

# 金属積層造形技術に関する研究 および開発の進展

佐藤 雄二<sup>1)</sup> 塚本 雅裕<sup>2)</sup>

## 1. Laser Additive Manufacturing の概要

Additive Manufacturing (以下 AM) 技術は、必要な場所に必要材料を付加して目的の立体形状を製造する方法である。従来の切削加工や鋳造加工では実現できなかった形状を作製できるため近年、多くの分野で AM 技術の注目度が高まっている。ASTM (American Society of Testing and Materials) によると、AM 技術は、以下の様に 7 つに分類される。

①材料押出法 (Material extrusion) ②材料噴射法 (Material jetting) ③結合剤噴射法 (Binder jetting) ④液相光重合法 (Vat Photo-polymerization) ⑤シート積層法 (Sheet lamination) ⑥粉末床溶融結合法 (Powder bed fusion) ⑦指向エネルギー堆積法 (Direct energy deposition)

中でも、⑥粉末床溶融結合法と⑦指向エネルギー堆積法は、金属用 AM 技術として応用されている。熱源にレーザーを用いた金属用 AM 技術は、Laser Additive Manufacturing (LAM) と呼ばれ、近年、研究開発および製品開発が進んでいる。粉末床溶融結合法の装置メーカーとしては、EOS 社、SLM Solutions 社、Concept Laser 社、指向エネルギー堆積法では、TRUMPF 社、LaserLine 社がリードしているが、これらの企業は、すべてドイツ企業である。また、2016年に TRUMPF 社、2017年2月に DMG Mori 社がそれぞれ粉末床溶融結合装置をリリースするなど、LAM 分野では、ドイツ企業の活躍が目立つ。一方、アメリカでは、General Electric 社が、粉末床溶融結合法の装置メーカー Concept Laser 社と ARCAM 社を買収し、新規プロセスの開発や技術開発の短縮化などに力を入れており、2017年2月に開催された Workshop on LAM2017 では、「パウダーベースで飛行機を作る夢を実現する」と講演で謳っていた。一方、国内では、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構が国家プロジェクトとして立ち上がり次世代産業用 3D プリンタの開発を産・官・学が連携して進めている。このように LAM 分野の研究開発は、国内外で活発に進められている事

がわかる。そこで、本報では、LAM 技術の最新の研究開発動向および応用について述べる。

## 2. レーザー粉末床溶融結合法

### (1) レーザー粉末床溶融結合法の概略

レーザー粉末床溶融結合法 (L-PBF) は、学術的には、選択的レーザー溶融法 (Selective Laser Melting: SLM) と呼ばれることが多い。熱源にレーザーを用いて、一層毎に金属粉末を溶融・凝固して、これを繰り返し積み上げて立体形状を形成する手法である。レーザーには、高出力かつビーム品質が高く、光ファイバーでレーザー光を伝送できる Yb ファイバーレーザーが最も多く採用されている。光ファイバーから出射されたレーザー光は、2軸あるいは3軸のガルバノミラーに導光され、集光レンズを介してパウダーベッドに掃引照射される。図1にレーザー粉末床溶融結合法の概略図に示す様に、粉末をローラーでパウダーベッド上に任意の厚さに均一に敷き均し、その状態でレーザーを掃引照射して、材料粉末を溶融・凝固して 2D の造形物を形成させる。次に任意の積層厚だけステージを下降して、再びローラーで粉末を供給し、レーザーを照射する。これを繰り返して立体の造形物を形成する。積層厚さは各装置によって異なるが約 50 μm ~

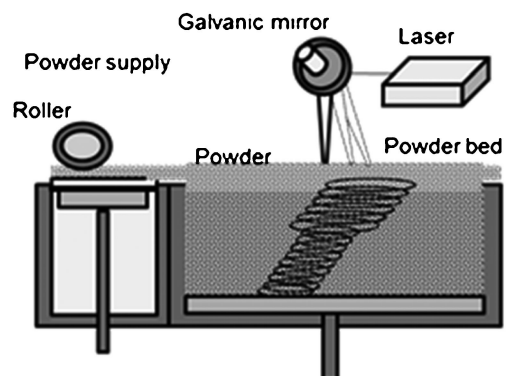


図1 レーザー粉末床溶融結合法の概略図。

\* 大阪大学接合科学研究所 接合プロセス部門レーザープロセス学分野; 1) 特任講師 2) 教授 (〒567-0047 茨木市美穂が丘11-1) Development Trend and Progress of Laser Additive Manufacturing for Metal; Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto (Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Ibaraki)  
Keywords: laser additive manufacturing, selective laser melting, laser metal deposition, laser coating, beam profile  
2017年7月21日受理 [doi:10.2320/materia.56.691]

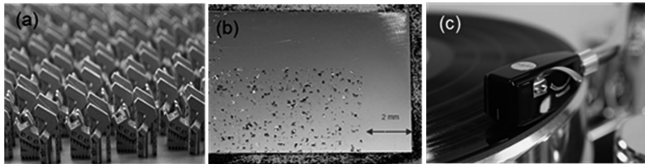


図2 L-PBFで造形したレコード針支持金具 (a) L-PBF造形直後の写真, (b) 断面図, (c) 完成品 (㈱愛知産業提供).

100  $\mu\text{m}$  である。材料粉末はローラタイプあるいはスキージタイプのブレードで搬送するので、流動性の高いガスアトマイズで作製した球状の粒径 30  $\mu\text{m}$  程度の粉末を用いている。L-PBF法はパウダーベッドで基板に一層から造形するので、微細な形状や、生体を模擬した複雑な立体構造の造形ができる事が特徴である。適用材料としては、ステンレス、インコネル、ハステロイ、Fe-Ni系合金、Al-Mg-Si、チタン合金、マグネシウム合金など各種金属の研究報告が盛んに報告されている<sup>(1)-(7)</sup>。図2に実用例として、ORTRON社のレコード針の支持金具に採用されている造形部品を示す。図2(a)は、当支持金具をL-PBFで造形した際の写真、(b)は支持金具の断面写真を示している。先端部は密度を100%に、それ以外の部分は、多孔構造になる様にレーザー照射条件を適用し造形を行っている。図からも多孔層が現れているのが確認できる。これによって図2(c)に示す様にアナログレコードの針が完成する。この密度差を利用した支持金具によって、音質が良くなるという。

従来は、金型や機械部品の試作・開発、小ロット部品の製造、航空宇宙分野のブラケットや燃料噴射装置、医療分野ではインプラント、歯科用ブリッジなどの応用が展開されていたが、今回紹介したレコード針の支持金具など身近な電化製品に应用展開され始めており、L-PBFで造形した部品、製品の普及が進んでいるのがわかる。

## (2) レーザー粉末床溶融結合法の研究開発動向

L-PBFの課題は、パウダーベッドに敷き均した約100  $\mu\text{m}$ の粉末にレーザーを掃引照射して、積層造形していくため、どうしても造形に時間が掛かってしまう事にある。例えば、10 cm  $\times$  20 cm  $\times$  10 cmの直方体を造形しようとした場合、400 Wのレーザーを搭載した造形装置 (SLM280型, SLM Solutions) では、最大造形速度が 35 cm<sup>3</sup>/h であるので、約57時間程度掛かる事になる。これを解決するためにドイツ・フランフォーファー ILT のチームは、Hull & Core法と名付けられたレーザー掃引方法を開発した。これは、図3に示す様に直方体を造形する時、輪郭部のHull部を400 Wのシングルモードファイバーレーザーを用い、スポット径を200  $\mu\text{m}$ に設定して掃引照射して輪郭部を3層積み上げ、その後、内部を1000 Wのマルチモードファイバーレーザーを用いて、集光径1000  $\mu\text{m}$ で掃射して造形する方法である。このように2台のレーザーを用いて造形すると、400 Wのレーザー一台で造形していく場合に比べて、約5倍の

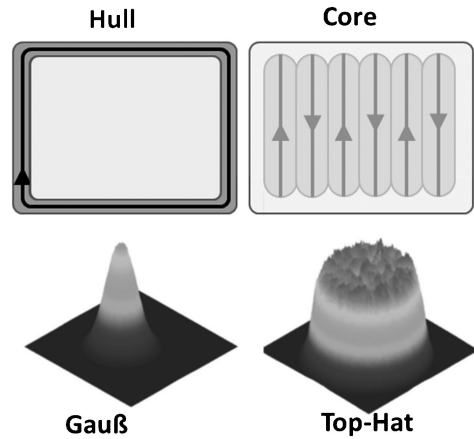


図3 Hull & Coreによるレーザー掃引パターンとビームプロファイル。

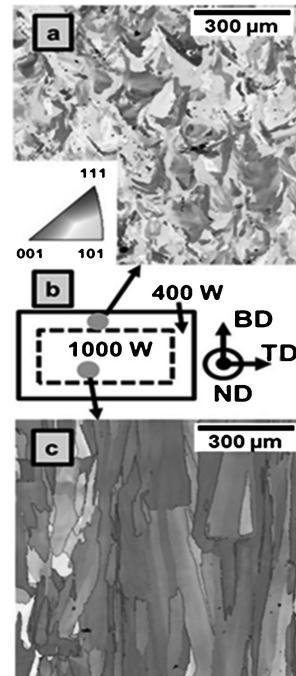


図4 EBSD分析結果 (a) Hull部, (b) 概略図, (c) Core部 (愛知産業㈱提供)。

造形速度が得られている<sup>(8)(9)</sup>。先述した10 cm  $\times$  20 cm  $\times$  10 cmの造形をHull & Core法で造形した場合には、造形時間が11時間程度で済むということになる。次にSUS316Lを用いて造形した試料の金属組織をHull部とCore部について評価するために、EBSD分析を行った結果を図4に示す。その結果、Hull部の結晶粒は、微細粒が支配的であるのに対し、Core部では、結晶粒が大きくしかも造形方向に沿って粒が成長している事がわかる。このようにレーザーの照射条件を変えると材料組織が異なる造形が可能になるため、異方性材料の開発なども検討されている。

2017年6月にミュンヘンで開催された国際会議 Lasers in ManufacturingにてSLM Solutions社からHull & Coreでインコネル718を造形した試料において、単結晶の造形に成

功したと報告があった<sup>(10)</sup>。会議ではプロジェクト進行中ということで、詳細な造形パラメータの開示が無かったが、L-PBFで単結晶材料の造形が可能になればますます用途が広がっていく。

L-PBFの設計の自由度が高くなることに加え、造形物の材料組織が制御、しかも単結晶材料の造形ができるとなれば、部位ごとに材料組織を変えられるような真の意味のテーラーメイドものづくりを実現する技術となり得る。今後もL-PBFの開発動向に注目されたい。

### 3. 指向エネルギー堆積法

#### (1) 指向エネルギー堆積法の概略

金属積層造形技術の一つである指向エネルギー堆積法またはレーザー粉末肉盛法(Laser Metal Deposition: LMD)と呼ばれるこの手法は、レーザーを用いて基板表面に熔融池を形成し、そこに金属粉末あるいはワイヤー等で材料を供給しながら、熔融凝固させて堆積する手法である。基材形状に制約が少ないため、積層造形だけでなく、金型補修や肉盛溶接など幅広く応用展開が進められている<sup>(11)(12)</sup>。熱源であるレーザーには、波長が0.9~1.2 μmのファイバーレーザー、ファイバーカップル半導体レーザー、ディスクレーザーなどの出力が4~6 kWの高出力CW(Continuous Wave)レーザーが採用されている<sup>(13)(14)</sup>。出射されたレーザー光は、光ファイバーでロボットアームに取り付けられている加工ヘッドに導光され、加工ヘッドの集光レンズによって加工部に集光照射される。この時のスポット径は、2~5 mmφである。このレーザー照射によって表面の金属を熔融して熔融池を形成し、そこに材料を供給すると粉末が熔融・凝固して皮膜が形成される。図5に示す様に粉末供給とレーザーを一体化した加工ヘッドが、ドイツ・フラウンホーファー ILT で開発・実用化されている代表的な加工ヘッドである。

#### (2) 指向エネルギー堆積法の研究開発動向

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。しかし、粉末の集束性が悪いため、目標とする位置

に正確に粉末を供給することが難しく、高精度な造形が難しい。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、粉末供給位置決め精度を向上した面直噴射型LMD装置が開発された。これは、内閣府が先導する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)/革新的設計生産技術/高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発(開発責任者:大阪大学接合科学研究所 教授 塚本雅裕)での開発成果である。同装置は、図6に示すように、ヘッドの中心に設置した口径φ0.4 mmのノズルから原料粉末を試料に面直に噴射供給するとともに、斜め方向から6本のレーザー光(波長915 nm, 最大出力50 W/本)をノズル先端の位置で集光し、最大300 Wのレーザー光で粉末を熔融・凝固して造形を行うことができる。6本を重畳したときの集光径は、φ0.3 mmである。

上述のレーザー加工ヘッドおよびレーザー発振器、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7に示す。装置には、X軸、Y軸、Z軸からなる多軸の位置決めステージが組み込まれており、その上に固定したワークを自動で移動させながら肉盛および造形が可能である。微細なビードを積層することにより立体造形が可能であるかを検証するため、厚さ2 mmのステンレス鋼板(SUS304)上に直径20 mm、肉厚0.7 mmの薄肉円筒の積層造形を行った。図8(a)にその外観写真を示す。実験条件は、レーザー光出力100 W、送り速度20 mm/s、粉末供給量50 mg/s、積層ビ

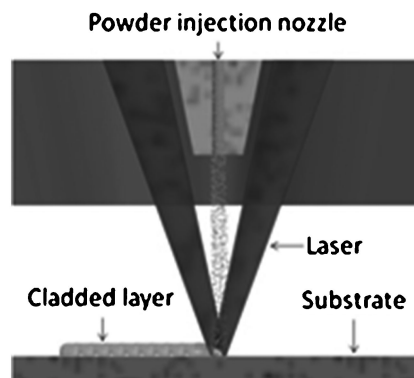


図6 面直噴射型LMD装置の概略図。

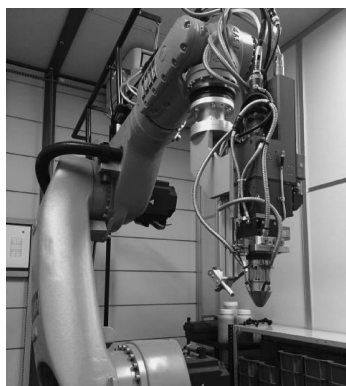


図5 LMD装置外観。

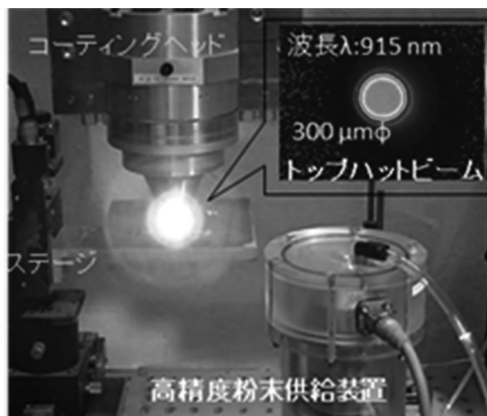


図7 面直噴射型LMD装置のレーザー照射時の様子。

