

レーザー粉体肉盛法による微細造形技術の開発

山下順広* 舟田義則* 廣崎憲一* 根田崇史*
村谷外博** 塚本雅裕*** 阿部信行***

金属3Dプリンタ技術の一つとして、近年注目されているレーザー粉体肉盛法(Laser Metal Deposition)の既存装置は、粉末の供給精度が低いことなどから造形可能な形状のサイズが大きく、薄肉部品や微細部品に対して精密な造形が難しい。本研究では、薄肉部品や精密部品に対して微細な造形が可能なLMD技術の開発を目的に、微量の原料粉末を安定に供給可能な面直噴射型LMD装置を試作し、実験によりNi基自溶性合金粉末を用いて幅0.4mm、高さ0.3mm未満の微細な肉盛りや薄板への厚さ0.1mmの薄膜形成ができることを確認した。また、SKD11粉末を用いて厚さ0.7mmの薄壁を高さ3mmに立体造形できることを明らかにした。

キーワード: レーザ粉体肉盛法, レーザ肉盛り, 面直方向, Ni基自溶性合金粉末, SKD11粉末

Development of Micro Additive Manufacturing by Means of Laser Metal Deposition

Yorihiro YAMASHITA, Yoshinori FUNADA, Kenichi HIROSAKI, Takashi KONDA,
Sotohiro MURATANI, Masahiro TSUKAMOTO and Nobuyuki ABE

In recent years, Laser Metal Deposition (LMD), which involves building up layers on products by melting metallic powder with laser heat, has been gaining attention as a possible new technology for metal 3D printers. However, it is difficult to create micro parts for a commercial LMD apparatus because the cladding size is large, and a lot of powder is required. The purpose of this study is to develop LMD technology for making micro cladding on thin parts and precision parts. Test using Ni-based SFA powder showed that it is possible for the build-up to have a narrower width than 0.4mm, a lower height than 0.3mm, and a thickness of only 0.1mm. And in the case of cladding with SKD11 powder, it is possible to build up a thin wall with a width of 0.7mm and a height of 3mm.

Keywords : laser metal deposition, laser cladding, perpendicular to the surface, Ni-based SFA powder, SKD11 powder

1. 緒 言

近年、3次元CADデータから直接造形して製品を製造する技術として3Dプリンタが注目されている。特に、使用する材料を金属とした金属3Dプリンタは、航空宇宙分野、医療分野、工業分野などを中心に普及が進んでいる^{1),2)}。

金属3Dプリンタには様々な方法があり、選択的レーザー溶融法(Selective Laser Melting, 以下SLMと記す)と呼ばれる手法が一般的によく知られている。薄く敷いた原料粉末に、造形したい箇所のみレーザーを照射して固化し、これを繰り返して積層造形する方法である。これに対して、必要な部分にのみ粉末を連続的に供給しながらレーザーで溶融・固化していく、レーザー粉体肉盛法(Laser Metal Deposition, 以下LMDと記

す)がある。この技術は、SLMに比べ用意する粉末が少なく済むことや、既製の製品に対して部分的に形状を付加することが容易であるなどの特長がある。しかし、従来のLMD装置では、粉末の供給精度が低いことなどから、レーザー造形可能な最小の幅が0.4mm、高さが0.3mmと大きく³⁾、薄肉部品や微細部品に対する精密造形が難しいという課題がある。

そこで本研究では、従来装置に比べて造形可能な最小幅や最小高さが小さくできるLMD装置を開発し、造形実験により、薄肉部品や精密部品に対応した微細造形が可能であるか検証を行った。

2. 面直噴射型LMD装置の開発

従来のLMD装置では、レーザー加工ヘッド中心から照射されるレーザー光に対して斜め方向から原料粉末が噴射供給される。よって、目標とする位置への粉末の集

*機械金属部 ** (株)村谷機械製作所

***大阪大学接合科学研究所

束性が低く、微小な範囲に正確に粉末を供給することが難いため、局部での高精度な造形が困難である。

そこで、造形面に対して垂直に原料粉末を供給することで、粉末供給範囲の極小化を図った面直噴射型LMD装置を試作した。同装置は、図1に示すように、ヘッドの中心に設置した口径 $\phi 0.4\text{mm}$ のノズルから原料粉末を面直に噴射供給し、斜め方向から照射するレーザー光で加熱しながら造形している。6本のレーザー光(波長 915nm 、最大出力 25W)が原料粉末供給ノズルと同軸の位置で集光し、最大 150W のレーザー光が得られる。このときの集光径は、 $\phi 0.4\text{mm}$ とした。

薄肉部品や微細部品を造形するためには、原料粉末を安定して供給することが必要である。そこで、内部に加振機能を付与することで、粉末のブリッジ現象による目詰まりを抑止し、微細な吐出口から微量の原料粉末を安定して供給することができる高精度粉末供給機を試作した。本供給機は、レーザー加工ヘッドとチューブを介して接続され、高圧ガス流にのせてレーザー加工ヘッドまで原料粉末を移送し、ヘッド内のノズルより噴射している。

粉末供給能力の評価には電子天びんを用いた。図2に粉末供給量と時間の関係を示す。経過時間とともに直線的に粉末量が増加しており、粉末が安定して供給されていることがわかる。直線の傾きから粉末供給速度は 27mg/s であり、微量の粉末で供給できた。

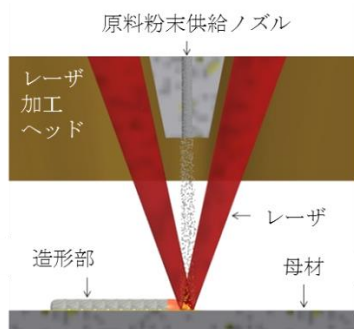


図1 面直噴射型LMD技術

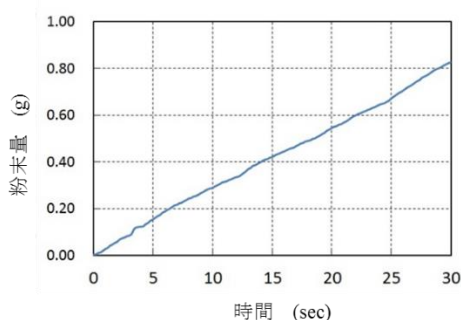


図2 粉末供給性能評価



図3 試作したLMD装置

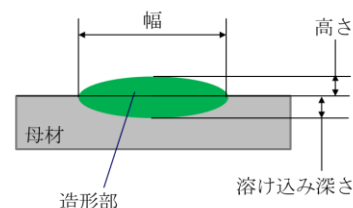


図4 造形サイズの評価

上述のレーザー加工ヘッドおよびレーザー装置、高精度粉末供給機を搭載した面直噴射型LMD装置の外観を図3に示す。本体には、X軸、Y軸、Z軸からなる多軸のワーク位置決め装置が組み込まれており、ワークを移動させながら造形が可能である。

3. 直線造形実験

微細造形にはどのような造形条件が適切であるか検討するため、レーザー光出力、送り速度、粉末供給量の造形条件と造形サイズの関係性を明らかにする実験を行った。

3. 1 実験及び評価方法

実験は、厚さ 2mm のステンレス鋼板(SUS304)をベースプレートとして、直線状のビードを形成した。使用した原料粉末は平均粒径 $\phi 0.04\text{mm}$ のNi基自溶性合金である。実験条件は、レーザー光出力 $30\sim 120\text{W}$ 、送り速度 $5\sim 30\text{mm/s}$ 、粉末供給量 $10\sim 58\text{mg/s}$ とした。造形サイズの評価では、図4に示すように造形幅、造形高さ、母材への溶け込み深さを測定した。

3. 2 実験結果

図5に送り速度 10mm/s 、粉末供給量 23mg/s で造形した時のレーザー光出力と造形サイズの関係性を示す。レーザー光出力が小さい程、造形の幅、高さともに小さくなる。そして、レーザー光出力 40W の条件で、幅 $151\mu\text{m}$ 、高さ $60\mu\text{m}$ 、溶け込み深さ $29\mu\text{m}$ の微細な造形ができることを確認した。

レーザー光出力 100W 、粉末供給量 23mg/s で造形した場合は、図6に示すように送り速度の増加とともに造形の幅や高さ、深さがともに小さくなった。このことから、送り速度の調整によっても造形サイズをコントロール可能である。

また、レーザー光出力 100W 、送り速度 10mm/s で一定

とした場合では、図7に示すように粉末供給量を増加させても造形幅はほとんど変化しなかった。一方、造形高さでは、粉末供給量の増加とともに高くなるが、溶け込み深さは浅くなる傾向であった。これは、レーザー光のエネルギーが原料粉末の熔融に多く費やされ、それに伴い母材の加熱が弱まったためと推察される。

これらのことから、本装置では造形条件をコントロールすることにより、高さ0.3mm未満、溶け込み0.2mm未満、幅0.4mm未満の微細形状を造形可能であることが確認された。

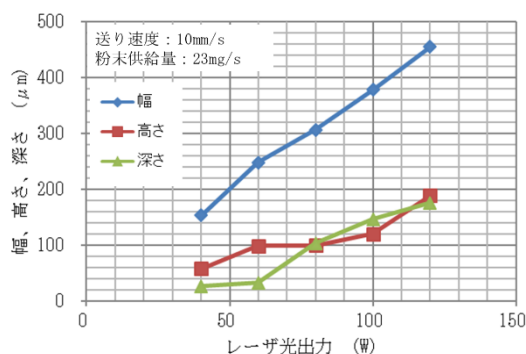


図5 レーザ光出力と造形サイズの関係

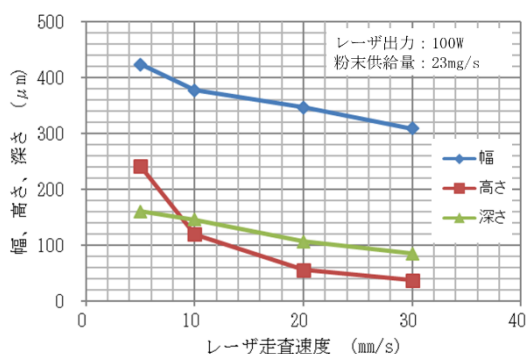


図6 送り速度と造形サイズの関係

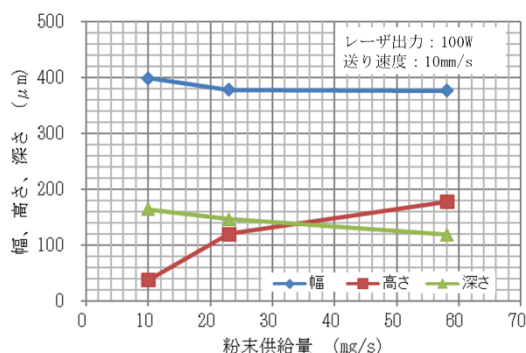


図7 粉末供給量と造形サイズの関係

4. 薄板への皮膜形成実験

金属を付加する対象を薄肉形状の製品に拡大するためには、母材が溶け落ちることなく造形することが求められる。そこで、薄肉部に対して造形の可能性を評価するため、薄板への皮膜形成実験を行った。

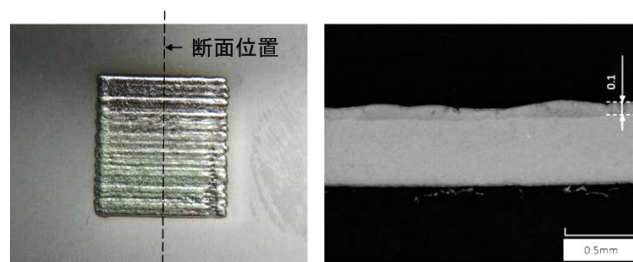
4. 1 実験及び評価方法

実験は、厚さ0.5mmのステンレス鋼板(SUS304)をベースプレートとして、10mmの長さを往復移動させ、1サイクル毎に横方向に0.2mmずつずらし、10mm×10mmの面積で皮膜を形成した。使用した原料粉末は平均粒径φ0.04mmのNi基自溶性合金である。実験条件は、レーザー光出力80W、送り速度20mm/s、粉末供給量30mg/sで行った。皮膜形成後、その断面について電子線マイクロアナライザ(日本電子(株)・IXA-8100)(以下、EPMAと記す)を用いた成分分析、マイクロビッカース硬さ試験機((株)ミツトヨ・HM-220D)を用いた硬度分布測定を行った。

4. 2 実験結果

造形後の外観および断面の観察結果を図8に示す。薄板上であってもベースプレートが溶け落ちることなく、厚さ0.1mm程度の薄い皮膜が形成されていることがわかる。また、皮膜および母材の元素分布をEPMAの線分析により調べた結果を図9に示す。皮膜の主成分であるNiは皮膜部で多く、母材部で少ないことがわかる。

一方、母材の主成分であるFeは皮膜部で少なく、母材部で多かった。これら元素の分布は境界面付近で大きく変化しているが、その変化層は約5μmと極めて薄い。また、断面の硬さ分布を図10に示す。皮膜部は母材よりも硬く、最高硬さはHV600を超えており、硬さは界面までほぼ一定であった。このことから、試作した面直噴型LMD装置では、皮膜組成の希釈が極めて小



(a) 観察写真

(b) 断面画像

図8 皮膜の観察画像

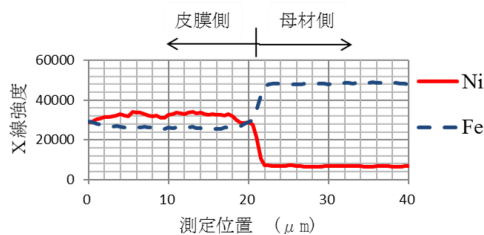


図9 EPMAによる元素分析結果

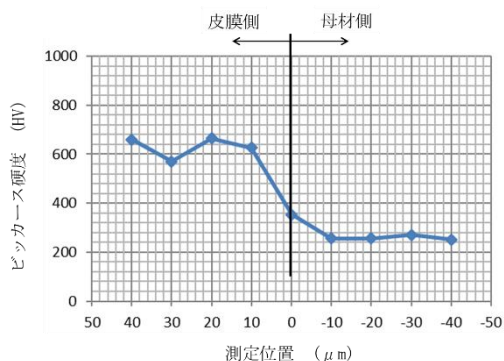


図10 ビッカース硬度評価結果

さく、高硬度な皮膜を薄く形成できることが確認された。

5. 積層造形実験

皮膜の積層により微細な立体造形が可能であるかを検証するため、厚さ2mmのステンレス鋼板(SUS304)に角丸四角形(20mm角)の皮膜を形成し、これを積層する実験を行った。

5. 1 実験方法

実験には、平均粒径φ0.03mmのSKD11粉末を使用し、レーザ光出力100W、送り速度10mm/s、粉末供給量90mg/sの条件で行った。1層目の造形高さが0.06mmであったことから積層毎に試料台を0.06mmずつ下げて造形を行った。

5. 2 実験結果

10層毎に造形高さを測定した結果を図11に示す。高さは10層から50層まで直線的に増加しており、造形初期から皮膜が安定して積み上げられていることがわかる。50層造形後の外観を図12に示す。形状の崩れがなく、角丸四角形を輪郭とする肉厚0.7mmの薄壁を3mmの高さまで造形できることを確認した。薄壁を造形できたことから、立体にも造形可能と考えられる。

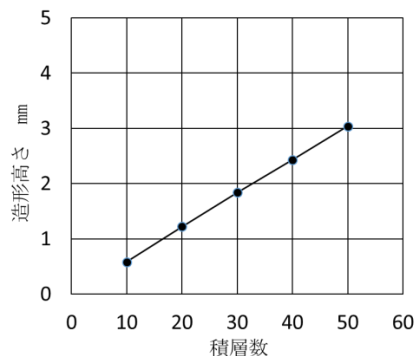


図11 積層数における造形高さ

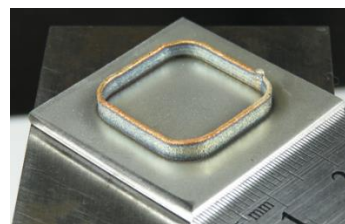


図12 積層造形物

6. 結 言

本研究では、原料の金属粉末をレーザ加工ヘッドの中心から供給する面直噴射型LMD装置を試作し、これを用いた造形実験を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1)微細で溶け込み深さの小さな造形が可能であり、造形条件による造形サイズのコントロールが可能であることを示した。
- (2)皮膜形成実験において、厚さ0.5mmの薄いステンレス鋼板上に厚さ0.1mm程度の薄い膜を形成できることを確認した。
- (3)20mm角の角丸四角形を輪郭とした厚さ0.7mmの薄壁が、形状が崩れることなく3mmの高さまで積層造形できることを確認した。

参考文献

- 1)桐原慎也. 新たなものづくり3Dプリンタ活用最前線. 新日本印刷(株).2015.
- 2)池田博英,升岡正. “宇宙開発における金属Additive Manufacturing技術の活用”.精密工学会誌. 2016, vol.82, no.7, p.639-642.
- 3)中村強. “Bastian BECKER,レーザメタルデポジション法によるクラディング技術開発”.レーザ加工学会誌. 2014, vol.21,no.1,p.14-17.