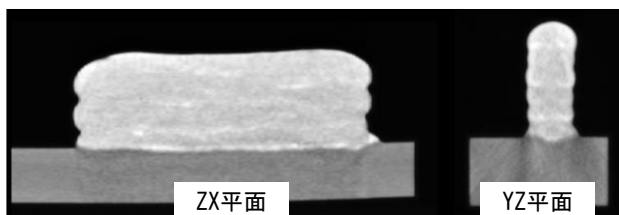
(c) 条件 a-3



(d) 条件 b-1

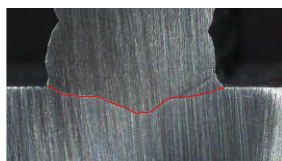


(e) 条件 b-2



(f) 条件 b-3

図5 積層造形物の内部観察結果



(a) 条件 a-2



(b) 条件 b-2

図6 溶け込みの様子

表3 溶け込み状態の測定結果

条件No.	溶け込み深さ [mm]	ビード幅 [mm]	ビード幅 1/2位置 [mm]
a-1	1.5	10.7	3.3
a-2	1.4	9.3	3.1
a-3	1.3	6.8	3.0
b-1	0.8	8.6	2.0
b-2	0.9	8.1	2.5
b-3	0.9	6.0	2.5

3. 硬さ試験

3. 1. 実験方法

積層造形条件による積層造形物の硬さを調べるため、ロックウェル硬さ試験を行った。測定物は、前述の積層造形物とし、図7に示すように積層造形物3点、境界部分1点、ベースプレート部3点の計7点とした。試験には（株）マツザワ製RMT-1を用いた。

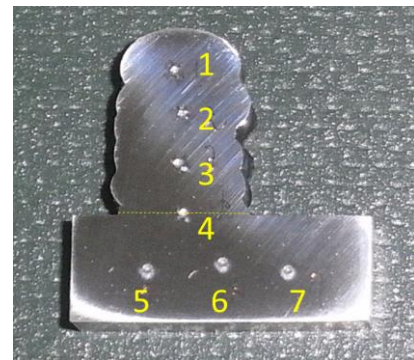


図7 硬さ測定箇所

3. 2. 結果

硬さ試験の結果を表4に示す。条件aでは、積層造形物の硬さが39 [HRC] 程度、条件bでは37 [HRC] 程度と条件aが条件bより硬度が高い結果となった。また、各条件内でのばらつきは少なく、トーチ送りの影響は見られなかった。なお、条件a-1において、ベースプレート部の硬さが他より高くなっているが、積層造形物の硬度評価が目的のため、原因の検討は行っていない。

表4 硬さ試験結果

条件No.	硬さ[HRC]						
	1	2	3	4	5	6	7
a-1	38.1	41.4	39.3	39.6	29.6	31.6	35.6
a-2	38.0	38.7	40.3	33.5	24.4	24.8	26.1
a-3	37.7	40.4	39.1	35.7	23.0	24.4	24.5
b-1	36.6	36.3	35.6	36.7	23.5	23.9	24.3
b-2	35.7	36.0	35.3	31.3	24.5	24.4	24.2
b-3	37.4	38.0	37.2	32.3	26.4	25.6	24.7

4. 結言

ステライト No. 6 合金系である KST-6FCW 積層造形時の特性把握として、積層造形条件による溶接割れや内部空孔発生とともに、硬さへの影響を評価し、以下の結果を得た。

- ・今回実施した条件では、積層造形物に外観上の割れや内部空孔は確認されなかった。
- ・ベースプレートへの溶け込み深さは、使用する溶接プログラムの影響が大きく、ビード幅はトーチ送りの影響が大きい。

・積層造形物の硬さは、使用した溶接プログラムの影響が大きく、トーチ送りの影響は小さい。

参考文献

- 1) 安齋弘樹, 穴澤大樹. 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, 令和4年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告書. 2023.
- 2) 2) 安齋弘樹, 小林翼 他. 切削加工品の代替としての WAAM 方式金属積層造形品の可能性評価. 令和5年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2024.