進化し続ける積層造形

ジョセフ・コーウェン、ナイジェル・ブント

積層造形は、技術と材料が目まぐるしく進化する状態にあり、その進化に伴って、他の方法では実現できない解決策をますます多くの用途にもたらし続けている。

3Dプリントとも呼ばれる積層造形（Additive Manufacturing：AM）は、30年以上前に初めて登場して以来、急速な成長を遂げてきた。1984年、3Dプリントプロセスに関する初めての主要な特許を、光造形法の発明者であるチャールズ・ハル氏（Charles Hull）が取得した。ほぼ同じ時期に、3D押出の熱可塑性部品を発明した米ストラタシス社（Stratasys）も複数の特許を取得している。それ以来、多くのことが業界内で成し遂げられてきた。

光造形法は、ポリマーと金属の両方をプリントするためのさまざまな種類のレーザ技術と同様に、産業用レーザを使用するものだった。

ポリマー

ポリマー部品を造形するための複数の技術が存在する。液槽光重合法（vat photopolymerization：VPP）では一般的に、紫外（UV）光源を使用してフォトポリマーを硬化する。熱は、エネルギー源としても使用できる。光造形法としても知られるVPPプロセスは、レーザを使用して造形タンク内で液状の樹脂層を1層ずつ硬化することによって、物体を造形する。米エンビジョンテック社（Envisiontec、現在のETEC）は2002年に、DLP（Digital Light Processing）プロジェクターを、フォトポリマーを硬化するための代替光源として使用するシステムを発表した。これらのシステムは、一部の用途においてレーザベースの光造形法の代わりに使われるようになった。一部の例外を除き、DLPシステムは、それよりもフレームが大きな光造形法よりも、小さな部品の造形に利用されている。小型部品用のVPPは、歯科分野のさまざまな用途に一般的に用いられている。

ポリマー部品製造に対する2番目に主要な技術は、粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion：PBF）または選択的レーザ焼結法（Selective Laser Sintering：SLS）である。レーザエネルギーによって粉末状ポリマーの層を溶融し、1層ずつ融合することによって部品を造形する（**図1**）。SLSに用いられる最も一般的な材料は、ナイロンとしても知られる、ポリアミド（PA）12である。良好な材料特性を備えた完全に機能する部品が、出力される。部品は溶融粉末から作られるため、表面仕上げは粗く、平滑化や塗装などの後処理が通常は必要である。さまざまな産業用途において、部品設計にもよるが、製造個数が最大で数万個までの少量生産の部品に対して、従来の射出成形に代わってSLSが使用されている。1987年に、テキサス大オースティン校からスピンオフしたDTM社（後に米3Dシステムズ社[3D Systems]が買収）が、このプロセスを初めて開発した。

ポリマーの3Dプリント手法の最後を締めくくるのが、材料押出法（material extrusion：MEX）と材料噴射法（material jetting：MJT）である。前者は、熱溶解積層法（Fused Deposition Modeling：FDM）として広く知られており、加熱して溶かした熱可塑性樹脂をノズルから吐出して部品を造形する。後者は、産業用インクジェット技術を利用して、フォトポリマーを造形プレート上に選択的に噴射し、UV光を当てることによって硬化する。

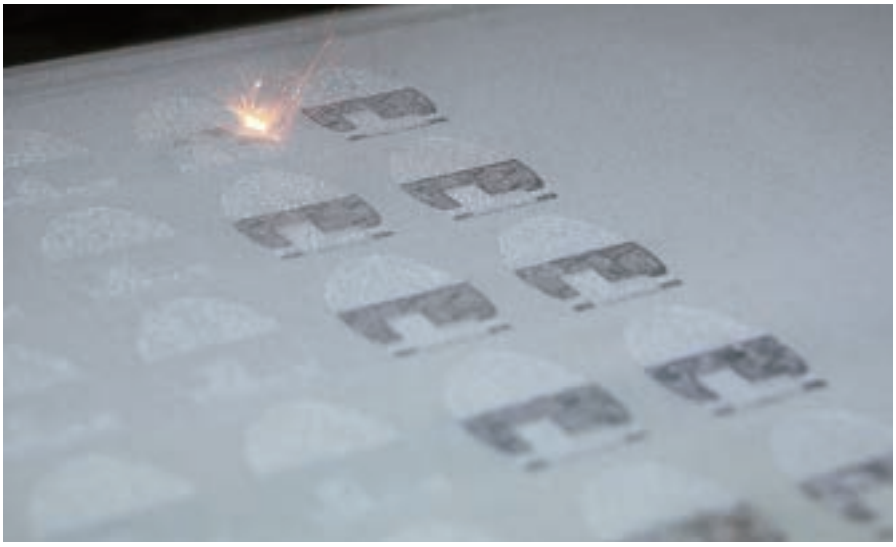


図1　粉末床溶融結合（PBF）システムでプリントされた金属工具部品。（画像提供：独EOS社）

これら2つのプロセスには、レーザ技術は利用されない。

金属とセラミック

機能的な金属及びセラミック部品の製造方法は、基盤技術の価格が低下したことを受けて、ここ数年で著しく進歩した。金属AMプロセスとして群を抜いて最も一般的なのは、PBFである。ポリマーに対するPBFプロセスと同様に、加熱された不活性の造形チャンバの中の金属粉末を、レーザビームで溶融して部品を造形する。造形プロセスは、プリント対象の金属合金の融点に達することで、粉末を融合して機能的な金属部品を生成する。部品には支持構造が必要で、造形完了後にそれを除去する必要がある。ポリマーのPBFと同様に、部品は溶融粉末から作られるためにかなり粗く、所望の表面仕上げを得るために、平滑化、研磨、または機械加工が通常は必要である。また、PBFプロセスの間に増大する負荷を軽減するために、部品の熱処理が一般的に必要である。一部の用途に対しては、最大限の密度を達成するために、熱間等方圧加圧法(Hot Isostatic Pressing:HIP)が必要となる場合がある。アルミニウム、チタン、コバルトクロム、ステンレス鋼、ニッケル基超合金、銅など、幅広い種類の材料が、このプロセスで使用できる。

指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition:DED)は、溶接に似たプロセスによって、金属材料を溶かして金属部品を造形することで特徴づけられる、一連のプロセスである。材料は、金属ワイヤまたは金属粉末として供給することが可能で、材料を溶融するための熱源は、レーザまたは電子ビームによって供給することができる(**図2**)。

図2 「LASERTEC 65」は、指向性エネルギー堆積法による積層造形とミリング加工を1つの装置に融合したものである。(画像提供:DMG森精機)

関連する非加熱プロセスの1つに、金属粉末ストリームを高速に加速することによって部品を造形する、コールドスプレー法がある。このカテゴリーに分類される技術はどれも、粗くて精度の低い部品しか生成しないため、最終形状を得るために機械加工が必要である。DEDは一般的に、大型部品に適用される。加工が難しい金属が使用される場合は特に、正味の形状に近い、完全に機能する部品の生成は、長い加工時間の短縮につながる。一部の用途においてはこれが、従来のコンピュータ数値制御(Computer Numerical Control:CNC)加工に勝るメリットとなっている。CNCのような減法製造プロセスでは、金属の一部を取り除いて所望の形状にするためにエネルギーが必要で、かなりの廃棄物が排出される。より持続可能なプロセスをメーカーが追い求めるこの時代において、それはマイナス面でしかない。

金属部品を製造するためのその他の非加熱プロセスとして、金属またはセラミック部品に対するVPPと、結合剤噴射法(binder jetting:BJT)がある。前者では、金属またはセラミックを充填したフォトポリマースラリーの硬化に、レーザビームが使用される場合がある。後者は、結合剤をインクジェットから噴射して金属粉末を接着させるものである。どちらの方法にも、最終製品の製造に焼結が必要である。

AMはいつ理にかなうか

AM業界以外の人々の期待を高めるような成果が定期的に報告されて、どんなものでもAMで造形できるという、共通の誤解が根付いている。速度、精度、材料の種類は、目覚ましい進歩を遂げているが、AMは、一般製造に対して経済的に理にかなった方法ではない場合が多い。プロトタイプ開発は通常、AMによって実行可能だが、試作される部品の個数は、業界の成長を大きく促進するほど多くはない。

製造への適用が、成長のための鍵である。部品コストが、従来の製造方法の代わりにAMを利用できない理由の1つとなっている。AMによる製造が

図2　ポリマーPBF（SLSとしても知られる）によって3Dプリントされたボブスレー用ヘルメットの型枠（左）と、レーシング用ヘルメット（右）。（画像提供：米ファースーン・テクノロジーズ社[Farsoon Technologies]）

実行可能な、さまざまな用途が存在するが、数量的には、それらが製造全体に占める割合はほんのわずかである。AMを利用する著名な例としては、米GEアビエーション社（GE Aviation）のレーザPBFで製造された燃料ノズルや、電子ビームPBFで製造されたチタンアルミ製タービンブレードがある。歯科業界では、金属とポリマーの両方の器具が使用されている。

AM業界はこれまでのところ、20%を超える年間成長率を示している。AMによる部品製造が、製造機会全体に占める割合はほんのわずかなのだとすると、AM業界のその高い成長率は何によってもたらされているのだろうか。AMはどのような場合に有効なのか。AM製造が実行可能な用途を定義する、複数の重要な概念が存在する。

数量：必要な部品の数が比較的少ない場合は、部品あたりの工具のコストは高く、製造に時間がかかる。場合によっては、工具を製造するよりも早く、数千個の部品が積層造形によって製造できてしまう。機械加工部品のデータの前処理と設定に時間がかかる場合もある。AM部品は、ほぼ瞬時にプリンターに送ることができる。

部品の複雑さ：AMは、一般的に造形プレートから上方向に向かって、1層ずつ部品を造形していくため、不可能なアンダーカット形状や内部経路を持つ複雑なデザインや、自由形状や自然から発想を得たデザインを、かなり容易に造形することができる。中空構造や格子構造の軽量部品は、航空宇宙などの業界で重宝される。航空宇宙業界では、製造コストだけでなく、より軽量な航空機がその使用期間を通してもたらすことになる燃料削減効果も、部品の評価基準となる。中空構造のチタン製医療用インプラント（埋め込み型医療機器）は、インプラント周囲の細胞集積が可能で、その成功率の向上につながっている。

製造の簡素化：部品の複雑さに関連して、AMは、通常は部品を個別に製造し、手動または自動の組み立て処理によって組み立てることが必要になるような、多数の部品が組み合わされたデザインの製造を容易にする。それらを1つのピースとして造形することにより、個々の部品の組み立てに必要な、コストと時間のかかる労力を省くことができる。例えば、GEアビエーション社が開発したエンジンは、800個以上もあった個別部品が15個未満にまで減少している。

持続可能性：多くのメーカーが二酸化炭素排出量の削減を目指すこの時代に、AMはさまざまな形で削減効果をもたらす。積層造形は、減法製造プロセスの副産物である廃棄材料を削減する。また、オンデマンドで部品を造形することが可能で、決して訪れることはないかもしれない万が一のために部品を倉庫に備蓄し、結局は過剰在庫として廃棄することがなくなることも、コストの削減につながる。サプライチェーンの制約が問題になっている今、部品が必要になる場所の近くにデザインを送付して、リモートでプリントすることは、戦争、自然災害、運河の閉鎖によって引き起こされる物流上の問題を回避する、エネルギー的にも、おそらくは時間的にも、効率の良い方法である。

カスタマイズ：特注または個別の寸法の製品が簡単に製造できる。アライナーなどの歯科用器具や、カスタムメイドの靴用インソールが、この例である。AMは、サイクリング用品やフットボールヘルメットといったカスタムメイドのスポーツ用品の製造に、ますます

広く利用されている（**図3**）。

レーザの代替手法

光造形法は、かつては産業用レーザに基づく先駆的な技術だった。大型の光造形装置は、今でも需要がある。米アライン・テクノロジーズ社（Align Technologies）によって開発され、米3Dシステムズ社（3D Systems）が提供する装置を利用する、古くからの製造方法によって、今でも大量のAM部品が製造されている。アライン・テクノロジーズ社は、1日あたり70万個の歯列弓を製造している。大型部品は、今でもレーザ光重合が有効な分野の1つでもある。

しかし、レーザを使用するプロセスは現在、DLPやLED光源を搭載する装置との厳しい競争に直面している。それらは、レーザを置き換えられるだけの精度を備え、層全体に一度に光源を当てることができるため、速度上のメリットがある。ベクトル処理であるレーザ重合は、本質的にそれよりも低速である。フォトポリマーのインクジェットプリントも、レーザに競合する技術である。ただし、部品サイズは限られており、材料特性も、低粘度の材料しか噴射できないために限られている。

レーザを使用するSLSは、米HP社が開発して商用化した、インクジェットと赤外線を組み合わせたプロセスである、マルチジェットフュージョン（MJF）との競争に直面している。同様に、高速焼結は、ナイロン製機能部品をSLSよりも低いコストで製造できる可能性を示している。

金属部品については、レーザPBFがまだ大きな市場シェアを占めており、レーザを使用するいくつかのDED技術による製造量は、それよりもはるかに少ない。電子ビームPBFは進歩を遂げており、多くの新しい企業がこの市場に参入しているが、金属AMの設置台数に占める割合は、ほんのわずかである。

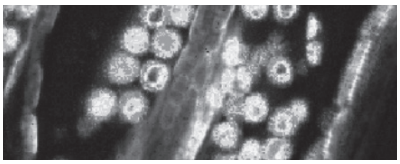
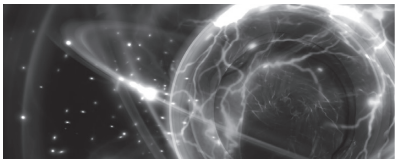
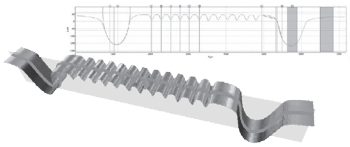
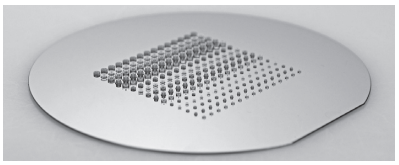
レーザPBFに対するより強力な競合技術は、金属結合剤噴射法である。この技術は、より低コストの金属AMを約束するものである。数多くの新興企業と潤沢な資金を持つ企業がこの技術に参入しているが、その成長はこれまでのところ、期待に応えられていない。その原因は、未焼結部分の処理に関連するプロセスの問題にあるのかもしれない。また、部品の効率的な焼結が顧客にとって難しいことが、より重要な問題として存在する。この二次的なプロセスは、レーザPBFでは不要なものである。

AMの技術と材料は目まぐるしく進化しており、増加の一途をたどっている。ますます多くの供給メーカーによって、興味深い新たな開発成果が毎年市場に投入され、AMにメリットがある分野において新しい用途が開拓されている。AMは、どのような用途に対しても有効というわけではなく、製造業界に占めるその割合は非常に小さい。しかし、有効な用途に対しては、ますます多くのユースケースに付加価値をもたらす、他では得られないソリューションを提供することができる。この分野は活力にあふれており、この先何年にもわたって成長が続くことを期待させる。

著者紹介
ジョセフ・コーウェン（Joseph Kowen）とナイジェル・ブント（Nigel Bunt）は、イスラエルのインテリジェントAM社（Intelligent AM）の主席コンサルタントで、さまざまなAM企業のコンサルタントも務めている。e-mail: joseph.kowen@intelligent-am.com　URL: www.intelligent-am.com

LFWJ

レーザー・光技術のお困りごとは
レーザー専門商社の
JLC JAPAN LASER
にお任せください！
レーザー加工

顕微鏡、バイオイメージング

原子・分子・量子研究

検査・分析・評価

ナノフォトニクス、微細加工

光技術に関するご相談は
https://www.japanlaser.co.jp/
E-mail:jlc@japanlaser.co.jp
JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー
本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0861
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711