

## 技術解説



## Technical Review

## 金属積層造形技術

大崎元嗣\*

## Metal Additive Manufacturing

Mototsugu OSAKI

## Synopsis

Recently, 3D printing technology (Additive Manufacturing, AM) has grown rapidly. AM technology was previously applied to reduce the manufacturing lead time of prototypes, but in recent years, application to practical parts is being considered in various fields such as aircraft, medical, energy, automobiles and molds. In Metal Additive Manufacturing (Metal AM) technology, there are powder-type processes, such as Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), Laser Metal Deposition-Powder (LMD-P) and Binder Jet (BJ), and wire-type processes such as Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), Laser Metal Deposition-Wire (LMD-W) and Wire Electron Beam Additive Manufacturing (WEBAM). When applying Metal AM technology, it is necessary to understand the characteristics of each process and select the optimal process for the product.

## 1. はじめに

近年、3Dプリンティング技術が急速に成長しつつある。3Dプリンティング技術は、海外では Additive Manufacturing (AM)、国内では積層造形という呼称でも用いられる。積層造形技術による製造方法は、これまでの塑性加工および切削加工のような「引き算」の製造方法に対し、3D-CAD 図面に従って、部品のすべりもしくはバルク材のある特定の部位にニアネットで形状を付加する「足し算」の製造方法であることが最大の特徴である。積層造形技術は先述した 3D-CAD による図面作成、強度シミュレーションによる形状最適化（トポロジー最適化）、装置による造形物作製など、デジタルツールを活用したものづくり要素が強く、デジタルマニュファクチャリングの1つとも言える。積層造形技術は、1980年代にそのコンセプトが発表され<sup>1)</sup>、当初は試作段階において、形状の異なる部品を短期間で作製し

評価を行うことで開発リードタイムを短縮するという目的での適用が主流であったが、2013年に当時の米国オバマ大統領が一般教書演説の中で、3Dプリンタに言及したことで、実用品への適用を検討する動きが活発化した。近年では、先進国をはじめさまざまな国や地域、航空機・医療・エネルギー・自動車・金型といったさまざまな分野で積層造形技術の適用開発が進んでいる。

積層造形技術には、樹脂積層造形と金属積層造形がある。樹脂積層造形は、企業の生産活動に用いられる産業用装置から、一般家庭でも使用できる汎用的かつ安価な装置までさまざまなラインナップが存在する。一方で金属積層造形は、金属粉末が粒径によっては危険物に分類されること、熱源の取り扱い、後工程で熱処理や切削加工などが必要であることから、産業用装置が主となる。

本稿では、積層造形技術の中でも、金属材料を用いた金属積層造形技術 (Metal Additive Manufacturing) に関して、代表的な製造プロセスの解説を行う。

2021年4月28日 受付

\* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

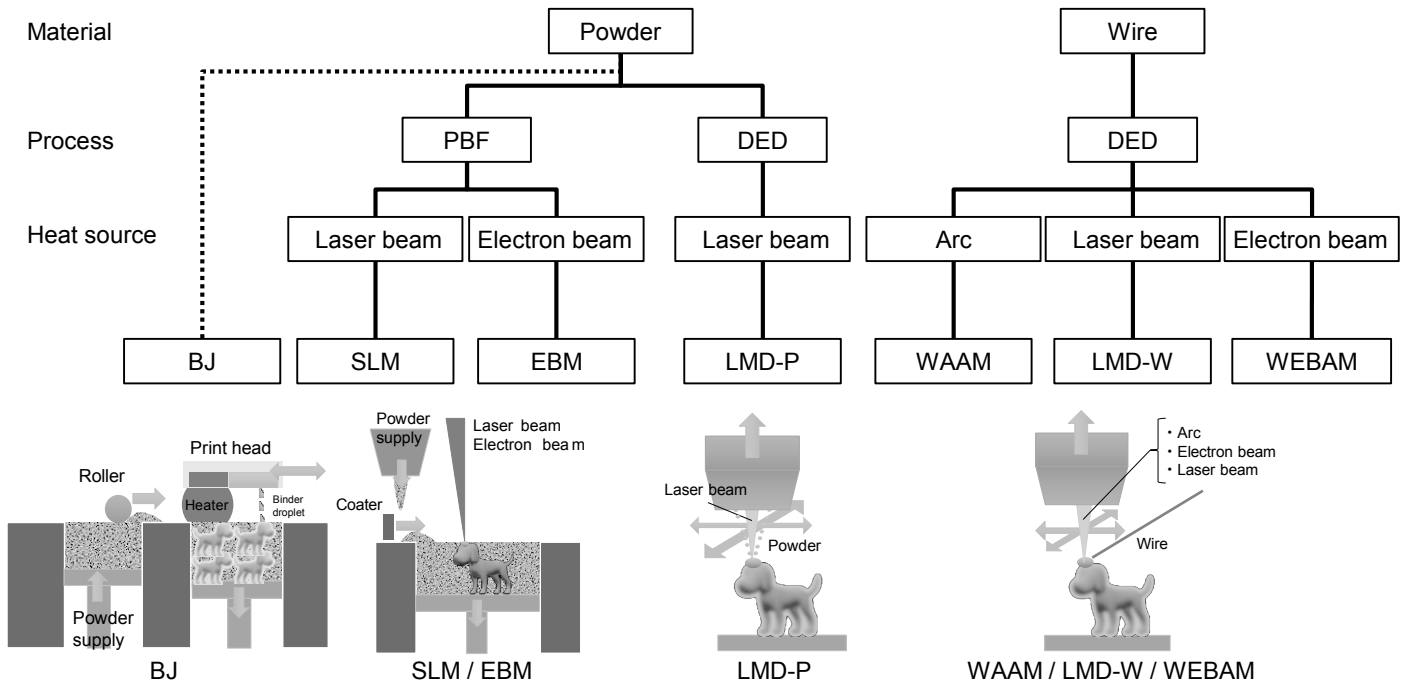


Fig. 1. Technical overview of Metal Additive Manufacturing.

Table 1. Technical overview of Metal Additive Manufacturing<sup>2)~7)</sup>.

Process	PBF		DED				BJ
	SLM	EBM	LMD-P	WAAM	LMD-W	WEBAM	
Heat source	Laser beam	Electron beam	Laser beam	Arc	Laser beam	Electron beam	-
Material	Powder	Powder	Powder	Wire	Wire	Wire	Powder
Material size	10-60 μm	45-100 μm	45-200 μm	φ0.8-1.6 mm	φ0.6-1.6 mm	φ1.0-4.0 mm	<15 μm
Process atmosphere	Ar / Vacuum	Vacuum	Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere	Vacuum	Atmosphere
Process speed	10-170 cm <sup>3</sup> /h	45-100 cm <sup>3</sup> /h	1-1.8 kg/h	1-5 kg/h	2.9 kg/h	1-10 kg/h	7.7 kg/h

## 2. 金属積層造形技術

Fig. 1 に金属積層造形の代表的な製造プロセス、Table 1 に各プロセスの概略仕様を示す。金属積層造形は金属粉末やワイヤを用いるプロセスが存在し、それに加えて材料の供給方法および熱源の種類により、製造プロセスが分類される。例えば、敷き詰めた金属粉末（粉末床、パウダーベッド）にエネルギーを照射し造形を行う粉末床溶融法（Powder Bed Fusion, PBF）、エネルギーを照射し形成された溶融池に粉末やワイヤを供給し造形を行う指向性エネルギー堆積法（Direct Energy Deposition, DED）がある。また、熱源には溶接技術に使用されているアーク、レーザ、電子ビームなどが用いられる。使用される材料も、ステンレス鋼、工具鋼、Ni 基超合金、Co 基超合金、Ti 合金、Al 合金、Cu 合金な

ど多岐に渡る。熱源を使用しない造形方法として、バインダーをインクジェット方式で塗布し、造形するバインダージェット方式がある。

## 3. 粉末を用いた積層造形技術

### 3. 1 選択的レーザ溶融法

現在、金属積層造形技術において主流の造形方式が選択的レーザ溶融法（Selective Laser Melting, SLM）である。本造形方式は、金属粉末をブレードやローラーを用いて数十 μm 程度の均一なパウダーベッドとし、3D-CAD 図面に従って、所定の位置にレーザを照射することで、敷き詰めた粉末を溶融・凝固させ成形していくプロセスであり、このプロセスを繰り返すことで造形

物を作製する。SLM方式は作製部品の形状に合わせて、サポート（支柱）を別途設計することで、形状自由度が高く、かつ複雑形状の造形物作製が可能となる。これらの特徴を活かし、例えば金型分野において、造形物内に複雑な経路の水冷孔を組み込むことで、冷却効率を改善し金型寿命を向上<sup>8), 9)</sup>させる取り組みなどが検討されている。また、Fig. 2に示すようなモノリス構造により冷却効率を高めた熱交換器や、航空機ガスタービンエンジンの燃料ノズルを作製し、部品点数と耐久性向上、軽量化による燃料効率の改善を達成した事例などもある<sup>10)</sup>。

一方で、1層あたり数十μmの積層ピッチとなるため、造形効率は他のプロセスに比較し低く、技術的な課題になっているが、マルチレーザ化による同時照射によって造形時間短縮を図るなどの装置開発が進んでいる。材料面においては、造形物の品質確保のためパウダーベッドを均一にする必要があり、各種粉体特性、特に充填性や流動性（流れやすさ）といったSLM方式独自の特性が要求される。

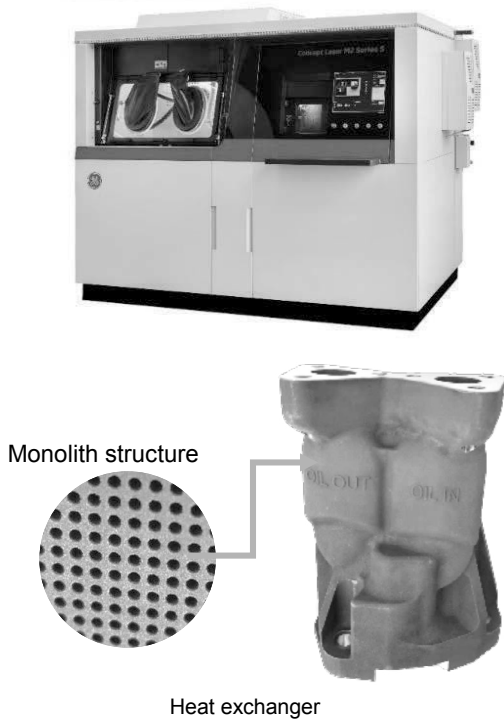


Fig. 2. Device appearance and application examples of SLM.

\*Courtesy of GE Additive

### 3. 2 電子ビーム積層造形法

先述したSLM方式と類似のプロセスだが、熱源にレーザではなく電子ビームを用いる方法が電子ビーム造形法（Electron Beam Melting, EBM）である。EBM方式

は電子ビームを用いるため、真空下で造形を行うプロセスとなり、雰囲気中のガス成分の吸着がなく、高品質な造形物を作製するのに適している。また、電子ビームを用いて粉末床を700℃以上に予熱できるため、延性に乏しい材料の造形が可能である。一方で、予熱プロセスは電子ビーム照射による金属粉末の帯電・反発・飛散を防ぐための予備加熱の目的もある<sup>11)</sup>。Fig. 3に代表的な装置の外観と適用部品の一例を示す。EBM方式では、例えば、TiAl合金のような難加工で割れやすい材料を本方式で作製し、鋳造方法などで製造されている低圧タービン翼への適用検討が進められている<sup>12)</sup>。



Fig. 3. Device appearance and application examples of EBM.

\*Courtesy of GE Additive

### 3. 3 レーザ粉体肉盛法

DED方式として、熱源にレーザを用いる粉末タイプの造形プロセスがレーザ粉体肉盛法（Laser Metal Deposition-Powder, LMD-P）である。LMD-P方式は従来のレーザ肉盛（レーザクラッティング）と同じ技術であり、肉盛層を積み重ねることで造形物を作製する。本方式は、協働ロボットにトーチを取り付け、熱源であるレーザ発振器と粉末供給のためのフィーダーを組み合わせることでシステムの構築が可能であるが、5軸加工機と造形機を組み合わせた複合タイプの装置が切削加工メーカーからリリースされている<sup>13), 14)</sup>。複合タイプの造形機は、装置内で造形と切削加工の工程を繰り返すことにより、完成部品を装置1台で作製できる特徴を有する。Fig. 4に代表的な複合タイプのLMD-P装置の外観と、製品事例を示す。LMD-P方式は、SLM方式やEBM方式に比較し造形能率が高く、かつ製品の一部に造形物を作製できることから、耐摩耗性、耐熱性、耐食性のような各種特性を有する合金粉末を特定の部位に積層することが可能である。一方で、PBF方式と比較すると複雑形状の造形は難しく、造形部をニアネットで作製後、切

削加工で仕上げる必要がある。しかし、プログラム制御、CAMソフトウェアの活用により、最小限の造形による効率的運用や曲面への造形が可能であり、金型の補修や形状の追加、摺動部への耐摩耗材料の部分施工などの適用用途がある<sup>13)</sup>。



\*Material  
DAP-AM HTC™



Slide core

Fig. 4. Device appearance and application examples of LMD-P.

\*Courtesy of Okuma Corporation

### 3. 4 バインダージェット法

近年、注目されている造形方式の1つがバインダージェット (Binder Jet, BJ) 方式である。BJ方式はこれまで述べた方式と異なり、粉末の溶融・凝固現象がプロセス中に含まれないのが特徴である。BJ方式はSLM方式やEBM方式と同様、粉末を敷き詰めるプロセスが入るが、粉末に樹脂バインダーを選択的に塗布し、粉末同士を結合することで造形し、その後工程でバインダーの除去および焼結を行うための熱処理を行う。本方式は熱源の照射プロセスがないため造形能率が高く、他の積層造形プロセスと比較して大量生産に適したプロセスであるため、大ロットの生産が必要な自動車業界への展開も期待されている。また、類似の技術であるMIM (Metal Induction Molding) に使用される粉末を流用することが可能であり、SLM方式やEBM方式のようにプロセスに適した粉体特性を有する金属粉末を準備する必要がな

いメリットがある。一方で、BJ方式ではバインダーの除去、焼結処理により造形密度や寸法精度 (熱処理時の収縮) に技術的な課題がある。BJ方式の造形装置外観写真を Fig. 5 に示す。



Fig. 5. Device appearance of BJ.

\*Courtesy of GE Additive

## 4. ワイヤを用いた積層造形技術

### 4. 1 ワイヤーク積層造形法

これまでは金属粉末を用いた積層技術が主流であったが、近年ではワイヤ積層造形技術にも注目が集まっている。ワイヤ積層造形の特徴は、PBF方式のような複雑形状・高精度の造形物作製には適していないものの、造形能率が高く、かつ協働ロボットと組み合わせることで大型部材の作製が可能である。一般的な溶接で用いられるアークを熱源にして積層造形を行うプロセスがワイヤーク積層造形法 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) である。WAAM方式は前述したとおり、アークを熱源に用いる積層造形プロセスであり、既存のガスシールドメタルアーク溶接 (GMAW) 用電源を用いることが可能である。熱源であるアークの温度は10000℃以上であり、入熱のコントロールが課題であるものの、近年では溶接ワイヤの送給を機械的に制御することで低入熱での溶接を可能としたワイヤ送給制御方式の電源が開発されており、WAAM方式への適用が期待される。WAAM方式の装置外観と製品事例を Fig. 6 に示す。WAAM方式の適用事例はまだ少ないものの、例えば船舶用のスクリュー<sup>15)</sup> や橋梁<sup>16)</sup>、プラズマアークを用いたWAAM方式では、Ti合金の造形物が航空機部品として認証を取得する<sup>17)</sup> など、適用実績が増えつつある。

### 4. 2 レーザワイヤ肉盛法

WAAM方式に対し、熱源にレーザーを用いるプロセスがレーザーワイヤ肉盛法 (Laser Metal Deposition-Wire, LMD-W) である。WAAM方式は先述した入熱コント



\*Courtesy of Fronius and Aichi Sangyo



Blade

\*Courtesy of WAAM 3D and Aichi Sangyo

Fig. 6. Device appearance and application examples of WAAM.

ロールが課題となるが、レーザはアークと比較して温度が低く、かつレーザプロファイルなどの照射制御が可能な熱源であるため、WAAM方式と比較して低入熱での造形、および低入熱による成分偏析や応力変形の抑制、やや複雑な形状や薄肉の造形が可能である。同じレーザタイプのDED方式であるLMD-P方式は、熔融プールへの粉末投入時に集束点から外れた粉末が熔融プールに投入されず、造形物形成におけるロスとなり造形歩留りが低下するものの、LMD-W方式では溶接ワイヤを熔融プールに直接投入できるため、高歩留りの造形が可能である。また、レーザをパルス状に照射し入熱を必要最低限に抑えることで形状精度を向上させるなどの開発も行われている<sup>18)</sup>。LMD-W方式の装置外観と製品事例をFig. 7に示す。

### 4. 3 電子ビームワイヤ積層造形法

材料に溶接ワイヤ、熱源に電子ビームを用いるプロセスに電子ビームワイヤ積層造形法（Wire Electron Beam

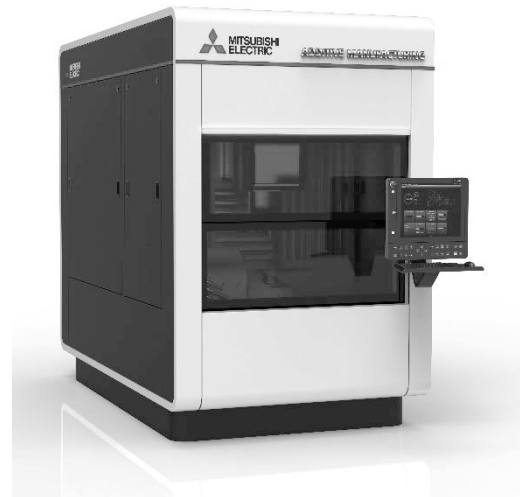


Fig. 7. Device appearance and application examples of LMD-W.

\*Courtesy of Mitsubishi Electric Corporation

Additive Manufacturing, WEBAM)がある。WEBAM方式は粉末タイプのEBM方式と同じく真空下にて電子ビームを照射し、溶接ワイヤを溶融・凝固させ積層するプロセスである。真空下でのプロセスになるため、WAAM方式やLMD-W方式では必須であるシールドガスによる大気遮断が不要で高品質な造形物を作製することが可能である。また、レーザと比較して材料のエネルギー吸収率が高く、高融点材料の造形も可能である。一方で、真空環境における造形プロセスのため、真空チャンバーが必要になることから、協働ロボットと組み合わせ、シールドガスを用いて大気環境での造形が可能なWAAMやLMD-Wに対して、造形物サイズは真空チャンバーの大きさに依存する。Fig. 8に代表的なWEBAM装置の外観と製品事例を示す。WEBAM方式は、その特徴である真空下での造形プロセスを活用し、Ti合金ワイヤとの組合せで航空・宇宙分野での適用が進んでいる<sup>19)</sup>。

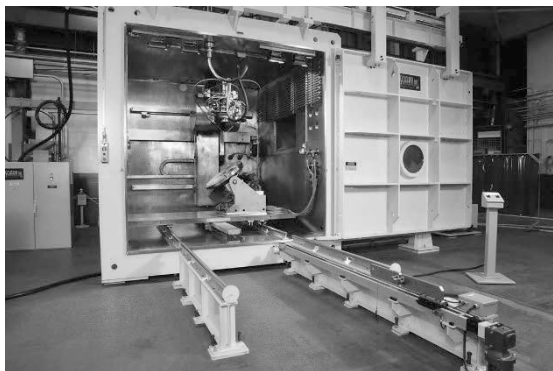


Fig. 8. Device appearance and application examples of WEBAM.

\*Courtesy of SCIAKY and Aichi Sangyo

## 5. おわりに

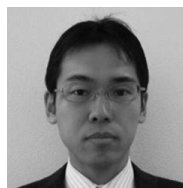
ここで挙げた積層造形技術は、代表的なプロセスに絞って述べている。積層造形技術は日々進化しており、新たな造形プロセスも開発されている。積層造形技術は各プロセスに一長一短があり、各ユーザーが目的に合わせ最適なプロセスを選定する必要がある。また、従来技術で製造する部品を積層造形技術に単純に切り替えるだけでは、コスト増大に繋がり、積層造形技術の利点が活かさないことが多い。積層造形技術を取り入れる場合、積層造形技術の特徴を活かし、部品設計の段階から検討する必要がある。日本は海外に比較し、積層造形技術の活用は遅れており、今後の市場成長に期待する。

最後に、本稿を執筆するにあたり、装置写真および製品事例の画像をご提供頂いた、GE Additive殿、三菱電機(株)殿、オークマ(株)殿、愛知産業(株)殿に感謝の意を表します。

※ DAP, HTCは大同特殊鋼(株)の商標または登録商標です。

(文 献)

- 1) Hideo Kodama: Review of science instruments, 52 (1981), 11, 1770.
- 2) 木寺正晃: 生産加工技術を支える機械と工具, 9 (2019), 12, 47.
- 3) 木寺正晃: 溶接学会誌, 90(2021), 1, 23.
- 4) PRECITEC社ホームページ: <https://www.precitec.com/jp/laser-welding/products/processing-heads/coax-printer/>
- 5) 産業用3Dプリンターの最新技術と先進分野への応用, 技術情報協会, 2018.
- 6) Sciaky社ホームページ: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder>
- 7) ANIWAA社ホームページ: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/additec-uprinter/>
- 8) 漆崎幸憲, 上出義和: 素形材, 53(2012), 9, 48.
- 9) 阿部論, 上本誠一: パナソニック技報, 62(2016), 2, 92.
- 10) GE Additiveホームページ: <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>
- 11) 千葉晶彦: スマートプロセス学会誌, 3(2014), 3, 152.
- 12) Metal Powder Report, 74(2019), 5, 272.
- 13) 山本誠栄: ぶらすとす, 3(2020), 34, 592.
- 14) オークマ(株)ホームページ: <https://www.okuma.co.jp/product/laserex/>
- 15) Damen Shipyards Groupホームページ: [https://www.damen.com/en/news/2017/09/3d\\_printed\\_ships\\_propeller\\_takes\\_step\\_closer\\_to\\_completion](https://www.damen.com/en/news/2017/09/3d_printed_ships_propeller_takes_step_closer_to_completion)
- 16) MX3D社ホームページ: <https://mx3d.com/company/news-awards-media/>
- 17) Metal Powder Report, 72(2017), 4, 279.
- 18) 三菱電機(株)ホームページ: <https://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/list/mechatronics/b233/index.html>
- 19) Sciaky社ホームページ: <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>



大崎元嗣