

解説

レーザ焼結技術を用いた 3Dプリンティングとその造形材料

前田 寿彦^{†1}

^{†1} (株) NTTデータエンジニアリングシステムズ

3Dプリンタによるものづくりが新たな生産手段として注目を集めている。中でも熱可塑性粉末材料をレーザで焼結あるいは溶融することで三次元形状を造形する装置は適用範囲もプラスチック部品から金属部品まで幅広い。一層ごとに積層して造形する工程のため機械加工の制約がないことおよび造形物の物性が最終製品として十分通用することから、射出成形や鋳造、機械加工といった既存工法では作ることができない複雑で軽量化と強度維持を両立させた部品の生産を可能にする。本稿ではこのレーザ焼結技術を用いた3Dプリンティングで実際にどのような製品が作られているのか、また今後どのような分野に利用されようとしているのか、またそのために解決すべき課題について述べる。

1. はじめに

三次元形状を誰でもが簡単に作れる機械ということで3Dプリンタが脚光を浴びて久しいが、個人レベルでの浸透に加え、産業界においても新たなものづくりのツールとして真剣に検討が進んでいるようである。しかしながら軍事、航空宇宙、発電プラント、医療、コンシューマ雑貨などの領域で3Dプリンタが広く活用されている欧米に比べ日本ではまだまだその活用事例は少ないといわざるを得ない。一方、セミナーやWebページなどで紹介される欧米の活用事例についても、実際に製品として使われているのか単に試験的に作られたプロトタイプなのか判断に苦しむことも事実である。一口に3Dプリンタといってもさまざまな方式があるが本稿では熱可塑性粉末材料をレーザの熱エネルギーで積層的に焼結あるいは溶融することによって三次元形状を造形する方式を採用するレーザ焼結型3Dプリンタについて、それがものづくりにおいてどのような材料でどのような用途に利用されているのかを最新の事例で示す。また今後の発展のために解決しなければならない課題、開発が必要な材料および将来の展望について考察する。

2. 3Dプリンタとアディティブ・マニファクチャリング (AM)

3Dプリンタの起源は1987年に商品化された光硬化樹脂に紫外線レーザを当てる方式の積層造形装置で、迅速に試作品を作るためのもの、すなわちラピッド・プロト

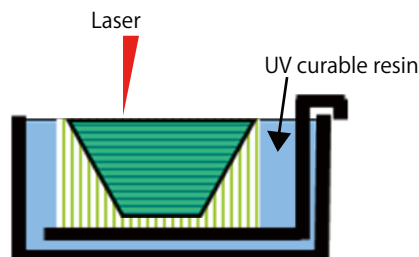
タイピング (RP) 装置と呼ばれていた。現在、積層造形装置にはさまざまな方式があるが、基本的にはどれも原理は同じで、三次元形状を厚さ0.02mm～0.3mm程度の多数の積層面にスライスしその一層ずつを順次、何らかの手法で固めることによって最終的に三次元形状を造形するものである。その中で3Dプリンタとは本来「プリントヘッドやノズルあるいはその他のプリンタ技術を用いて材料を堆積させることによって立体形状を造形する比較的安価な積層造形装置」のことであったが最近では3Dプリンタという言葉が広く浸透していることでレーザを使うようなハイエンド装置も3Dプリンタと呼ばれており、その定義は曖昧になっている。2009年のASTM F42委員会では、このような技術は付加的にものを作るということでアディティブ・マニファクチャリング (AM) と呼ぶことが公式に決められている。したがって本稿でも以下AMあるいはAM装置という呼び方で統一する。

3. レーザ焼結型 AM 装置の位置づけ

図1にAM装置の主な方式を代表的な分類に分けて示す[1]。中段には本来の3Dプリンタと呼ばれていたAM装置をグループにまとめて示している。それぞれの造形方式で装置の改良や新しい材料の開発が進められ、それに伴って利用分野も拡大されてきた。造形物もプラスチック部品はもとより金属部品、金型、鋳造用鋳型と多岐にわたる。マニファクチャリングといっても、小さなフィギュアのようなものから高機能部品までAMの適用

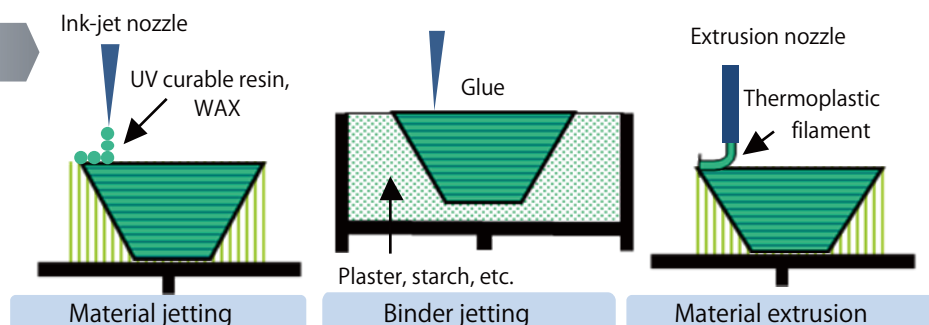
Vat photopolymerization

- Many types and sizes are available
- Ultraviolet curable resin materials
- Transparency parts can be built



3D printer

- Easy installation
- Easy operation



Powder bed fusion

- Various kinds of functional material are available
- High productivity
- Little restriction for geometry of the parts

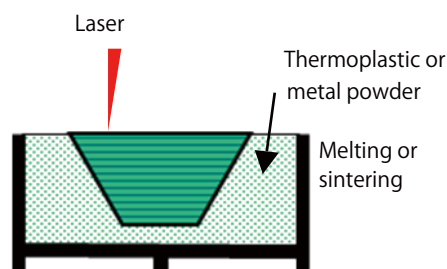


図1 Kinds of additive manufacturing system in categories

分野はさまざまであるがAM装置を生産設備と考えた場合、最終製品として十分な強度と耐久性を持つ付加価値の高い製品、高品質な製品を安定して、効率的に生産することが重要となる。

この点、レーザで熱可塑性粉末材料を焼結あるいは溶融して造形するレーザ焼結型AM装置はほかの方式の造形装置にはない優れた特徴を持っている。図2に主な積層造形装置とそのAMへの適用性を示す。図の横軸は装置の価格で約10万円から2億円の範囲、縦軸は形状チェック用の試作品から上方向に機能検証用試作品、最終製品と適用範囲のレベルを表している。粉末床溶融結合(Powder bed fusion)、すなわちレーザ焼結法による造形物が高い適用性を示しているがこれはプラスチック系材料を始め、種々の金属や鋳造用砂など豊富な材料を扱えること、および造形物の物性、耐久性、耐熱、耐薬品性などが最終製品として十分通用する性能を持つことによる。レーザ焼結型AM装置の適用分野を表1に示す。表を見て気付くことは、これら適用分野の多くが金属部品の製作であるということである。今でこそ世間の注目を集めている3Dプリンタであるが、実は20年以上も前か

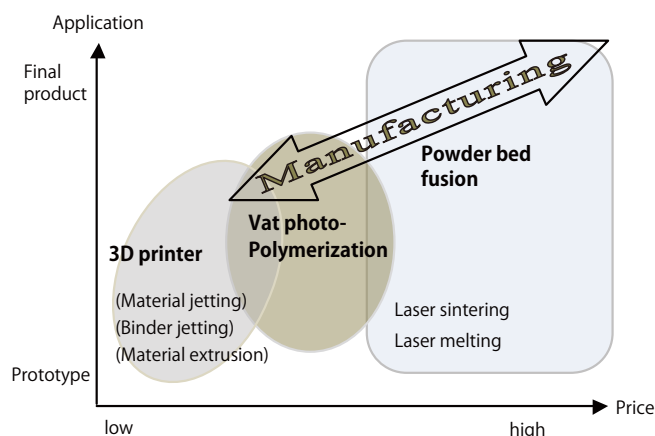


図2 Positioning of additive manufacturing systems

表1 Application of laser sintering type AM system

Material	Built parts	Final Product	Process
Metal powder	Metal parts	Metal parts	Direct metal laser sintering
	Injection mold	Plastic parts	Injection molding
	Die mold	Metal parts	Die casting
Plastic powder	Plastic parts	Plastic parts	Laser sintering
	Sacrifice pattern (Polystyrene)	Metal parts	Investment casting
Shell sand	Mold, Core	Metal parts	Shell casting

ら使われている技術である。ただし、その使われ方は試作品の製作から最終製品の製作へのシフトが着実に進んでいるようである。

4. レーザ焼結型 AM 装置で利用できるプラスチック材料

どのメーカーのレーザ焼結型 AM 装置でも利用できるプラスチック材料は基本的にポリアミド 12（ナイロン 12）およびポリスチレンである。一部の機種では PEEK（ポリエーテル・エーテル・ケトン）も造形可能である。そのほかには、ポリプロピレン、あるいはポリプロピレンライクなどの材料がリリースされているが、広く使われるようになるにはさらなる精度と品質の向上が必要であると思われる。材料の種類は多くはないがそれだけレーザ焼結に利用できるプラスチック材料の開発は難しいものといえる。

4.1 ポリアミド 12

白色微粉で、一般的な用途は高品質なプラスチック部品である。機械特性が優れていることから通常は射出成形プラスチックの代わりに使用される。その生体適合性はプロテーゼなどに適しており高い耐摩耗性は稼働部品の連結などに役立つ。以下の材料特性を有する。

- 高い強度と剛性
- 良好な耐薬品性
- 優れた長期挙動安定性

ポリアミド 12 から派生した材料としてガラスビーズやアルミ粉末、カーボンファイバを混合したものや難燃性ポリアミドがリリースされている。

4.2 PEEK

レーザ焼結用に開発された高性能ポリマでポリアリルエーテルケトン（PAEK）に分類される熱可塑性の半結晶材料である。レーザ焼結部品は、最大 95MPa の引っ張り強さと最大 4,400MPa のヤング率を実現する。連続使用温度の上限は用途分野に応じて 180℃（動的機械）、240℃（静的機械）、260℃（電気）におよぶ。以下の材料特性を有する。

- 優れた高温性能
- 高い耐摩耗性
- 際立った耐薬品性
- 良好な加水分解性
- 潜在的な生体適合性

上記の特性から、医療機器や航空宇宙産業、モータスポーツなど、要求の非常に厳しい用途に最適である。軽量性と耐火性が重視される航空宇宙産業やモータスポーツでは PEEK が金属代用品として開発されてきた。特に医療分野ではステンレス鋼やチタンの代用品として最適である。この材料は高温で造形するために専用装置が必要であること、回収した非焼結材料の再利用ができないといった理由が製品のコストアップにつながり、国内での導入実績はまだない。

4.3 ポリスチレン

優れた寸法精度と低い融点から、特にインベストメント鑄造に適している。レーザ焼結部品は以下に示す優れた材料特性を有する。

- 優れた寸法精度
- 非常に高い表面品質
- ロストパターンとして使用できる十分な強度

ポリスチレンの一般的な用途は石膏およびセラミックシェルの鑄造用消失パターンである。この材料は消失後の灰分が最小となるように最適化されている。真空鑄造用のマスタパターンとしても使用可能である。

4.4 その他のプラスチック材料

広範囲に使われている ABS での造形が強く求められているが ABS がレーザ焼結用粉末材料としてリリースされる見込みは今のところない。レーザが照射された時点で B の成分（ブタジエン）が飛んで組成が変化し、結果として ABS にはならないからである。今後、リリースされる可能性のある材料としてはサーモプラスチックエラストマやポリ乳酸などが考えられる。

5. レーザ焼結型 AM 装置で利用できる金属材料

一方金属材料は多様な材料が実用化されている。一般的に使われている金属材料を表 2 に示す[2]。レーザ焼結型 AM での造形は厳密に言えば、焼結の場合もあるし、溶融の場合もあり得る。焼結か溶融かは投入する熱エネルギーと使用する材料に依存するが、現在一般的に使われている材料は合金を粉末にしたものであり造形物は完全に溶融している。相対密度は 99.8% 以上あり機械特性は鑄造品と同等またはそれ以上である。また、鑄造品に比べて緻密な結晶構造を有している。チタンなど材料によっては疲労強度が鑄造品より劣るものがあるが、ヒッ

プ処理で鋳造品と遜色ない程度に改善可能である。航空宇宙分野やガスタービンの部品は難削材を長時間かけて削り出すものが多い。したがって、この分野にAMを適用しようという試みが積極的に行われているが高温、高圧力がかかる環境下での動的部品に対応するには、さらなる耐熱材料や高強度材料の開発が必要である。そのような高耐熱、高強度材料は難溶接材の部類に入るが、レーザー焼結の場合も溶接と同様クラック等の問題が発生するため開発は容易ではない。今後、新しい材料が開発されるとともに適用範囲も拡大されていくものと思われる。

6. 金属のAM

鋳造でもなく、機械加工でもなく金属粉末を直接焼結あるいは溶融して部品を作るAM装置が注目を集めている。日本国内でも新たな装置がいくつか商品化され、販売が始まっていることも最近の傾向として特筆できるものである。AMの利点が従来工法では作ることが難しかった複雑部品や高機能部品の製作にあることを考えると金属造形への期待も納得できる。表3に現在日本で販売

されている装置を示す。各社独自にプロセスの呼び方をしているが大きく分けて、以下の4種類にまとめることができる。

(1) レーザ焼結（溶融）

造形は窒素やアルゴンの不活性雰囲気中で行われるが、真空中で行う機種もある。

EOS, Concept Laser, 3D Systems, SLM Solutions, ASPECTの装置がこれに含まれる。

(2) レーザ焼結（溶融）と機械加工

たとえばレーザー焼結（溶融）で10層造形した後、工具で造形部の輪郭を削るといったレーザー焼結（溶融）と機械加工のハイブリッド装置。Matsuura MachineryとSodicの装置がこれに含まれる。

(3) 電子ビーム溶融

レーザーではなく電子ビームのエネルギーで金属粉末を溶融する方式。レーザーに比べて高出力で走査速度の速いエネルギー照射が特徴である。Arcamの装置がこれに含まれる。

(4) レーザクラディングと機械加工

上記3方式が一層分の粉末を撒いた平面（パウダーベッド）上で造形物の断面にエネルギーを照射するのに対して、レーザークラディングでは粉末材料をピンポイントに噴射し、同時にそのポイントにレーザービームを照射して溶融し、溶接ビードを積み重ねるように三次元形状を造形する。途中で工具による切削も組み入れる。造形テーブルは5軸制御され、複雑な形状も造形可能である。材料を途中で変えられるというほかの方式にはない可能性を持つ。

いずれの方法であっても金属の造形にはほかの材料にはない難しさがあるが以下にその一部を述べる。

表2 Metal powder for laser sintering

Material	Variety	Suitable application
Aluminum alloy	AlSi10Mg Light alloy	Functional prototypes and series parts, Engineering, Automotive, etc.
Cobalt Chrome	CoCrMo super alloy	Functional prototypes and series parts, Medical, Dental
Maraging steel	18 Mar 300/1.2709	Injection mold for series production, Engineering parts
Nickel alloy	Inconel 625 Inconel 718 Hastelloy	Functional prototypes and series parts, High temperature turbine parts combustion chambers, etc.
Stainless Steel	17-4/1.4542 15-5/1.4540 316L	Functional prototypes and series parts, Engineering, Medical, Lifestyle, Aerospace
Titanium alloy	Ti6Al4V light alloy	Functional prototypes and series parts, Aerospace, Motor sports, etc. Medical implant

表3 Metal AM systems available in Japan

Maker	Product	Process
EOS (Germany)	EOS M100, M290, M400	Direct Metal Laser Sintering
Concept Laser (Germany)	Mlab/MlabR, M1, M2, Xline 100R	Laser CUSING
3D Systems (U.S.A.)	ProX 100/200/300	Direct Metal Printing
Matsuura Machinery	Lumex Avance-25	Laser Sintering and Milling
SLM Solutions (Germany)	SLM 125/280/500	Selective laser melting
Arcam (Sweden)	Q10, Q20, A2X	Electron beam melting
DMG MORI SEIKI	LASERTEC 65 3D	Laser deposition welding & milling
Aspect	RaFaEl 300/550/150V	Powder bed fusion in Vacuum
Sodic	OPM250L	One process Milling Center
YAMAZAKI MAZAK	INTEGREX i-400M	Laser cladding and milling

6.1 サポート

AMでは一層ごとに順次積み上げて三次元形状を形成するため、図3 (a) のA部に示すような途中から現れる形状部を造形するには、その土台となるサポートと呼ばれる造形物を並行して造形する必要がある。傾斜角が45度以下となるようなアンダーカット部にもサポートが必要となる。

粉末材料の造形は粉末自体が造形物を支えるため、サポートは要らないと理解されているが、

金属の場合はサポートが必要になる。理由は内部応力によるひずみの拘束と熱の拡散である。当然サポートも同じ金属材料なのでその除去が大きな問題となる。また、造形できる形状にも制約が出る。サポートをどのように配置するか、サポートを少なくするために造形物をどの向きに配置するか、あるいはサポートを回避するためにどのようにデザインを変えるかといった検討が不可欠である。たとえば図3 (b) のような空洞部には着色で示したようなサポートが必要となるが (c) あるいは (d) とすることでサポートは不要となる。ただし、(d) でも空洞の直径が10mmを超えると円上部の水平に近い部分を支えるサポートが必要となり、(e) のような形状にするといった工夫が必要となる。

6.2 内部応力と熱処理

金属粉末を順次溶融再凝固させつつ三次元形状を造形するAMの宿命として内部応力の蓄積とそれによる造形物のひずみは避けられない (図4)。蓄積される内部応力の大きさ、すなわち歪みの大きさは材料によって異なる。たとえばマルエージング鋼やアルミニウムは内部応力をほとんど蓄積しないがチタン合金やインコネル718は大きな内部応力を蓄積する。造形物の配置方法やレーザ照射パターンの工夫で改善は可能であるがゼロにはできない。解決策の1つとして、サポートで造形物をベースプレートに固着し、造形中のひずみを拘束するとともに造形後にベースプレートごとオープンで熱処理を行うという方法がとられている。そうすることでサポートを

除去してもひずまない部品の造形が可能となる。

6.3 パラメータ

造形物の精度、密度、表面品質、内部応力の大きさなどを左右する大きな要素が造形パラメータと呼ばれるものである。造形パラメータはレーザの出力、ビーム径、走査速度、走査密度などの投入エネルギーに関するもの、積層厚や造形温度など装置に関するもの、それとレーザ走査パターンに関するものなど多岐にわたる要素の組合せであり、およそ250項目の設定項目がある。装置にはもちろん各材料に適した標準のパラメータが設定されているが、個々のアプリケーションに必要とされる最適な特性を持つ部品を造形するにはパラメータの最適化という作業が必要となる。また、新しい材料を開発する場合にも必要な時間のほとんどはその材料にあったパラメータセットを見つけるために費やされるといえる。今のところ、最適なパラメータを見つける場合、造形—評価—パラメータ変更—造形... の手順を繰り返すことになるが、レーザ焼結 (溶融) の挙動を解析する研究が進められており近い将来は、内部応力や歪みを回避するための手法、さらには新しい材料に対するパラメータが論理的に定義されるものと期待される。

6.4 造形限界

金属造形で部品を製作する場合どれだけ小さい穴が開けられるのか、どれだけ薄い壁を立てられるのかといった造形限界を理解することが重要である。造形限界は材料によってまったく違う値になる

が、パラメータを調整することでも大きく変化する。表4にインコネル718 (IN718) とチタン合金 (Ti64) の造形限界を示す。評価項目は以下の4点である。

- (1) Hole : 板厚2.5mmの縦壁に開けた横穴の評価
サポートなしで造形可能な穴の最大径
- (2) Small hole: 板厚5mmの縦壁に開けた横穴の評価
貫通穴の最小径
- (3) Pin : 直径1mm ~ 2mmのピンの造形可能高さの評価
ピン径と造形可能高さの比(L/D)の最大値

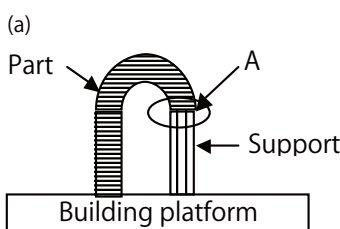


図3 Support for metal parts

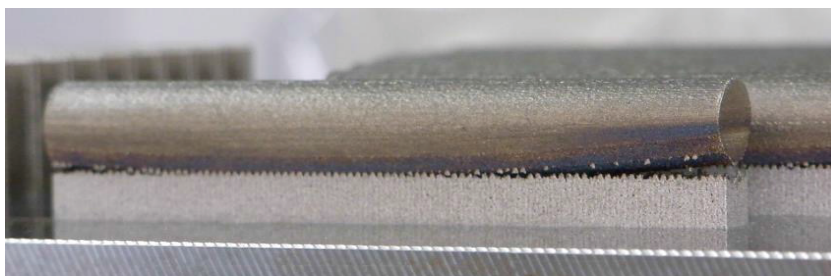


図4 Inner stress and distortion

表4 Limitation of geometries

Geometry	Assessment	IN718	Ti64
Hole	Maximum diameter	8mm	13mm
Small hole	Minimum diameter	0.4mm	No try
Pin	Maximum L/D	5.0 (5mm/1.0mm)	50 (50mm/1.0mm)
		6.7 (10mm/1.5mm)	33 (50mm/1.5mm)
		5.0 (10mm/2.0mm)	25 (50mm/2.0mm)
Wall	Minimum wall thickness	0.165mm	0.155mm

(4) Wall：高さ3mm，幅5mmの縦壁を造形できる板厚の評価

欠陥のない壁の最小板厚

結果を見ると，Ti64は比較的自由度が高い造形材料であるといえる。

7. 事例

どんな複雑な形状であっても微少な断面に分解すれば単なる二次元の塗りつぶし問題になるためAMでは機械加工の制約はなく，形状の複雑さは加工時間や工数，コストにリンクしない。すなわち，軽量化や剛性を極限まで追求したデザインを持つ部品の製作が可能となる。具体的には「バイオニックデザイン」や「トポロジー最適化設計」といった手法を採用した製品の開発が容易となる。以下にその例を示す。

7.1 航空宇宙

航空機の軽量化や燃費向上の手段としてAMの活用が積極的に検討されている。一例として図5に燃料噴射装置を示す[3]。これは2016年から実機に搭載されるLeapジェットエンジンの噴射装置で，1つのエンジンに19個の部品が搭載される。このエンジンメーカーでは全数を

AMで生産する計画を持ち，そのために配備されるAM装置も相当な数になる。AMを採用する利点として以下が挙げられる。

- 複雑な形状も一体造形できるため従来工法では25カ所あったろう付け溶接部が5カ所に削減でき，組立工数が大きく削減される
- 従来品に比べて寿命が5倍になる
- 軽量化と効率化がはかられ，Leapエンジンの目標とする15%の燃費向上に大きく貢献する

特に，AMで製造される部品は複雑形状でも一体造形が可能であり，複数の部品を接合して製造する従来工法による部品に比べ，ジェットエンジンのように高温状態と低温状態が繰り返される環境下で使用される場合の寿命と信頼性の向上が最大のメリットである。

燃料噴射装置以外にもジェットエンジンを構成する部品には複雑で機械加工や組立てに工数と時間を要するものが多くあり欧米を中心にAMの活用が積極的に検討されている。しかしながら，たとえば高温にさらされる回転体にはまだ強度と耐熱性の点で造形された部品が採用されるまでには至っていない。今後さらなる耐熱性材料の開発，微細欠陥のない造形プロセスの確立，内部構造を含めた検査器具の開発等が必要である。

図6にアルミニウム製の人工衛星用通信アンテナの支柱を示す[4]。トポロジー最適化設計により剛性を維持しつつ従来品に比較して43%の軽量化が図られている。この支柱は2015年9月に打ち上げられる予定になっている。

7.2 軽量化部品

図7にアルミニウム合金のブラケットの例を新旧のデザインの比較で示す。中空構造を採用し，必要な強度を確保しつつ従来品との比較で40%の軽量化を実現してい



図5 Fuel injection & swirlers

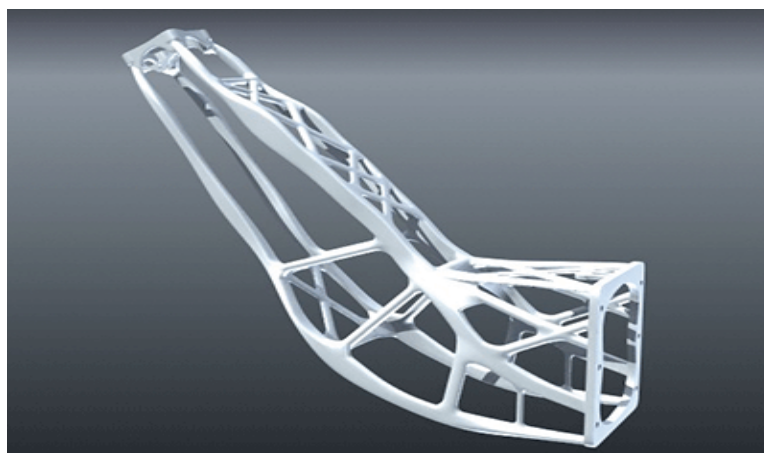


図6 Topologically optimized satellite antenna support

る。一体化した部品を造形するため部品点数と組立て工数の削減を実現している。また、バイオニックデザインが採用されている。

7.3 高機能部品

図8に熱交換器の事例を示す。液体流路外部に緻密なフィンが配置されているだけでなく、流路内部にも多数の突起が配置されている。この突起により乱流が発生し熱交換効率が向上し、結果的に従来品に比べて小型化が可能になる。これもまた軽量化に寄与するものであり、レースカーに搭載される。

7.4 医療

医療はAMが適している分野の1つである。医療用機器を始め、手術用器具や治具、体内に埋め込む人工関節



図7 Lightweight bracket

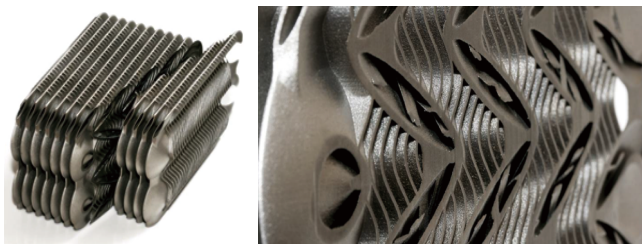


図8 Heat exchanger (Source : WITHIN, 3T RPD, EOS)

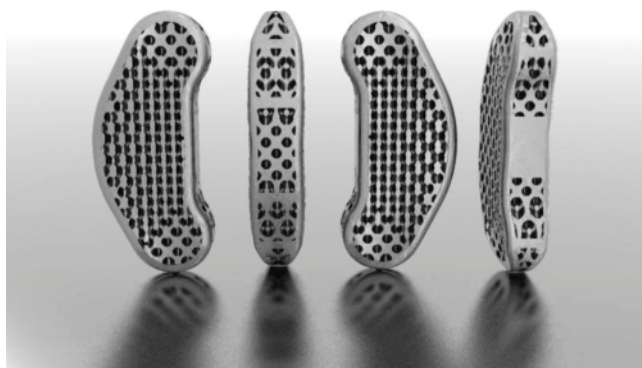


図9 Spinal implant (Source : WITHIN, EOS)

や人工骨、歯科におけるクラウンやブリッジなどの修復材等複雑で個々の患者に合わせたカスタム製品を速く、安価に製作するのにAMの技術は最適である。したがって、プラスチック材料、金属材料とも医療全般にわたって活用されている。図9に脊椎のインプラントを示す。

8. おわりに

AMは本稿で例示したような高機能部品や軽量化部品の製作に適用して初めてその真価が発揮されるものと考えられる。しかしながら事例に示したような形状を造形するためには当然その三次元データが必要であるが、それを既存の三次元CADでデザインするのはきわめて難しい。また、種々の解析ソフトも必要となる。このようにAMの利点を生かすためには造形技術のほかに今までにないデザインの着想、それを形にするデザインツール、そして高度な後処理技術さらには複雑な造形物を評価するための検査ツールが必要である。今後欧米では競争力のある製品製作のためにAMの適用範囲をますます拡大していくと思われるが、日本の産業界が欧米にキャッチアップするためには上記要素技術の確立が急務であると思われる。

参考文献

- 1) Maeda, T. : Positioning of Laser Sintering Type Additive Manufacturing System in 3D Printing, Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol.61, No.5, pp.217-222 (2014).
- 2) Maeda, T. : Additive Manufacturing by Laser Sintering Technologies, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol.56, No.651, pp.275-279(2015).
- 3) <http://www.gereports.com/post/80701924024/fit-to-print> (2015年6月5日現在)
- 4) http://www.altair.com/newsdetail.aspx?news_id=11062&news_country=en-US (2015年6月3日現在)

前田 寿彦 (非会員) maeda.t@nttd-es.co.jp

(株) NTT データエンジニアリングシステムズ営業本部 AM ビジネスユニット。1978年日立造船情報システム(株)入社、1991年海外事業部部長。1993年独 EOS 社と積層造形装置の日本国内における独占販売契約締結。以後、EOS 社の積層造形装置の事業推進に従事し、現在に至る。2006年(株)NTT データエンジニアリングシステムズに社名変更。

採録決定：2015年9月25日

編集担当：赤津雅晴 ((株) 日立製作所)