

付加製造 (Additive Manufacturing) を核とした新しいものづくり

新野 俊樹

1. はじめに

付加製造技術 (Additive Manufacturing 技術, 以下 AM 技術) は, 2012 年頃から「3D プリンター」もしくは「3D プリンティング」の呼称で広く一般の方々にまで知られるようになり, ブームが始まった当初はデータさえ入れればどんな品物でも作ってしまう「魔法の箱」といった言われ方もされていた。もちろんそんな魔法は存在するわけもなく, 現在ではその反動である種の「がっかり」感が広がっているということは否めない。しかしながら, AM 技術を従来とは全く異なる加工技術の 1 つとしてとらえ, その特徴に合わせた使い方をすれば新たなものづくりの創出も可能で, これまでにそのような用途が散見され始めている。本稿では AM 技術を概観し, AM 技術によって期待される新たなものづくりについて考察する。

2. 定義と分類

AM 技術は, ISO と ASTM (American Society for Testing and Materials) により「材料を付着させることによって, 3 次元形状データから部品を作る技術」と定義されている。また, 補足として「多くの場合, 層を重ねることによって」とも記述しており, 「積層造形」などと呼ばれることも多いが, 定義に従えば技術の本質は層を重ねることではなく, 「材料の付着」と「3 次元形状データ」の 2 点にある。定義には明確に書かれていないが, 3 次元形状データを用いることから, データから人の手を介さずに自動的に 3 次元形状を実体化することが暗に示されており, AM 技術は単なる加工技術

ではなく, 材料の付着を利用したシステム技術であることになる。「3D プリンター」と言うと, 材料を配置することに目がいきがちであるが, 造形された部品の強度などの物理的な性能を担保するには, 精密に材料を配置するのみならず, 材料と材料を適度な強度で接合することが重要になる。商業的に利用されている装置に採用されている接合方法には, 溶着と接着があり, さらに, 主材料を接合材料で接合していくものと, 接合剤をそのまま構造材として用いるものがある。前述した AM 技術の定義は「付着」と「データ」にしか言及していないとても粗い定義であるが, ISO/ASTM は, 以上の材料の接合方法に加えて, 材料の形態, 材料の供給方法によって, AM 技術を以下の 7 つのカテゴリーに分類している (図 1)。

1. 液槽光重合 (Vat photopolymerization : VPP)
2. 粉末床溶融結合 (Powder bed fusion : PBF)
3. 結合剤噴射 (Binder jetting : BJT)
4. 材料押出 (Material extrusion : MEX)
5. 材料噴射 (Material jetting : MJT)
6. 指向性エネルギー堆積 (Directed energy deposition : DED)
7. シート積層 (Sheet lamination : SHL)

なお, 各分類はさらにいくつかの具体的な加工法を包含しているが, 一般名詞としての呼称が確定するものは多くなく, 商標と名称が混乱している状況である。

商業化されている技術に限定すれば, DED 以外のすべてのカテゴリーに樹脂を加工できる技術がある。それらのうち, シート積層以外では, 接合剤を構造材として用いるものがあり, さらに熱可塑性樹脂を加工して構造材料として利用可能なものは, PBF, MEX が主である。

一方, 金属の AM 技術は, 金属粉やナノ粒子を成形し, その後脱バインダ等の処理を経て, 最終的に金属粉を焼結することによって部品を得る間接的なものと, 金属粉や溶接棒を溶融堆積して構造物を得る直接的なものの 2 通りがある。初期の頃は, 前者のプロセスが利用されていたが, 材料に制限があることや結果的に得られる部品が多孔性になることからその利用は限定的であった。後者はおおまかに言うと肉盛り溶接を自動化したものであり, 初期の頃はそ



Innovation in Products and Services through Additive Manufacturing Technologies
Toshiki NIINO
1995 年 東京大学工学系研究科精密機械工学専攻博士後期課程 博士(工学)
現在 東京大学生産技術研究所 教授
E-mail niino@iis.u-tokyo.ac.jp

2020年2月25日受理

分類	液槽光重合	粉末床溶融結合	結合剤噴射	
分類(英語)	Vat photopolymerization, VPP	Powder bed fusion, PBF	Binder jetting, BJT	
主な材料	光硬化性樹脂	熱可塑性樹脂, 金属, セラミックス	石膏, 耐火物, 他模型用材料	
材料の形態	液体	粉末	粉末	
接合方法	光重合・接着	溶接	接着	
模式図				
説明	光硬化性の樹脂をレーザー等の光で選択的に固体化	粉末床の表面付近を熱により選択的に溶融・固化	粉末床に結合剤を噴射して選択的に固体化	
分類	材料押出	材料噴射	指向性エネルギー堆積	シート積層
分類(英語)	Material extrusion, MEX	Material jetting, MJT	Directed energy deposition, DED	Sheet lamination, SHL
主な材料	熱可塑性樹脂	ワックス, 光硬化性樹脂	金属	樹脂, 紙, 金属
材料の形態	フィラメント	固体もしくは液体	粉末または固体	シート, テープ
接合方法	溶接	溶接, 光重合・接着	溶接	接着, 溶接
模式図				
説明	液体もしくは可塑性された固体をノズルから押し出し, 堆積すると同時に固体化	液状の材料をノズルから噴射し堆積した後固体化	材料を供給しつつ, 各種ビーム等で熱エネルギーの発生位置を制御して, 材料を選択的に溶融・結合	箔状の材料に断面形状と同等の形状を付与し, 積層して結合

図1 AM技術の分類

の加工条件などが明らかになっておらず, あまり利用されていなかったが, 2005年あたりから, 金属の直接造形技術が一般に利用され始めている。一方で, 2015年頃からは間接的な方法による金属部品の加工法が再度見直されており, 金属粉を含んだMEX用のフィラメントも販売されるようになってきている。

3. 性能と特長

3.1 AM技術の性能

前節で述べたように, AM技術の定義はとてつもないので, その性能, たとえば精度や微細性を一言でまとめて語るにはあまり意味がない。ここでは部品の直接加工に利用されることが期待されるPBF, DED等肉盛り溶接系のプロセスに限定して考えてみる。溶接系のプロセスでは凝固時の収縮と, その後常温まで冷却する際の収縮の2つの収縮を予測しないと良い精度は得られない。さらに積層造形では, 凝固した層の上に新たな層を堆積するため, 凝固・収縮のプロセスはとてつもない複雑であり, 各部の収縮は, 溶接時のスキャン方法はもちろんのこと, 部品の大きさや

形状にも大きく影響される。また, 凝固した層の上に新たな層を載せ, さらにその層が収縮することにより大きな変形が生じることもある。これらの問題を解決する処方箋はまだ完成しておらず, PBFでは粉末床の予熱や部品の配置方向の工夫等により, 変形によって粉末供給装置と部品の干渉が起らない程度に抑制している。また, プラスチックのPBFでは, 凝固時と冷却時の収縮が樹脂によっては5%程度あるため, この収縮を予想するには経験を要し, 寸法誤差を全体寸法の0.1%程度以下にするためには多くの場合試行錯誤が必要である。これらの問題を解決するため, 現在, 造形シミュレーションの開発が盛んにおこなわれている。

部品強度については, 一般的に金属では鍛造材と同等程度, 樹脂では射出成形品の70%から90%程度の強度が得られている。また, 金属では一般的に疲労強度が低くなることが知られている。

以上を踏まえると, 従来の製品の工法をAM技術に単純に置き換えるのは, あまり得策ではなく, 以下で述べる特長を活用して, 従来なかった製品の生産や, 従来とは異なる規模の生産に利用することが好ましい。

3.2 AM技術の迅速性

AM技術では、材料を配置、接合することによって形状を創成していくため、除去加工における工具と部品の干渉、成形加工における型と部品の干渉の問題がなく、前述した変形の問題等々を考えなければ、任意の形状を加工することができる。このことは形状データから複雑な処理を経ずに部品を加工できる迅速性というAM技術の特長につながる。

AM技術の迅速性は1990年代からRapid Prototyping (RP)として模型製造に用いられている。当時は3次元CADが盛んに開発されてきた時期でもあり、RPは3次元CADの出力装置として重宝されていた。その後、機構部品や流体部品の機能確認をおこなうための機能模型製造に用いられるようになり、さらに2000年代前半には競技車両用の部品など使用回数の少ない用途に実用品として用いられるようになった。この頃からRapid Manufacturing (RM)という概念が用いられるようになり、戦闘機の部品など少量生産品に用いられるようになった¹⁾。少量生産品においては、金型等設備コストの削減、補用品生産のための金型の保管コストの削減などのインパクトがあり、AM技術の生産性や経済性の向上により適用生産数は徐々に増えていくと考えられる。一方で、AM技術の利用は生産数を大きくするのではなく、異なるデザインの部品を大量に製造することにも活用されるようになった。Align Technology社は、ライナーと呼ばれる歯列矯正用の装具の製造にAM技術を応用した²⁾。従来ライナーの製造は、歯列の石膏模型を切断し再配置したものを型として、加熱・軟化させた樹脂板に形状を転写することでおこなっていたが(図2)、型の製造にAM技術を用いることで、歯列の再配置がデジタル化された結果、ライナーの生産性が圧倒的に向上し、製造能力は日産4万個に到達している。このように、個人や状況に応じてデザインの異なる製品を大量に生産する技術はマスカスタマイゼーションと呼ばれ、高性能製品の大量生産品のコモディティ化が加速される中、今後新たな付加価値を提供するビジネスモデルが提案されると予想され、AM技術はその中核を担う製造技術として期待できる。



図2 石膏模型とライナー(従来工法)

3.3 AM技術が提供する形状の複雑性

材料の付着による形状創成で工具や金型と加工対象の干渉が排除された結果、除去加工や付着加工では作れない複雑な形状の製造が可能になり、AM技術は従来の工法に比べて圧倒的な形状の複雑性を提供できる。トポロジー最適化による構造部品の軽量化は、材料力学に従えばこういう形を作ったほうが軽くなることはわかっていたが、加工の制限により実際には作ることができなかった部品を、AM技術によって初めて生産できるようになったという、AM技術活用のお手本とも言える利用法である。図3は金属のPBFで製造された熱交換器である。熱交換器の熱媒の流れには、層流になると熱交換の効率が低下し、乱流が増えると流路抵抗が増大するという二律背反がある。このことは流路設計に流体力学を用いた最適化をおこなうことで、熱交換器の機能向上ができることを示している。このようにAM技術により自由な形状が加工できるようになったことで、材料力学、流体力学のみならず、様々な基礎科学に基づいた形状最適化を実際に利用できるようになり、新たなものづくりが創出されると期待できる。



図3 熱交換器

4. 各種展開例

4.1 電磁気学の活用

誘電率の周期構造を作ることによって、特定の波長の電磁波を通過させたり遮断したりする構造はフォトニック結晶と呼ばれている。枝川らは周期構造ではないアモルファス様の構造であっても一定の波長選択性を発現することを理論上確認していた。筆者らは酸化チタンの粉末と樹脂のポリアミド粉末を混合しアモルファス構造を造形することで(図4)、波長選択性を実現した³⁾。本例は、電磁気学に基づくデザインのAM技術による実現に当たる。

4.2 組織工学への応用

図5aは足場材料の1つであるポリカプロラクトン(PCL)粉をPBFによって造形した組織工学担体である⁴⁾。細胞が増殖するスペースを確保するために担体は90%の気孔率

を有し、担体内部の細胞に酸素を共有するために流路ネットワークが配置されている(図5b)。この担体を用いて肝臓細胞(肝がん由来細胞HepG2)を培養し、生体肝の6%程度の細胞密度を得ることに成功している。本担体が有する内部構造は組織工学に基づく高付加価値形状であり、本例はAM技術による実体化の例と考えることができる。

4.3 カスタマイゼーションにおけるCADのインパクト

筆者らは、機能と審美性の両方に優れたスポーツ用義足ソケットの実現をめざし、①機能性を高めるためのスーパーエンジニアリングプラスチック(PEEK)の造形技術、②機能性と審美性に優れたデザイン手法、③義肢装具士のデータ作成を支援するCADの開発の三位一体の開発をおこなった(図6)。表1は義肢装具士が1つの義足の完成まで

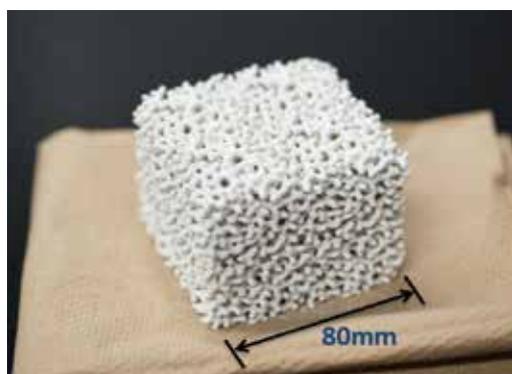
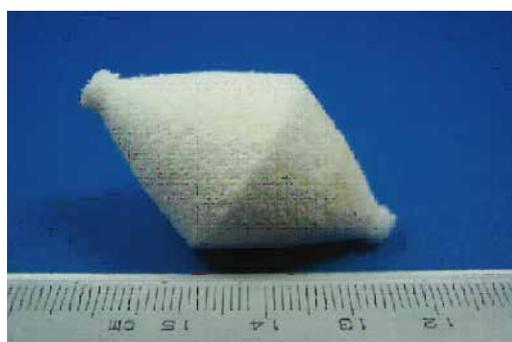
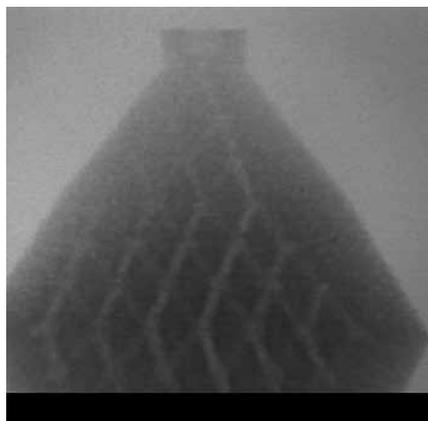


図4 フォトニックアモルファス



a. 組織工学担体の外観



b. 組織工学担体の内部構造

図5 PCL製組織工学担体

に従事する時間を従来の手法と、本プロジェクトで開発したCADを利用したものとで比較したものである。CADを利用することで、従事時間が1/3から1/4程度まで低減されていることがわかる。これは、義足ソケットの制作を、CAD操作による設計とAM装置による製造とに分離し、技能者の製造作業を廃したことの効果であると言える。さらに、製品の数と同数の設計が必要となるカスタマイゼーションでは設計コストの低減が成功の重要な鍵となると言える。



図6 AM製スポーツ義足ソケット
左：ナイロン製(塗装済み)，右：PEEK製

表1 技能者の作業時間

	ベテラン	中堅	若手
従来工法	4h05m	5h15m	7h15m
開発CAD	1h12m	1h30m	1h36m
低減率	71%	71%	78%

5. おわりに

AM技術の定義は「付着による形状データの実体化」と非常に「粗い」定義であるため、様々な工法を十把一絡げに論じるのは乱暴であるが、あえて評価をすると、精度や材料の強度においては従来の加工法に比べてやや劣るという欠点がある一方で、従来の加工法では加工できない形状が加工できる、従来の加工法より迅速に形状が得られるという利点もある。したがって、AM技術は従来の製品の工法を置き換えるものではなく、製造規模と工法の不一致を埋めたり、科学に基づく最適化の具現に用いたりといった、従来の加工法と相補的な活用をすることによって高付加価値ものづくりを加速することが期待される。

参考文献

- 1) Wohlers, T.: Wohlers Report 2005, p.157, Wohlers Associate Inc., CO, USA (2005)
- 2) <https://www.alightech.com/solutions> (accessed 2020/02/24)
- 3) Imagawa, Edagawa *et al.*: *Phys. Rev. B*, **82**(11), 115116 (2010)
- 4) Niino, Hamajima *et al.*: *Biofab*, **3**(3), 034104 (2011)