

# 金属積層造形技術(3Dプリンタ)の 最新動向

樹脂を用いた積層造形は、数万円の安価な装置が販売されるなど幅広く認知されているが、金属製品も同じように積層造形が可能になってきた。造形物が金属製のため最終製品、部品としての使用も可能になり、航空機用などで応用が広がってきている。

2017年 7月



**株式会社 旭リサーチセンター**

主幹研究員 松田 英樹

## まとめ

- ◆3D プリンタ（積層製造）による造形法は、産業用から個人のホビー用まで、さまざまな原料、装置が開発されている。原料の多くは樹脂であり、金属、特に金属粉を原料にした積層造形についてはまだ一般には知られていない。この工法では、造形物がそのまま部品などに使用でき、航空機用などを中心に実用化段階に入っているが、課題も多い。 (p. 1～4)
- ◆金属粉を用いた積層造形法として、粉体の供給方法としてパウダーベッド（PB）法とパウダーデポジション（PD）法がある。溶融光源としてはレーザー、電子ビームがあり、供給方法や光源に適した金属粉の形状や材質がある。今まで不可能だった構造や、一体成形が可能になるなどの優位な点があるが、金属ゆえの制限もある。これらの点をよく理解してどのような構造に適しているかなど使用目的を明確にすることが重要だ。 (p. 5～15)
- ◆金属造形分野で現在目的に最も合致したものは、航空機用の部品だ。特に米国のゼネラルエレクトリック（GE）などは、エンジン部品や燃料ノズルで実用化を進めている。また宇宙分野などにも用途が広がってきている。 (p. 16～24)
- ◆金属積層造形の装置はドイツが進んでいたが、英国や米国、中国なども国をあげた開発を進めている。米国では、国外に流出した製造業を再び米国に戻すための有力な手段として積層造形技術の開発に国をあげて取り組んでいる。 (p. 25～30)
- ◆日本では、取り組みはやや遅れたが、国家プロジェクトとして装置や金属粉の開発に取り組んでいる。目標は航空機など以外への普及のため、より高速での生産、大きな部品の生産、安価な装置開発、さまざまな用途に合致する金属粉の開発だ。目標達成をめざして開発が進んでいる。 (p. 31～37)
- ◆生産速度の改善にはレーザーなどでは限界があるため、新規な方法として液体に金属ナノ粒子を分散させたものをインクジェット方式で吹き付ける工法などが考案されてきている。今後の革新的な工法の開発によって、より広い分野での生産に活用されることが期待される。 (p. 38～40)

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 金属製品の積層製造技術について .....	5
2. 1 古くから金属製品の製造、加工方法が発明、考案されてきた .....	5
2. 2 金属粉末原料を用いる積層製造方法 .....	6
2. 3 積層製造の特徴を生かしたものづくり .....	10
3. 航空機用に拡大する金属積層製造技術 .....	17
3. 1 ジェットエンジン部品の製造 .....	17
3. 2 宇宙用にも拡大する金属積層造形 .....	22
4. 海外での金属積層造形技術の開発状況 .....	25
4. 1 英国での開発状況 カタパルトプログラム <sup>5)</sup> .....	25
4. 2 米国での開発状況 America Makes <sup>6)</sup> .....	27
4. 3 中国での開発状況 .....	28
4. 4 シンガポール及び台湾の開発状況 .....	29
5. 日本の取り組み .....	31
5. 1 国家プロジェクトでの巻き返し .....	31
5. 2 TRAFAMの開発目標と体制 .....	31
5. 3 装置の開発状況 .....	33
5. 4 金属原料粉の開発状況 .....	34
6. 金属積層造形の新たな方法 .....	38
7. さいごに .....	39
参考資料 .....	40

## 1. はじめに

溶融した樹脂をノズルから出して積み上げることにより成形物を得る 3D プリンタはここ数年ですっかり一般にも知られるようになった。またこの工法の特許が切れたことで、台湾や中国などの企業が装置を生産し、中には 10 万円以下という家電並みの装置も販売されるようになり、より身近な技術となった。

樹脂などを積み上げることによる製造技術が世界で最初に発明されたのは、1980 年出願の小玉秀男氏の特許であると言われる。小玉氏は当時名古屋工業試験所の技師で、展示会で感光性樹脂を見て思いついたとされる。

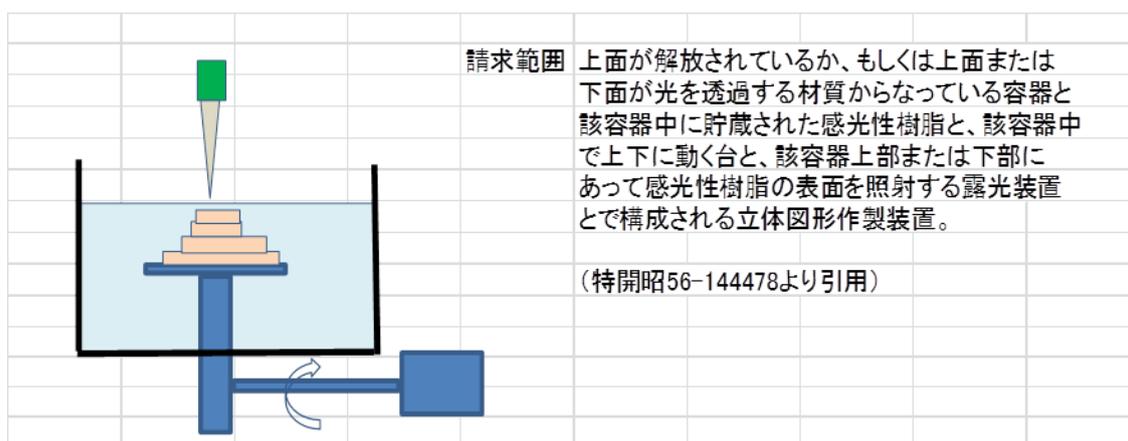


図 1 世界最初の積層製造法と言われる小玉氏の特許の請求範囲とイメージ

(請求範囲は特許から引用、図は各種情報をもとに ARC 作成)

図 1 に小玉氏の特許の請求範囲を示す。しかし、その内容は一般に知られる 3D プリンタによる製造とはかなり違っている。光硬化性樹脂の液体への紫外線照射を繰り返すことで、液中に造形物ができるというものだ。この工法は 2000 年ごろにはすでに多くの企業が研究、開発していた。例えば日本のシーメットの開発者の論文が 2004 年に発行されている。<sup>1)</sup>

小玉氏の特許出願の6年後の1986年に、樹脂を溶かして積層して成形する熱溶融積層法の特許を出願したのは米国人である\*。表1に積層による製造技術に関するおよその流れを示すが、その後の経緯を見ると、この分野では最初は米国を中心に開発が進み、さらにはドイツなど欧州やイスラエルなどに波及し、製造方法もさまざま進化し、技術面で圧倒的にリードしてきたことが分かる。積層による製造方法や材料の例を表2に示す。

表1 積層製造技術に関する流れ

時期	動き
1980年4月	小玉秀男氏(名古屋工業試験所)により光造形の特許が出願される。これが積層製造に関する世界最初の特許と言われている。しかし、審査請求はせず未請求取り下げ処分になった。(図1に特許概要を示す)
1986年	米国のチャックハル氏が光造形の特許取得。小玉氏の特許が先行技術になりもめたが権利化された。3Dシステムズを創業し87年に最初の装置販売。
1988年	米国ストラタシスが熱溶融積層法の特許取得。 ノズルから樹脂を出して固める方法を考案。 (2009年に失効 →以降 廉価版プリンタが各社から販売される)
2012年	米国が国立の研究開発センターを設立。
2013年2月	米国オバマ大統領一般教書演説で3Dプリンタに言及した。 「革新的製造技術になる可能性を秘める」

各種情報をもとに ARC 作成

\*この工法を熱溶解積層と表現することがあるが、本来溶解とは水や有機溶剤などの溶媒に物体を溶かすことであり、この場合に使用するのは適当ではない。熱溶融積層と表現すべきだろう。

表 2 積層による製造方法について方式と内容、主な使用材料

方式	内容	主な使用材料
溶液光硬化	液槽中の光硬化性樹脂表面を紫外線レーザーなどで所望の場所を硬化し、それを繰り返すことで積層造形する。	光硬化性樹脂
熔融積層	樹脂を加熱して熔融し、ノズルより押し出し、積層する工程を繰り返す製造方法	熱可塑性樹脂
材料押し出し光硬化	光硬化性液体材料をノズルより噴射し、同時に紫外線を照射して硬化させる積層製造方法	光硬化性溶液
接着剤噴射	インクジェットノズルより接着剤を噴射し、粉末材料を接着させる造形方式。接着剤が光重合性の材料を使用する場合もある。	高耐熱性樹脂、砂、石膏、セラミック
粉末床熔融結合（パウダーベッド法）	粉末材料表面をレーザーや電子線で照射して加熱して熔融させ、その後薄く表面に粉末を供給し加熱、熔融の工程を繰り返すことで造形する方法。	金属粉、樹脂粉、セラミック粉
指向性エネルギー積層（パウダーデポジション法）	金属粉末をノズルから供給しながらレーザーで熔融させ、積層する造形方式。	金属粉

各種情報をもとに ARC 作成

それでも数年前までは一般の人がそのような製造技術を知るほどには普及していなかった。しかし 2013 年 2 月に米国のオバマ大統領（当時）が一般教書演説で、「革新的製造技術になる可能性を秘める」として 3D プリンタに言及したことで一気に広まった（表 1）。台湾、中国、韓国など海外に流出していた米国の製造業を、3D プリンタなどの革新技術で国内に取り戻さなければならないとした。この演説で 3D プリンタが世の中に広く知られ、用語としても一般化した。

ところで小玉氏の特許のような方式や、熱熔融積層法などを果たしてプリント（印刷）と表現してよいのかは議論がある。産業界や学界では、従来は、“Rapid Prototyping” や “Rapid Manufacturing” などの用語が使用されていた。確かにこの方法は金型などが不要になるので Rapid と言えるかもしれないが、定性的で正確性には欠けるもので学術用語としてはふさわしくない。そのため 2009 年の国際学会で “Additive Manufacturing”（AM）が提案され、正式な用語になった。日本語では

一般的には付加製造と訳されるが、中国語では積層製造と表現することが多い。概念的には付加製造の一部が積層製造ということになるが、実際に今の方式は、樹脂溶解や光重合、金属を用いたいずれの方法も一層ずつ製造する方法なので、積層製造のほうがしっくりくる。このレポートの中では積層製造または積層造形に統一する。

米国では 1980 年代後半から主に樹脂を使用した工法の開発が盛んで、2012 年には研究開発センターがいち早く開設され、実用化に向けた研究が行われ大きな成果がでてきている。中国でも 2000 年ごろから大学を中心に開発が進んでいた。共通することは、軍事力が重視されるということである。ある程度コストがかかっても、早く製造するというニーズは軍用にぴったりと考えられた。このような事情が、米国や中国、欧州で関心を集め、発展した一因かもしれない。

光硬化性樹脂や熱可塑性樹脂など樹脂による積層造形方法は、すでに多くの紹介がなされている。<sup>2)</sup> しかし樹脂による方法は、熱可塑性樹脂を用いる方法も、光硬化性樹脂を用いる方法も造形物は熱により柔らかくなったり溶解したりするため、耐熱性を要する部品に用いることはできない。もともと Prototype (試作模型) と言われていたように、試作やホビー用フィギュアなどが主な用途だった。表 2 に示された使用材料の多くは樹脂である。また砂や石膏を用いる方法はその粉体を、バインダーを塗布して固める方法である。

一方、表 2 には使用材料として金属を用いる方式も記載されている。金属粉を原料に用いる金属造形は、その加工品をそのまま部品や製品として使用することができる。この分野は主に産業用であり、装置も高価で、樹脂の造形のように一般にはまだあまり知られていないし、手軽に試してみることもできない分野である。しかし、樹脂同様の自由な形の製造が可能な金属製品の積層製造方法は、今後は金属製品や部品の新しい製造方法として注目されていくと思われ、ものづくりの大きな革命になる可能性を秘めている。実際、航空用など高機能分野ですでに実用化が進んでいる。本レポートでは金属粉を用いた積層製造方式の紹介、世界と日本の開発や技術の現状と、今後の課題などについて述べる。

## 2. 金属製品の積層製造技術について

### 2. 1 古くから金属製品の製造、加工方法が発明、考案されてきた

金属は鉄器や青銅器などとして数千年前から使用されてきた。石器や土器のみであった時代から、鉄器が登場、武器や農具として使用され、人類の生活は大きく変化した。石器は天然の石を割ったり削ったりして加工するが、金属、例えば鉄器は石などと違い、鉄鉱石から鉄を取り出し製錬し、それを所望の形に加工することが必要だった。また金属を単独で使用する以外に、2種類以上の金属を合わせることで新しい機能を見出してきた。青銅は銅とスズの合金化で高機能化したものだ。このように金属器は人類にとって極めて重要なものだったので、その目的や必要特性などにより、金属の加工についてさまざまな方法が発明、考案されてきた。鋳造は鉄器や青銅器の加工などに用いられる製造方法だ。この方法により、複雑な形状の製造、複数金属による合金化により優れた性能発現が可能になった。鍛造も金細工や日本刀などの製造で用いられてきた。たたくことにより結晶の構造に変化を与えることで特性を改善できる。切削、粉末冶金、プレスなどは比較的近代の加工方法だ。表3に主な金属製品の加工方法と特長を示す。このように、金属加工は長い歴史を持ち発展し、人類の豊かな生活の実現に貢献してきたが、ここ10年ほどで従来とは全く違う製造方法が出現した。それが金属粉末原料を用いた積層製造方法である。

表 3 主な金属製品の製造、加工方法

加工種類	加工方法	特長
鋳造	鋳型と言われる砂型などに溶融した金属を流し込んで成型する方法	複雑な形状でも製造可能
鍛造	金属をたたいたり延ばしたりすることで成型し、金属の物性も改善する	小型の量産品製造に向いている
切削	旋盤などで削り出して成型する	近年NC旋盤などで複雑な形状の削り出しも可能に
粉末冶金	金属の粉末を金型に入れ、圧縮加熱することで焼結成型する	相溶しにくい金属でも、粉を混ぜることで合金化が容易
プレス	凹と凸の金型の間に挟み込んで圧を加えて成型する方法	自動車鋼板など薄板加工が可能

各種情報をもとに ARC 作成

## 2. 2 金属粉末原料を用いる積層製造方法

### ①パウダーベッド (PB) 法とパウダーデポジション (PD) 法

金属粉末を原料に用いる場合、成形品がそのまま金属部品として使用できるため早くから注目を集めてきたが、金属は樹脂のように低温では溶融せず、当然光で固めることもできない。そのため金属に適した新しい製造方法が必要だったが、その製造方法として開発されたのが粉末床溶融結合 (パウダーベッド法、PB 法) と、指向性エネルギー積層 (パウダーデポジション法、PD 法) である。(表 2)

図 2 に二つの方式の製造方法を示す。PB 法は、材料供給用ローラーで粉末を広げ、レーザーや電子線を照射して溶融、焼結する。その後台が下がり、再び同じ工程を繰り返すことで、粉末の中に埋まるように成形体を得る方法で、現在の製造方法の主流になっている。PD 法は、樹脂の溶融層法の金属粉版ともいえるべきもので、粉体をノズルから供給し、そこにレーザー光で粉体を溶融、焼結させる方法だ。

PB 法は、成形には成形物がすっぽり入る立方体分以上の多くの原料粉が必要だが、原料供給が簡単な仕組みのため広く採用されてきた。PD 法は必要な粉体が成形物分のみで少ないというメリットがある一方、粉体を均一に搬送する技術が難しかったが、今日では各国で開発が進んでいる。現在実用的な製造装置として市販されている装置の多くは PB 法のものであり、ドイツなどではすでに数多くのメーカーから販

売されている。ただし PB 法は生産速度が遅いことや、造形サイズが小さいなど、本格的に工業製品に応用するには課題を有しており、各国で盛んに改良研究がなされている。

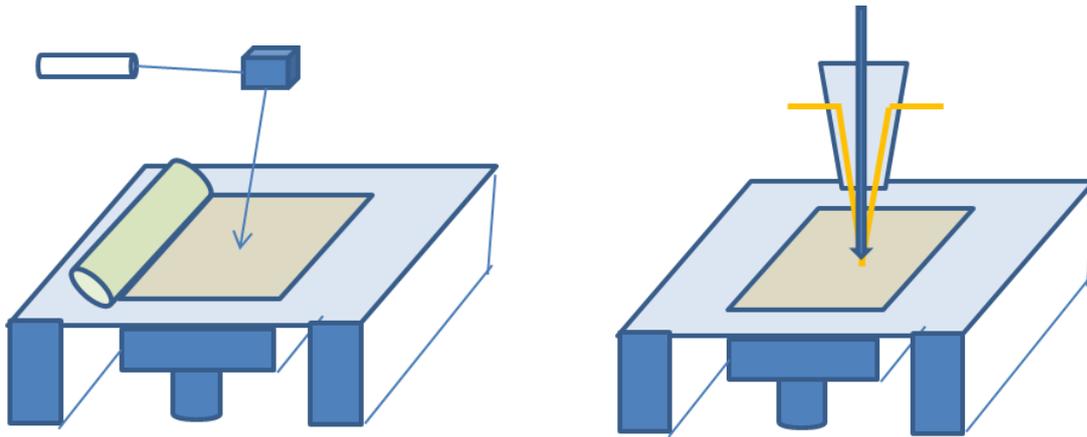


図 2 パウダーベッド (PB) 法 (左) とパウダーデポジション (PD) 法 (右)

各種情報をもとに ARC 作成

PB 法には金属粉に代わり樹脂粉末やセラミックス粉末を使用することもある。樹脂としてはナイロンや PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) などの融点の高いものが使用される。融点の低い樹脂では用途が限定されたり、試作レベルにとどまるが、PEEK など高融点樹脂ではそのまま部品や製品として使用できる場合も増えてくる。当然金属用と違いレーザー出力は弱いですが、今後装置や材料など拡大してくると予想される。表 4 にそれぞれの特徴をまとめた。

表 4 パウダーベッド（PB法とパウダーデポジション（PD）法の特長

	PB法	PD法
使用光源	レーザー 電子ビーム	レーザー
大型化(出力)	△(～1kW)	○(～6kW)
複層積層(異種金属)	×	○
表面精度	○	△(1-2μ m)
オーバーハング	○(45-60°)	△(20°)
修理	×	○
ソフトウェア	○	×(市販品無)

各種情報をもとに ARC 作成

## ②オーバーハング問題

積層造形では、自由な形状のものが製造可能と思われているが、積層造形ゆえの課題もある。その一つがオーバーハング問題だ。



図 3 オーバーハングとサポート材の必要性

各種情報をもとに ARC 作成

オーバーハングとは、図 3 に示すように上にせり出すような形状のことで、このような構造を製造する場合、自重で崩れてしまい形状が維持できない。PB 法の場合は周囲に金属粉が存在するため、その粉がサポートの役割をするので、より大きな角度まで可能になる。成形体周辺に粉が存在しない PD 法では角度がわずか 20° で限界がくる。これは金属造形だけではなく、PB 法の樹脂造形でも同様の課題だが、樹

脂は軽いのでそれほど問題にはならない。金属の場合には重いので樹脂よりも深刻な問題になる。このような問題解決のためには、そもそもの設計時点で一定以上の角度を持たないような構造にすることが重要だ。どうしても避けられない場合には造形物を傾けて角度が大きくなるように工夫したり、造形物の下にサポート材を設けるようにする。サポート材は後で機械的に取り除く必要があるので、可能な限り無いことが望ましく、造形物を傾けたり、形状を変えることが可能ならば再設計をしたりすることが重要だ。

### ③レーザー溶融法と電子ビーム溶融法

PB法で金属を溶融させるエネルギー源として使用される光源にはレーザーと電子ビームの2種類がある。一般的にはレーザーを使用する装置が多い。表5にその特徴を示す。電子ビームの場合には金属粉末を予め高温に加熱することが必要だ。高温にしないと電子ビームが反射され、うまく金属に吸収されない現象が発生する。この原因は完全には解明されていないようだが、結果的には航空機用のチタン合金などの使用が可能になる。また、高温雰囲気中で成形しているため、ジェットエンジン部品のように高温で使用する製品は歪（ひずみ）が小さくなるという点が長所になる。ただし真空条件で使用するため、減圧などの工程が必要になる。このことは装置の価格や生産性という点では障害になるが、金属の酸化による変質を防ぐことができる。このように電子ビームとレーザーの特徴に応じて使い分けることが必要になる。

従来レーザー発振源は極めて大型で高価なものだったが、近年においてはファイバーレーザーの進歩が著しく、小型で安価なレーザー源が可能になった。積層造形で使用されるレーザーの多くはファイバーレーザーだ。

表 5 レーザー溶融法と電子ビーム溶融法の特徴

	レーザー溶融法	電子ビーム溶融法
使用光源	レーザー	電子(物質波)
積層厚さ (μ m)	20-40	50-70
造形速度 (cc/h)	~20	~70
造形雰囲気	不活性ガス	真空
表面粗さ	良	劣る
寸法精度 (mm)	±0.05	±0.1
特徴	生産性は劣るが高精度で幅広い金属の使用が可能(ステンレス系、ニッケル系、クロム系など)	生産性は早いが精度は劣る、高融点金属(例えばチタン系など)が得意

各種情報を元に ARC 作成

## 2. 3 積層製造の特徴を生かしたものづくり

積層製造は自由に形状を変えることが容易にできるなど、極めて魅力的な工法だが、生産性に劣るなどの弱点もある。したがって、従来の鋳造や鍛造などの方法でも生産可能なものを作ることはあまり得策ではない。今までの製造方法では実現が不可能だったことが、積層製造なら実現できるという用途に使用すべきだろう。そのことにより今まで見たことがないような形状や構造、軽量化などが可能になる。だからこそ1億円を超えるような高価な装置を導入して製造しようというモチベーションにつながっていく。このことは金属に限った話ではないが、金属の場合には装置価格も高いので、より必要なことと思われる。ここでは金属を例にして積層造形の特徴を述べる。

①今までの製造方法では不可能だった構造のものが製造可能になる。

### i) ラティス構造

ラティスとは本来「格子」という意味であり、図4のような三次元網目構造をしている。このような構造は、金型鋳造など通常の製造方法では不可能である。

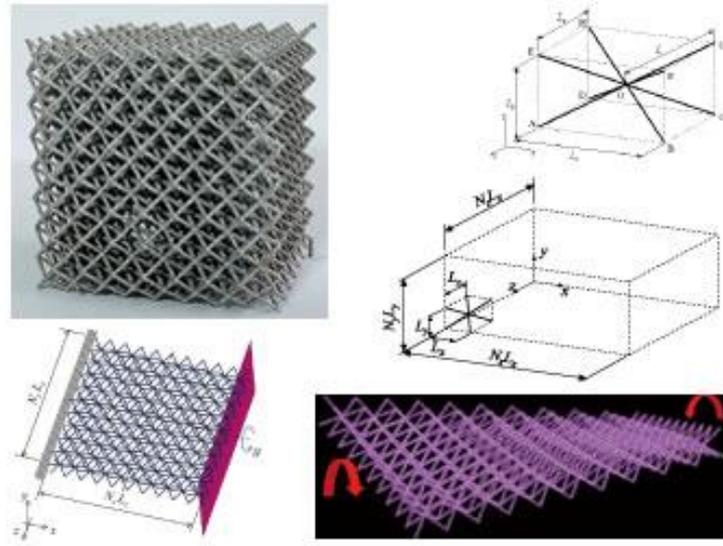


図4 ラティス構造の例

<http://www.kyusan-u.ac.jp/guide/project/2012/study/83micro.html>

このような構造により、同じ強度でも軽量化が可能になるため、航空機用などでさかんに検討されている。また、スニーカーのヒール部分に、樹脂でラティス構造を作ることによって、軽量でクッション性の高い機能を付与することができる。ナイキやアディダスなどスポーツ用品メーカーですでに実用化され、販売されている。

## ii) トポロジー (位相) 最適化

トポロジーとは数学用語で日本語では位相幾何学という。図形を連続的に変形させてどういう性質をもつかを考える学問だ。有名な例では、持ち手のあるコーヒーカップを変形させるとドーナツと同じ構造になるため同じ仲間と考えるというものだ。トポロジー最適化とはコンピュータ上で部品を連続変形させて強度計算や歪 (ひずみ)、重量などを最適化して解を求めるものだ。これにより同じ強度でも材料を少なくし、軽量化することが可能になる。従来もこのような取り組みはあったが、計算で得られた構造が実現不可能なこともしばしばあったが、積層製造により実現できることも多くなった。図5はトポロジー最

適化のイメージである。取り付けの穴の形と位置は固定して、他の形状をコンピュータで計算し変形させたものだ。図5右のような構造が最適と分かってもこの構造を単一部品で作ることは困難なことも多い。しかし、積層製造なら可能ということになる。

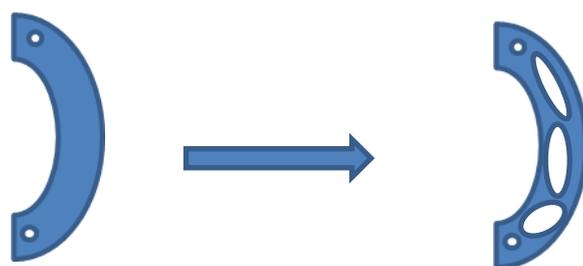


図5 トポロジー最適化のイメージ

各種情報をもとに ARC 作成



図6 トポロジー最適化により製造した航空機のドアヒンジ

(左；従来構造、右；トポロジー最適化による製造)

[https://www.eos.info/eos\\_airbusgroupinnovationteam\\_aerospace\\_sustainability\\_study](https://www.eos.info/eos_airbusgroupinnovationteam_aerospace_sustainability_study)

図 6 はエアバスの航空機のドアヒンジの従来構造とトポロジー最適化で設計し積層造形により製造した例だ。この手法により用いる材料を減らして省資源化を図りながら、軽量化と強度アップも実現している。このような複雑な構造は積層製造により容易になる。従来製造法であえて実現しようとするれば格子の部分は溶接するなどの方法が必要だった。溶接部は割れなどの発生要因になるため現実には難しい。

また、エアバスは 2015 年 12 月、米国のオートディスクと共同で航空機のパーティションを積層造形で製造する技術を開発したことを公表した。パーティションは航空機の後方に配置され、乗客の座席とキッチン隔着る壁になる部分であり（図 7）、クルー用の座席もこの部分に固定されるため、強度も要求される。この部品は「バイオニックパーティション」と称され、生物の細胞構造や骨の成長過程を模したデザインによる独自アルゴリズムにより設計したとのことだ。図 8 にアルゴリズムで計算された構造パターンを示す。赤い部分がストレスの大きい部分を示す。骨が多くなればストレスは小さくなるが、重量が増える。この計算で最適化設計が可能になる。従来法ではこのような構造体の簡便な製造は困難だった。



図 7 パーティションの位置（左）と積層造形で製造された構造（右）

<http://www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/Pioneering-bionic-3D-printing.html>

## Partition optimization via generative design

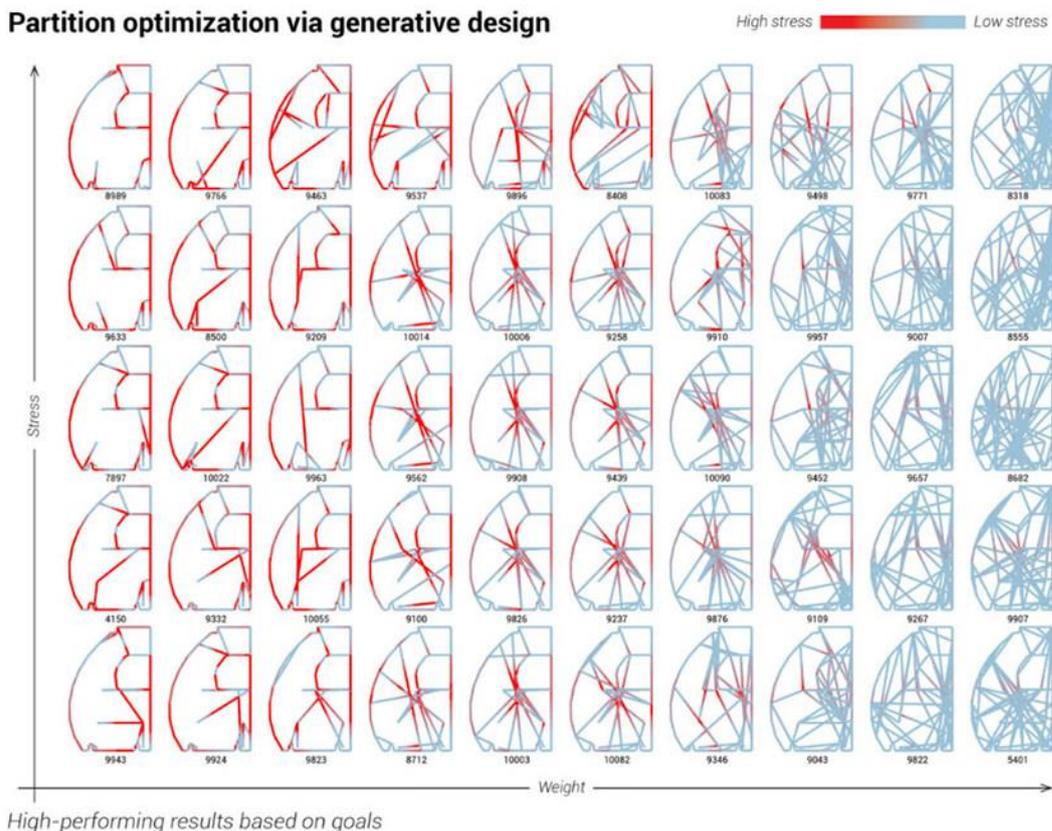


図 8 アルゴリズムで計算された構造パターン

<http://www.autodesk.co.jp/customer-stories/airbus>

②今まで複数部品の組み合わせだったものの一体成形が可能になる

米国のゼネラルエレクトリック（GE）は、今や電気機器から軍事、金融までも扱う超巨大企業だが、航空機エンジンや航空部品なども手掛けている。図 9 は、ジェットエンジンの燃料噴射ノズルだ。航空機のエンジンの炎の中で、エンジン中にジェット燃料を噴射するという重要な役割を果たす部品だ。このノズルは高圧と高温（およそ 1650℃）に耐えられる必要がある。従来は、さまざまな方法で製造したおよそ 20 の部品を、溶接などで組み立てていた。それが一体成形により一つの部品になった。このメリットは極めて大きなものがある。

i) 20 個の部品の品質管理が必要だったものが、一つになる。

航空機では数十万点の部品が使用され、個々の部品の品質管理が必要になる。

部品のメーカーが複数になる場合もあり、部品が一体化することで品質管理が容易になることは大きなメリットになる。

ii) 製品の歩留りが向上する。

例えば一つの部品の良品率が 99.99%であっても、20 個を組み立てると全体の良品率は 99.8%になる。また部品組み立て時にもミスが発生する可能性も高くなる。部品や工程はできるだけ少なくすることが高歩留りの基本だ。

iii) 軽量化が可能になる。

組み立てに必要な溶接や部品のネジ部分などが不要になるので、軽量化できる。実際に図 9 に示す GE の燃料噴射ノズルでは従来品に比べ 25%の軽量化に成功している。

iv) 強度がアップする。

ネジによる組み立てでは緩みが必ず発生するのでチェックは欠かせない。また溶接部による接合ではエアボイドなどがあるとそこからクラック発生するケースもある。一体構造にすれば強度劣化を改善できる。



図 9 GE が積層造形法で一体成型した燃料噴射ノズル

<http://www.gereports.com/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/>

このように、品質管理や軽量化、強度などの点で良いことづくめであり、実際 GE（製造は子会社の GE アビエーション）は積層造形技術のノズルを使用したボーイング 777 用大型ジェットエンジンでの実験に、2016 年 4 月に成功したことを公表している。2017 年から認定取得に取り組み、2018 年認定取得、2019 年から運行を予定している。

③金型がなくなるので、サイズやデザインを変更したものも製造可能になる。

同じ部品の大量生産ではこのようなニーズは少ないが、航空機用など生産台数がそれほど多くない場合や、さまざまな機種により構造や設計が変わる場合などの場合には大きな威力を発揮する。

### 3. 航空機用に拡大する金属積層製造技術

前の章で、エアバスの航空機用ドアヒンジや、ゼネラルエレクトリック（GE）がジェット燃料噴射ノズルを積層造形法で製造する計画を進めていることを紹介したが、航空機分野ではさらに拡大してきている。今までの例は航空機の中でも比較的力のかからない部品だったが、さらに進んで高温高圧にさらされる、過酷な条件で使用される重要部品にまで拡大してきている。

#### 3. 1 ジェットエンジン部品の製造

##### ①全日空のボーイング 787（B787）ジェットエンジン中圧ブレード破損問題<sup>3)</sup>

2016年8月、全日空は、2月と3月にB787が、エンジントラブルにより引き返す事例が発生した件についての報告を行った。製造設計は英国のロールスロイス（RR）であり、その解析によると大気中の化学成分に起因する硫化腐食が中圧タービンブレードに発生し、そこを起点に疲労亀裂が生じ、飛行回数とともに亀裂が進行することが分かったということだ。特に国際線は硫化物などの飛散が多い環境もあるため、国内線用では問題ないとしている。しかし、同様にB787を国際線で運航している日本航空では発生していない。全日空はRR製エンジンを採用、日本航空はGE製を使用していた。ではなぜRR製のみ問題が発生したのか。タービンブレードには腐食防止用のコーティング処理がされているが、このコーティングが不十分で想定より早く硫化腐食が発生したということだ。東南アジアなど空気が悪いところでは腐食が早くなると説明をしている。今のところはRR製中圧タービンのみの問題で、全日空では計画より早めに部品交換をして対応すると公表している。

中圧タービンはファンで集めた1.5気圧の空気を10気圧に加圧する部分で、さらに高圧圧縮機で40気圧に加圧され、ジェット燃料と混合されて燃焼し、高圧タービンを回して推力を得る。これらのタービン類は高温にさらされ、しかも高速で回転するので非常に苛酷な条件で使用され、破損も起こりやすい。そのため腐食が少なく高融点のチタンなどの金属が使用される。

外からエンジンを見て、回転している部分は空気取り込み用のファンで、この部分は高温にならないので主にカーボンファイバー製が使用されている。B787 は、初期トラブルとしてリチウムイオン電池（LiB）の発火問題で数か月運行できなかったが、今回はそれに続くトラブルだ。全日空のみが影響を受けた格好だが、全日空は B787 のローンチカスタマーであることも大きい。ローンチカスタマーとは最初の納入社であり、運航試験中などでさまざまな意見を言える立場というメリットはあるが、初期トラブルのリスクもある。

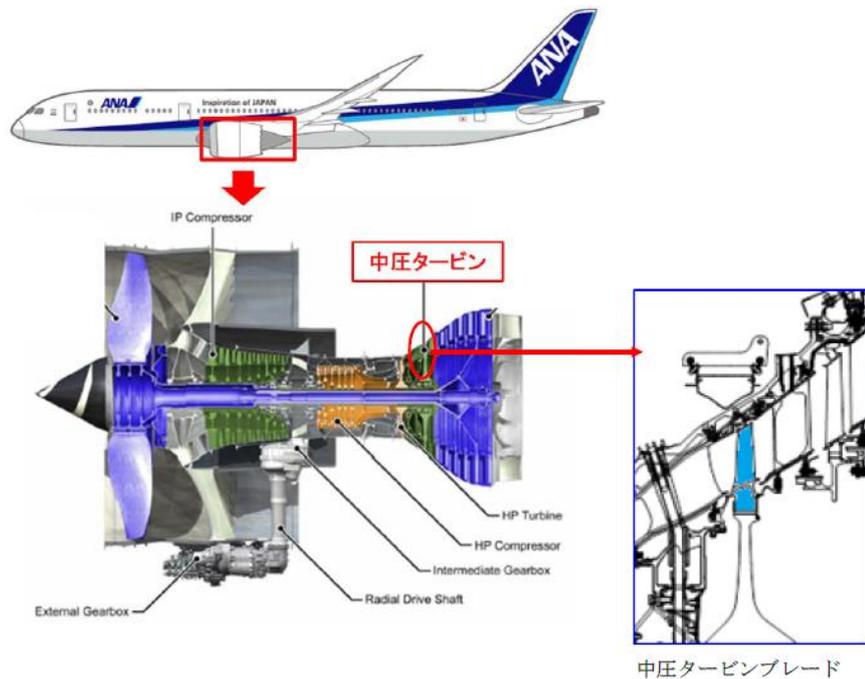


図 10 全日航のエンジンの破損部分（全日空のホームページより）

このようなジェットエンジンのブレード破損によるトラブルは過去にもあった。2003 年、ボーイング 777 のエンジン高圧タービンブレードが破損した問題だ。この時は、全日空と日本航空の両社で発生し、エンジンのメーカーは両社ともプラットアンドホイットニー（PW）だった。原因は、製造段階で使用するめっき液の洗浄が不十分で残留し、その残留硫黄により硫化腐食が発生し、強度が不足、破損に至ったとされる。航空機のエンジン不良は事故に直結するだけに、信頼性は極めて重要だ。

## ②航空機のジェットエンジンについて

大型航空機用エンジンは、航空機の部品の中でも極めて高い信頼性が必要な部分だ。そのため、欧州のエアバスや、ブラジルのエンブラエル、日本の国産ジェット機も、エンジンは自社開発していない。国産初の民間ジェット機である三菱リージョナルジェット（MRJ）もエンジンはPW製だ。特に大型航空機のジェットエンジンは世界で米国のGE、PW、英国のRRの3社の独壇場である。同じ航空機でもエンジンはユーザーが選択できる場合が多い。

GEはもともとエジソンにルーツを持つ家電メーカーだったし、RRは高級自動車メーカーだ。近年ではエンジンを売るだけではなく、エンジンにさまざまなセンサを取り付け、インターネットを通じて運航状態や運航時間などのデータ（ビッグデータ）を把握し、保全に生かしたり、省エネ運行の提案をしたりしている。また、エンジンを販売するのではなく、リースのような形でエンジンの稼働に対して課金するようなビジネス形態も広がっている。このようなビジネスは一見積層造形とは無関係にも思えるが、常に部品の状態を把握し、修理の必要性や故障を予測することにも応用できるので、オンラインで生産指示を出し生産しておくことで在庫量を減らしたり、修理計画を立てたりすることも可能になる。今後このようなビジネス形態は自動車などにも拡大してくると思われる。

RRは最新エアバス用のエンジン部品を積層造形法で製造してテストが行われている。GE以外のエンジンメーカーにも積層造形法は拡大している。

## ③従来のブレードの製造方法

従来、ブレードの製造方法は、精密鑄造法と切削研磨法を併用する方法で製造されている。精密鑄造とは別名ロストワックス法といわれる方法で以下の要領で行う。

ワックスを製造したい形に加工 → 砂などで周りを固める → 加熱してワックスを溶融し、取り出す → 砂型に金属（合金）の溶湯を入れる → 冷却し、砂型を割って取り出す。

その後、切削研磨し、さらに表面を保護膜でコートする。コートには、残存した液は腐食などの原因になる可能性があるので、できるだけ液を使用しないドライ工法が採用される。

このような工法は古くから行われており、昔はワックスの代わりに蜜蝋を使用し、装飾品、仏像や金属活版などがこの方法で作られた。<sup>4)</sup>

#### ④いち早く金属の積層造形法に着手した GE

GE は航空機用エンジンの大手 3 社の中でもトップのシェアを持っている。トップ企業だけにさまざまなイノベーションに取り組むことも早かった。先に述べたように、エンジンは従来、航空機メーカーに売ったら売りっぱなしだったが、現在はエンジンにさまざまなセンサを取り付けることで、運航中のデータを集め、最適な運航条件を提案して燃費を改善したり、メンテナンス時期を予測することで、部品の在庫を最適化して費用を削減するなどの取り組みをしている。またこのようなデータを管理することで、エンジンを売るのではなく、リースにより運航に応じて課金をする新たなビジネスモデルを構築するなども GE のイノベーションの例と言える。

一方、製造方法として積層造形法を取り入れたのも比較的早かった。前章に示したようなジェット燃料噴射ノズルなどの製造が検討されてきた。またエンジンの性能向上や燃費改善で、エンジンのブレードのさらなる軽量化が望まれたことや、また燃焼温度が高温化したことが原因で、材質の見直しがなされたことも積層造形が材用される要因となった。軽量化のため、従来のニッケル合金からチタンアルミ合金への材質変更が検討されたが、チタンアルミ合金は融点が高く、精密鑄造には適さない材料だった。そのため積層造形法が検討された。この材料変更でブレードの重量は約半分になり、燃費改善が期待されている。

#### ⑤GE が欧州の 3D プリンタメーカー 2 社を買収 (TOB)

2016 年 9 月、GE は欧州の積層造形装置メーカー 2 社を買収すると発表した。買収

金額は2社で14億ドル（約1,440億円／発表当時のレートによる）になる。買収する企業はアーカム（スウェーデン）とSLMソリューションズグループ（ドイツ）だったが、その後SLMについては買収額で折り合わず断念している。アーカムは電子ビーム溶融法の装置では最も先端を行くメーカーだ。

金属の積層造形には、前章に記載したように主にレーザー法と電子ビーム法の2種類がある。航空機用には電子ビーム法の方が適している場合が多い。現にGEではレーザーも用いていたが、電子ビームでの造形にも取り組んできた。その理由としては次のようなことが考えられる。

航空機用には軽量化のために、マグネシウムやアルミニウムなどのような軽金属を使用することが多いが、これらの加工を空気中で行うと粉末は粉塵爆発の可能性がある。電子ビーム法は真空条件で加工する必要があるため爆発防止には都合が良い。また酸化や窒化による材料劣化、変質の心配がない。またアルミニウムやチタンはレーザー光に対するに反射性を有するため、高温溶融加工が難しかったが、電子ビームに対しては反射が小さく、また厚さ方向への侵入に対して角度が変わらないので、融点2000℃以上の高融点金属でも加工が可能という特長がある。このように高温で使用されることが多い航空機用部品の積層造形には電子ビームのほうが適していると思われる。しかし電子ビーム方式の装置メーカーは世界でほぼアーカムのみであり、GEでは50台以上の装置を導入した。しかしまだ課題は多い。寸法精度や表面粗度と加工速度はトレードオフの関係だ。造形物の大型化も必要だ。これらの改良を加速するには、アーカムを買収するほうが良いと判断したと思われる。

#### ⑥積層造形法が破損問題を解決するかどうか

全日空のB787のエンジンプレードの破損に対して、積層造形法は対策になりうると思われる。金属の積層製造により、従来一体型だった成形品が、内部がラティス構造（図11）の成形品も可能になる。このような構造のため軽量化も可能だ。これにより破損を防止できる可能性があるが、理由としては以下の理由が考えられる。

- i) 軽量化が可能になり、羽の根元にかかる力が軽減できるので破損に強くなる。
- ii) 表面が腐食した場合でも、表面腐食のみであり内部には及ばない。
- iii) 金属疲労が発生した場合、一体型であれば疲労による亀裂が発生するが、内部にラティス構造があるとそこで亀裂は止まるので破損には至らない。



図 11 一体型成形品（左）と内部がラティス構造になった成形品（右）のイメージ  
各種情報をもとに ARC 作成

### 3. 2 宇宙用にも拡大する金属積層造形

①米国航空宇宙局 NASA がロケットエンジン用ターボポンプを製造、試験に成功  
ロケットエンジン用ターボポンプは、極低温の液体水素燃料を送り出す部品で、かつロケット燃焼時には 3000℃以上にも耐える必要がある。しかも大量の燃料を送り込まなければならず、構造も非常に複雑だ。しかしこのポンプは、積層製造で従来法よりも 45%少ない部品で構成することができ、燃焼試験にも耐えたとのことだ。

National Aeronautics and Space Administration

**3-D Printed Turbopump**  
Heart of An Engine  
Liquid Hydrogen (LH2) pump

**A Lot of Force in a Small Package**

NASA recently designed and tested a 3-D printed turbopump--one of the most complex rocket engine parts ever made with additive manufacturing. During recent tests, the turbopump delivered 1,200 gallons of cryogenic liquid hydrogen per minute--enough to power an upper stage rocket engine capable of generating 35,000 pounds of thrust. Additive manufacturing technology may make it possible to develop complex rocket parts that have fewer parts and unique designs yet are more affordable.

<b>Maximum rpm</b>	95,000 rpm	9.5 times faster than a Formula One RaceCar
<b>Maximum thrust potential</b>	35,000 pounds	Upper Stage Engine class turbopump
<b>Fuel delivery</b>	1,200 gallons of liquid hydrogen per minute	
<b>Horsepower</b>	2,000 horsepower	Twice the horsepower of a NASCAR
<b>Part count</b>	45% fewer parts than traditionally made turbopump	

#JourneyToMars  
@NASA\_Marshall  
www.nasa.gov/marshall

www.nasa.gov

図 12 NASA が積層製造方法により作ったジェットエンジン用ターボポンプ

<https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2015/successful-nasa-rocket-fuel-pump-tests-pave-way-for-3-d-printed-demonstrator-engine.html>

②エアバスがドイツに積層製造の研究機関設立

2016年4月、エアバスは航空宇宙用の研究機関として、ドイツ・ミュンヘンに「Aerospace Factory（航空宇宙科学工場）」の設立を発表した。この研究所では、航空宇宙用に革新的な金属材料や生産工法を開発し、軽量化と低コスト化を目指すとする。エアバスでは技術を持っている下記の企業や研究機関、大学とパートナー

契約を結んでいる。

- ・フラウンホーファー研究所
- ・ミュンヘン工科大学
- ・EOS（金属造形用のメーカー）
- ・MTU エアロエンジン（ドイツの航空機エンジンメーカー）

このように、特に金属造形技術では航空宇宙用に海外での研究や開発が活発だ。海外で特に活発な要因としては、航空宇宙は軍事目的と直結していることが大きかったからだと考えられる。昔から軍事用の開発は、予算が潤沢で進歩しやすいという面がある。軍事用から発展した技術は多い。原子力開発やロケット、GPSはその例だ。コンピュータや半導体の進歩も、軍事面での応用がけん引したという側面がある。しかしその後多くの技術が人類に貢献したように、積層製造技術も今後さまざまな分野に用途が広がり、人類の豊かな生活に貢献することになるだろう。そうだからこそ、多くの国で国家をあげた開発が進められている。

## 4. 海外での金属積層造形技術の開発状況

積層製造技術は、製造の大きなパラダイムシフトを招く可能性があり、重要技術として各国が主導する形で開発が進んでいる。この中からいくつかの国の状況を示す。

### 4. 1 英国での開発状況 カタパルトプログラム<sup>5)</sup>

英国では大学や研究機関における研究開発が非常に活発で、論文や特許件数も多いが、それらを商業化や実用化を通して社会や経済につなげ、役立てるという施策が不十分で、国民が豊かさを実感できないという不満があった。英国でも日本の産総研のような技術イノベーションの拠点は存在していたが、日本やドイツなど12か国の類似施設を調査した結果、初期の研究成果を実用化に近い段階までつなげる機能が不足しているとの結論になった。2010年9月、拠点形成事業としてのプログラム（カタパルトプログラム）を発表し、拠点としてのセンター（カタパルトセンター）を設置した。

カタパルトとは、もともとはパチンコ型の投石道具の意味だったが、今日では航空母艦の甲板から空気を吹きだし、航空機を発艦させる装置として知られる。産業を浮揚させるという意味で名づけられたと思われる。

このプログラムでは11か所のセンターを設立したが、その分野は以下の通りである。

- ①洋上再生可能エネルギー（グラスゴーなど）
- ②高価値製造業（ストラックライドなど6ヶ所）
- ③精密医療（ケンブリッジ）
- ④未来都市（ロンドン）
- ⑤細胞遺伝子治療（ロンドンなど）
- ⑥デジタル技術（ロンドン）
- ⑦輸送システム（ミルトンキーンズ）

- ⑧衛星応用（ハーウェル）
- ⑨化合物半導体応用（サウスウェールズ）
- ⑩エネルギーシステム（バーミンガム）
- ⑪薬剤発見（アルダリーパーク）

このうち、積層製造技術開発は②の高価値製造に属するが、その中心として 2011 年に MTC (Manufacturing Technology Center) が設立された。積層製造ではいかに残留応力や歪（ひずみ）を低減するかが、部品のクラックや破壊防止に重要だ。MTC の紹介ページでは、図のように工程により歪を取り除く方法が紹介されている。

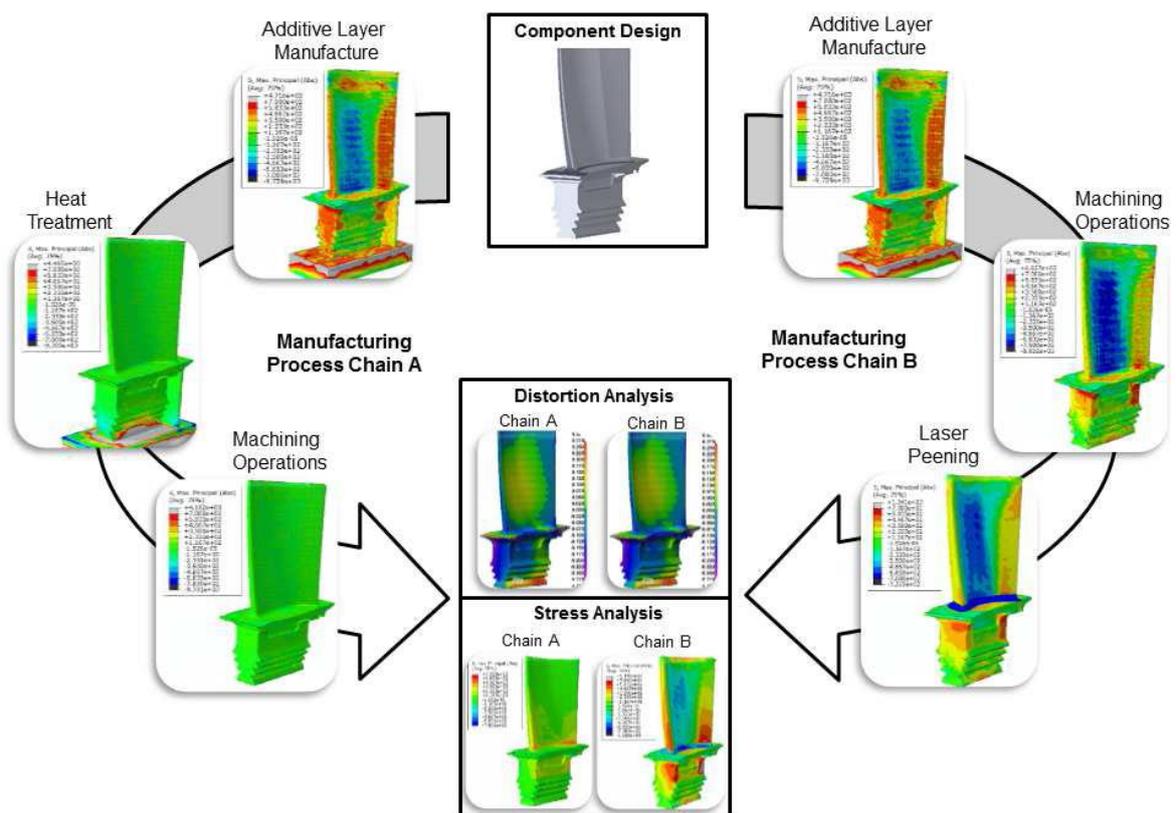


図 13 積層製造後の工程による残留応力の低減

<https://hvm.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/04/Case-study-Numerical-Modelling-of-Powder-Bed-Additive-Layer-Manufacturing-Technologies.pdf>

レニショーは、英国でよく知られる計測器や医療機器などのメーカーだ。積層製造装置も手掛け販売していて、金属造形用では英国唯一だ。レーザー溶融タイプであり、チタンやチタン合金の成型が可能で、骨の固定器具用などに各国の大学病院などで使用されている。実際、中国の大連大学医学部に装置が導入されていた。

#### 4. 2 米国での開発状況 America Makes<sup>6)</sup>

米国ではオバマ政権下において、2011年6月、省庁横断的かつ産学官が連携する取り組みである大統領イニシアティブ「先進製造パートナーシップ（AMP）」を立ち上げた。このプログラムでは①安全保障に係わる重要製品の国内製造回帰 ②先端材料の開発と普及にかかる時間の短縮 ③次世代ロボティクス ④製造過程におけるエネルギー使用効率の向上の四つの重点領域が設定され、この分野における先進製造関連の研究開発のプロジェクトに5億ドル以上が投資された。

2012年3月には、AMPを構成する具体的な官民パートナーシップ事業として「米国製造イノベーションネットワーク（NNMI）」プログラムを提案した。NNMIは、米国内での先進製造を促進する産学セクターのための製造研究基盤を構築することを目指しており、最大15の製造イノベーション研究所（IMIs）から構成される。この中の一つが、オハイオ州にある製造イノベーション推進機構（NAMII；National Additive Manufacturing Innovation Institute）であり、米国の大企業や大学からなるコンソーシアムなどが資金を出し、米国防総省や米航空宇宙局（NASA）なども高い関心を寄せて資金を提供している。

2013年2月12日のオバマ大統領（当時）の一般教書演説は、積層製造法を3Dプリントと表現する一つのきっかけになり、さらに一般にも広く知られるようになった。この中で、米国内でいかに雇用を創出するかに関し、インテルやアップルが米国に製造拠点を戻すということに並べて3Dプリントを取り上げ、NAMIIを設け、あらゆるものの作り方を変える可能性のある3Dプリントの技術を労働者が習得している」と述べた。大統領自らがこのような新しい技術に極めて強い期待、関心を持ち、米国は3Dプリントによるモノづくりにより製造業を革新して新しい産業、雇用を自

国に生み出そうとしており、国家レベルで強力に支援、推進している。

この組織は現在、America Makes という名称になっており、100 以上の企業や大学、研究機関、官庁などが広範なネットワークを形成している。この組織の所管官庁は国防総省であるとおり、航空用などのより実用的な部材開発が行われている。また、この組織の目標の一つは人材育成であり、学校などに積層製造装置を導入し、早くからその装置や製造方法に親しむことが目標とされている。

現在の金属関係での検討としては、金属粉末造形時のゆがみ予測と補正方法の研究、金属造形時の許容誤差と表面仕上げの自動終了の研究、金属積層造形用の新しい超低成本粉の開発、米国の鋳物産業における積層造形テクノロジーの加速などが行われているようだ。金属造形には欠かせない基礎的なデータや知見を得ることで、応用へのスピードを早めようとしている。

#### 4. 3 中国での開発状況

中国では 1980 年代後半から大学を中心に積層製造技術の研究を行っていた。主な大学は、いずれも国家重点大学である清華大学（北京市）、華中科技大学（湖北省）、西安交通大学（陝西省）などであり、現在も研究の中心を担っている。

金属造形についても 1995 年ごろから軍などを中心に、主に戦闘機向けチタン合金部品用として研究を開始していた。2000 年ごろからは西北工業大学でも研究を開始し、最近の報告ではエアバスと航空機用部品を共同開発し、チタン粉末のレーザー加工で部品製造に成功している。同大学材料学院の黄衛東教授の研究チームは、C919 の翼の重要部品、全長およそ 3m のチタン合金部材を生産した。C919 は中国が開発している小型民間旅客機であり、日本の MRJ（三菱リージョナルジェット）よりやや大型で、ボーイング 737 などと競合するものだ。

国家的な支援体制も積極的に推進している。2013 年 4 月、科学技術部は「国家ハイテク研究発展計画（863 計画）」に、積層製造（3D プリント）技術に対する支援政策を策定した。この時期は、オバマ米国大統領の一般教書演説の 2 か月後になる。方針としては、積層製造のコア技術と製造装置研究、開発ということだ。具体的に

は、航空宇宙分野や金型業界からのニーズに応じて、積層製造技術の課題を突破し、製造装置を研究開発して、関連する領域に用途を展開し、産業化を後押しするというものだ。研究内容としては、航空宇宙用大型部品のレーザー熔融成形技術の研究及び応用、金型製造向けの大型レーザー焼結成形装置の研究開発及び応用、材料開発や応力緩和などの処理装置の開発などだ。

中国の特徴は、車や航空機の骨格などの大きな部品を一気に作ろうということにある。そのため装置も大きくなる。また住宅を積層造形で作るというような取り組みもある。

中国のこの分野での課題は原料問題だ。南昌大学材料科学工程学院の黄筆武教授は、3D プリント業界（積層製造）の大きな問題点は材料の供給で、メーカーが少なく、殆どは輸入に依存し、積層製造の発展を制限していることをあげる。政府及び関係部門は支援政策を策定、サポートすることを呼びかけている。例えば、積層製造用の光硬化性樹脂については、中国内の研究開発は非常に難点があり、実験に必要な材料は海外輸入に依存している。

#### 4. 4 シンガポール及び台湾の開発状況

##### ①シンガポール

シンガポールは狭い国土に 500 万人以上が生活する都市国家だ。物流の拠点として、また IT 産業のさかんな地域として知られているが、工場での「ものづくり」については、あまり活発ではない。これはもともと国土が狭く、ある程度の土地や設備が必要な鋳造などの工場の立地には適さなかったからだ。しかし、積層造形については装置が入るだけの面積があればよく、また電気以外の大した用役や廃棄物処理も不要なのでビルの中で製造することも可能だ。シンガポールのような国土の狭い国には適していると言える。

このため、積層製造への取り組みは非常に活発であり、2014 年に 3,000 万ドルの予算で、理工系では国トップの南洋理工大学に積層製造センターを設立した。

生産ターゲットとしては、航空や宇宙用、自動車用などの金属製品は当然として、

チョコレートなどの食品や、タンパク質や臓器などのバイオ用にも展開を考えている。IT 産業との融合により、高付加価値製品の省エネルギー生産で新たな産業創出を目指している。

## ②台湾

台湾は液晶産業や半導体産業が盛んな国だ。世界最大級の半導体ファクトリーである TSMC は台湾の工業技術研究院（ITRI）のスピンアウト企業である。液晶の AUO などもある。このような企業は今までで 100 社以上に及んでいる。

ITRI は研究者を含めた職員が約 2 万名、特許は 1 万件以上を有する組織であり、電子情報通信、ナノテクノロジー材料、バイオメディカルテクノロジー、先進製造システム、環境エネルギーなどの分野で研究開発を行っている。

積層製造技術としては、樹脂用の 10 万円などの安価な装置の多くは台湾製だ。特許が切れた技術を活用している。一方、金属用については目立った企業はまだないようで、ITRI などの研究機関が中心になっている。台湾の経済部などはレーザー技術を活用した技術クラスターとして「レーザーバレー」の構築を計画している。その一環として、2012 年 7 月、ITRI 南分院に金属用装置を導入している。主に使用しているのはチタン合金粉末であり、医療用や装飾用などへの展開を目指している。

## 5. 日本の取り組み

### 5.1 国家プロジェクトでの巻き返し

各国で金属粉用の積層製造装置の開発が進み、応用も広がってきたが、樹脂用に比べまだまだ課題が多い。例えば造形精度が悪く、表面状態がざらざらしていて光沢がない。また、装置の価格が高いこと（通常1億円以上）、原料（金属粉）の種類に限られるなどだ。日本では2013年6月に、国の成長戦略の一つとして3Dプリンタによる製造技術の開発が取り上げられ、2014年度より本格的に国の支援事業がスタートした。現在の樹脂用プリンタの多くが欧米製であり、技術的にも高く、日本製のシェアは極めて小さいことからこの分野での開発は行わないことになった。そのためまだ改良余地が大きい金属粉用に絞って開発を進める方針が出された。2013年10月に、経済産業省は、3Dプリンタが生み出す付加価値と今後のものづくりの方向性を考察することを主目的とした「新ものづくり研究会」（座長：東京大学大学院経済学研究科 新宅純二郎教授）を開催し、報告書を2014年2月21日に公表した。この中で、「今後の付加製造（積層製造）では金属造形分野が有望だが、欧米に比べて立ち遅れているため、我が国の競争力強化のため早急な取り組みが必要」とされた。このような方針に基づき、2014年4月、技術研究組合「次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）」が発足した。樹脂造形の分野では欧米をはじめとした海外に大きく差をつけられており、また今後の開発余地も少ないが、金属造形であれば今後追いつき、追い越すことは十分可能という考え方だ。

### 5.2 TRAFAMの開発目標と体制

図14にTRAFAMが終了する予定の2019年度での最終目標を示す。造形速度を500cc/hと従来装置の約10倍を目指すというものだ。樹脂を使用する方式などでは高速造形の研究が進んでいるが、金属粉の造形ではなかなか難しいのが現実だ。また、造形サイズも最大1m角（高さは60cm）を目標とするなど意欲的な計画になっている。

**A: 次世代型産業用3Dプリンタ技術開発**  
 <技術開発終了時点の平成31年における目標値>

- 製品の精度：±20μm（従来精度の約5倍）
- 造形速度：500cc/h（従来速度の約10倍）
- 製造可能製品の大型化：造形可能範囲 1,000×1,000×600mm（従来の約3倍）
- 異種金属材料等の積層（傾斜構造）が可能
- 装置価格：5,000万円以下（従来装置の半額以下）
- 4つのタイプを試作（下表参照）

	光源	造形サイズ (mm)	造形速度 (cc/h)	寸法精度 (μm)
電子ビーム	EB	大型 (1000×1000×600)	500	50
電子ビーム	EB	小型 (300×300×600)	500	20
レーザービーム	LB	大型 (1000×1000×600)	500	20
レーザービーム (デジタル方式)	LB	小型 (300×300×300)	500	20

図 14 TRAFAM の技術開発目標 （技術研究組合発行のパンフレットより）

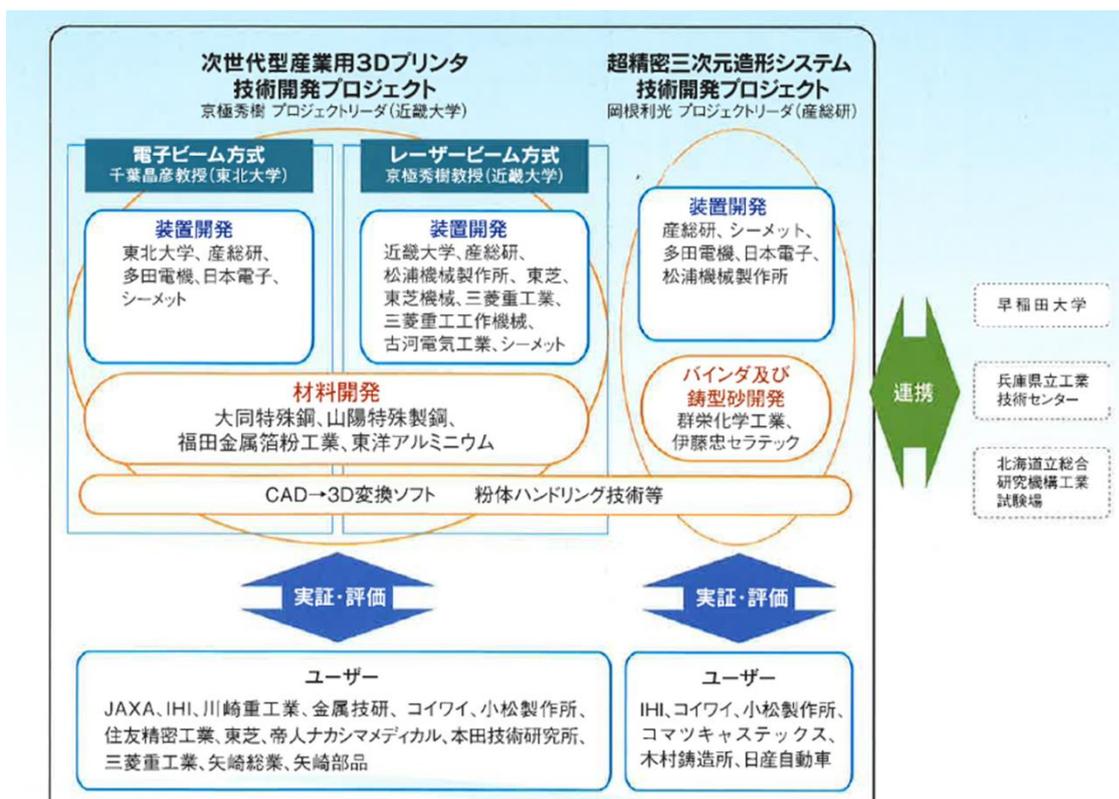


図 15 TRAFAM の開発体制 （技術研究組合発行のパンフレットより）

図 15 に TRAFAM の開発体制を示す。「次世代型産業用 3D プリンタ」は、近畿大学の京極教授がプロジェクトリーダーを務め、電子ビーム方式は東北大学、レーザービーム方式は近畿大学が担当する。材料である金属粉は金属粉メーカー 4 社が担当する。

「超精密三次元造形システム」では、鋳造のための砂型を形成する方式を開発する。金属粉の代わりに砂の粉体、レーザーの代わりにインクジェット方式で砂を固めるバインダを吹き付ける。この方法により砂型を作ろうというものだ、砂型使用後は焼成すればバインダを焼きとばし、再利用が可能だという。従来の砂型では難しかった精細な構造物が鋳造で製造可能になる。

### 5. 3 装置の開発状況

表 6 に中間目標設定時における TRAFAM 参加企業の達成状況を示す。三菱重工業と東芝の装置は、パウダーを供給しながらレーザー溶融するパウダーデポジション (PD) 方式で、いずれも造形速度はおよそ 360cc/h に達しており最終目標である 500cc/h にかなり近づいている。両社は最終仕上げ方式に違いがあり、三菱重工業は切削加工であり、東芝はレーザーによるポリッシング方式である。精度はやや切削が上回っている。一方パウダーベッド (PB) 方式での造形速度は、特に大型装置では低くとどまっている。粉をロールで広げる工程があり、その厚みを厚くすると精度が悪くなるというトレードオフの関係にあるためだ。造形速度と精度をいかに両立させるかは、かなり厳しそうだ。

表 6 TRAFAM 参加企業の装置開発状況（中間目標設定時）

	溶融方式	原料供給法	最大造形サイズ	造形速度(cc/h)	精度(μ m)	特徴	中間達成状況
三菱重工業	ファイバーレーザー (複層)	パウダーデポジション	□300×100	360	24	5軸積層造形+5軸切削加工	造形速度達成
東芝				359	30	レーザーポリッシング	造形速度達成
松浦機械製作所	レーザー	パウダーベッド	□600×400	68.5	50	レーザーミリング	造形速度未達
多田電機	電子ビーム		□500×600	100	78		造形速度未達
日本電子			□300×600	214.6	27	解析メーカーのノウハウ活用	造形速度未達
中間目標	大型		□500	250	50,100		
	小型		□300	50(三菱、東芝) 250	40、50		
最終目標	大型		□1,000×600	500	±20		
	小型		□300×600				

各種情報をもとに ARC 作成

#### 5. 4 金属原料粉の開発状況

金属造形法においては、パウダーデポジション (PD) 方式とパウダーベッド (PB) 方式の両方式とも原料形態は粉体である。言うまでもなく粉体の特性と供給体制、価格は金属積層製造において極めて重要なファクターである。

日本では粉体メーカーと積層造形の企業は違うことが一般的だが、米国の GE は、自ら粉体製造を手掛けているという情報がある。そういう意味では、GE では装置と原料が自社開発体制になっており、装置に対応した粉体を開発することでより強みを発揮できる状況である。

##### ①粉体組成

日本のプロジェクトにおいて開発対象にしている粉体は以下の種類である。

- ・鉄系：SUS316L、SUS304 など
- ・銅系：純銅 銅合金
- ・ニッケル系：ニッケル基超合金（インコネル 718）
- ・チタン系：Ti-6Al-4V

- ・アルミニウム系：Al-10Si-0.4Mg

鉄系は SUS 材組成であるため、錆など腐食に強く一般的な材料と言える。銅系は酸化しやすい材料であり粉体としては粉じん爆発性もあるが、不活性ガスや真空中での取り扱いで使用が可能になった。銅は伝熱性が良好なので冷却管などに使用される。ニッケル系やチタン系は高融点で、連続しての高温使用でも変質しにくいため、航空用エンジン部品などでの使用が検討されている。

一方、アルミニウム系は粉じん爆発の可能性があり、現在使用できるのは Al-10Si-0.4Mg である。これはアルミニウム鋳物用の原料であり、積層造形により金型が不要になることがメリットだ。用途としては、主に自動車用のシャーシー、ブレーキドラムやギヤボックス、シリンダヘッド、また航空機用でも高温耐性が不要な部分での使用が考えられ、実際の使用例としてはスーパーカーのシャーシーの製造がある。2016年に米国サンフランシスコの Divergent Microfactories が開発した「Blade」というスーパーカーで、積層製造法で製造されたアルミ素材のジョイントと、従来のカーボンパイプを結合してシャーシーを組み立てるものだ（図 16）。自動車のバンパー部品などへの応用も考えられている。また、修理用部品について、従来は多くの部品を準備し、場合によっては部品が無くなり修理不能ということもあったが、図面さえあれば一個でも作ることが可能になる。このような使用例も広がりそうだ。



図 16 スーパーカー「Blade」のジョイント

<http://www.divergent3d.com/>

しかし、使える金属粉原料に制約が多いことも課題だ。研究の成果で使用できる粉体が増えてきているが、使用できない例も多い。例えばマグネシウムなどはその例である。マグネシウムは生体内で溶解するため、医療用として骨の固定や、ステントとして使用した場合、取りだす手術がいらないという特長がある、しかも個人の体形や骨格、血管に合わせて成型することは重要で、積層製造ができればメリットは大きい。現在の技術ではマグネシウムやその合金の使用は困難だ。

## ②粉体形状

粉体の形状は球状であることが必要だ。パウダーデポジションでもパウダーベッドでも粉の流動性は非常に重要であり、また充填性等からも単分散よりは粒径分布を有することが好ましい。粉によっては粉の表面に潤滑処理をすることもあ。表 7 に現在 TRAFAM で開発中の粉の概要を示す。

表 7 TRAFAM 参加企業の金属粉開発状況

粉体メーカー	製造方法	粉の直径		粉末種類	特徴
		レーザー	電子ビーム		
大同特殊鋼	ガスアトマイズ法			Fe、Ni、Cr系合金	
福田金属箔工業	ガスアトマイズ法	20～35μ m	50～80μ m	Cu	修飾粉開発(セラミック系潤滑剤)
山陽特殊製鋼	真空溶解、不活性ガス(N <sub>2</sub> or Ar)アトマイズ			Fe、Ni、Co系合金	低酸素 高纯净度
東洋アルミニウム	ガスアトマイズ法	ファイン:22μ m、粗いタイプ:48μ m		Al-Si、Al-Fe、Al-Fe-Ni など	流動性の調整が可能

各種情報をもとに ARC 作成

製造方法としてはガスアトマイズ法が最適であり、各社もその方式を採用している。アトマイズ法の概要を図 17 (左) に示す。金属を坩堝で高温熔融させ、ノズルからガスとともに一気に噴出させる。金属は表面張力で球形になり、一気に冷却される。図 17 (右) にガスアトマイズ法で製造された金属粉の一例を示す。この製造

法では、通常粒径は広く分布するため分級により所望のサイズに調整する。また、積層製造での造形品が、いかにバルク金属の特性に近づくかも重要だ。そのためには装置の特性はもちろんだが、金属の純度や、粒径分布、形状、ボイドなどの有無も重要になってくる。

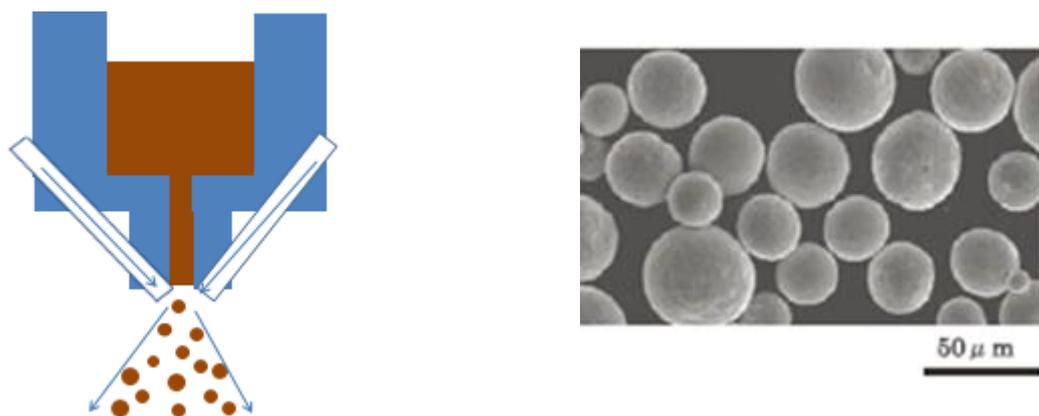


図 17 金属粉製造のガスアトマイズ法（左）と製造された球状粉の例（右）

各種情報をもとに ARC 作成

金属造形用粉体の製造は極めて重要である。GE のように大規模に積層造形で製造を計画している企業が装置メーカーを買収したが、原料の金属粉体についても今後は自前で生産しようというところが出てくると予想される。GE はすでに粉体メーカーを買収したという話もある。

## 6. 金属積層造形の新たな方法

レーザーや電子ビームによる製造方法では、その生産速度が TRAFAM の目標とする 500cc/h に達することは難しい状況だ。またレーザー源の価格もまだ高く、そのため装置も高い。そのような状況で、最近レーザーも電子ビームも使用しない新しい造形方法が開発された。

イスラエルの Xjet が開発した方法は、液体金属（液体に金属ナノ粒子を分散させたもの）を、インクジェットのように金属粉に吹き付けるものだ<sup>7)</sup>。金属粉は 300℃ 程度に加熱されており、付着した瞬間に液体は蒸発し、金属ナノ粒子はこの温度で溶融するようになっており、粉を結びつける接着剤やバインダーの役割をしている。その後、1000℃で焼結させることで成型体を得る方法だ。図 18 に工程を示す。

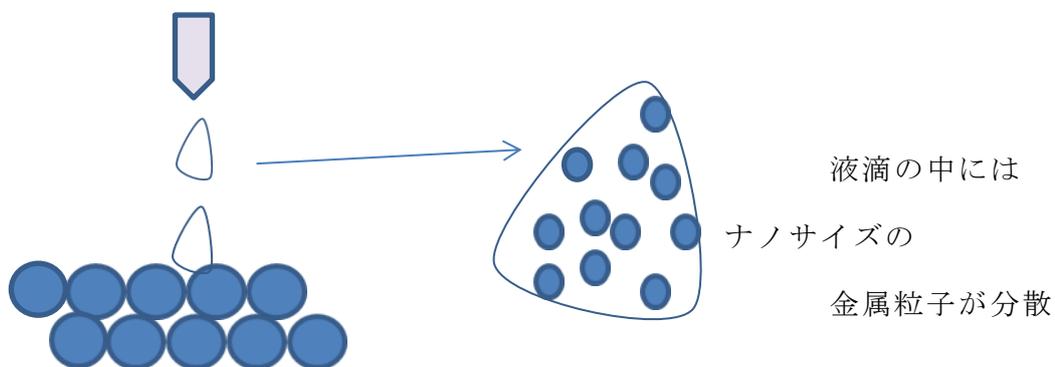


図 18 Xjet が開発した新しい金属造形の模式図

この方法が実現できれば、造形速度も速くなり装置も高価なレーザー源を使用しないことから低価格化が実現できると思われる。今後もさまざまな新技術が生まれることが期待される。

## 7. さいごに

積層造形（3D プリンタ）は、ドイツや米国などで開発、製品化が進んできた。世界の市場規模は、CMC リサーチの予測によると、2020 年には UV 硬化型樹脂系が 6,345 億円、熱可塑性樹脂系が 2,899 億円に対して、金属粉末系は 87 億円と予測されている<sup>8)</sup>。2016 年は 9 億円とのことなので 4 年間の成長率は約 10 倍になるという予測がなされている。そういう意味ではまだ金属積層造形は萌芽期と言える。

現在は航空機用など特殊な分野で製造実績が先行しているが、それほど数が出ないことと、部品点数が極めて多く、製造コストも高かったからだと言える。そのためまだ汎用的に一般の企業で気軽に使用できるという状況ではない。また、軍事用途向けが開発を加速してきたという側面もある。

今後は、自動車や家電などにおいて汎用的に使用するには、製造速度や造形精度の点で十分とは言えない。また、装置の価格も極めて高価であり、普及には課題が多い。そのため米国や中国、欧州などでは国をあげた研究が進んでいる。

日本では、装置の改良や原料開発をめざし、経済産業省が主導して TRAFAM が発足し、開発が進んでいる。目標は、現行装置の特性を大きく改良したものであり、これが実現できれば積層造形分野で世界の最先端にたち、主導することが可能になるだろう。

2015 年度（平成 27 年）末時点では各社試作機を完成させた段階であり、中間目標を達成したところだ。後半の 3 年間もほぼ半分が過ぎたが、今後最終目標達成にむけ向け装置改良が進み、より高精度化、より高速度造形、より大型装置の開発が期待される。しかし装置の低価格化も必要（目標は 5 千万円台）なため、ハードルは決して低くない。一方、原料金属粉の開発も進み、金属の種類拡大や合金化などで、多様化し、また高機能化してきた。

近年、医療用では骨折などの手術にマグネシウム製固定器具の使用が研究されている。個人に合わせた形状にするのは積層製造による造形が適している。しかしマグネシウムなど軽金属はレーザー光反射や粉塵爆発の可能性などで現状では使用が

難しい。今後、より多くの種類の金属が使用できるような技術開発が望まれる。

一方、レーザーや電子ビームを使用しない新たな工法も開発されてきている。例えばアーク溶接や液体金属を用いる方法などだ。これらの工法はコストを大幅に下げたり、生産性を格段に向上させたりする可能性がある。

また、金属粉同様にエンジニアリングプラスチックの粉体を使用して、レーザーで熔融する方式も検討が進んでいる。融点が高く強度も強いのでそのまま最終部品として使用することも可能になる。樹脂などを供給する企業にもチャンスは広がりそうだ。今話題の第四の産業革命と言われるインダストリー4.0は、世間の需要、ニーズをビッグデータから明らかにして、生産ラインを自由に組み替えて、最も安く高品質のものができるところから生産するというものだ。このような未来のものづくりにも非常に適した方法と言える。試作やホビー用からまさに、精密なものづくりのための小さな工場になる段階が今後くるようになることに期待したい。

## 参考資料

- 1) 萩原恒夫 「光造形樹脂の最近の開発動向」精密工学会誌、Vol.70、No.2、2004
- 2) 丸谷洋二他 「解説 3Dプリンター」オプトロニクス社、2014年5月
- 3) 全日空のホームページ <https://www.ana.co.jp/group/pr/787/pdf/20160826.pdf>
- 4) 名古屋造形大学 <http://www.nzu.ac.jp/lib/journal/files/2013/5.pdf>
- 5) <https://catapult.org.uk/>
- 6) <https://www.americamakes.us/>
- 7) [https://www.xjet3d.com/about\\_us.html](https://www.xjet3d.com/about_us.html)
- 8) 「3Dプリンタと造形材料の市場動向」「工業材料」日刊工業新聞社、2016年6月号

<本リポートのキーワード>

積層造形、3Dプリンタ、金属、レーザー、電子ビーム、熔融、ラティス構造、  
トポロジー最適化、航空機、宇宙、国家プロジェクト、粉末、ガスアトマイズ

(注) 本リポートは、ARCのホームページ (<https://www.asahi-kasei.co.jp/arc/index.html>) から検索できます。

このリポートの担当

主幹研究員 松田 英樹

お問い合わせ先 (03)3296-5250

E-mail ; [matsuda.hc@om.asahi-kasei.co.jp](mailto:matsuda.hc@om.asahi-kasei.co.jp)

注：内容の無断転載を禁じます。