

## 解 説

## 3D プリンティング技術とこれからの日本のものづくりについて

山口 修一\*

(2014.2.27 受理)

## 3D Printing Technology and its Influence on Japanese Manufacturing Industry in Future

Shuichi YAMAGUCHI\*

Since last year, 3D printer has been a topic of conversation in Japan. Having touched on the history of 3D printing technology development, this article describes the principles and features of typical 3D printing methods in the mainstream of industry, and introduces the application fields of printed objects by each method. In those printing methods, inkjet technology which has been widely applied as printing method for characters and images is picked up, followed by explanations of the technical points on 3D printing which differs from 2-dimensional printing. Upon listing up the current issues of 3D printers, the future direction of technology development will be described. Finally, the proposal how to utilize 3D printer into manufacturing industry in Japan, and how to tackle the tasks for its implementation, will be addressed. It concludes that intensive R & D for inkjet technology where Japan has strength should be carried out, by one Japan regardless of company name, towards the era of "3D Printer 3.0".

**Keywords:** 3D-Printer, Additive manufacturing, Inkjet, Stereo lithography, Selective laser sintering

日本国内において、昨年来 3D プリンタが話題となっているが、本稿では 3D プリンティング技術発展の歴史に触れた上で、現在主流となっている代表的な 3D プリンティングの方式について原理や特徴を解説すると共に、各方式の造形物の適用分野について紹介する。続いて特にこれらの方式の中で、文字や画像の印刷技術として発展してきたインクジェット方式を取り上げ、2次元の印刷とは異なる3次元造形における技術的なポイントについて解説する。次に現状の課題について整理した上で、今後の技術開発の方向性について述べ、最後に日本のものづくりへの活用方法や日本としての取り組み方について述べる。日本は得意なインクジェット技術に集中して研究開発を行い、企業の垣根を越え総力を結集して、3D プリンタ 3.0 の時代に向かっていくべきであると考えます。

**キーワード:** 3D プリンタ, 付加製造, インクジェット, 光造形, 粉末焼結

## 1. はじめに

3D プリンタが様々なメディアで取り上げられ、ものづくりを身近なものにするツールとして関心が高まっている。3D プリンタについてはじめて一般的な書籍で扱ったのは、2012年5月に出版された拙著「インクジェット時代がきた!」<sup>1)</sup>であるが、それから約2年の間にこれほどまでに急速に3D プリンタが一般に認知されようとは著者である私自身も予想していなかった。

3D プリンタとはそもそもどのようなものを指すのかを、まずはじめに定義しておきたい。元来3D プリンタとはプリンタ

という言葉が示すように、3次元造形技術の中でも、ノズルや2次元の印刷に使われているインクジェットヘッドによって材料を堆積、積層する、價格的にも性能的にもローエンドの製品を指す言葉であった。しかしながら日本においては、個人でも買えるようになったローエンドの3D プリンタを各種のメディアが取り上げる中で、ハイエンドの装置や造形物にも触れ、これらも含めて造形装置全体に対してこの3D プリンタという表現を用いたため、今では3次元造形機全体を指す言葉として3D プリンタという表現が定着した感がある。一方で、これまで3次元造形技術を学術的に研究している研究者の間では、造形技術はAM (Additive Manufacturing) 技術、装置はAM装置と呼ばれている。この呼称は2009年1月のASTM国際会議で統一された。しかし一部の研究者以外はこの呼称を使っていないので、本稿では造形装置全体を表す言葉として3D プリンタを用い、「3D データを用いて、特定の材料を層状に積

\* 株式会社マイクロジェット 3D プリンター研究所  
〒399-0732 長野県塩尻市大門五番町 79-2

\* MICROJET Corporation 3D printer laboratory  
79-2, Gobantyou, Daimon, Shiojiri, Nagano, 399-0732, Japan

み上げて造形する装置」と定義し、パーソナル用途から産業用途までを含む広義の意味で使用する。

ここで、3次元造形技術の歴史について簡単に触れておく。3次元造形技術は1960年代後半には研究が始まったとされ、特許出願で見ると限りにおいては、Swainsonの特許<sup>2)</sup>が最初の特許とされているが、原理は今日実用化されているものとは大きく異なっている。今日の造形技術に最も近い特許は、光造形法の分野において1980年4月に日本で出願された名古屋市工業研究所の小玉秀男氏の特許<sup>3)</sup>が最初の特許といわれている。その後米国や日本国内で研究がなされ、1988年に光造形法による1号機の装置が米国の3D Systems社<sup>4)</sup>より発売された。

3次元造形技術は1990年代には迅速試作：Rapid Prototypingと呼ばれて、主に形状確認やデザイン検討のための試作品をつくる技術として利用されていたが、2000年代に入ると造形技術や造形材料の進歩により、試作品用途だけではなく、少量生産や短納期目的で実際に使える部品の製造に用いられるようになり、付加製造：Additive Manufacturingと呼ばれるようになった。

## 2. データ作成から3次元造形までの流れ

3Dプリンタの造形技術について説明する前に、まず3Dプリンタによる造形までの流れを見ていく。3次元の造形を行うためには、3次元データが必要であることは言うまでもない。しかしこのことが意外に忘れられている。3Dプリンタを購入すれば何でも作れるような誤った認識が一部にあるが、造形するための3Dデータがなければただの箱である。この3Dデータを作成する方法には、3DのCADソフトから作成する方法、3DのCGソフトから作成する方法、スキャナやCTスキャン等により造形したい物のデータを取り込む方法、写真から3Dデータを作成する方法等がある。

標準的な3Dプリンタでは造形データの形式にSTLフォーマットを採用している。STLとは「Stereo Lithography」の略称で、米国の3D Systems社<sup>4)</sup>が開発したファイル形式であるが、今では実質的に業界標準のファイル形式となっている。なお国内では「Standard Triangulated Language」とも呼ばれている<sup>5)</sup>。このSTLフォーマットは立体を三角形のポリゴンのみで表現するフォーマットであり、局面や曲線は存在しない。なお、STLフォーマットで作成されたデータがあれば3Dプリンタで必ず造形できるわけではないことに注意する必要がある。STLデータとして成立していても、そのデータに欠陥があれば3Dプリンタはエラーを表示し出力できない。たとえば、三角形のポリゴンが一部欠損して穴が空いていたり、ポリゴン1枚で作成されていて厚みがない形状等がこれに該当する。特にCG系のソフトでデータを作成した場合にこの問題が発生しやすい。

Fig. 1にデータの作成から造形までの流れを示す。CGソフトではSTLフォーマットのデータを作成できないものもあるが、その場合は一旦OBJフォーマットでデータを作成し、その後変換ソフトを用いてSTLフォーマット形式のデータに変換する。STLデータはプリンタドライバでスライスデータに変換された後、積層1段分のデータごとに印刷される。

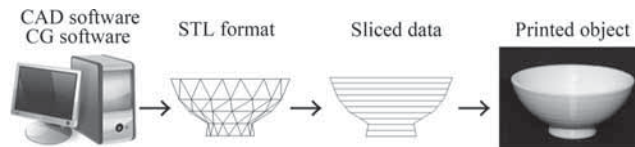


Fig. 1 Process workflow from data creation to fabrication.

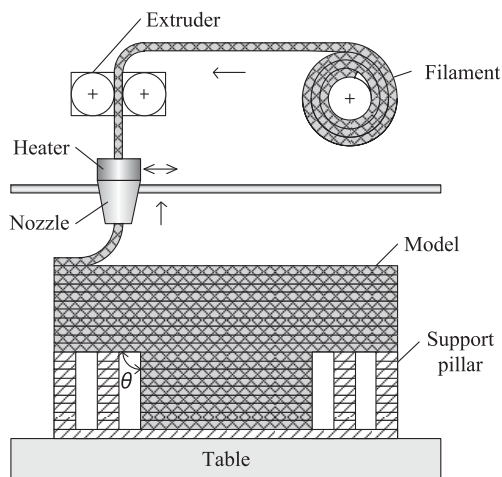


Fig. 2 Principle of fused deposition modeling.

## 3. 3D プリンティングの各種方式と造形物の用途

現在主流となっている造形方式には様々な方式があるが、代表的なものについて以下に造形原理を説明する。方式の呼称については定まったものはないが、本稿では代表的な造形方式を熱溶解積層法、光造形法、インクジェット粉末積層法、インクジェット光硬化積層法、粉末焼結法の5つに分類した。

### 3.1 熱溶解積層法

Fig. 2に熱溶解積層法の原理を示す。リールに巻かれたフィラメントと呼ばれる樹脂製の線材がエクストルーダと呼ばれる線材送り出し機構により、ノズルの中へ押し込まれる。ノズル部はホットエンドと呼ばれ、ノズル加熱用のヒータが搭載されている。このホットエンド内に押し込まれた線材はヒータによる加熱により溶融する。溶融した樹脂は新たに後方からエクストルーダにより押し込まれた固形のフィラメントの体積分だけノズル先端から押し出される。ソフトクリームを作るときのようにノズルから溶融樹脂を押し出し、造形物のスライスされた断面のパターンをベクトル的にプリントしていく。積層厚みは50~300 $\mu\text{m}$ 程度である。1段の積層が終わるとノズル部が上方に1段分移動し、次のスライス断面を造形し、これを次々と繰り返していく。押し出しスピードは50~150 mm/sec程度であり、外観部を形成する最外周部を造形する場合は形状精度を出すために、内部の造形よりもスピードを遅くして造形する。また、造形品質を上げるために、造形テーブルを加熱したり、造形物をファンで冷却するなど熱に対する対策がとられている。

オーバーハング部の造形はサポート構造を形成した上にモデル部を造形するが、このサポート部形成には二つの方法があ

る。安価なモデルではモデル材と同じ材料を使ってサポート部が形成される。作業者が簡単にむしり取れるような弱い構造のピラー等で形成される。高級機ではモデル材とは異なる材料で造形できるように、専用ノズルを搭載している。なお、Fig. 2のオーバーハング部の角度 $\theta$ が $\theta > 135^\circ$ の場合にはサポート部は基本的には不要である。

フィラメントの材料としてはABS樹脂やポリ乳酸のPLA (Polylactic acid) 樹脂が用いられるが、用途によって使い分けられている。ABSは強度や耐液性が高いが、熱により変形しやすい。一方PLAは造形による変形が少ないが耐水性はない。

本方式はFDM (Fused Deposition Modeling) と呼ばれているが、FDMは米国Stratasys社<sup>6)</sup>の米国における登録商標である。

この方式の造形装置としては、日本国内では本体が7万円から50万円程度までのパーソナル用と150万円から数千万円程度までのプロフェッショナル用の二つの製品群がある。プロフェッショナル用では、造形エリアが広く且つ造形部を外装で覆い内部の温度制御を精密に制御している。また、熔融樹脂の送り出しやテーブルの制御を精密に行っている。

用途的にはデザインや設計における構造や機構の確認用途、工業系や美術系の高校や大学、専門学校における教育用途、治工具、玩具の製作、試作用途等がある。

3Dプリンタがこれほどまでに話題になった背景には、この方式の低価格化が関係している。国内でもオリジナルの3Dプリンタが多くの小規模なベンチャー企業から販売されているが、この背景を理解しておく必要がある。短期間に低価格の製品が開発できる理由としては、RepRap<sup>7)</sup>コミュニティの存在がある。これはイギリスのバース大学のAdrian Bowyer教授によって、自己増殖可能な3Dプリンタを普及させることを目的としたオープンソース・ハードウェアプロジェクトであり、2005年に立ち上げられた。自己増殖とは3Dプリンタの部品自身を3Dプリンタで作るという意味である。低価格のパーソナル用3Dプリンタの開発企業はその殆どが、このプロジェクトと何らかの関係があり、基本技術の拠り所としている。

### 3.2 光造形法

光造形法は液状の光硬化性樹脂に紫外線レーザーを照射して硬化させ、3次元構造物のスライス断面を一層ごとに形成していく方法である。Fig. 3に原理図を示す。光硬化樹脂の満たされた容器の液中に造形テーブルが設置されており、このテーブルの上方に造形1層分の液が薄く広がっている。この1層分の液に向かって紫外線レーザーが固化させたい部分にのみ照射される。実際にはテーブルとの剥離を容易にするため、除去可能なサポート部を形成した上に実際のモデルを造形する。この方法でオーバーハング部を形成する場合は、細いピラー構造等の除去可能なサポート構造物をモデル部下部に形成し、その上にモデル部を造形する。大型の装置では、液容器が大きくなるため、この容器に満たす液材料費だけで1000万円を超える場合もある。この問題を解決した方式をFig. 4に示す。この方式では光を容器の透明な底部からあて、造形部を1層形成するごとに引き上げていく吊り上げ方式である。これにより容器の中

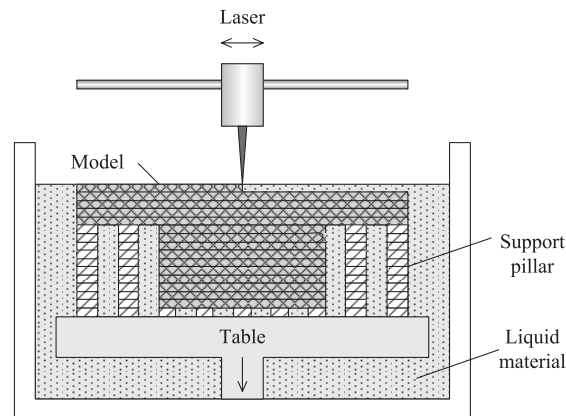


Fig. 3 Principle of stereo lithography.

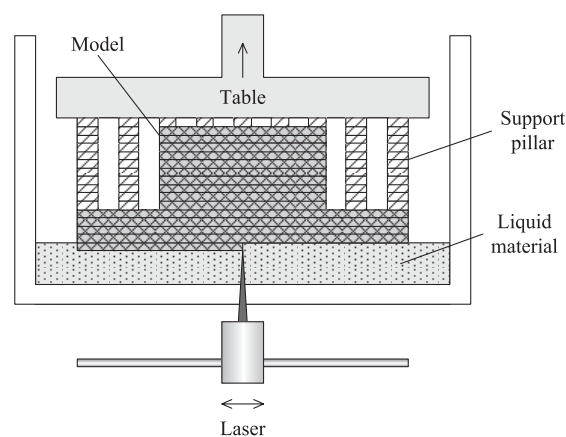


Fig. 4 Principle of stereo lithography2 (Lift-up method).

に満たしておく液を劇的に減らすことができ、イニシャルコストを抑えることが可能となる。

光硬化性樹脂は、反応形態からラジカル重合型とカチオン重合型に分類される。ラジカル重合型は主にアクリル系樹脂である。カチオン重合型はエポキシ樹脂を主成分としている。エポキシは体積収縮率が低く、変形しにくいので高精度な造形が可能である。造形後に硬度が十分でない場合は紫外線照射や熱硬化によるポストキュアを行う。造形精度は現状の各種3Dプリンタでは最も高く、0.05 mm程度の精度を実現している。

用途はデザインや設計形状の確認用や試作品の製作、ジュエリーや玩具のマスターモデル、歯科技工に使用する歯型、歯列矯正用マウスピースの試作用途等がある。

### 3.3 インクジェット粉末積層法

Fig. 5は石膏を使ったインクジェット粉末積層法の原理を示す。平らな造形テーブルの上に造形材料の石膏粉末を積み上げ、それをローラやスクレーパで指定高さとなるように石膏の粉を掻き取り、薄い石膏の粉末層を形成する。その上方からインクジェットヘッド1によりモデル部に着色用インクとヘッド2により粉末の固着用バイндаを吐出させ、粉末を着色し固める。1層印刷後は粉末をその上に盛り上げ、ローラ等を使って再び指定高さとなるように粉末をかきとり、その後再び、イ



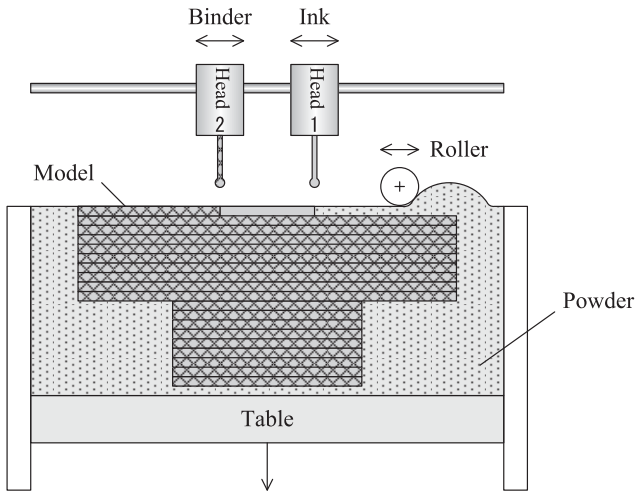


Fig. 5 Principle of inkjet powder-based 3D printing.

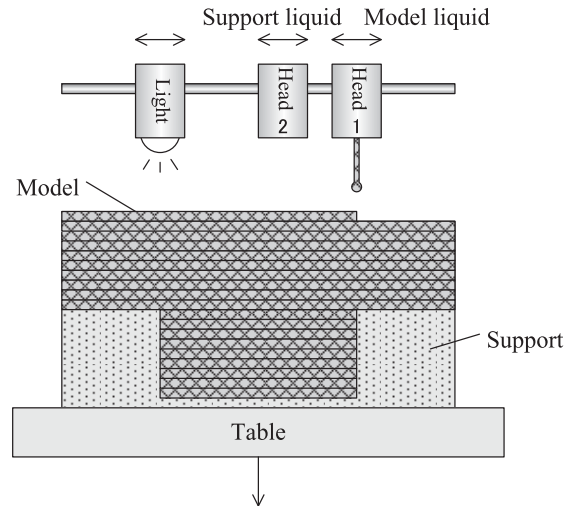


Fig. 6 Principle of inkjet photopolymer 3D printing.

ンクとバインダを吐出する。これを繰り返しながら立体を造形していく。1回の積層高さは0.1 mm程度である。オーバーハング部は未固着の粉末がサポート材の役目を果たすため、サポート材は不要である。造形終了後は石膏粉末の中より造形物を掘り出し、表面に付いた粉を除去した後、強度を持たせるために、硬化剤等を表面にコーティングする。また表面をなめらかな面に仕上げる場合は塗料をコーティングする場合もある。市販のこの方式の3Dプリンタには現状サーマルジェットヘッドが用いられているが、インクやバインダー液は水性の溶液であり、ピエゾヘッドでも吐出可能である。この手法の特徴は液を吐出するノズルが多数形成されているため、造形速度が比較的高速なことと着色した造形物を作れることである。

用途としてはフィギュアや商品見本、住宅模型、ジオラマの製作等着色をいかした用途となっている。この粉末積層法では粉末の材料を石膏以外の別の材料に変えることにより、新しい様々な用途が生まれている。たとえばリン酸三カルシウムの粉末を使った人工骨の作製例が報告されている<sup>8)</sup>。また、鋳物の鋳型作製にもこの手法が使われている。粉末としては珪砂が用いられ、固着用バインダで型を造形していく。また、最近では石膏の代わりに樹脂の粉末を使ってフルカラーで造形できる製品も開発されている<sup>9)</sup>。

### 3.4 インクジェット光硬化積層法

Fig. 6にインクジェット光硬化積層法の原理を示す。これは大判プリンタで行われている紫外線硬化インクによる印刷と同じように、紫外線硬化インクをヘッド1により塗布し、その直後に紫外線ランプによりインクを硬化させる。これを繰り返し、高さ方向に硬化したインクを積み上げていく。光源としてはメタルハライドランプやキセノンランプが使われている。一回の積層厚みは最も高精細なもので16 μm程度であり、1 mmの高さを積層するのに30分から1時間を要する。従って生産性は高くないが、造形エリア内に配置できる数だけ同時に造形できるため、1個あたりの造形時間は実質的には短くなる。3Dプリンティングでは同じものをたくさん作ることが本来の目的ではないため、造形面内や造形エリア空間内にどれだけ多

くの種類の異なるものをたくさん配置して、効率よく作るかも重要なコストダウン要因となる。オーバーハング部の造形には、サポート部が必要であり、モデル材のヘッド1とは別のサポート材専用のヘッド2が搭載されている。モデル材の材料としてはアクリル系の材料が主流となっているが、靱性を増すために一部ウレタン系の材料が含まれているものもある。これ以外にはゴムライクやABSライクの材料がラインナップされている。何々ライクという表現の材料が多いが、これは裏を返せばその材料そのものではないということであり、あくまでも弾力性や強度といった材料としての機能性を実現しているに留まる。

新しい技術としては、複数の材料を複数のインクジェットヘッドより吐出させて、一つの断面内に任意の比率や任意の形状で材料を塗り分けながら、これを更に厚み方向にも変化させ、傾斜材料からなる構造物を構築していく技術が注目されている。この技術を応用する事により、従来の樹脂成形技術では作る事のできなかった、複雑な構造や機能を持った部品が作製可能となる。サポート材は各社各様の材料が使われており、詳しくは後述する。

この方式の用途としては主に玩具や工業用製品の形状確認や機能確認用の試作が中心となっており、寸法精度も0.5 mm程度が目安となっているため、精密な部品や数 mm以下の小型の部品にはまだ使用できない。

### 3.5 粉末焼結法

これはインクジェット粉末造形法と類似しており、Fig. 7に示すようにインクジェットヘッドによるバインダ液の吐出の代わりに、レーザー光を金属や樹脂の粉末に照射して粉末を焼結させ、冷却による固化の後に、その焼結面の上に再び粉末をローラやリコーター等により積層し焼結を繰り返す方法である。レーザー光としては炭酸ガスレーザーやYbファイバーレーザーが用いられ、照射部の温度は最高2000℃程度まで制御可能である。ビーム径は0.1~0.5 mm程度であり、造形物の外形部と内部で使い分けている場合もある。レーザー光の走査スピードは1~10 m/sec程度である。造形エリアはN<sub>2</sub>やAr雰囲気下におかれ

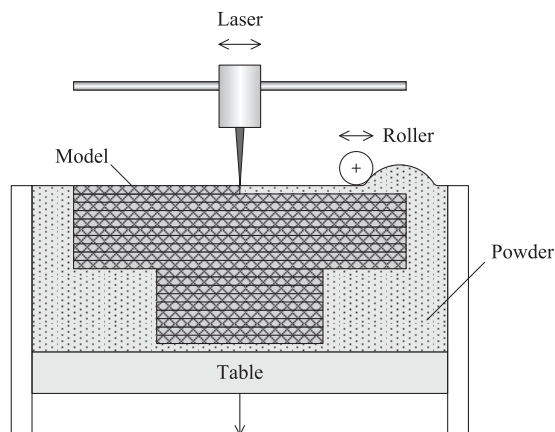


Fig. 7 Principle of laser sintering.

る。1回の積層厚みは20~200 $\mu\text{m}$ 程度である。造形後の表面は凹凸がありざらついているため、後処理で研磨等が必要になる。なお、表面状態を改善するため、10層積層するごとに外形部をエンドミルにより加工し、端面を平滑に仕上げる手法も実用化されている<sup>10)</sup>。これらのレーザを用いた粉末焼結法の開発はヨーロッパを中心として行われてきたが、特にドイツが国を挙げて研究開発に取り組んできたこともあり、ドイツに有力なメーカーが多く存在している。

またレーザの代わりに電子ビームを用いた装置もある<sup>11)</sup>。電子ビームを用いる場合造形は真空下にした後、Heガスを導入して行われる。電子ビームを用いるメリットは高密度の金属部品が作製可能なことや不純物の混入や材料劣化が少ないこと、そして高融点合金に適応可能なこと、造形スピードが速いこと等である。

インクジェット粉末積層法ではサポート材が不要であることを説明したが、同じ粉末による積層法である粉末焼結法においてもサポート構造が不要と考えられるが、実際は熱による変形を抑えるために、造形後に除去可能なピラー構造を持ったサポート構造体を設ける場合がある。

材料は純チタンやTi-6Al-4V合金、Co-Cr合金、ステンレス鋼、型材として用いられるマルエージング鋼などが使われる。金属粉の粒径は主に10~100 $\mu\text{m}$ 程度であり、ガスアトマイズ法等により製造される。積層造形では積層部が剥離しやすく引っ張り強度が弱くなるのではないかと懸念もあるが、実際の引っ張り強度試験等のデータからは、鋳造以上で鍛造にせまる程度の強度があると言われている。密度は真空中で造形を行う電子ビーム法では99.9%が実現できている。これらの造形方法は金属粉末だけでなく樹脂の粉末にも適用できる。ABS、PEEK、ナイロン、ポリスチレン等の樹脂も造形が可能である。

金属の造形用途は主にタービンプレードやジェットエンジン部品、燃料噴射装置、樹脂金型、ダイカスト金型、チタン製人工歯根、人工関節、人工骨、自動車の補修部品、玩具や文具等が実用化されている。樹脂の造形用途としては高負荷環境におけるブラケットや配管ダクト等に用いられている。用途は金属を中心に多岐にわたるが、両方式共に装置が1億円前後と高価

であり、造形速度がまだ十分ではなく、造形に用いる粉末材料が1kg当たり数万円と高価であることが課題である。

### 3.6 まとめ

これまで見てきたように、各種の3Dプリンタによる造形では、造形できる材料にも制限があり、その結果造形できる物にもそれぞれ特徴があった。材料の持つ強度や耐熱性、透明性といった機能、造形精度、カラー着色の可否等によりその用途は多岐にわたる。

3Dプリンタによる用途展開が最も成功している分野を1つあげるとすれば、それは歯科用途である。3Dプリンタにより作製されたインプラントのチタン製人工歯根が海外では既に実用化されており、粉末焼結法により製造されている。また、クラウンと呼ばれる、虫歯の治療などで歯を削った後に被せる、金属やセラミック、レジン等からなる歯冠補綴物の型を作製する際に光造形法が用いられ、歯列矯正に用いられるマウスピースの製造に用いられている。

3D造形に限らず、デジタルデータによりものを製造するデジタルファブリケーション技術が、多品種少量生産に適している事は衆知の事実であるが、中でもこの3Dプリンタによる造形技術は人体に関わる様々な用途のパーツを製造する際に適している。それは一人として同じ人間が存在しないため、人体のある部位に関係したパーツを作製する場合、全てカスタムメイドになるからである。海外の3Dプリンタ関連のビジネスパーソンの口から良く発せられる言葉に「Mass Custom Manufacturing」という言葉があるが、医療や歯科の分野はまさにこの言葉に合致した分野と言える。有望な市場を見つける際に頭の片隅に入れておきたい言葉である。

## 4. インクジェット法による造形技術のポイント及び造形材料

様々な造形方法がある中で、ここでは画像印刷技術と最も関係が深いインクジェット技術に焦点を当て、技術的に少し掘り下げてみたい。

インクジェット法による3Dプリンティングの特徴は、2次元の平面に印刷するインクジェットプリンティングを厚み方向に対して繰り返し行い、積層していく工程にある。インクジェット法では2種類の方式があることは既に述べたが、それぞれの方式の造形ポイントについて特徴的な部分を解説する。

まず、粉末積層法の場合であるが、最も重要な点は粉末を均一な薄い層で薄く広げることである。積層の厚みは0.1mm程度であり、石膏を使ったタイプではこの石膏の粉に特徴がある。Fig. 8に石膏粉のSEM写真を示す。平均粒径は約40 $\mu\text{m}$ 程度であり大きさはばらついている。均一な薄い層を形成する目的でローラやスクレーパを用いて粉末を平らにならす工程があり、粉を掻くスピードやローラへの回転の与え方が重要である。また、粒径の他に粉末の吸湿状態も平滑な面を形成する際に重要なパラメーターとなる。

次にインクジェット光硬化積層法の特徴について述べる。造形物本体を構成するモデル材料には多くの場合アクリル系の紫外線硬化樹脂が用いられ、硬化させるための光源としてはメタルハライドランプやキセノンランプが使われている。液が着滴

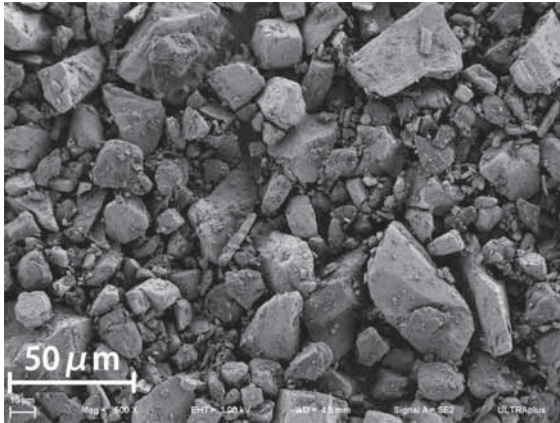


Fig. 8 SEM picture of plaster powder.

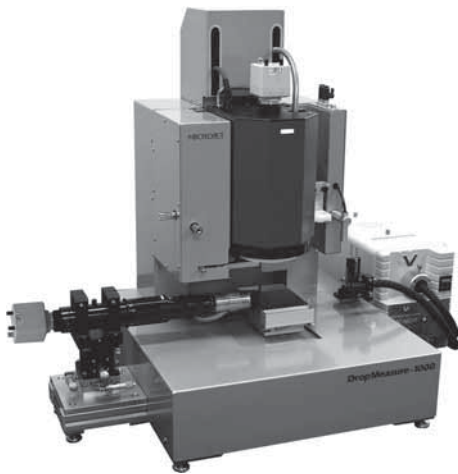


Fig. 9 Impact droplet analysis device (DropMeasure-1000).

してから紫外線が照射されて硬化するまでには、通常数 100 msec 程度の時間差がある。その為、着滴した液は硬化するまでの間に濡れ広がるために、100 μm レベルの高精度な形状を造形することは難しい。しかしながらこの点においても技術の進歩が見られる。具体的には常温では固体のインクを加熱して液体化して吐出させ、着滴と同時に固化させ、その後に紫外線で本硬化させる手法である。いわばワックスタイプの紫外線硬化インクと言える。通常の紫外線硬化インクとワックスインクで、どの程度濡れによる広がりには差異があるか、着滴を真上と真横から同時に高速度カメラで撮影可能な弊社の着滴解析装置 DropMeasure-1000 (Fig. 9) を用いて実験を試みたので、そのデータを Fig. 10 と Fig. 11 示す。Fig. 10 は着滴の様子を真上から高速度カメラで撮影した写真である。真横からも撮影可能であるが、ここでは省略した。Fig. 11 は着滴ドット径の経時変化のグラフである。着滴面は無処理のスライドガラス面であり、液滴体積は共に 50 pl である。このデータによると通常の紫外線硬化インクでは、100 msec を超えて液は濡れ広がり続けるのに対して、ワックスインクでは 1 msec までに硬化し、径はその後変化していない。このことから微細な構造物や精度の良い構造物を作る目的にはワックスタイプのモデル材料

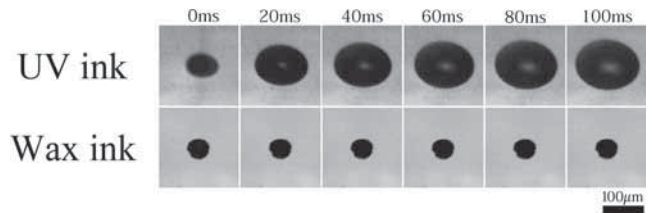


Fig. 10 Welty spreading status right after impact of droplet (UV ink, Wax ink).

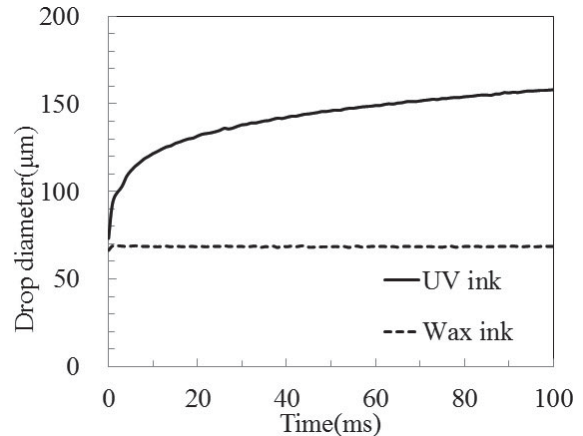


Fig. 11 Reaction movement of dot diameter after ink impact.

が適していると言える。

一方この紫外線硬化積層方式においては、Fig. 6 に図示するように、オーバーハング部の形状を造形するために、そのオーバーハング部位の下方にサポート材を用いてモデル材を支える構造物を形成する必要がある。サポート材の材質は除去方法と関係しており、どのような手段によりサポート部を除去するかによって材料が異なり、この方式では主にアクリル系の樹脂やワックスインクがサポート材として使われている。サポート材は造形後に除去する必要があるが、その除去方法により作業効率が左右される。ここにも 3D プリンターメーカー各社で差異が見られる。サポート材除去方法としては水の噴射圧によってサポート材を除去する方法、熱によって溶解させて除去する方法、水に浸漬することによって溶出させ除去する方法等が採用されている。どの方法にも一長一短があるため、造形物の形状や複雑さ、大きさにより最適なサポート材の除去方法を備えた装置を選択する必要がある。

## 5. 3D プリンターの課題と今後の技術開発の方向性

3D プリンティング技術はここ 20 年来大きな進歩を遂げてきたが、依然多くの課題が残されている。課題には造形技術そのものに関するものや関連技術であるスキャナ技術やソフトウェアに関するものがあるが、ここでは造形技術に絞って、他の関連技術については割愛する。また 3D プリンタが普及することによって新たな社会問題も生み出しているため、それらについても述べてみたい。

造形技術の課題としては、各方式に共通した課題もあれば、



個別の方式特有のものもある。各方式に共通した課題としては造形スピードと造形精度の問題がある。3Dプリンタの用途が多品種少量生産とは言え、業務効率を考えれば、今の生産性ではまだ十分とは言えない。数cm程度の大きさのものを作るのに数時間程度かかっている今の生産性では、付加価値の高いものの製造にしか使えない。また造形精度を向上させるにはインクジェット液滴の微小化やレーザーのスポット径の微小化が必要であるが、これは造形スピードの面から見ればマイナスの要因であり、造形精度と造形スピードを両立させることは容易ではない。これを克服すべくインクジェットヘッドの複数搭載や照射レーザーの複数搭載が進められているが、一方でこれは装置の高価格化をもたらしている。

個別には、熱溶解積層法の課題は、特に造形スピードと積層縞の低減である。インクジェット粉末積層法における課題は、造形精度や造形表面状態の改善、粉末材料やバインダー液の低価格化である。インクジェット光硬化積層法の課題は、造形スピードと造形材料の多様化、そして液材料の低価格化である。光造形の課題は、造形スピードと材料の低価格化そして装置本体の低価格化、カラー化等である。粉末焼結法の課題は、造形スピードや造形精度、そして材料や装置本体の低価格化である。

次に3Dプリンタが普及することによって、新たな社会問題も出はじめていますのでそれらについて述べる。具体的には著作権の問題や危険物の製造問題、製造物責任についてである。3Dプリンタは究極の複製技術とも言える。データさえあれば、同じものを何個でも複製することが可能となる。データの複製や伝達は容易である。音楽や映像の著作権同様、今後は3Dデータの著作権についても保護が必要となっていくであろう。また、ネットでも一時話題となったが、銃のデータが公開され、多数のダウンロードが行われた。銃以外にも危険なものは多数存在するため、これらについても何らかの規制措置が必要となって来るであろう。さらには3Dプリンタで作ったものに欠陥があって事故を引き起こした場合、責任の所在は造形データを作ったメーカーなのか、造形装置メーカーなのか、その装置を使って製造したメーカーなのかといった問題も出てくる。いずれにしても最先端の技術に法律が追いついて来ないのは世の常である。これからの議論や法整備が待たれるところである。

## 6. 3Dプリンティングがもたらすものづくりや社会への影響

3Dプリンティングがもたらすものづくりや社会への影響についてここで述べたい。3D印刷技術の本質を整理してみると、下記のようなことが言える。

従来の製造業で価値と考えられていたものが価値を失う。たとえば組立の工程である。3Dプリンティングでは部品と部品の間にサポート材を介して隙間を作る事ができるため、Fig. 12(a)のチェーンのように形状が閉じたものを閉じたままで組み合わせて製造できる。物体の内部の空間に別の物体を同時に作る事も可能である。Fig. 12(b)に示すように3個の部品からなるスパナを組み上がった状態で造形できる。このように組立

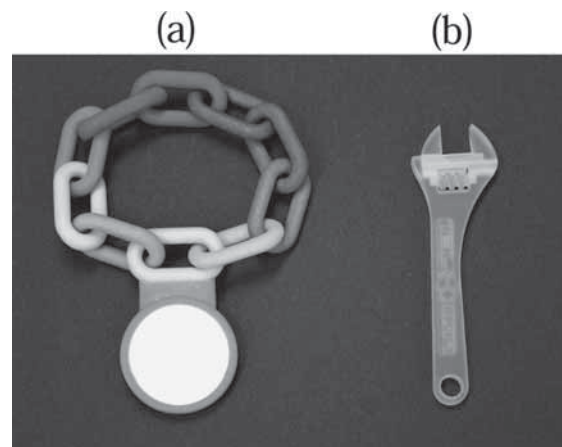


Fig. 12 Integrated fabrication by inkjet 3D printing method (Chain & Spanner).

が不要となるだけでなく、従来は組立が不可能だった複雑なものも組み立てることもできるようになる。

また、これまで切削で加工する場合、形状が複雑なものは切削に時間がかかるためコストもかかっていたが、3Dプリンティングでは複雑な形状だからといって時間がかかるわけではない。インクジェットプリンタで写真を印刷するとき、一面青一色の単純な海の写真と色鮮やかな熱帯魚がたくさん映った海中の複雑な写真とで印刷時間が変わらないのと同様である。造形コストは材料の量やプリンタの稼働時間で決まる。つまり造形物の高さや体積がコスト要因であって、これまでのような加工の複雑さはコスト要因ではなくなる。そして加工や組立の工程の価値が減り、データそのものの価値が高まる。その結果、目的にあった3Dデータを作れる設計者やデザイナーがこれまで以上に重要な人材となり、これらの人材を育成すべく教育分野にも変化が出てくるであろう。

これ以外にも3Dプリンティングを活用したものづくりでは、必要な時に必要な量だけ作れるので在庫が不要になる。また、これまで製造地から消費地まで作ったものを運ぶ必要があったが、消費地の近くに3Dプリンタがあってそこで製造すれば、途中の運搬工程が不要となるため、物流にも大きな変化が生じるであろう。海外製品もデータをダウンロードして、近くの3Dプリントショップに持ち込み、その場で造形してもらうようなことも現実のものになるであろう。

話は変わるが、米国のオバマ大統領は3Dプリンタでアメリカの製造業を復活させると2013年2月の一般教書演説で述べたとされているが、これはあながちリップサービスとは言いきれない。具体的には3Dプリンタの研究機関NAMII (National Additive Manufacturing Innovation Institute) を設立して技術開発を強化すると共に、全米の学校1000箇所にも3Dプリンタやレーザーカッター等のデジタル工作機械を完備した工作室を開設するプログラムを開始した。なお、2013年10月にこのNAMIIはAmerican Makesにリブランドされた。この施策の本質はものづくりの楽しさを子供たちに体験してもらい、ものづくりに関心を持つ子供を増やし、後にこれらの子供たちが成長したときに新しい産業や企業を生み出す起業家を育成する

プログラムとも言える。パソコンやゲーム好きの子供たちが成長して大人になり、コンピュータ社会やネット社会で様々な産業を生み出したように、これから何年か先の社会においても、3D プリンタ好きの子供たちが、やがて新しいものづくり企業やサービスを生み出す原動力になっていることは想像に難くない。

翻って、日本では今後この3D プリンティング技術とどのように関わっていけば良いのであろうか。筆者は日本が今後注力すべきテクノロジーはインクジェット技術による3D プリンティング技術と光造形技術であると考え、その理由はいくつかあるが、まず1番目の理由として、これらの基礎となる技術は既に日本にあり、それらを強化する事により、世界のトップランナーになる事が可能であると考えからである。特にインクジェット技術は2次元のプリンティング技術として日本は世界をリードしており、これに積層技術を組み合わせることは、それほど難しいことではない。また特許的に見ても2次元プリンタの技術は3次元プリンタにおいても、そのベースとなる部分に使われていると考えられるため、3次元の特許に対抗しうると考えられる。2番目の理由としては両方式共に材料の多様性が製品やサービスの多様性を生み出していきと考えられ、材料技術でも強みを持っている日本の技術が活かせる分野と言えるからである。特にモデル材料やサポート材料の開発は、今後の3D プリンティング開発で最も重要な鍵を握る技術と言える。2次元のインクジェットのプリンタ用インク開発と同様に、これらの材料開発にはインクジェットヘッドとのマッチングやシステムの最適化が求められる。そしてプリントドエレクトロニクス分野と同様に、材料開発の実験や評価には専用の装置が必要となる。

筆者は、3D プリンタの研究開発を促進すべく、3D プリンタ研究所<sup>12)</sup>を社内に設立し、特にインクジェットによる3D プリンタや材料研究の開発支援を始めた。また、3D プリンタ用



Fig. 13 Device to evaluate inkjet materials for 3D printer (MateriART-3D).

材料評価装置「MateriART-3D」(Fig. 13)を開発したので、これについて最後に簡単に触れておく。この装置はインクジェット粉末積層法とインクジェット光硬化積層法の両方式に対応可能で、どちらか一方の方式を選択可能である。インクジェット飛翔液滴を観察しながら、また液滴の特性を定量化しながら、液材に合わせてヘッドの駆動条件を最適な値に設定できることはもちろん、積層の厚みや液滴サイズ等様々なパラメータを可変しての造形実験が可能である。このような装置を利用して、日本独自の材料開発や造形手法の開発が進展することを望んでいる。

## 7. おわりに

3D プリンタの業界に長年携わってきた方に言わせると、今回は3回目の3D プリンタブームだということである。しかしこの言葉に私は違和感を覚える。その理由はブームという言葉のニュアンスは、盛り上がった後に過ぎ去っていくものを表しているからである。今回は3D プリンタのブームではない。明らかに新しいトレンドにはいったと筆者は考えている。それは3D プリンタについて関心を持っている個人や企業の数が過去のブームの時の比ではなく、非常に多くの企業が関心を持ち、実際に人、物、お金、時間がこの分野に投入されはじめていることを目の当たりにしているからである。

Rapid Prototyping と呼ばれた時代を3D プリンタ 1.0、そして Additive Manufacturing と呼ばれた時代を3D プリンタ 2.0 するならば、アート作品やファッション作品までも創り出すことが可能になった現在は、Creative Manufacturing の時代であり3D プリンタ 3.0 が到来したと言えるのではないだろうか。

今からちょうど30年ぐらい前、秋葉原でマイコンキットが売られていた時代に、今日のコンピュータ、ネット社会を予想した人はどれだけいたであろうか。こんなおもちゃのようなキットはコンピュータではないとっていたあの時代と、こんな筋だらけの精度の悪いものしか作れない3D プリンタは使えないと言っている今の時代が、全く同じ風景に見えるのは私だけではないはずである。

これまで見てきたように、現在はものづくりが大きく変化する時代の節目である。日本のものづくりが世界に再び存在感を示すには、この3D プリンティング分野は最も可能性を持った分野と言える。多品種少量、高付加価値品の製造技術こそが、日本の目指すべきこれからのものづくりの方向であると考えられるからである。先行する米国やドイツに対抗していくには、集中すべき分野を決め、その分野に国や企業が総力を挙げて取り組むべきである。また、この3D プリンティング技術で出遅れてしまったことを事実として認め、各企業がアライアンスを組んで企業の垣根を越えて技術を持ち寄り、最先端の研究開発に本気で取り組むべき時が来ていると言える。本稿がそれらの行動を起こすヒントやきっかけとなれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Shuichi Yamaguchi, Tatsuya Yamaji, "Inkjet jidai ga kita!", Kobunsha Co., Ltd., (2012), [in Japanese].
- 2) W.K. Swainson, U.S. patent application US 05/165,042, (1977).



- 3) H. Kodama, Japanese patent application S56-144478, (1981).
- 4) 3D Systems, Inc., <http://www.3dsystems.com/> (accessed 2014-2-25).
- 5) Daisuke Ichimi, "Nyumon rittaikeijyou no rapid prototyping", Ohmsha, Ltd., (2013), [in Japanese].
- 6) Stratasys Ltd., <http://www.stratasys.co.jp/> (accessed 2014-2-25).
- 7) RepRap. org, <http://reprap.org/wiki/RepRap> (accessed 2014-2-25).
- 8) Ung-il Chung, "Inkjet printer ni yoru jinkou kotsu no sakusei", ISJ Thecnical Seminars No.117, (2013), pp.49-64 [in Japanese].
- 9) ProJet® 4500, <http://www.3dsystems.com/3d-printers/professional/projet-4500> (accessed 2014-2-25).
- 10) LUMEX Avance-25, <http://www.matsuura.co.jp/japan/contents/products/lumex.html> (accessed 2014-2-25).
- 11) Arcam AB, <http://www.arcam.com/> (accessed 2014-2-25).
- 12) 3D printer laboratory, <http://www.3d-printerlab.com/> (accessed 2014-2-25).



### 山口 修一

1983年東京工業大学大学院理工学研究科機械工学専攻を修了。1983年エプソン株式会社（現セイコーエプソン株式会社）に入社。インクジェットヘッドの開発を担当。その後インクシステム、インク開発にも従事。1997年マイクロジェット社設立。代表取締役。2013年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程機械工学専攻を修了。工学博士。1995年度日本画像学会技術賞受賞「Mach-Jet技術の開発」。