

Ni系合金を用いた熔融金属積層造形物の機械的特性と造形条件最適化

東京農工大学 ○瀧澤 周平, 三菱電機株式会社 中野 善和, 塚本 晋士, 東京農工大学 ◎笹原 弘之

要 旨

本研究ではアーク放電を用いた熔融金属積層法において, 代表的なNi系合金であるInconel718を用いた際の, 造形条件と造形物形状との関係および造形物の機械的特性, 金属組織について検討した. 連続した均一なビードを形成するには適切な電流値とトーチ送り速度との組み合わせ条件が必要であることを明らかにした. また造形物の金属組織観察を行い, 造形物強度と金属組織との関係を調査した.

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¹⁾.

本研究では, 溶接技術で用いられているアーク放電により金属を熔融・固化させる技術に着目し, 熔融金属を積層することにより3次元造形を行う熔融金属積層法の実用化に向けた研究に取り組んでいる. 本手法を用いて造形を行う場合, 熔融電流やアーク電圧, トーチ送り速度などの積層条件が造形物形状に影響を与える. 積層条件が不適切な場合, 溶融池から金属がこぼれ落ちて所望の造形物の形状精度が低下する, 欠陥が発生するなどの原因となる. また, これまで軟鋼を用いた造形において造形物形状と積層条件の関係や造形物の機械的特性について報告しているが²⁾, Ni系合金を用いた場合については十分な説明がされていない. そこで, 本研究では航空機用ジェットエンジンや産業用ガスタービン部品等に用いられるInconel718を用いて良好な造形物形状が得られる条件範囲を明らかにした. また, 立壁形状を造形後, 造形物から引張試験片を製作し, 造形物の引張強さを調査した. さらに, 造形物の金属組織観察を行い, 引張強さと金属組織の関係を調査した.

2. 実験装置

図1に本研究で使用した熔融金属積層装置を示す. 直進軸(X,Y,Z軸)とテーブル傾斜軸(B軸)がそれぞれ制御可能である. Z軸に溶接トーチを取り付け, NC制御装置を用いてMIG・MAG溶接トーチの移動軌跡を指定し, 積層基板に積層する.

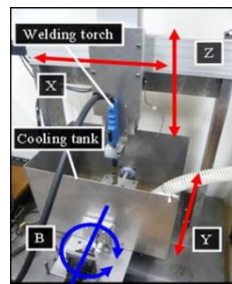


Fig. 1 Direct metal rapid fabrication machine

3. Inconel718で造形可能な条件範囲

熔融金属積層法を用いて造形を行う場合, 電流や電圧, トーチ送り速度等の造形条件によって造形物形状が変化する. また, これらの3条件から求まる単位長さ当たりの入熱量も造形物形状に影響を与える. 単位長さ当たりの入熱量 H [J/mm]は電流を I [A], 電圧を V [V], トーチ送り速度を F [mm/min]とすると, 次式で定義される³⁾.

$$H = (I \cdot V) / F \times 60$$

入熱量が過小な場合, 溶融量が少なくなりビード幅やビード高さが不安定となったり, 割れや空孔等の欠陥が発生する. そこで, 造形条件を変化させて図2に示す1本のビードを造形後, ビードの外観の評価を行い, 連続で均一なビードを造形可能な条件を調査した. また, 熔融金属積層法では入熱量が過大な場合, 積層中に溶融した金属が重力により垂れてしまい, 所望の造形物形状が得られない場合がある. そこで, 良好なビード形状が得られる積層条件で図3に示す長さ100mmのビードをZ軸方向に10層積層した

立壁形状を造形し, 垂れずに積層造形できるか, また, 造形物に割れが発生しないか調査した. 表1に実験条件を示す



Fig. 2 Bead shape



Fig. 3 Vertical wall shape

Table 1 Experimental conditions

Welding current I	A	40~300
Welding voltage V	V	20
Torch feed speed F	mm/min	100~1000
Wire material		Inconel718 equivalent (JIS Z3334 SNI718)
Wire diameter	mm	1.2
Shielding gas	Ar	100%
Shielding gas flow rate	L/min	15

図4に造形物の状態と電流, トーチ送り速度との関係を示す. 同図の青色に示す入熱量が200J/min未満の範囲ではビード幅やビード高さが不安定となり良好なビード形状は得られなかった. 入熱量が小さいと溶融量や溶け込みが不足するためである. また, 入熱量に関わらず電流が40Aの条件でも同様に良好なビード形状は得られなかった. これは電流の低下に伴って材料供給量が少なくなり, トーチ送り速度に対して材料供給量が不足するため, 熔融金属が表面張力によってちぎれてしまうためである⁴⁾. 一方, 電流が300Aの条件では送り速度に対して材料供給量が過大なために, 造形開始点で熔融金属がこぼれ落ち, 造形が出来なかった. したがって, 良好な造形物形状が得られる条件範囲は図5の赤色で示した範囲となる.

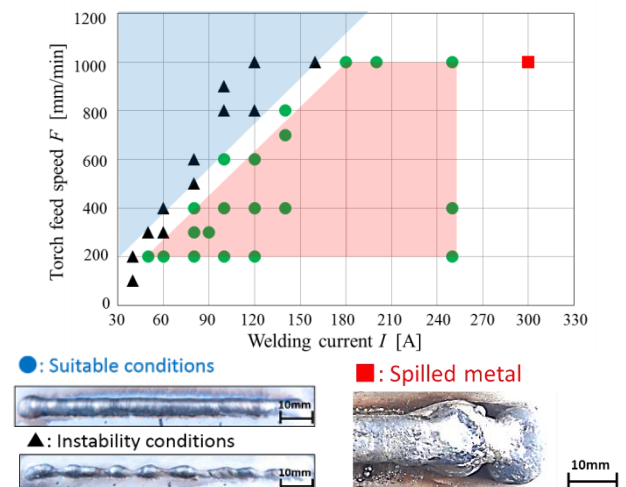


Fig. 4 Optimized fabricating conditions

4. 造形物の引張強さと金属組織の関係

熔融金属積層造形物と相当する鋳造品とについて引張強さとについて比較した。また、使用したワイヤ材料と鋳造品の化学組成をICP発光分光分析法によって分析した。分析結果を表2に示す。二つの材料の組成に大きな違いはないことが確認できる。これにより、材料の組成が引張試験に大きな影響を与えないことを確認できた。

Table 2 Chemical composition

	Ni	Fe	Cr	Nb	Al	Ti	Si	P	C	S	O	N
ワイヤ材料	53.86	18.18	18.24	5.14	0.44	0.94	0.06	0.005	0.032	0.01	0.003	0.0059
鋳造品	53.58	17.92	18.47	5.12	0.48	0.93	0.03	0.01	0.042	<0.001	0.003	0.0072

引張試験片は前章で造形した立壁形状の造形物から、図5に示すようにトーチ送り方向にワイヤ放電加工機により切り出した。鋳造品からも同様に引張試験を製作した。図6に製作した引張試験片を示す。造形条件は電流を120A、電圧を20Vに固定し、トーチ送り速度を200, 300, 400, 600mm/minと変化させた4条件で行った。また、造形物及び鋳造品に溶体化処理及び時効処理を施さずに試験を行った。



Fig. 5 Tensile test pieces within laminated object



Fig. 6 Tensile test pieces

引張試験の結果を図7に示す。トーチ送り速度の異なる4条件を比較すると、どの条件も同等程度の引張強さが得られており、熔融金属積層造形物の引張強度はトーチ送り速度には影響されなことが確認できた。しかし、鋳造品の引張強度と比較するとどの条件もやや低い値となった。

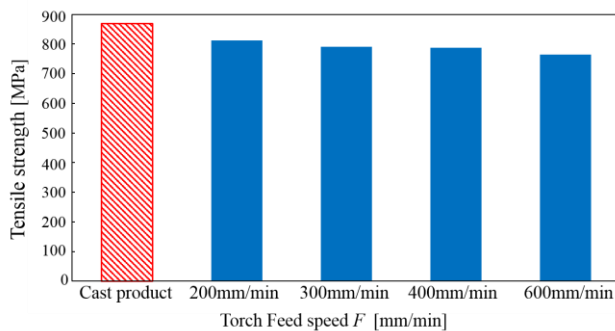
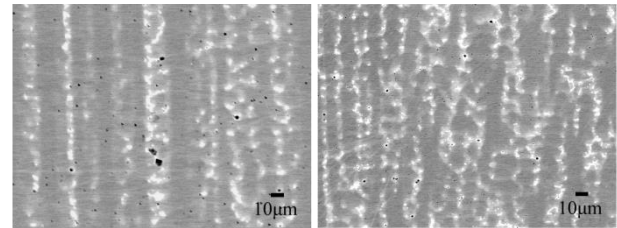


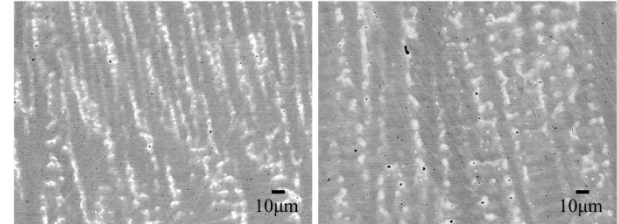
Fig. 7 Tensile strength

本研究で用いたInconel718は析出強化型合金であり、一般に溶体化処理後に時効処理を施すことによって金属間化合物を析出させ、強度を高めている。また、熔融金属積層法はアーク溶接を応用した手法であるため、造形中に造形物は高温になる。そこで、析出物の発生に着目し、走査型電子顕微鏡で金属組織観察を行った。図8に熔融金属積層造形物の金属組織観察の結果を、図9に鋳造品の金属組織観察の結果を示す。写真はいずれも反射電子組成像である。



(a) 120A-20V-200mm/min-720J/mm

(b) 120A-20V-300mm/min-480J/mm



(c) 120A-20V-400mm/min-360J/mm

(d) 120A-20V-600mm/min-240J/mm

Fig. 8 Metallographic structures of laminated objects

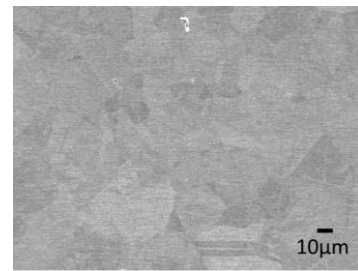


Fig. 9 Metallographic structures of cast product

熔融金属積層造形物と鋳造品の金属組織を比較すると、熔融金属積層造形物は黒色と白色の析出物が多数確認された。アーク溶接によってInconel718を溶接した場合、熔融金属にNb炭化物及びLaves相が析出することが知られている⁵⁾。本研究で観察された黒色の析出物はNb炭化物、白色の析出物はLaves相であると考えられる。また、Laves相は引張強さを劣化させる有害相として知られている⁶⁾。したがって、鋳造品と比較して熔融金属積層造形物の引張強さが低い値となった原因は、Laves相が生成されたためだと考えられる。

5. 結言

Inconel718を用いた熔融金属積層造形物の適切な造形条件、引張強さ、金属組織について検討し、以下の点を明らかにした。

- (1) 連続した均一なビードを形成するための電流値とトーチ送り速度の適切な組み合わせ条件を明らかにした。
- (2) 常温での引張強さは、溶体化処理及び時効処理を施さない場合、トーチ送り速度に影響されないことを明らかにした。
- (3) 鋳造品に比べて熔融金属積層造形物は引張強さが低下していることが分かった。引張強さの低下要因としてはLaves相の析出が考えられる。

参考文献

- 1) Terry wohlers, Wohlers Report 2012, Wohlers Associates Inc., (2012),p.42
- 2) 笹原弘之, 田中敬三, 吉丸玲玖, 熔融金属積層における造形条件と強度・金属組織に関する研究, 精密工学会誌, 78, 5,(2012),418.
- 3) 社団法人溶接学会編, 溶接・接合技術特論, 株式会社精興社, (2003), 184.
- 4) 安藤弘平, 西川淳, 井上真, 高電流・高速MIG溶接における溶融池現象に関する研究, 溶接学会誌 第40巻 第4号, (1971), pp.309
- 5) 溶接学会, 新版 溶接・接合部組織写真集, 黒木出版社, (2013), pp.495-496
- 6) G.D. Janaki Ram, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao, G.M. Reddy, J.K. Sarin Sundar, Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds, Journal of Materials Processing Technology 167, (2005) ,pp.73-82