

軽金属プロセス全般に関わる 3Dプリンターの変遷と展望

岡 根 利 光*

1. 緒 言

積層造形技術は、CADデータを元に一層ずつ繰り返し積み上げて造形する手法で、3Dプリンターとも呼ばれている。従来の加工プロセスの制約にとらわれず、複雑な3次元形状を一体で作成可能なプロセスである。

ここ10年では低価格の3Dプリンターも発売され普及が進み、クリス・アンダーソンが著書「Makers」で示したパーソナルなものづくりへと展開されることが期待される一方、3Dプリンターによるものづくりの変革を目指す産業用途の積層造形装置も進化が著しい。従来の試作、形状確認、機能評価といった用途から、金型としての活用や工業部材の製造など、生産技術への展開が図られている。

2012年のオバマ大統領の演説とともに Additive Manufacturing による米国の競争力を強化する組織である America Makes が設立され研究開発が加速するとともに、欧州、そして日本でも「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」、「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」による開発が進められている。

なお、名称について、積層造形、Rapid Prototyping (RP)、Additive Manufacturing (AM) など様々に呼ばれているが本稿では3Dプリンターとして統一したい。

2. 3Dプリンターの種類

積層造形技術による3Dプリンターは、かつてはラピッドプロトタイプング(Rapid Prototyping, RP)とも呼ばれ、1980年に小玉博士が最初の特許を出願して1987年頃からアメリカの企業による実用化が開始された。図1は様々な3D

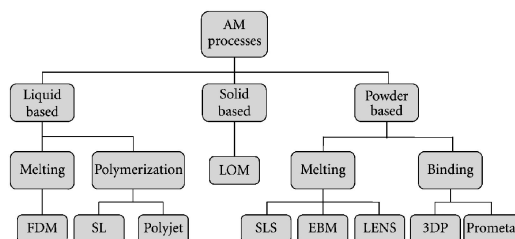


図1 3Dプリンターの種類。

プリンターのプロセスを材料別、プロセス別に分類した図である⁽¹⁾。

3Dプリンター技術の嚆矢となった光造形技術から始まり、シート積層法(LOM)、熔融堆積法(FDM)などがこれまでのRP用途における代表的な技術であった。これらの技術では、近年基本特許の保護期間終了に伴い、低価格な装置の普及が進んでいる。

3. RPからAMへ

上述の様に、これまでは迅速試作技術として光造形法を中心に、樹脂素材を造形し、形状確認や設計上の機能評価に用いられてきた。しかしながら、光造形では形状精度や表面粗さでは優れるものの、光硬化性樹脂を使用するという制限から、射出成形樹脂やエンジニアリングプラスチックに比べて強度が低く、実用部材としては用途が制限されていた。

近年は粉末を原料に加熱して熔融凝固させ、金属や樹脂の3D形状の最終製品を得る方法が著しく進化している。原料の粉末を50 μmから100 μm程度の厚みに敷き、その上から最終形状の部分だけレーザーや電子ビームを照射して粉末を熔融凝固させ、図2に示すような複雑形状の造形物を得る

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 製造技術研究部門；研究員(〒305-8564 つくば市並木1-2-1)
Progress and outlook of 3D Printers Related to Light Metal Processing; Toshimitsu Okane(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba)
Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, powder bed fusion, directed energy deposition, casting, automotive, aircraft
2016年10月24日受理[doi:10.2320/materia.56.244]

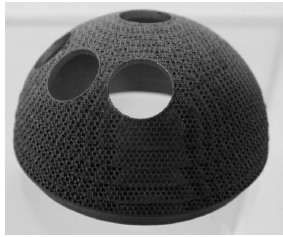


図2 EBWプロセスで造形したチタン合金人工骨部材.

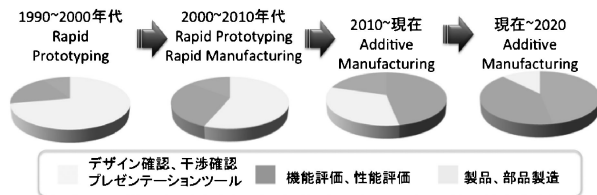


図3 試作から製造へシフトする活用域.

ことができる. この方法は, 粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion, PBF), 加熱源の種類により SLM (Selective laser melting) や EBW (Electron beam melting) 等と呼ばれている.

従来は成形品の密度も低く, 素材として十分な強度が得られなかったものの, 近年はファイバーレーザーの活用等により, 100%近い密度が達成されるようになってきている. それとともに鋳造品や射出成形品, 一部では鍛造品, 圧延材からの機械加工品などと比べても遜色ない材料特性 (機械的性質, 疲労特性など) が得られている.

このことは, 金属や樹脂の 3D プリンター造形品が, そのまま実用部材に使えるようになることを示す. 積層造形技術の近年の大きなジャンプであり, 現在注目されている一つの要因である. それに伴い呼称もこれまでの RP から AM (Additive Manufacturing, 付加製造) へと変化している.

図3は, 定性的であるが, 3D プリンター装置メーカーが考える用途の変遷を示す. これまでの RP 成形品では, デザイン確認, 干渉確認等のモデリング用途から始まり, 例えば冷却水路の設計において有効性を確認する等の機能評価・性能評価, これらの用途が主であった. しかしながら, CAD ビューアー, AR (仮想現実感) 技術の進化によるモデリングの補完, 構造解析・流動解析 CAE 等の進化による試作前段でのスクリーニングや試作レスの試みも進んでおり, 3D プリンターの従前の用途は将来減少することも懸念される.

自ずと 3D プリンターには新たな用途展開が求められている. 一つの方向性として, 生産技術としての活用, 即ち製品や部品製造への用途展開が期待される.

4. 金属造形 3D プリンターの活用と課題

(1) 粉末床溶融法 (PBF) の特徴

光造形の実用化に続き, 3D プリンターによる金属部材製造の試みも始められ, 1987年テキサス大学オースティン校

の Prof. Beaman らによって報告されている⁽²⁾. 続いて1989年にドイツ EOS 社が設立され, 金属粉末を直接レーザーにより溶融焼結 (Selective laser sintering, SLS)・凝固 (Selective laser melting, SLM) させる造形技術が開発された⁽³⁾. 1997年にはスウェーデン ARCAM 社が設立され, 電子ビームを熱源とする造形 (EBW) が始められている.

上述の様に近年では高出力ファイバーレーザーの普及, 金属粉末の品質向上や制御技術の発達により, 密度がほぼ 100%の造形が可能になっている. 加えて急速加熱・急速冷却のプロセスであることから結晶粒微細化の効果もあり, 鋳造品, 一部では鍛造品を超える機械的性質が得られている⁽⁴⁾.

レーザー, 電子ビームそれぞれの熱源の特徴から造形方法, 造形物にもそれぞれ特徴がある. 電子ビームは, 大出力・高速スキャン可能・真空中造形といった特徴から, 造形面全体を 700°C~800°C程度まで予熱した中で造形が可能であり, 低い残留応力が特長である. 造形速度, 表面精度, 造形品質, 適応材料の広さ等その他の点については装置メーカーのポリシーに負うところも大きい, 一般的に電子ビーム造形は, 造形速度及び造形品質に優れている.

適用材料としては, 電子ビーム, レーザーといった加熱源の特長から高融点金属の溶融に向き, 鋳造の難しい材料でかつ高付加価値という点から軽量構造部材としての Ti 合金, 耐熱部材としての Ni 基合金, 生体適合材料としての Co-Cr 合金による造形の実用化が先行して進められている. 装置の普及が進んだ近年では, 自動車やその他の用途拡大を目指して Al 合金, Cu 合金の造形事例も報告されている.

図4は Ti 合金におけるレーザー, 電子ビームの表面状態を比較した物である. 図4からもわかるように, 造形物の表面性状は, 素材の金属粉末の粒径及び積層ピッチに依存しており, 表面性状の向上は課題である. 特に, 例えば金型の内部冷却構造など, 後加工が不可能な内面に対しても, より平滑な表面性状が要求される場合がある. マシニングセンタと融合して, 積層造形中に加工を加えて内面を平滑化する技術が実用化されている (図5).

(2) 指向性エネルギー堆積法 (Directed energy deposition, DED) の特徴

レーザーやアークを熱源として, 金属粉末やワイヤー等の材料を供給しながら, 選択的に溶融凝固させて堆積を繰り返して造形する方法が指向性エネルギー堆積 (DED) 法である. 代表的な例としてはレーザークラディング, Laser

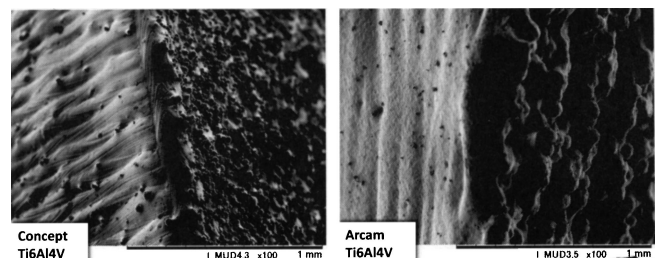


図4 SLM と EBW の表面状態の比較.

metal forming, LENS プロセスとして行われてきた。PBF に比べて表面粗さに劣るが、近年では粉末供給とレーザー、シールドガスを同軸化したノズル開発が Fraunhofer ILT 研究所によりなされ (Laser metal deposition, LMD) (図 6)⁽⁵⁾、加工機と組み合わせた装置が実用化されている。

加工と交互に造形することにより造形物内面の表面性状を平滑・高精度にできるほか、多種類の粉末を供給できるノズルを用いることにより局所的に材質を変化させる多層化の実現が容易、配合を変化させながら造形することによる傾斜構造化が容易、熱流の制御により造形が高速であるという特徴がある。

また近年、アークを熱源、溶接ワイヤーを材料とし、MIG 溶接トーチを制御ステージと組み合わせて肉盛溶接を制御しながら堆積する造形方法も開発されている⁽⁶⁾。表面性状は上記と同様に PBF に比べて劣るが、アークの熱源が安価な点、様々な合金種の溶接ワイヤーが安価に供給されている点、大型化が容易な点、造形が高速な点に特徴がある。

(3) 金属造形 3D プリンターの課題と展望

この10年間の技術開発によりこれまで述べてきたような様々な技術が開発されて一部では実用化が進んでいる。今後も積層法については新たな原理での造形技術の開発と改良が進むとともに、活用先として様々な部材が開発され、更なる実用化が進んでゆくと期待される。金属造形 3D プリンターの活用方法として大きく以下の2点が挙げられる。

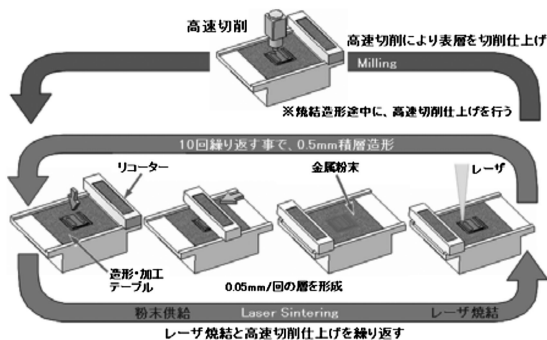


図5 PBFとNC切削加工複合化。

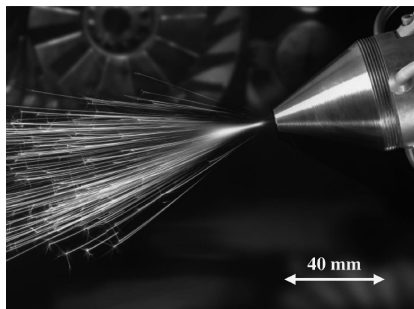


図6 LMDプロセスのための同軸ノズル。

(a) 工法置換による高性能化

従来鋳造品や鍛造、機械加工により製作していた部材に対して金属造形 3D プリンターによる工法置換や形状付与により、例えば軽量化、高機能化、短納期、オーダーメイド、コストダウンを目指すものである。例として、航空機エンジンのブレード、ロケットのノズル、歯のクラウン、少量生産自動車の部材等が挙げられる(図7)。

ここで求められるのは従前の装置における製造制約の縮小(高速化・大型化・高精度化・サポートフリー・材料選択の拡大・装置コスト・ランニングコストの低廉化)や信頼性の向上(緻密化・高品質化・材料の品質向上・安定化)である。特に信頼性の向上にあたっては、従前の部材と同等の機械的特性・信頼性が求められる場合も多く、欠陥発生に対して造形姿勢や形状依存性の影響の大きい本プロセスにおけるCAEを駆使した設計ツールの確立が望まれる。同時に、CT等の欠陥評価技術の高度化と連携も不可欠である。

そのためにも、粉体溶融のモニタリング及びその予測と制御技術、抜熱(凝固)の高速化と制御技術、熱応力の予測と制御技術等の研究開発が望まれる。

(b) 新たな形状及び材料特性の創出による新機能部材の開発

新たな形状に起因する機能付与や、高速凝固や凝固の異方性といった特徴を生かした新たな材料特性によりこれまでに無い機能部材創製を目指すものである。例として、ラティス構造による断熱特性を生かしたロケット姿勢制御用噴射ノズル、患者の負担を減らせる脊椎インプラント等を試作した例(図8)が挙げられる。これまでの報告では、凝固組織は高速凝固に伴う微細な溶接組織となっており、より高速の領域である Absolute stability⁽⁷⁾には至っていないようである。即



図7 工法置換による金属3Dプリンターの活用例。(国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構・株式会社由紀精密・株式会社コイワイ提供)

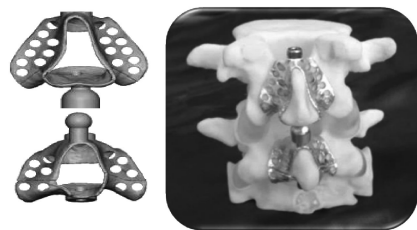


図8 チタン製脊椎インプラント。(秋田県立脳血管研究センター脊椎椎外科診療部 部長菅原卓先生提供)

ち今のところ凝固速度としては拡散が支配する領域であり、これまでの基本的な理論が適用できる範囲である⁽⁷⁾。その上で展伸材、鋳造材の枠組みを超えた金属3Dプリンターに適した新たな材料開発とその組織制御による新たな機能発現と理論構築が期待される。

上記の研究開発に加えて少量で高品質の粉末を製造できる合金開発環境を整えるとともに、場所毎に合金組成を変化させる複層化・傾斜組成・構造化技術、高温勾配・高速凝固下における凝固組織予測と制御に関する研究開発が望まれる。

5. 鋳造技術における3Dプリンターの活用

(1) 模型と鋳型の製作

大量生産を目指した軽金属プロセスとして鋳造での3Dプリンター活用にも触れておきたい。鋳造とは、金属を溶解し、鋳型に注湯・凝固させることによって、目的の形状に成形する加工方法である。軽金属においては自動車エンジン、航空機部材等、輸送機器を中心に用いられている。鋳造のプロセスでは、製品と同形状の模型、模型から鋳型、鋳型から鋳造品へと、型を利用して型を作り、複数回の転写工程を経て鋳造品を製作する。3Dプリンターが目指す、3Dデータからの直接・迅速造形、複雑形状の一体成形などの特徴は、いずれの段階の型の製作においても有効である。そのため、鋳造と3Dプリンター技術の親和性は高く、その黎明期から活用されてきた。

(2) 精密鋳造

精密鋳造はチタン合金など高融点金属の鋳造に適した技術であり、Ni基合金の一方向凝固・単結晶材は耐熱性に優れ、航空機エンジンのブレードに用いられている。通常は金型もしくはゴム型を用いてワックス型を取る。さらにワックス型から鋳型、鋳型から鋳造品を製作する。精密鋳造のワックス型もしくはその代替品を3Dプリンターで製作することが行われており、マテリアルジェット法によるワックス材の直接造形、図9に示すような光造形法を用いたワックス型代替品の製作が行われている。金型を用いないことから、アンダーカットのある形状の成形、金型コスト低減、リードタイム低減が可能である。

(3) インクジェット砂型積層造形

砂を積層し、その上にバインダを選択的にインクジェットして積層造形するバインダジェット法(BJ)による3Dプリンター鋳型造形技術が実用化されている(図10)⁽⁸⁾。

通常の砂型鋳造の鋳型では、多数の模型から転写して組み合わせる鋳型とするのに対し、3Dプリンターによる鋳型の造形では一体化して造形できることから、迅速生産、より複雑な形状の実現、鋳型精度の向上による薄肉軽量化の実現に効果がある。

本造形技術のもう一つの特徴は、熱プロセスではなく、ビーム走査が不要なことから装置の大型化が可能で、他の積層造形技術に比べて100倍もしくはそれ以上の高速化が可能である。

将来的な展望として、現在の主な課題は更なる高速化である。3Dプリンターの複雑形状を生かした鋳造品を月産数千～数万個、大量生産する計画が示されている。図11の例では大型の装置内に約650個のターボチャージャー用鋳型が含まれている。高速化により造形～鋳造が1日で完了するサイクルタイムにより上記目標は実現可能であり、それを旨し

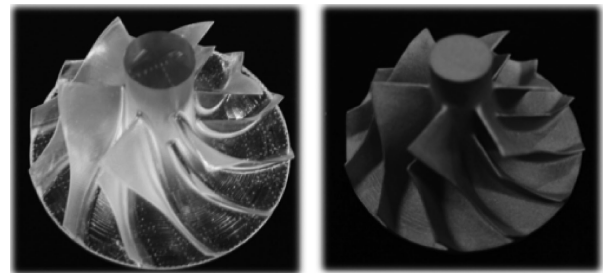


図9 光造形による模型と精密鋳造品。

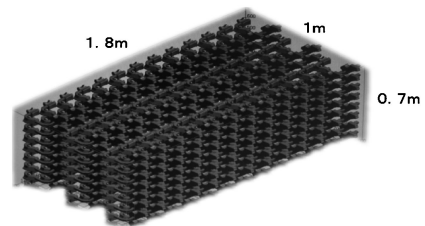


図11 積層造形砂型の量産対応。

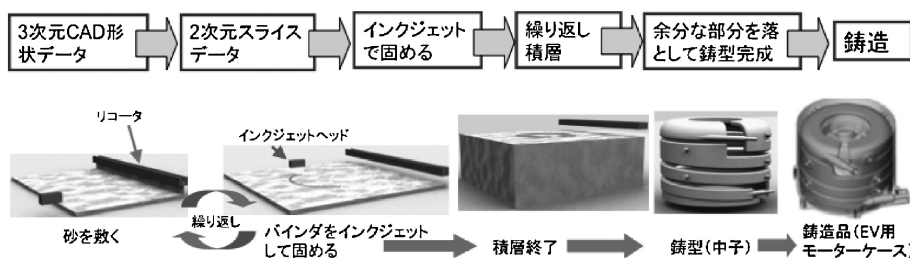


図10 バインダジェット法による砂型積層造形。

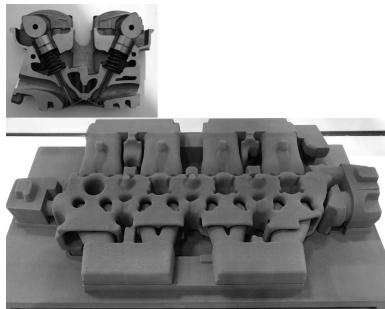


図12 シリンダヘッドとシリンダヘッド鋳型.

て現在開発が進められている。

自動車では、燃費及び走行性能の向上を目的に、車体の軽量化、エンジン自身の効率向上、パワーステアリング電動化、ダウンサイジングターボ、HEV/PHEV/EV/FCV化等が進められており、いずれも鋳造品が中核部材として用いられている。

図12は、乗用車用エンジンのシリンダヘッドの鋳型を試作した例である。特に、冷却水の流路を形成するウォータージャケット中子では、燃焼室を取り囲むような配置と鋳造品の薄肉化により、効率の向上、軽量化、コンパクト化が図られる。今後、装置の高速化により月産数千台への適用が実現し、一般量産車への適用も期待される。

6. 結 言

3Dプリンターによる工法置換、新たな形状及び材料特性の創出による新機能部材の開発により、従来のプロセスにとらわれない形状への設計革新、さらには材料転換、プロセス転換が期待される。各国で現在進められている各プロジェクトの成果も現れてくるであろう。少量生産から大量生産ま

で、その活用範囲は広大であり、今後の益々の発展を期待したい。

本稿では、株式会社コイワイならびにシーメット株式会社より貴重な造形品の写真を提供いただいた。ここに深謝の意を表する。

文 献

- (1) K. V. Wong and A. Hernandez: A Review of Additive Manufacturing, ISRN Mechanical Engineering, (2012), 10.
- (2) C. R. Deckard, J. J. Beaman: Recent Advances in Selective Laser Sintering, Proc. 14*Conf. on Prod. Res. and Technology, (1987), 447-451.
- (3) U. Behrendt and M. Shellbear: The EOS rapid prototyping concept, Computers in Industry, 28(1995), 57-61.
- (4) 漆崎幸憲, 上出義和: 金属光造形複合加工法による機能射出成形金型製作 SOKEIZAI, 53(2012), 9, 48.
- (5) I. Kelbassa, P. Albus, J. Dietrich and J. Wilkes: MANUFACTURE AND REPAIR OF AERO ENGINE COMPONENTS USING LASER TECHNOLOGY, Proceedings of the 3 Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, (2008).
- (6) 村田秀和: アーク溶接金属 3D プリントによる造形事例, 公益財団法人溶接接合工学振興会 第27回セミナー資料.
- (7) W. Kurz: Solidification Microstructure-Processing Maps: Theory and Application, ADVANCED ENGINEERING MATERIALS, 3(2001), 7, 443.
- (8) 岡根利光ら: 砂型積層造型装置の開発, 日本鋳造工学会第166回全国講演大会講演概要集, (2015).



岡根利光

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1990年3月 東京大学大学院工学系研究科修士課程 修了
1990年4月 株式会社ニコン入社
1993年4月 東京大学工学部金属工学科 助手
2000年4月 博士(工学)取得 論文博士・東京大学
2002年4月 現職
専門分野: 凝固組織形成, 鋳造技術
◎凝固組織形成およびその予測に関する研究に従事.
3Dプリンターの鋳造への適用を中心に活動.
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★