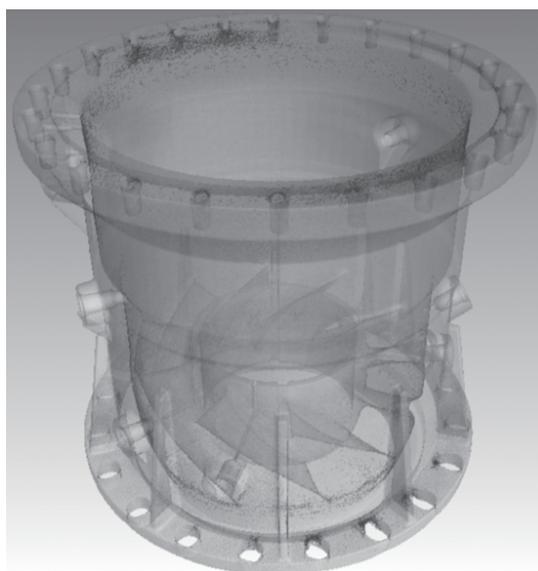
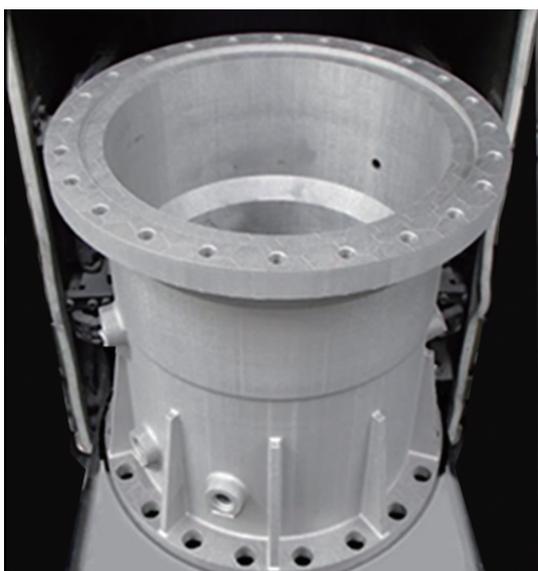


# 3D プリンターで ロケットエンジンを作る

## 最先端のものづくり技術，3D プリンターを使った ロケットエンジン部品の製造方法を開発

近年，急速に技術が進歩しており，ニュースで耳にすることも多い 3D プリンター。ある意味どんな形状の金属部品も作れてしまうこの技術を使って，究極の工業製品ともいえるロケットエンジンの製造方法に革新を起こす。

株式会社 IHI  
航空・宇宙・防衛事業領域  
技術開発センター 宇宙技術グループ 三原 礼



3D プリンターで製造したロケットエンジン部品

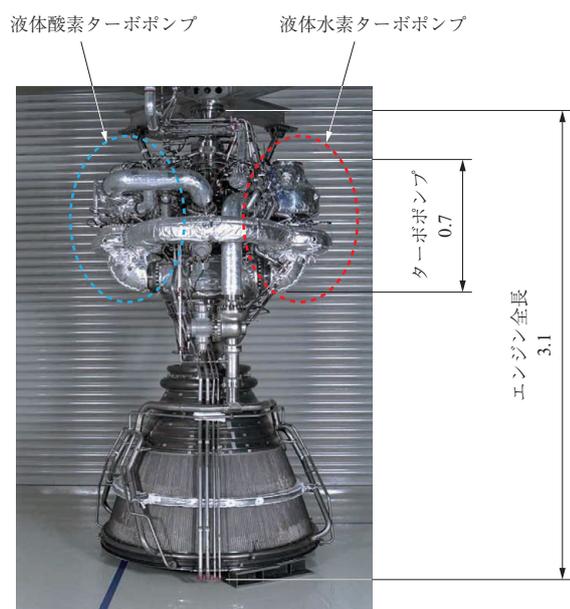
### 液体ロケットエンジンとターボポンプ

液体ロケットエンジンは，ロケット全体の構造質量を低減できる優位性から，通常はターボポンプと呼ばれる高速回転するポンプを用いる方式が採用されている。

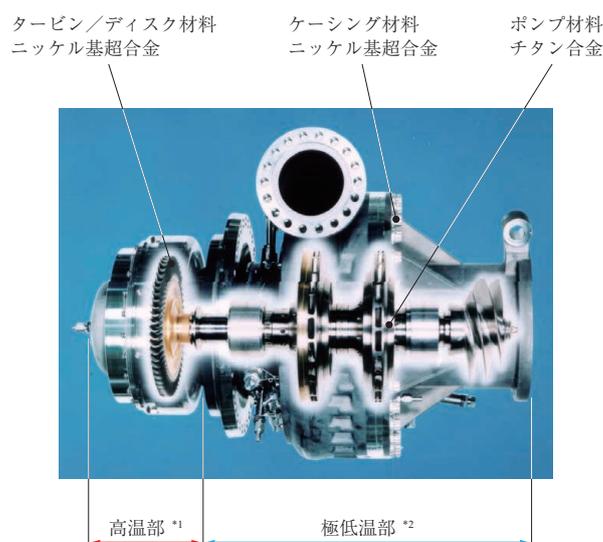
ターボポンプの機能は，燃焼ガスなどを用いてタービンを回転駆動することによって，タンク内の推進薬を昇圧してエンジン燃焼室に送り込むことにあるが，

その特殊性から幾つかの大きな特徴を有している。

H-IIA ロケットの第 1 段エンジン LE-7A を例にとると，ターボポンプでは約 530 l/s もの液体水素を吐出圧力約 28 MPa まで昇圧する必要があり，出力にして約 20 MW にも達する。その一方で，ロケットの打ち上げ能力に直結する軽量化要求は非常に厳しく，これらの大流量，高圧，大出力を得るための構造体の質量はわずか 200 kg に抑えられている。そのため，必然的にターボポンプが有するエネルギー密度は極端な



ロケットエンジン (LE-7A) (単位:m) ©JAXA



(注) \*1: 燃焼ガス, 約 700℃  
\*2: 液体水素, -253℃

ターボポンプ断面図と使用材料 ©JAXA

までに大きくならざるを得ない。

さらに、推進薬としては  $-253^{\circ}\text{C}$  という極低温流体の液体水素を採用する一方で、タービンを駆動する燃焼ガスの温度は約  $700^{\circ}\text{C}$  であり、同一部品の最大温度差が  $950^{\circ}\text{C}$  にも達する。

一方で、要求される寿命は短く、使い切り型の場合では作動時間はわずか 400 秒程度である。開発試験において確認する寿命も約 2 000 秒にすぎない。

ターボポンプは、400 秒というごくわずかな時間に、極限的な環境下で燃焼ガスの膨大なエネルギーを推進薬の圧力上昇に変換する機能を担う高速回転機械であり、そこに用いられる構造部品は文字どおり「極限設計」という言葉が当てはまる。本稿では、IHI が長年日本のロケットエンジン用に開発してきたこのターボポンプを、3D プリンターで作るということにフォーカスして話を進めたい。

## 従来の製造方法

右上にターボポンプの断面図と使用材料を示しているが、これまで IHI が開発してきたターボポンプ部品の材料は、その過酷な環境に耐え得るために高温、極低温の両方に耐えられるニッケル基超合金やチタン合金を主に使用している。

製造方法としては、鍛造素材と呼ばれる金属の塊から必要な形状に削り出すか、鋳造といって溶かした金

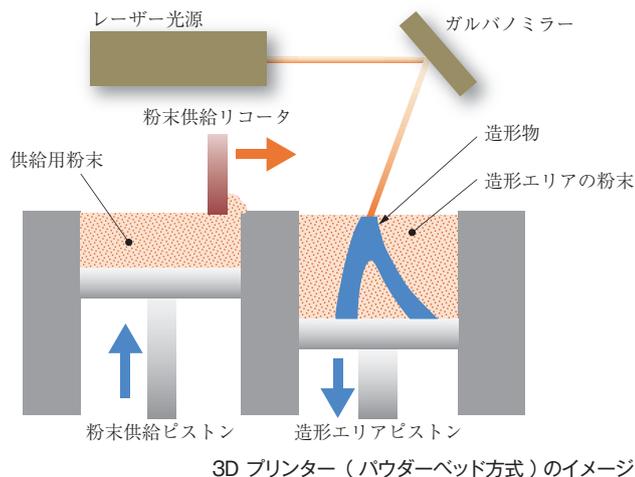
属を鋳型に流し込んで特定の形状に冷やして固めるといった二つの方法が主流である。

しかしながら、削り出す方法では刃物工具が届かない場所があると形状を作り出すことができない。鋳型に流し込む方法でも複雑な形状、特に部品内部が複雑な形状になっていると、欲しい形状の金属部品を得ることは非常に難しくなる。

そのため、構造部品として耐えなければならない強度要求に対して、「作れる」ことを前提に試行錯誤しながら最終的な部品形状を決めていくことになるが、製造方法の制約によって諦めざるを得ない形状が多い。極端に言えば、ターボポンプの部品というのは設計要求と製造制約との間で妥協に妥協を重ねて、たどり着いた形状になっていると言っても過言ではない。この状況を打破すると期待されるのが 3D プリンターによる製造である。

## 3D プリンターの特長

一口に 3D プリンターと言ってもさまざまな方式があるが、金属の精密部品に対しては製造できる精度などの関係から、現状はパウダーベッド (Powder Bed Fusion) と呼ばれる方式を採用している。イメージ図を次ページに示しているように、パウダーベッドとは金属の粉末を数十ミクロンの非常に薄い層に敷いたうえで、その層に該当する断面形状部分にレーザーを照



3D プリンター（パウダーベッド方式）のイメージ

射して一瞬のうちに溶融，再凝固させて薄い金属を一層ずつ造形する。それを部品の高さまで繰り返していく（積層していく）ことによって最終的な形状の部品を製造する技術である。

3D プリンターを用いた製造方法は従来にない特長をもっており，主なものとしては以下の三つが挙げられる。

### ① 製造できる形状の自由度が高い

どんな部品もある面で切断すると断面形状が定義できるため，薄い断面形状を一層ずつ金属で造形することで原理的にはどんな複雑な形状でも製造できる。例えば，中空の構造というようなこれまでの製造方法では考えられなかった形状も製造可能である。

### ② 少量生産の製造コストが低い

3D プリンターでは，部品を作るのに必要な分量の材料（金属粉末）しか使わないので，削り出した部分の金属を無駄にすることもない。使い捨ての型なども必要ないため，部品を1個だけ製造するとしても大量生産するときとほとんど変わらないコストで製造できる。

### ③ 製造期間の短縮

事前に準備する作業（金属の塊を調達したり，鋳型を作ったりしておくなど）が必要ないため，従来の製造方法では通常は1年，短くても半年は掛かる最初の部品製造に要する期間を，例えば1週間程度まで劇的に短くすることが可能になる。

上記の三つの特長だけでも非常に魅力的な製造方法であるが，さらに3Dプリンターが無数の可能性を持っていると言わしめる特長が，金属の組織を自在に制御できるということである。

従来の金属材料は，加熱して柔らかくしておいてたいて形状を整えたり，溶かして型に流し込み冷やして固めたりして作るため，冷却速度などで決まる金属組織を理想的なものにすることは難しく，当然一つの部品には同じ金属しか用いることができない。一方で，3Dプリンターは層ごとにわずかな領域で金属粉末を溶かして固めていくことの繰り返しであるため，狭い範囲で金属が固まるという現象を製造条件でうまく管理することができる。さらには使用する金属粉末も管理することで，一つの部品を異なる金属で製造するという夢のような部品を作ることも可能である。

## ロケットエンジンへの適用

ロケットエンジンの部品は極めて厳しい環境で使われるため極限設計を行っているが，一方で，従来の製造方法では製造制約から妥協を重ねて最終形状が決まっていることは先に述べた。

3Dプリンターを使うことによってその制約が取り除かれるということは，従来の金属加工法で諦めていた複雑な形状の設計，言い換えると極限環境に耐えながら限界まで軽量化する究極の設計が可能になることを意味している。

また，製造コストはもちろん，製造期間も劇的に短縮できることのメリットは大きく，一つのエンジンを開発するには少なくとも5年を要するのが現状だが，部品の製造が1週間でできてしまえば，エンジンの開発期間を1年以下にすることも視野に入ってくる。

## 3Dプリンターで実際にロケット部品を作る

3Dプリンターは，部品設計や開発期間に革新的な進歩をもたらす可能性をもっている。しかし残念ながら，ロケットエンジンのような極めて過酷な要求を満足しなければならぬ金属部品を製造するとなると，装置を買ってきて稼働させれば誰がやっても欲しいものが製造できてしまうというものではない。装置を使いこなすために，技術的に把握しておくべき事項は多い。

例えば，3Dプリンターでは部品が大きくなるほど，レーザー照射したときの熱がこもって変形が起きやすくなるため，精度の良い部品を作るにはこの変形挙動を抑えていく必要がある。そのこともあって，現時点

では世界的にも 3D プリンターの金属部品は 100 mm 以下の小型部品の事例が多い。

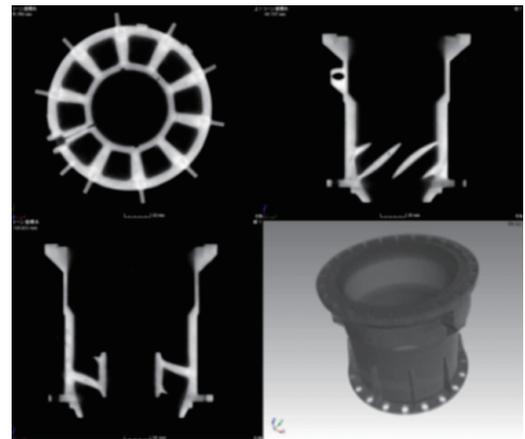
一方で、ターボポンプでは大きいもので 500 mm 以上のサイズがあるため、このような大型部品を、しかも寸法や強度などの厳しい要求を満足しつつ製造するという事は、3D プリンターとしては大きな挑戦である。そのため、IHI ではこれまでさまざまな試作を重ねてきており、3D プリンターで製造した部品を詳細に評価して、どのようにすれば要求を満足できるかということについて評価例を右図に示すように、数多くの知見を蓄積してきた。その結果、大型部品でも十分に製造できる見込みがあることを確認してきており、500 mm のサイズまで製造できることも検証している。これまでの試作評価の結果、従来の製品に対して製造コスト、試作期間を大幅に短縮できる見込みがあることが分かっており、3D プリンターがもつメリットを最大限に活用できることを確認した。

製造部品の品質を確保するという観点からは、原料となる金属粉末が品質に与える影響の評価や、3D プリンターで製造した後に必要となる表面仕上げ加工などのさまざまな後工程、最終的に品質を保証するための寸法精度や内部欠陥確認などの検査工程などについても、一つひとつ評価を進めながら開発を行っている。

また、金属が固まる現象を制御することで自在な金属組織を作れる可能性について先に述べた。製造部品の品質を管理するという観点からも現象を把握することは重要である。3D プリンターの製造過程における非常に微小な領域で生じる金属の溶融、再凝固という現象（工学的には非常に繊細で緻密な知識を要する現象であるが）を理解し、制御していくための研究開発についても IHI では積極的に取り組んでいる。

### 3D プリンターの可能性

従来の製造方法で得られない数多くのメリットをもつ 3D プリンターは、これまでの金属部品製造のあり方を根本的に変えてしまう、まさに革新的な技術である。IHI ではグループのものづくり力を結集し、各分野の専門家が集まって議論を重ねながら、3D プリンターで作った金属部品がどの程度の負荷で破壊するかという強度評価から、ミクロンレベルの微細な金属組織の評価に至るまで、数多くのデータを取得して物理



試作部品の X 線による評価例

的な現象を理解する作業を実施している。現在 3D プリンターの世界では、超大型に分類されるサイズの実際の部品の製造に成功する段階にまできている。

3D プリンターは無限の可能性をもっているが、世の中に登場してからまだ 40 年もたっていない若い技術でもある。従って、鍛造や鋳造など、それぞれ 1 000 年以上の歴史をもつほかの製造方法と異なり、どのような製造上のトラブルが生じるかについての知見の蓄積がほとんどないと言っても過言ではない。一方で、ロケットエンジンは絶対に失敗が許されない製品であることから、細心の注意を払いながら実機への適用に向けた開発作業を進めているところである。

### 今後の展開

試作評価を重ねてさらに詳細な知見を蓄積していくとともに、3D プリンターで実際のターボポンプの部品を製造してエンジン燃焼試験で検証したうえで、フライト品に適用していく計画である。

また、上記で得られた知見を踏まえて、ロケットエンジン部品以外の製品にも積極的に適用していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

航空・宇宙・防衛事業領域

宇宙開発事業推進部 営業グループ

電話 (03) 6204 - 7661

<https://www.ihi.co.jp/>