

サブトラクティブ法に対抗して、 積層造形法をどう積み上げていくか

ゲイル・オーバートン

レーザ積層造形法(LAM)で製造される金属やポリマの構成部品が宝石や歯

科インプラントで一般的になりつつあるが、企業は精巧なさらに多くのLAM

素子を機能統合しようと競っている。

レーザフォーカスワールド本誌が、2009年にフォトニクス応用シリーズでレーザ積層造形法について書いたとき、「3Dプリンティング」という表現は一般的ではなかった。2014年に早送りすると、3Dプリンティングは最もホットな製造トレンドの1つとなっており、米グローバル・インダストリー・アナリストによると、市場規模は2018年に45億ドルに達する見込みである⁽¹⁾。同様に米ウォーラーズ・アソシエイツは、積層造形法装置と関連するサービスの売上は2012年に22億ドルに達しており、これは2017年までには60億ドルに上昇すると予測している⁽²⁾。

2013年5月、初の完全3Dプリント拳銃から38口径の弾が発射された。これはディフェンス・ディストリビューテッド(<http://defdist.org>)創始者、ディレクターであるコディ・ウイルソン(Cody Wilson)が作製した「リバレイタ」(Liberator)と名付けられた拳銃からだった。ディフェンス・ディストリビューテッドは、3Dプリント製造された拳銃で一般の人々を力を与える非営利組織だ。この製法に関してフォーブスオンラインのアンディ・グリーンバーグ(Andy Greenberg)は、「オリジナルのスチール製リバレイタと違い、ウイルソンの武器はほぼ全面的にプラスチックだ。16部品のうちの15が、8000ドルの中古のストラタシス・ディメンション(Stratasys

Dimension) SSTの3Dプリンタで作製された。プリントされなかった唯一の部品は、一般的な金物店で売っているもので撃針として使われた釘だ」と説明している⁽³⁾。

しかしフォトニクス業界にとっての問題は、米国とイスラエルに拠点を持つストラタシスの3Dプリンタがレーザを使わないことだ。ここでは熱を使って熱可塑性物質を整形する。したがって、全ての3Dプリンティングシステムがレーザベースでないことを認識しておくことは極めて重要である。3Dプリンティングに関する誇大宣伝は、家庭や小型店で使うための、ローコストで、熱を基盤にしてノズルでポリマを押し出すシステムに関するものが多い。この記事で扱うのは、より高価で、高分解能、より高品質の構成部品に関するレーザ積層造形システムとなる。

レーザ積層造形法(LAM)、レーザ溶融堆積、選択的レーザ溶融(SLM)、バット光重合、レーザ焼結またはレーザキュービング、直接金属レーザ焼結法(DMLS)、レーザ3Dプリンティングなどと、名前と技術の変種はたくさんあるが、LAM業界の成功は物理的な構成部品製造の条件次第と言える。つまり、これらの部品が加工、モールディング、あるいは競合する電子ビーム溶融(EBM)技術など従来のサブトラクティブ法で製造した部品の強度、耐久性、製造容

易性、製造量あたりのコスト目標に合致しているか、あるいはそれを凌駕しているかによる。では、LAMコンポーネントは、従来技術で製造されたパツとどのように違うのか。

金属部品

独コンセプトレーザ社の商標登録になっているレーザキュービング(LaserCUSING)プロセスは、ステンレス、工具鋼、アルミニチタン合金、ニッケルベース超合金、コバルト・クロム合金、あるいは金や銀合金など貴金属で使える。同社は2013年後半に600m²のR&D工場を開設した。これは、宝石、歯科インプラント、さらには自動車や航空機部品のレーザ積層造形部品に対する需要増に応えたものである。

最高出力1kWのファイバーレーザを使ってコンセプトレーザの粉体層ベースのコンポーネントは15~200μm厚で積層しており、粉体層のサイズは幅と深さが5cm、高さ8cmから、現在は最大63cm幅、40cm深さ、50cm高さとなっており、積層レートは1~100cm³/hrの範囲となっている。歯科修復メーカー、スイスのユニシムは、コンセプトレーザの100W連続波(CW)ファイバーレーザを搭載したMlab Cusing Rシステムを使って金属(チタンなど)歯科インプラントを造っている。同社によると、これは密度と歪がない点でフライス加工コ



図1 レニショーのレーザ焼結コバルト・クロスレーザブリッジのような歯科インプラントは、機械加工品あるいはフライス加工バージョンと同等の信頼度があることが研究により示された(レニショー提供)

ンポーネントよりも品質が優れている。英レニショーによると、同社のLAMで作製したコバルト・クロムのレーザブリッジ(LaserBridges)は高精度で細部のかみ合わせが優れている。また、正確さを期すために歪を除去しており、優れた陶歯保持を提供している(図1)。レニショーのAM250レーザ溶融加工機は200Wもしくは400Wのイッテルビウム(Yb)ファイバーレーザを採用している。25×25×30cm粉体床でビーム径は70μmとなり、20~100μm厚の層を堆積し、1時間に5~20cm³の構成部品を作製することができる。

要言すれば、多くの歯科インプラント企業は、よりコスト効果のよいLAMによるインプラントを支持しており、一体成形やフライス加工／機械加工の終焉を予測している。それを証明する理由もある。2013年5月、「Lasers in Medical Science」誌は、前歯部へのシングルユニット換歯の歯科インプラントで機械加工(表面はアルミニナブラスト／酸エッチング処理)によるものとレーザ焼結によるものの信頼度と故障モードを評価した⁽⁴⁾。総数42のインプラント(各グループ21)をステップスト

レス加速寿命テスト、偏光およびSEMフラクトグラフィ(破面)解析を行った後、機械加工とレーザ焼結のインプラント間で信頼度と破損モードの違いを観察した。

米スマートック社は、3Dプリント医療および歯科製品だけの市場は2019年までに28億ドルに達すると見ている⁽⁵⁾。しかし人の口腔よりも遙かに過酷な環境にさらされる、より高度な金属コンポーネントはどうだろうか。2013年7月、航空宇宙局(NASA)は米アエロジェット・ロケットダイン社の選択的レーザ溶融で作製したロケットエンジンインジェクタ(燃料噴射装置)のテストを終えた。液体酸素と気体水素のロケットインジェクタアセンブリの燃焼は、この極めて重要なロケットエンジンコンポーネントの完全性を実証した、恐らくさらに重要な点は、NASAによれば従来の工程を利用したインジェクタの製造には1年以上かかるが、選択レーザ焼結溶融では4ヶ月しかかからないことで、3Dプリントコンポーネントは70%のコスト削減となる。

コスト削減に加えて、航空アプリケーション向けLAMコンポーネント(参

pco.

on the cutting edge

pco.edge 4.2
from the pioneers
in sCMOS
image sensor technology

USB 3.0
Camera Link

>70% QE @ 600 nm

100 fps @ 4.2 MP

0.9 e- read out noise

www.pco.de
www.pco-tech.com

図2 エアバスA320鋳鋼エンジン室ヒンジ金具(左)は、EOS直接金属レーザ焼結(DMLS)技術を用いて造った形態最適化チタン金具(右)と比べて全般的なエネルギー消費、材料の浪費で劣っている(EADSイノベーションワークス提供)。



図3 模型ヘリコプタ(差し込み図)用のハウジングは、EOS P396レーザ積層造形システムを使ってポリイミドPA 2200から作製した(ミカドモデルヘリコプターズ提供)。



照 <http://bit.ly/1dHV7PP>)にはもうひとつ軽量化という大きな利点が考えられる。英EADSイノベーションワークスが実施し、積層造形システムメーカー、米EOS社が報告した事例では、従来のエアバスA320鋳鋼エンジン室ヒンジ金具を、EOS DMLS技術を利用して最適化した形態のチタン金具と比較した(図2)⁽⁶⁾。EADS IWエネルギー消費分析に含まれるのは製造工程だけではない。原材料の調達と輸送、アルゴン消費と金属粉末材料の噴霧過程で生じる浪費も含まれる。コンポーネントの製品寿命全体には、プラケットの静的強度および操作過程が含まれており、この調査で明らかになった点は、エネルギー消費の40%低減、原材料消費

の25%削減、一機あたり約10kgの軽量化が見込めるということだった。

ポリマとセラミックコンポーネント

2013年2月、米オックスフォード・パフォーマンス・マテリアルズ(OPM)は、ポリマレーザ焼結OsteoFab Patient-Specific Cranial Device (OPSCD)インプラントで初めて米国食品医薬品局(FDA)510(k)認可を受けた。これは生体適合性を持ち、化学的に無害な、放射線透過性のポリエーテルケトン(PEKK)熱可塑性物質から造られたカスタムデバイスで、外傷あるいは疾病が原因で頭蓋骨にできた空隙を復元している。

低いツーリングコスト、廃棄物削減、

カスタマイズ能力によって、積層造形法は頭蓋インプラントにとって当然の選択となっている。しかし、PEKKの高い融点(360°C)のために熱3Dプリントの利用ができないので、代わりにEOSの高温EOSINT P800レーザ焼結システムのようなシステムの高エネルギーレーザ焼結機能が必要だった。

EOSINT P800は2つの50W CO₂レーザを結合して120μm厚層を造るが、中規模の作業向けのEOS P396では60~180μm厚(アプリケーションと使用する粉末材料に依存)を造る。また、これは独ミカドモデルヘリコプターズも採用しており、平均粒子サイズ60μmのポリアミドPA 2200材料を用いてヘリコプタ模型用のハウジングを作製した(図3)。

マイクロマシニングカテゴリーの多くのコンポーネントに必要になる、より微細な部分を扱うために、独EOS社と3Dマイクロマック社は最近、3Dマイクロプリント(3D MicroPrint)という会社を立ち上げた。同社は焦点口径≤30μmのレーザを用いるLAMシステムを製造する。このシステムの目的は、粒子サイズ≤5μmの粉末から≤5μmの層厚を造ることにある。

セラミックによる選択的レーザ焼結でよりコンパクトな粉体層を得るために、独BAM連邦材料試験研究所は、乾燥粉末を堆積するのではなく、代わりに粉末懸濁液(セラミック業界ではスリップ、スラリーとして知られている)を用いた。これは、サブミクロンサイズの粒子を含んでいて理論的充填密度の65%を達成する。層状スラリー堆積(LSD)と呼ばれる独自の工程をBAMのLSD 100システムに実装して、スラリー層を堆積し、それを乾燥させ、レーザ焼結セラミックコンポーネントを造るためにファイバーレーザエネルギー

を1034nm(100W CW)と1940nm(50W CW)で照射した。

「ファインセラミックスラリーによって、われわれはレーザ光と粉末の粒子サイズとの相互作用を調整し、レーザ光の材料層への侵入度が調整できるようになる」とBAMのセラミック加工と生体材料部部長、イェンス・ギュンスター(Jens Günster)氏は言う⁽⁷⁾。「さらに、スラリー層が高密度であるため、層自体が十分な支持材となっているので、支持構造を立てる必要がない」。加工時間は、いくぶん時間集約的なスラリー洗浄工程さえも含んでいて、サブトラクティブ技術に匹敵するものであり、BAMは、ビスク焼のような微細構造で衛生的なケイ酸セラミック便器のようなオブジェクトを造ることができる(図4)。

コンポーネントの完全性

粉末粒子サイズは、仕上がり面品質やLAM製造コンポーネントの稠密度に関与し、粒子特性開発のASTM標準ガイドの主題にさえなっている。これはLAMシステムのユーザー やメーカーのために米国標準技術局(NIST)がサポートしている。

「多くのレーザベース、粉末層溶融システムは一般に平均金属粒子サイズを20~40μmとしているが、粉末にはそれよりも大きいもの、小さいものが含まれている」とメリーランド州ギザースバーグのNIST製造システムグループの物理学者、ジョン・スロトウインスキ(John Slotwinski)氏は言う。「サイズの分布は重要である、それによって粒子が成長プレート上でよく固まるようになるからだ。ギャップは、より小さな粒子で埋められ、空隙が減少する」。

多くの産業、企業および大学の研究グ



図4 LSD工程を用いて、陶器でできた衛生便器プロトタイプのレーザ焼結後に剥離工程が示されている(BAM連邦材料試験研究所提供図)。

ループ、例えば英国の溶接研究所(TWI)、米国の積層造形コンソーシアムやジョイニング・テクノロジーズなどの研究グループは、独フランホーファーILT、北京航空航天大学、米ペンシルバニア州立大学(PSU)と協力してLAM法を理解しようと積極的に取り組んでいる。また、粒子サイズ、レーザエネルギー、他の製造パラメータが最終コンポーネントにどのように影響をあたえるかを理解しようとしている。

「一例を挙げると、レーザや電子ビーム蒸着を使って製造した金属コンポーネント、特にチタンとニッケルベースの合金で、歪や残留応力を減らす工程があるが、われわれの現在の研究は改善されたそのような工程を理解すること、開発することに向けられている」とペンシルバニア州応用研究所の材料科学および工学の研究員准教授Todd A. Palmer(Todd A. Palmer)氏は語る。同氏によると、従来の機械加工や成形に適さない独自の形状を持つコンポーネントを造るにはLAMは魅力的であるが、LAM工程はプレス加工品の特性を持つパーツを造ることはまだできない。「これらのコンポーネントが従来の鋳造、鍛造工程で見られる特性に一層近づくには、後続の工程、熱処理、熱間静水圧処理などが必要だ」。

LAMコンポーネントは材料特性で大きな異方性を示す、また融合空隙の欠如といった欠陥があり、これが完成したコンポーネントの疲労特性に悪い影響をあたえることがよくあるとPalmer氏は警告している。「文献には多くの機械的な特性があるが、ほとんどの場合、コンポーネントを造るために使う処理パラメータは十分に確立されているわけでも、文献が示されているわけでもない。現在、異なる積層造形工程の必要不可欠な変数を特定しようと努めているところだ。これによって、この必要な工程系統が得られることになる」と同氏は続けている。

参考文献

- (1) See <http://bit.ly/1iChIC8>.
- (2) See <http://bit.ly/1j1qDzL>.
- (3) See <http://onforbes.es/1aueWwN>.
- (4) E. O. Almeida et al., Lasers Med. Sci., 28, 3, 851-858 (May 2013).
- (5) See <http://bit.ly/1adR0gF>.
- (6) See <http://bit.ly/19mKplW>.
- (7) T. Mühlner et al., Int. J. Appl. Ceramic Technol., doi:10.1111/ijac.12113 (May 13, 2013).