



H. Sasahara

## ワイヤ+アーク放電にもとづく AM の 金型造形への適用可能性

笹原 弘之\*

### 1. まえがき

アディティブ・マニュファクチャリング (AM) の対象が、試作から実製品へと急速に拡大しており、強度部材にも適用できるような金属を用いた AM への期待が高まっている<sup>1)</sup>。金属製の部材を AM により製造するプロセスは、大別して二つの手法がある。ひとつは、粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion) であり、もうひとつは指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) である。

粉末床溶融結合では、レーザや電子ビームを熱源とし、平坦に敷き詰めた金属粉末を一層ずつ溶融・固着しながら積層していくものが主流である。通常、直径 15~45 $\mu\text{m}$  の金属粉末を用い、一層の厚さは 20~150  $\mu\text{m}$  程度である。ステンレス鋼、工具鋼、コバルトクロム、チタン合金、ニッケル基合金、アルミニウム合金などが使用できる。精細な造形が可能で、造形精度が比較的高い。造形能率は数十 cc/h 程度と高くないが、レーザを複数搭載するなどして高能率化も進められている。欧米の各社が先行しており、GE 社などでも採用が進んでいる。

他方、指向性エネルギー堆積は、肉盛 (cladding) プロセスがその原理であり、金属材料をワイヤもしくは粉末として供給し、それをレーザ、電子ビームまたはアーク放電により溶融し、金属のビードとして堆積することにより造形を行う。RPM Innovations 社では、3kW/4kW のファイバーレーザを用い、1500mm $\times$ 1500mm $\times$ 2100mm の大型造形を可能としている<sup>2)</sup>。DMG MORI 株式会社やヤマザキマザック株式会社からは金属粉末をレーザで溶融・堆積し、続けてエンドミル加工での仕上げが可能で装置が発表されている<sup>3,4)</sup>。また、米国 Sciack 社<sup>5)</sup>は、ワイヤ金属を電子ビームを熱源として溶融・積層するシステムを開発しており、5.7m $\times$ 1.2m $\times$ 1.2m の大型部品の製造も可能である。レーザ溶融が大気中あるいは不活性雰囲気中で行われるのに対し、電子ビーム方式の場合は高真空下で行われるため、雰囲気中の元素を巻き込むことなく造形が可能である。

以上のような構成の AM 装置に対して、ワイヤ素材をアーク放電による溶接技術で溶融・固化・積層する技術の研究も進められている。これは、指向性エネルギー堆積の

一つの形態として捉えることができる。このアイデア自体は 1926 年の特許にまで遡ることができる<sup>6)</sup>。アーク溶接による手法は、主要な熱源装置がレーザや電子ビームによるよりも単純かつ低廉であることが大きな特徴である。また、エネルギー効率も高い。ロールスロイス社では TIG・MIG 溶接を用いた Shaped Metal Deposition (SMD) に関する研究を行っており<sup>7)</sup>、航空機産業などで商業的に利用可能な技術とも言われている。MAG 溶接を用いた連続的な溶融金属の積層後、切削加工を施す研究<sup>8)</sup>も近年行われている。

著者の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溶融・固化させる技術に着目し、溶融金属を積層させることにより三次元造形を行う溶融金属積層法について研究を進めてきた<sup>9-19)</sup>。本技術では、チタン合金、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、溶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 AM が可能となる。溶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、短時間で製品製造が期待できる。

そこで本研究では、溶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、本手法の適用先として、金型や機械部品の補修が考えられるが、付加造形後にピッカー硬さ試験とシャルピー衝撃試験を行い、母材や熱影響部、積層部の機械的性質を調査した。

### 2. 造形装置

本研究で作製した溶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

\* 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

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溶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。

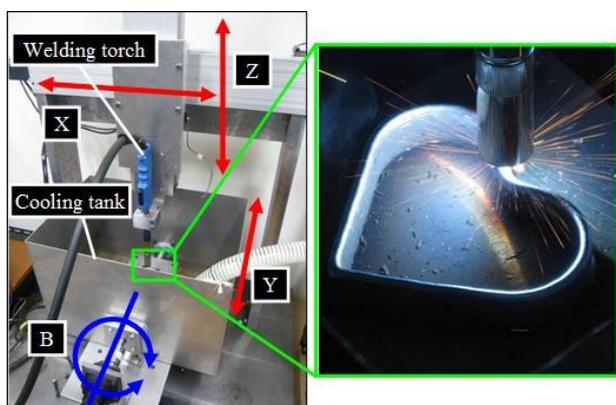


図1 実験装置と造形中の様子

### 3. リブを有するシェル構造の造形

溶融金属積層法では、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、軽量の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。

#### 3.1 オーバーラップ部分の問題

直径50mmの円筒に、直径25mmの二つの円形のリブが入る形状を造形した。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50mmの円の4分の1を描き、直径25mmの2つ円を八の字を描くように作り、最後に直径50mm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2.1mm、二層以降は1.45mm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ことが容易に想像できる。

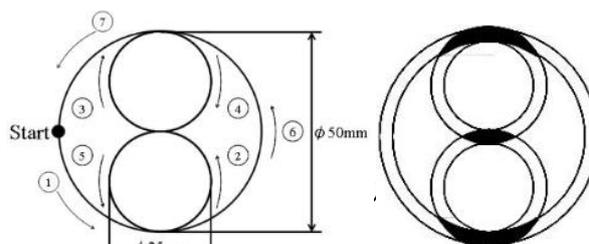


図2 トーチパス

図3 オーバーラップ部分

#### 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、電圧およびワイヤ供給量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あた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。

図4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300mm/minから600mm/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比べて約5mm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。

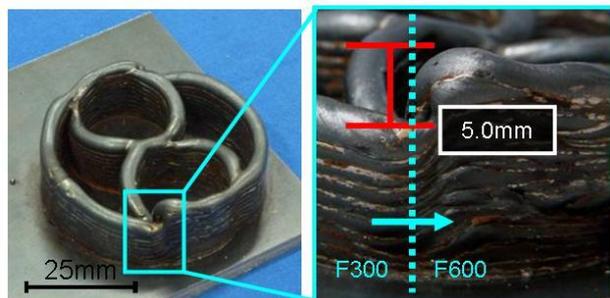


図4 送り速度変化により造形した造形物

### 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、4通りの軌跡を繰り返して積層するプログラムをつくり、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5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。

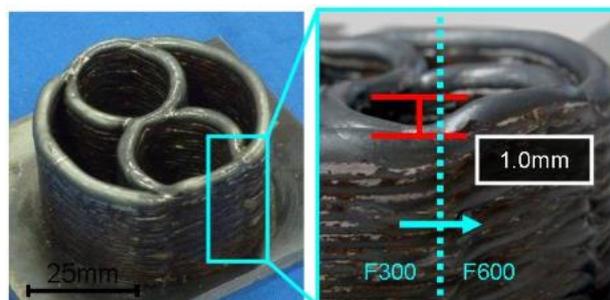


図5 トーチ移動速度を可変しトーチ移動方向を反転させた場合の造形物

## 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25mmである。

### 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6(a)示すように、Z軸方向に均等に分割する手法と、図6(b)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。

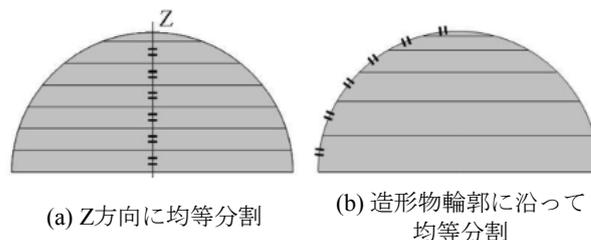


図6 造形物のスライスデータの作成方法

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25mmを1.3mm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18層までしか積層されず、19層目は18層目から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1.2mm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7(a)に示すように、ドームの天井を閉じることに成功し、図7(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。

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溶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。

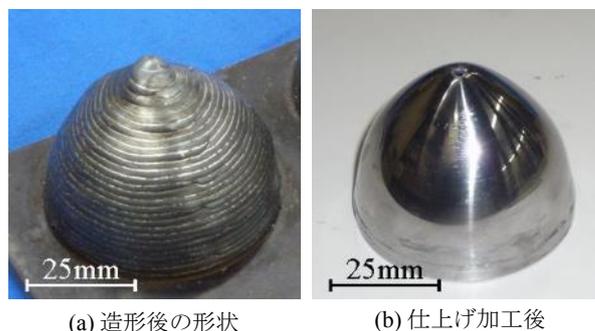


図7 造形物輪郭に沿って均等分割した場合の造形物

### 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 8(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 8(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。

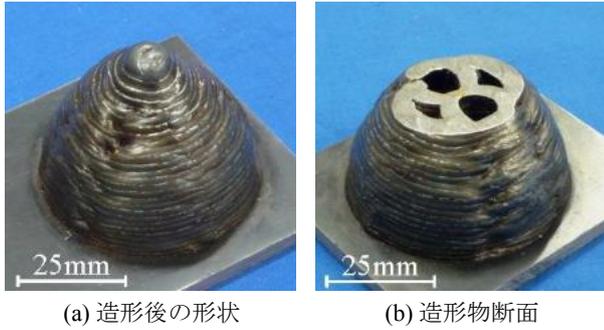


図 8 リブを持つドーム形状

## 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。

### 5.1 直線冷却管の造形

図 9 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 10 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。

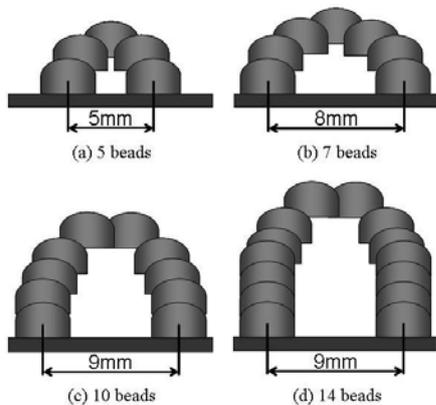


図 9 造形管の断面

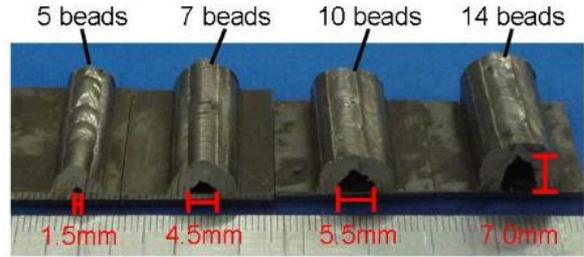


図 10 造形した直線冷却管の断面

### 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 11 に示すような S 字型の冷却管を製作した。図 12 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。

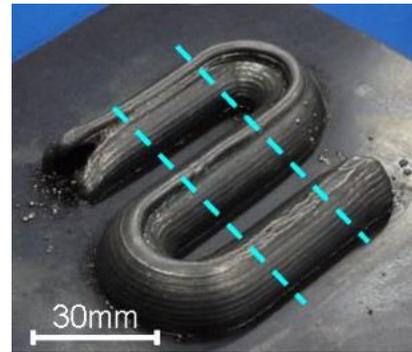


図 11 S 字型の冷却管

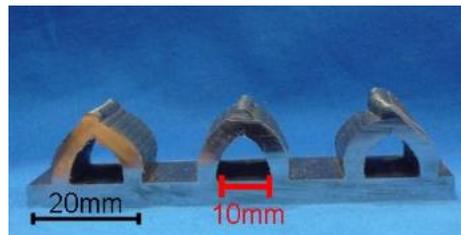


図 12 S 字管の断面

## 6. 熔融金属積層法による金型補修部の特性

本手法を用いることにより、金属部材に金属材料を必要量のみ局所的に付加することができる。これにより、金型や機械部品の補修部位に対して同等の金属材料を滴下・堆積させることで、金型や機械部品の補修が可能である。金属部材への付加造形後にピッカース硬さ試験とシャルピー衝撃試験を行い、母材や熱影響部、積層部の機械的性質を調査した。

図 13 に熔融金属積層法を用いた金属部材の補修工程を示す。本手法を用いて金属部材の補修を行う際、摩耗・欠

損部分を除去し、除去部を埋めるように積層し、切削や研削加工により仕上げる。

溶融金属積層法で補修を行う際に、溶接による熱の影響を受けて、溶接部近傍の母材に熱影響部が形成される。熱影響部は組織変化による機械的性質の変化が生じやすい。そこで本手法を用いて図 14(a)に示す試験片の中央溝部に肉盛溶接後、表面に仕上げ加工を行い、図 14(b) に示す仕上げ加工面の溶接境界近傍の硬さ測定を行った。また、図 14(c)に示す位置からシャルピー衝撃試験片を切り出し、母材や熱影響部、積層部の靱性を測定することで、補修後の金属部材の機械的性質を調査した。

実験では母材にダイカスト金型への補修を模擬するため合金工具鋼 SKD61 を用いた。実験条件は積層高さを 5.5mm、溶接電流:120A、溶接電圧:21.8V、送り速度:200mm/min、クロスフィード量:4.8mm、溶接線材質:SKD61、シールドガス Ar80%-CO<sub>2</sub>20%(mol%)、ガス流量:10L/min の条件で造形を行った。ダイカスト金型の寿命低下要因として熱応力によって発生するヒートクラックが挙げられる。そのため、金型寿命にはヒートクラックの進展を防ぐ靱性が影響する。よって、硬さ分布から溶接入熱による相変態の様子を推定する。相変態した金属は母材と異なる靱性を有すると考えられる。母材とする合金工具鋼 SKD61 は 1030℃で焼入れ空冷後、550℃で高温焼戻し熱処理を 2 回行った。

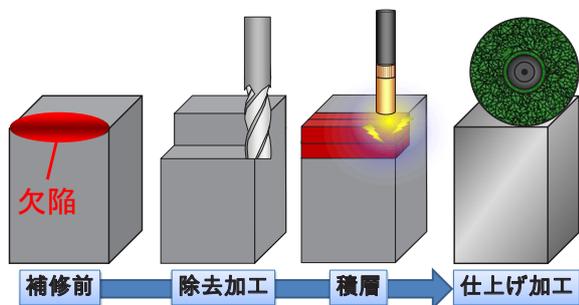
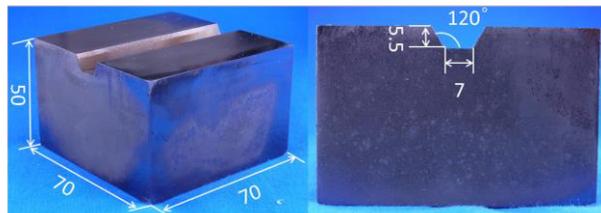


図 13 溶融金属積層法を用いた補修工程

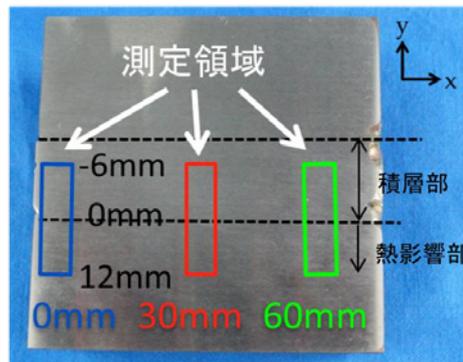
試験片の硬さ分布の測定領域を図 14(b)に示す。図 15 に試験片の硬さ測定結果を示す。溶接境界から 6mm 付近で硬度が低い領域が生じている。軟化が生じた原因としては、溶接入熱により相変態が生じたためだと考えられる。この領域では相変態により母材と異なる靱性を有していることが考えられる。

そこで、軟化域を有する熱影響部や、母材、積層部の靱性を測定した。図 16 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。熱影響部の靱性は、積層部や母材と同等以上であることが分かる。今後は、本手法で補修した試験片を用いて熱疲労

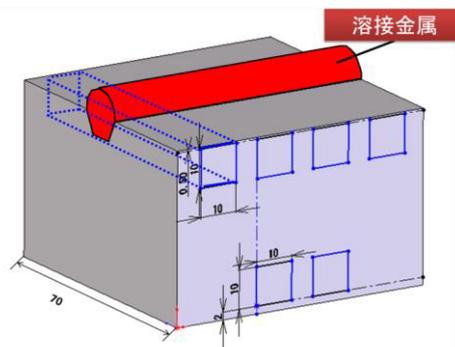
試験を行い、製品に使える性能を有しているか検討する必要がある。



(a) 試験片寸法



(b) 硬さ測定領域



(c)シャルピー衝撃試験片切り出し位置

図 14 測定領域

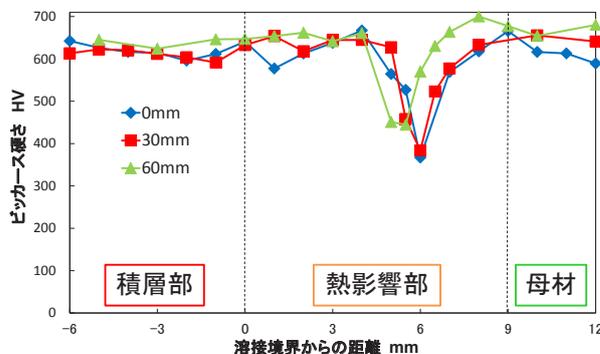


図 15 硬さ測定結果

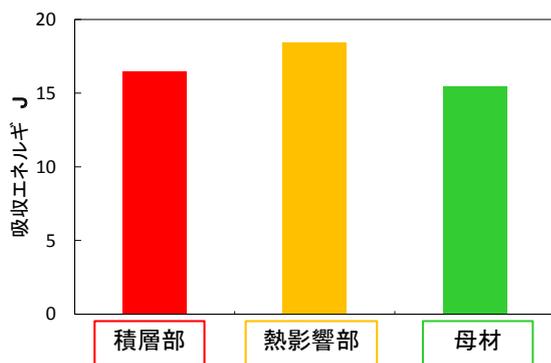


図 16 シャルピー衝撃試験の測定結果

## 7. おわりに

本稿では、ワイヤ材料をアーク放電により溶融・積層するアディティブ・マニュファクチャリングによる造形の特徴と金型補修へ適用した際の特性について述べた。

- 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を反転させ、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。
- 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。
- 溶融金属積層法では、造形に用いるビードの数を考えるだけで、さまざまな径、形状の冷却管の造形が可能である。
- 溶融金属積層法により補修した金属部材の硬度を測定した結果、熱影響部に軟化域が確認された。シャルピー衝撃試験の結果、積層部と熱影響部は母材と同等以上の靱性を有していることが分かった。

## 謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

## 参考文献

- J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 47, 2, (1998), 525-54.

- <http://www.rpm-innovations.com>
- <http://jp.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivem-anufacturing>
- <https://www.mazak.jp/news-events/press-releases/integrex-i-am-20141009/>
- <http://www.sciaky.com/>
- P. Cosgrove, S. Williams, High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology, www.cranfield.ac.uk
- D. Clark, et.al., Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications, Journal of Materials Processing Technology, 203, 1-3, (2008), pp.439-448.
- Y.-A.Song, et.al, 3D welding and milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 9, (2005), pp.1063-1069.
- 笹原弘之, 松丸哲史, 上岡利人, 他2名, 溶融金属積層による傾斜壁の造形, 日本機械学会誌論文集(C編), 75, 757 (2009) 2435-2439.
- 笹原弘之, 田中敬三, 上岡利人, アーク放電を用いた溶融金属積層による3次元造形, 型技術, 25, 8 (2010)28-33.
- R. Yoshimaru, H. Sasahara, et.al., Direct metal rapid fabrication using arc welding, Proc. 3rd Int. Conf. of ASPEN, (2009) #1A1-7 (CD-ROM)
- 田中敬三, 阿部壮志, 吉丸玲欧, 笹原弘之, アーク放電を用いた溶融金属積層による造形物の強度, 日本機械学会誌論文集 (C編), 79,800 (2013) pp.1168-1178.
- 田中敬三, 笹原弘之, プレス金型におけるトリム刃型製造方法の研究-(NC マシンによる溶融金属積層と積層金属の開発, 日本機械学会誌論文集 (C編), 78, 790 (2012) 2340-2349.
- T. Abe and H. Sasahara, Residual Stress and Deformation after Finishing of a Shell Structure Fabricated by Direct Metal Lamination Using Arc Discharge, Int. J. of Automation Technology, 6, 5 (2012) pp. 611-617.
- T.Kamioka, S.Ishikawa and H.Sasahara, Fabrication of Elbow Pipe by Direct Metal Lamination Using Arc Discharge while Maintaining the Molten Pool in a Horizontal Position, Int. J. of Automation Technology, 4, 5 (2010) pp.422-431.
- T. Abe and H. Sasahara, Study on Dissimilar Metal Fabrication with Direct Metal Lamination by using Arc Discharge, Proc. 14th Int. Conf. EUSPEN, Vol.1 (2014) pp.117-120.
- T. Abe and H. Sasahara, Development of the Shell Structures Fabrication CAM System for Direct Metal Lamination Using Arc Discharge -Lamination Height Error Compensation by Torch Feed Speed Control-, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16, 1 (2015-01) pp. 171-176.
- H. Takagi, T. Abe, P. Cui and H. Sasahara, Mechanical Properties Evaluation of Metal Components Repaired by Direct Metal Lamination, Key Engineering Materials Vols 656-657 (2015) pp 440-445.
- T. Abe and H. Sasahara, Dissimilar metal deposition with stainless steel and nickel based alloy by wire and arc based additive manufacturing, Precision Engineering, 45 (2016) pp. 387-395.