

# アーク放電を用いた熔融金属積層によるラピッドツーリング

東京農工大学大学院 工学研究院 先端機械システム部門  
教授 笹原 弘之  
(平成20年度一般研究開発助成 AF-2008013)

キーワード: アーク放電, 熔融金属積層, 高強度造形

## 1. 緒言

3D-CADデータから迅速に複雑形状の作製が可能であるラピッドプロトタイプリングは試作品作製技術として普及している。近年、材料の無駄を省き強度部材にも適用できるような金属製品の直接作製を迅速に行いたいという要求が非常に大きくなっており、ラピッドプロトタイプリング技術を応用し、機械部品や金型を直接製作するいわゆるラピッドツーリングやラピッドマニファクチャリング（以下RM）への期待が高まっている。機械部品や金型のRMは、レーザ照射により金属粉末を熔融、固着する粉末焼結法（SLS）によるものが主流であるが<sup>1)</sup>、使用できる金属材料が限られる場合が多く、密度や強度がバルク材には及ばない等の課題がある。

本研究室ではこれまでに、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、熔融金属を積層させることにより三次元造形を行う熔融金属積層法を提案している。本技術では、アーク溶接を用いているため、チタン、ステンレス、アルミニウムなどの高温・高圧下でも耐久性・耐熱性に優れた多種の金属材料の使用が可能である点に大きな特徴がある。また良好な溶接部分の強度はバルク材と同等以上であることが知られており、熔融金属積層法では汎用の金属材料を用いた高強度な造形物を作製するRMが可能となる。熔融金属積層でニアネットシェイプを造形後、表面に切削加工を施し所望の寸法を得ることで無駄な切りくずの発生をなくし、短時間での製品製造が期待できる。

RMに溶接技術を用いた類似研究はいくつか行われている。ロールスロイス社ではTIG、MIG溶接を用いたShaped Metal Deposition（SMD）の研究<sup>2)</sup>を行っており、航空機産業などで商業的に利用可能な技術と言われてしている。その他にも、MAG溶接やプラズマアーク溶接を用いた研究<sup>3,4)</sup>も行われている。しかしながら、いずれの造形物も外壁形状が鉛直であり、オーバーハング形状の造形例は報告されていない。また、ソリッド構造の造形がほとんどで、軽量で高強度なリブが入ったシェル形状や、中空で天井の閉じたドーム形状、冷却水路を含む形状の造形は行われていない。

そこで本研究では、熔融金属法における積層現象を解明し、様々な形状の造形方法開発を目的とする。具体的には、プレス金型を想定して、軽量で高強度なリブ入ったシェル構造、中空で天井の閉じたドーム形

状、冷却水路の積層方法について検討した。また、造形物強度に及ぼす、積層条件と冷却条件の影響を調査し、ラピッドツーリングによる金型製造の可能性について論じる。

## 2. 熔融金属積層装置

本研究で作製した熔融金属積層装置を図1に示す。ストロークが、X軸・Y軸160mm、Z軸220mmの三軸制御造型機のZ軸に溶接トーチを取り付け、XYテーブル上のベースブロックには造形物の基板（150mm×150mm×5mm）を固定した。トーチ先端でアーク放電により熔融させた金属を基板上に滴下、堆積しながらZ軸を上昇させることによって積層を行う。

積層中、アーク放電により発生した熱の一部が造形物、基板、直動転がり案内等に蓄積するため、冷却装置を作製した。まず、ベースブロック内に複数の冷却管を通し水を循環させた。次に、XYテーブル上にタンクを取り付けた。積層中、積層点の高さに応じてタンク内の水位を制御させ、造形物を水で直接冷却を行った。冷却により熱を拡散させることで、装置の温度上昇を低減するだけでなく、造形精度の低下も抑制された。

## 3. リブを有するシェル構造の造形

熔融金属積層法では、溶接トーチを目標形状の輪郭に沿って動かすことにより垂直壁からなるシェル構造を迅速に造形することが可能である。本章では、軽量なシェル構造に強度を持たせるためにリブを持つシェル構造の造形を行い、積層方法について検討した。

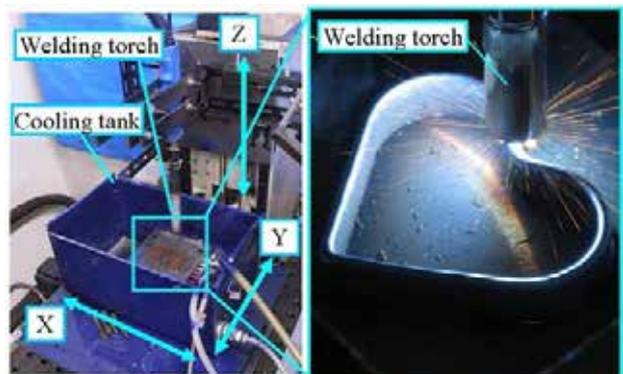


図1 造形装置

### 3・1 オーバーラップ部分の問題

直径50 mmの円筒に、直径25 mmの二つの円形のリブが入る形状の造形した。図2に示すように、溶接トーチ軌跡は黒点から反時計回りに直径50 mmの円の4分の1を描き、直径25 mmの2つ円を八の字を描くように作り、最後に直径50 mmの円の4分の3を描く。本報告では、溶接トーチが黒点からスタートして、再び黒点に戻ってくる軌跡を1層と定義する。このように溶接トーチを一筆書きで移動させる理由は、溶接電源のON、OFFを可能な限り行わず連続的に積層したいからである。

積層ピッチとは溶融金属を一層積層するごとにZ軸方向に溶接トーチを上昇させる量である。一層目は基板上に溶融金属を滴下するため、ビード断面形状は半円状になる。二層目以降は曲面であるビード上に積層するため、前層から零れやすくなり、一層目よりビード幅が広がり、高さが低くなる。一層目積層後の積層ピッチは2.1 mm、二層以降は1.45 mmとして、常に溶接トーチの先端と積層面との距離を一定に保っている。

しかしながら、図3の黒で示す部分のように、1層積層する間に2回積層される部分がある。本報告では、この部分をオーバーラップ部分と定義する。このオーバーラップ部分はオーバーラップしない部分より積層高さが高くなるのが容易に想像できる。

実際に、図4に示すようにオーバーラップ部分の積層高さがオーバーラップしない部分と比べて約4.0 mm高くなった。その結果、溶接トーチ先端と積層面との距離が約0.5 mmと極端に近くなり4層しか積層できなかった。このように、オーバーラップ部分を含む形状を造形する場合、オーバーラップ部分とオーバーラップしない部分の積層高さを一定にする必要がある。

### 3・2 オーバーラップ部分での送り速度制御

オーバーラップ部分とオーバーラップしない部分の積層高さを一定にする手法として以下の手法が考えられる。

- ①電流を小さくし、溶融量を減らす。
- ②電圧を大きくし、ビード高さを低くする。
- ③トーチの送り速度を高くし、溶融量を減らす。

本研究で作製した溶融金属積層装置ではNC制御装置と溶接機を同期させて、電流、電圧を徐変させることはできないため、送り速度を高くする手法を用いて実験を行った。

溶接において、電流、電圧を一定に保つと単位時間当たりの金属の溶融量はほぼ一定になる。つまり、溶接トーチの送り速度は単位長さ辺りの金属の溶融量を決める。オーバーラップ部分では、溶接トーチが1層積層する間に2回積層される。そこで、オーバーラップ部分での単位長さ辺りの溶融量を半分にし、オーバーラップしない部分と単位長さ辺りの溶融量が等しくなるように、オーバーラップ部分での溶接トーチの送り速度を2倍にした。

3.1項の表1に示す実験条件で造形を行い、オーバーラップ部分での溶接トーチの送り速度は600 mm/minとした。

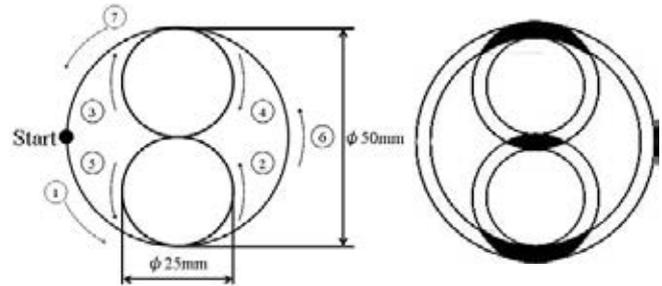


図2 トーチパス

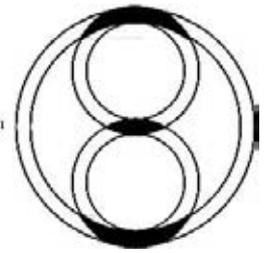


図3 オーバーラップ部分

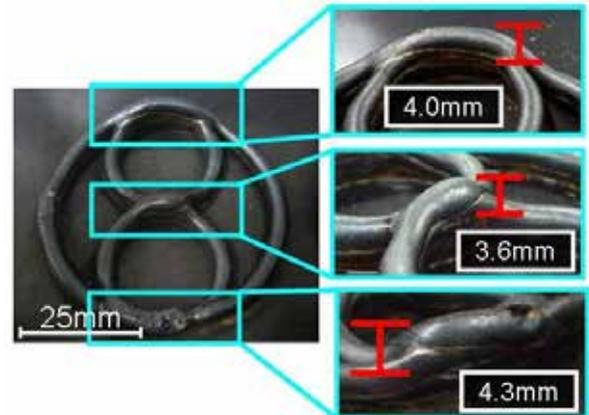


図4 オーバーラップ部分で生じる問題

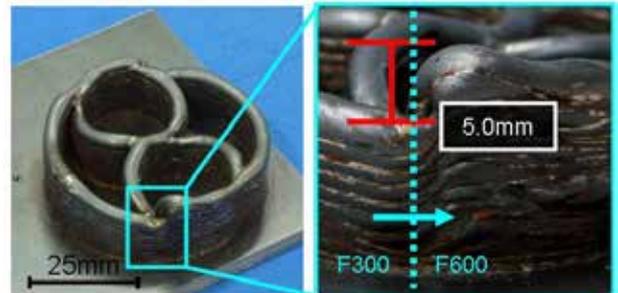


図5 送り速度変化により造形した造形物

図5に示すように、オーバーラップ部分での溶接トーチの送り速度を2倍にすることで、積層高さの上昇を抑制し4層以上積層することができた。しかしながら、溶接トーチの送り速度が300 mm/minから600 mm/minに高くなる部分、つまりオーバーラップ部分直前での積層高さがオーバーラップ部分の積層高さと同じ程度に低くなった。これは、トーチの移動方向が常に同一方向で、速度変動が常に同じ位置で周回ごとに繰り返されたためだと考えられる。

### 3・3 トーチ移動方向の反転

溶接トーチの移動方向が常に同一方向の場合、二つの速度変動が周回ごとに同じ位置で繰り返されることによって、積層高さに偏りが生じる。

そこで、積層開始位置を2箇所に分け、さらに溶接トーチの移動方向を時計回りと反時計回りにし、図6に示すように4パターンの軌跡を繰り返すプログラムをつ

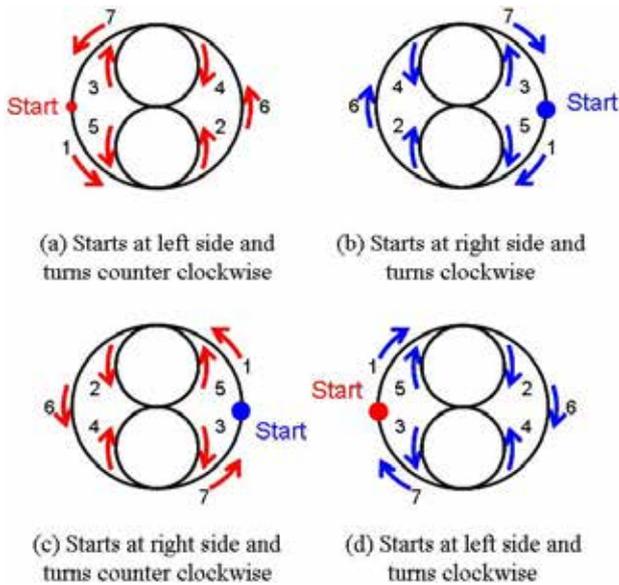


図6 トーチの移動パス

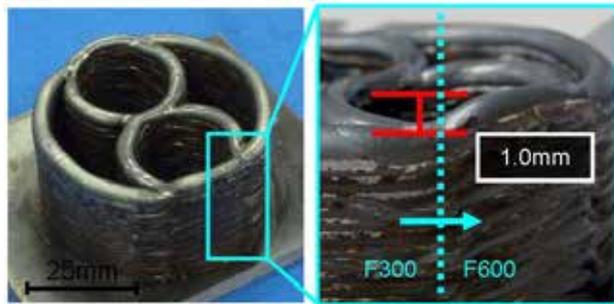


図7 トーチ移動速度を可変しトーチ移動方向を反転させた場合の造形物

くり、速度変動部での積層高さの偏りをなくす実験を行った。実験条件は3.2項の実験と同じ条件である。

図7に示すように、速度変動部での積層高さの偏りを約1.5mmに抑制し20層積層することができた。オーバーラップ部分の積層高さも、オーバーラップしない部分の積層高さとはほとんど変化がない。

#### 4. ドーム形状の造形

本章では、天井の閉じたドーム形状の造形を行い、積層方法について検討した。ドーム形状の半径は25 mm、実験条件は、60 A、15 V、F300 mm/minとする。

##### 4・1 スライス方法の影響

ドーム形状を作製する際に、以下の2つの方法でスライスデータを作製し、その影響について調べた。図8(a)示すように、Z軸方向に均等に分割する手法と、図8(b)に示すようにドーム形状の輪郭に沿って積層方向に均等に分割する手法を比較した。いずれも1層の間隔を1.3mmとした。

まずZ軸方向に均等に分割する手法の場合、ドームの高さ25 mmを1.3 mmで割ると、19.2となるため、製作したプログラムは20層積層予定であったが、図9に示すように、18層までしか積層されず、19層目は18層目から

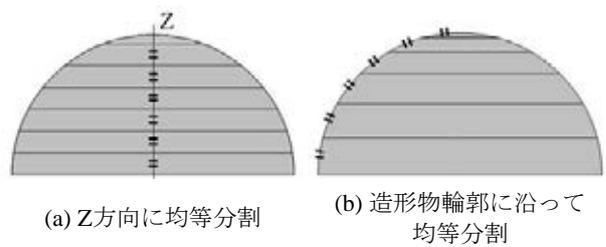
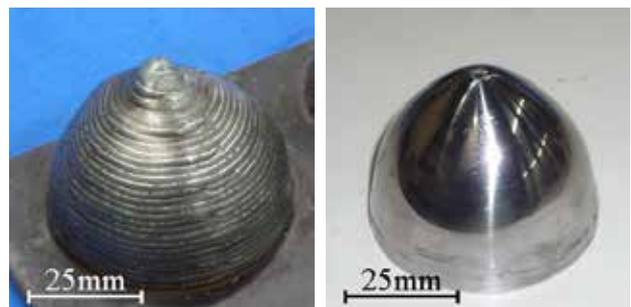


図8 造形物のスライスデータの作成方法



図9 Z方向均等分割した場合のドーム形状造形例



(a) 造形後の形状

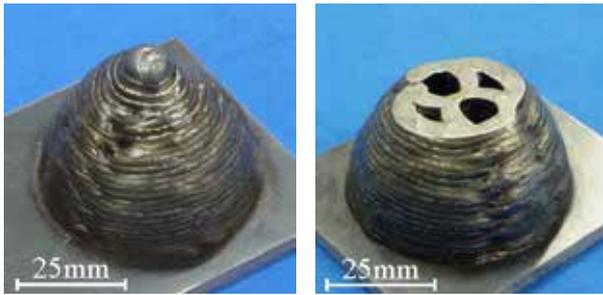
(b) 仕上げ加工後

図10 造形物輪郭に沿って均等分割した場合の造形物

外れ基板上に積層された。積層開始直後はほぼ垂直に積層されるが、ドームの頂点に近くなるほど水平方向に積層する必要がある。実験で使用した溶接ワイヤの径は1.2 mmであり、アークが前層のビードに飛ばず、積層できなかった。

一方、ドーム形状の輪郭に沿って積層方向に均等に分割する手法の場合、図10(a)に示すように、ドームの天井を閉じることに成功し、図10(b)に示すように、仕上げ加工を施しても欠陥がないことがわかる。

しかしながら、30層を予定していたが、28層目で完全に天井が閉じ、目標とした形状とは異なるものとなった。ドーム形状のようにオーバーハングした形状は、スライスデータを輪郭にそって積層方向に均等に分割して作製することにより、ドーム形状に限らず複雑な自由曲面のオーバーハング形状を造形可能であると考えられるが、より高精度にオーバーハングした形状を造形するには、テーブル傾斜を用いて熔融池を常に水平に保つ手法や、フレキシブルトーチを用いて溶接トーチ自体を斜めに傾けるなどの手法を用いる必要が考えられる。



(a) 造形後の形状 (b) 造形物断面

図11 リブを持つドーム形状

#### 4・2 リブを持つドーム形状

第3章で示したオーバーラップ部分があるリブ構造と、ドームのシェル構造を組み合わせて、リブを有するドーム形状の造形を行った。

図11 (a)示すように、ドームの内部にリブを保ちながら、天井を閉じ、ドーム形状を造形することができた。実際にドームを水平に切っても、図11 (b)に示すように内部にリブがあることがわかる。熔融金属積層法を用いれば、切削加工では不可能な中空で高強度なリブを持つ形状の作製が可能であることが明らかになった。

#### 5. 冷却管の造形

本章では、ドーム形状を造形する手法を拡張し、断面においてアーチを描くようにビードを傾斜させながら積層し冷却管の作製する手法を提案する。実験条件は60 A, 15 V, F300 mm/minとする。

##### 5・1 直線冷却管の造形

図12に造形する冷却管の断面の模式図を示す。ここでは基板上に、それぞれ5本、7本、10本、14本の直線ビードを用いて管壁を造形する。1層目の2本のビード間隔は5 mm, 8 mm, 9 mm, 9 mmとし、内径を変化できることを示す。

造形した直線冷却管の断面を図13に示す。それぞれ最大で1.5 mm, 4.5 mm, 5.5 mm, 7.0 mm程度の穴が貫通しており、造形に用いるビード数を変えるだけでも様々な径の冷却管を迅速に造形できることが明らかになった。

##### 5・2 S字冷却管の作製

5.1項の応用として、1層目のビード間隔を14 mmにし図14に示すようなS字型の冷却管を製作した。図15に示すように、冷却管の断面は約10 mmの径の穴が貫通しており、本手法を用いて複雑な経路をもつ冷却管を造形が可能となった。

#### 6. 熔融金属積層法における造形物強度

本章では、熔融金属積層法における積層条件、冷却条件が単一シェル形状の側面硬度に及ぼす影響について述べる。

##### 6・1 単一シェル形状の及ぼす積層条件の影響

表1に示す6条件で縦30 mm, 横70 mmの角柱シェル形

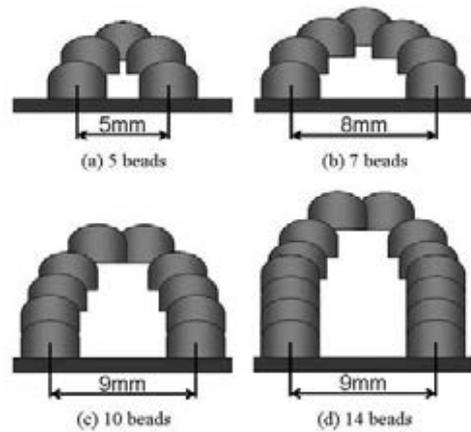


図12 造形管の断面

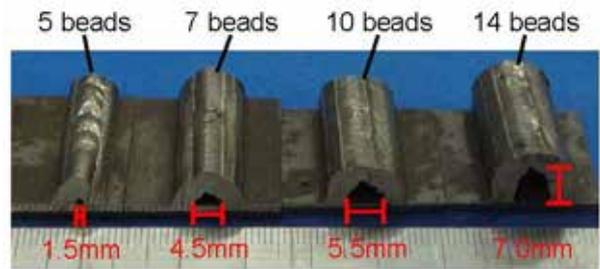


図13 造形した直線冷却管の断面

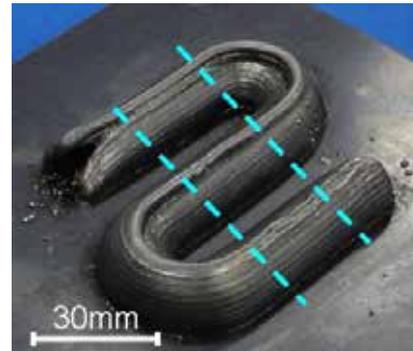


図14 S字型の冷却管

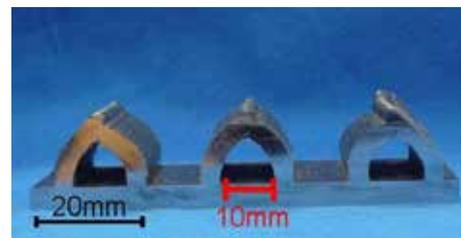


図15 S字管の断面

状を造形し、積層条件が造形物強度におよぼす影響について調査した。条件 a, b, cを比較すると電流の影響が、条件b, dを比較すると電圧の影響が、条件a, e, fを比較すると溶接トーチの送り速度の影響がそれぞれわかるようになっている。造形中、最上層ビード温度変化を、造形後、造形物側面の下層部（5層目付近）、中層部（15層目付近）、上層部（25層目付近）のビッカース硬度測定した。

電流を変えた場合の硬さ測定結果を図16に、溶接トーチの送り速度を変えた場合の硬さ測定結果を図17に示す。また条件a, e, fにおける5層目, 15層目, 25層目積層時の冷却速度を示す。冷却速度は熔融金属の800℃から500℃, もしくは300℃までの温度変化を冷却される時間で割った値(℃/s)である。

図16, 17に示すように、本実験において、造形物下層部より上層部の方が柔らかくなる傾向がみられた。この原因として、熔融金属の冷却速度低下が考えられる。図18に示すように、積層開始直後、下層部ではサブストレートがヒートシンクのように働き、熱が素早く拡散するため冷却速度が高い。一方で、積層を重ねるごとに、徐々に造形物に熱が蓄積していくため、中層部, 上層部では冷却速度が低下していく。下層部に比べて、組織の結晶粒が粗くなり、ある一定の硬度に収束するため、中層部と上層部の硬度は同程度、もしくは上層部は最も硬度が低くなったと考えられる。

また、図16の下層部, 図17の下層部と中層部に着目すると、電流, 溶接トーチの送り速度に応じて硬度差があることがわかる。これは、アーク放電から投入される入熱量の違いによる、冷却速度差の影響だと考えられる。単位長さあたりの入熱量 $Q$  [J/mm]は、アーク放電の電流を $I$  [A], 電圧を $V$  [V], トーチの送り速度を $F$  [mm/min]とおくと以下の式で表される。

$$Q = 60IV / F$$

電圧15 V, 溶接トーチの送り速度F300 mm/minの場合、電流値に応じて入熱量は60 Aが180 J/mm, 80 Aが240 J/mm, 100 Aが300 J/mmとなる。電流が低いと入熱量は少なくなり、硬度が高いが、逆に電流が高ければ入熱量が増加するため、硬度が低下すると考えられる。

また、電流60 A, 電圧15 Vの場合、溶接トーチの送り速度に応じて入熱量はF100 mm/minが540 J/mm, F300 mm/minが180 J/mm, F500 mm/minが108 J/mmで、電流に比べてそれぞれの入熱量の差が最も大きい。図18に示すように、入熱量が最も少ないF500の時に冷却速度が最も高く、入熱量がもっとも多いF100のときに最も冷却速度が低い。

一方、電圧15 Vから18 Vに変化させても、電流, 送り速度の変化に比べて入熱量の変化は少なく、硬度差はほとんど見られなかった。

## 7. 結論

- 溶接トーチが1層積層する間に2回積層されるオーバーラップ部分がある形状の造形では、オーバーラップ部分の積層高さが高くなる。オーバーラップ部分での溶接トーチの送り速度を2倍にすることで積層高さの上昇を抑制できる。
- トーチの移動方向が常に同一方向の場合、速度変動が常に同じ位置で周回ごとに繰り返されるため、積層高さに偏りが生じる。1層積層するごとに積層開始位置を変更し、さらに1層ごとに溶接トーチの移動方向

表1 実験条件

条件		a	b	c	d	e	f
電流	A	60	80	100	80	60	
電圧	V	15			18	15	
トーチ送り速度	mm/min	300				100	500
積層ピッチ	mm	1.3	1.75	1.6	2.3	3.4	1.2
溶加材		SS400					
ワイヤ直径	mm	1.2					
積層数		30					
ノズル高さ	mm	5					
シールドガス	Ar	Ar 80%, CO <sub>2</sub> 20%					
シールドガス流量	l/min	5					

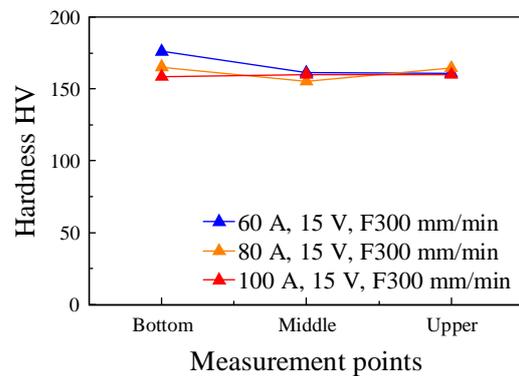


図16 位置による硬度の分布 (15 V, F300 mm/min)

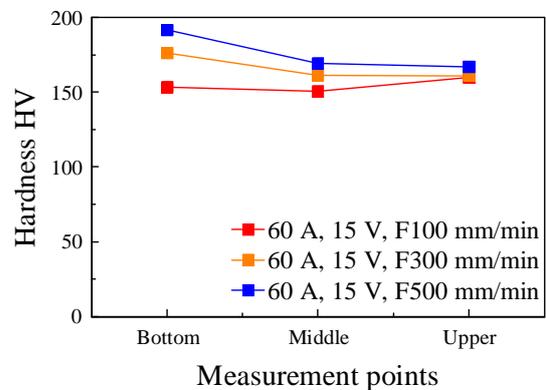


図17 位置による硬度の分布 (60A, 15 V)

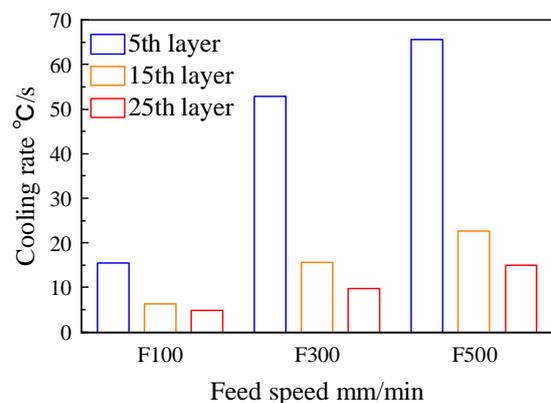


図18 冷却速度 (60A, 15 V)

反転させ、二つの速度変動部の影響を分散させることで、オーバーラップ部分を含む形状の造形が可能になる。

- 3) ドームのようなオーバーハングした形状の造形では、目標形状の輪郭に沿って一定間隔にスライスデータを製作することで造形可能である。
- 4) 熔融金属積層法では、造形に用いるビードの数を変えるだけで、さまざまな径、形状の冷却管の造形が可能である。
- 5) 積層開始直後、下層部ではサブストレートがヒートシンクのように働き、熱が素早く拡散する。一方で、積層を重ねるごとに、徐々に造形物に熱が蓄積していくため、中層部、上層部では冷却速度が低下していく。組織の結晶粒が粗くなり、ある一定の硬度に収束するため、中層部と上層部の硬度は同程度、もしくは上層部は最も硬度が低くなる。
- 6) アーク放電からの入熱量は冷却速度に影響を及ぼす。入熱量を決める要素は電流、電圧、溶接トーチの送り速度であるが、中でも溶接トーチの送り速度変化は入熱量を大きく変化させる。送り速度が高いと入熱量が少なく、冷却速度が高く、硬度も高い。送り速度が低いと、入熱量が多くなるため冷却速度が低下し硬度も低くなる。
- 7) 電流が低いと入熱量は少なくなり、硬度が高い。逆に電流が高ければ入熱量が増加するため、硬度が低下する。しかしながら、電流値の変化が入熱量変化へ及

ぼす影響は、送り速度変化に比べれば小さい。

- 8) 電圧を変化させても入熱量はほとんど変化しないため、電圧変化が造形物の硬度に及ぼす影響は小さい。

## 謝 辞

本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成20年度研究開発助成によるものである。記して深甚なる謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Tatsuaki, F., Takashi, U., Akira, H., Satoshi A. and Tomas, H.C.C., Study on the measurement of physical properties in the metal powder for rapid prototyping, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 73, 5, (2007) 558-562.
- 2) Clark, D., Bache, M.R., Whittaker, M.T., Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications, Journal of Materials Processing Technology, 203, 1-3, (2008) 439-448.
- 3) Song, Y.-A., Park, S., Chae, S.W., 3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 9, (2005) 1063-1069.
- 4) Xiong, X., Zhang, H., Wang, G., Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling, Journal of Materials Processing Technology, 209, 1, (2009) 124-130.