

「3Dプリンタ最前線」

応
般

～技術概要，情報産業へのインパクト，最新動向～

後編

山口修一（(株)マイクロジェット／(株)3Dプリンター総研）

本稿は前後編2回にわたり3Dプリンタの最前線について解説している。前編では3Dプリンタ技術，特にさまざまな3次元物体の造形方法の概要を説明した¹⁾。今回，後編ではインクジェット法の詳細，3Dデータの作成方法，3Dプリンタの今後の技術開発の方向性について解説する。

インクジェット法による造形技術のポイントおよび造形材料

前回紹介したさまざまな造形方法の中で，今後最も発展が期待される，インクジェット技術に焦点を当てて，技術的に少し掘り下げ，その詳細を解説する。

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前編で述べたが，ここではそれぞれの方式の特徴を詳しく解説する。

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。

図-1に石膏粉の電子顕微鏡写真を示す。平均粒径は約40 μm 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ーやスクレーパー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ーへの回転の与え方が重要である。また，粒径のほかに粉末の吸湿状態も均一な面を形成する際に重要な項目であり，粉の保管管理には注意が必要である。

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。そのため，着滴した液は硬化するまでの間に濡れ広がり，10 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いえる。通常のUV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着滴解析装置 Drop-Measure-1000 (図-2)を用いて実験を試みたので，そのデータを図-3と図-4に示す。図-3は着滴の

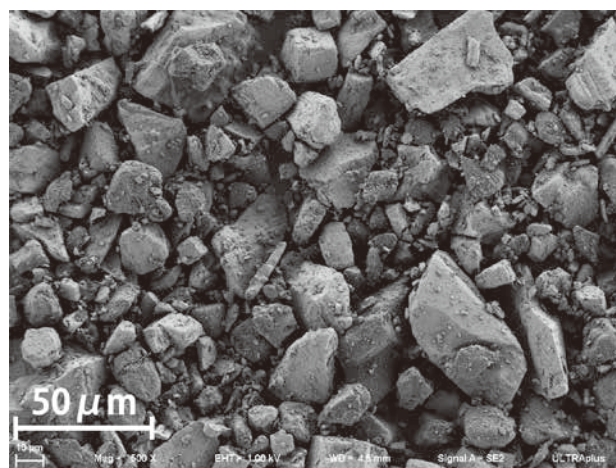


図-1 石膏粒子の電子顕微鏡写真

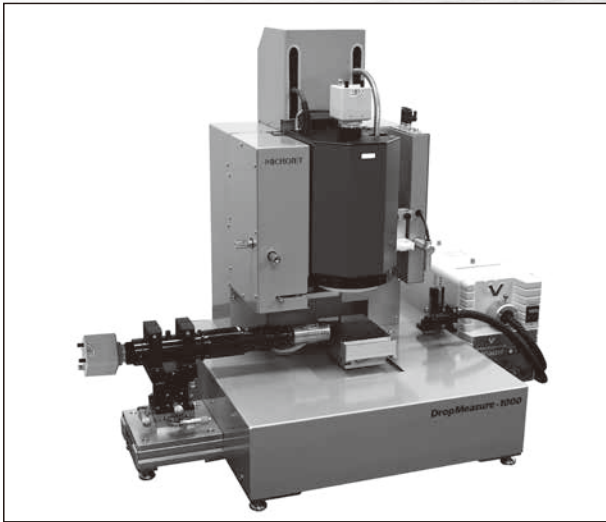


図-2 着滴解析装置 (DropMeasure-1000)

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。図-4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、液滴サイズはともに50plである。このデータによると通常のUV硬化インクでは100msec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1msec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が適しているといえる。

一方上記の光硬化積層法においては、図-5に図示するように、オーバーハング部位（下に支えがない部位）を持つ構造物を造形する場合、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る。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プリンタメーカー各社の差異が見られる。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

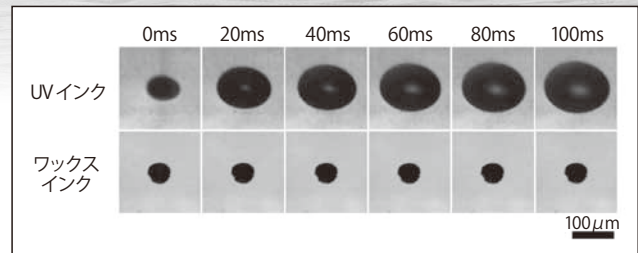


図-3 着滴解析装置による着滴の画像 (UVインク, ワックスインク)

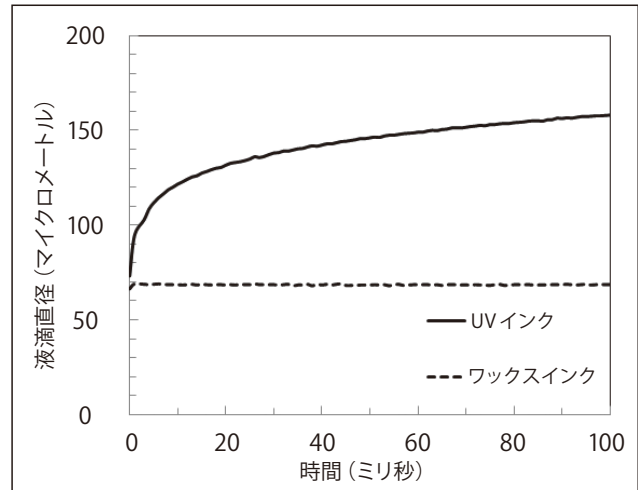


図-4 着滴ドット径の時間による変化

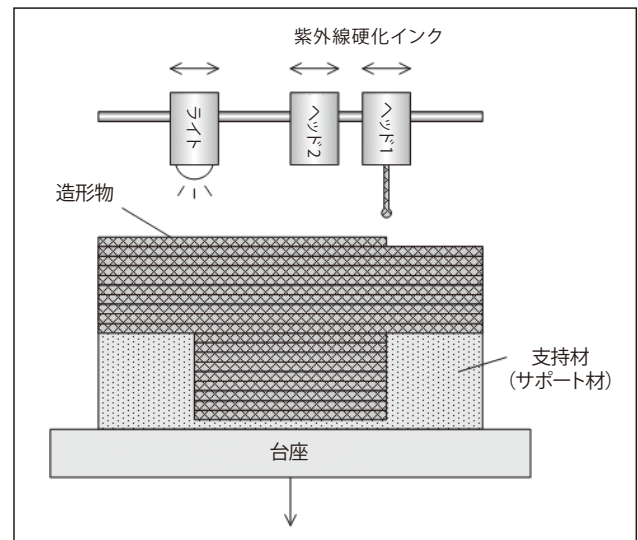


図-5 インクジェット光硬化積層法

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。

表-1に前記の2種類のインクジェット積層法の比較を示す。

	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
材料	石膏粉末, 珪砂, セラミック粉 金属粉, 砂糖, スターチ	アクリル系の紫外線硬化樹脂
層の厚み	100 μm	15 ~ 30 μm
着色	可能	可能
固めるための手段	バインダー液による粉末の固着	UV光による硬化

表-1 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比較

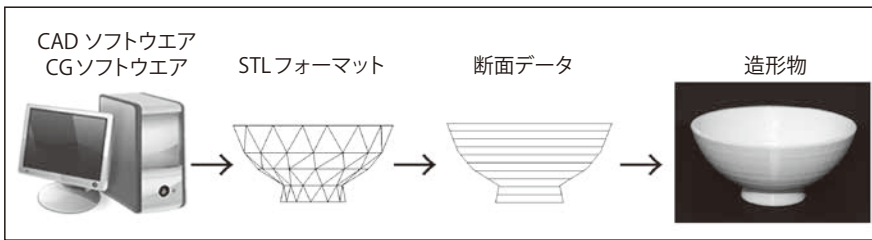


図-6 3Dデータ作成から3Dプリントまでの処理の流れ

3Dデータの作成方法

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ということは、意外に忘れがちである。3Dプリンタを購入すれば何でも作れるように錯覚しがちだが3Dデータがなければただの箱である。3Dデータを作成するには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。いずれにしても、3Dプリンタが真価を発揮するには情報技術の役割はきわめて大きい。

3Dプリンタの造形データ形式も発達途上である。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²⁾が開発したファイル形式である。これ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³⁾。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、曲面や曲線は存在しない。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。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かったりする場合がこれに該当する。3Dプリンタで用いることを前提としていないソフトウェアではこのような欠陥の確認は自動的に行われない。特にCG系のソフトでデータを作成した場合にポリゴンの欠陥が発生しやすい。

図-6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。その場合はいったんWavefront 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。このように、CGソフトから3Dプリンタによる造形までのソフトウェアやデータの扱いにはまだ煩雑な部分が残されており、改良の余地がある。

3D プリンタ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り、ほか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の
で、それらについても述べてみたい。

■ 造形技術の課題

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いえ、業務効率を考えれば、今の生産性はまだ十分とはいえない。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化や照射レーザーの複数化が進められているが、一方でこれは装置の高価格をもたらしている。

上記の共通した課題以外については個別に次のような課題がある。熱溶解積層法の課題は特に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材料や装置本体の低価格化である。

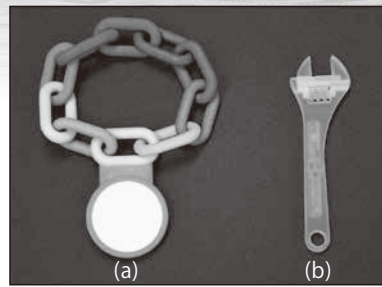


図-7 インクジェット法による組み上がり部品の直接生成

■ 3D プリンティングの社会的問題と対策

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始めている。具体的には著作権の問題や危険物の製造問題、製造物責任の問題が考えられるだろう⁴⁾。3D プリンタは究極の複製技術ともいえる。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が、これらについても今までは容易に作れなかったようなものが作れるようになるため、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人なのか、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こ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。

■ ものづくりへの影響

3D プリンタはものづくり自体に変化をもたらすことが考えられる。3D プリンタ技術の本質を整理してみると、下記のようなことがいえる。

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ことができるため、図-7 (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ことも可能である。図-7 (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。つまり3Dプリンタによる製造では、これまで必要であった「組立」という工程を不要とすることができるのである。

単に組立が不要となるだけではない。従来の方法では、非常に多くの部品や複雑な構造は、部品を作っても組立が不可能だった。3Dプリンタではこのような従来の方法では組立が不可能な複雑な構造であっても、最初から組みあがった形を造形することで実現できるようになる。

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で印刷時間が変わらないのと同様である。

3Dプリンタでは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の主な要因であって、これまでのような加工の複雑さはコストの主な要因ではなくなる。

以上をまとめると、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。

さらにサプライチェーンにも変化が起こり得る。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部品を作ることができる。したがって作り置き在庫が不要になる。従来は修理用の部品などは、修理を敏速に行うため全国に在庫を持つ必要があった。全国に、また全世界にくまなく配置する必要があるから、実際に消費されなくても必要な在庫の量はぼう大となりコストも高くなる。3Dプリンタを利用すればこのような大量な無駄な在庫を持つ必要がなくなる。

また、これまで製造地から消費地まで作ったものを敏速に運ぶ必要があった。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おうようなことも現実のものになるであろう。

■情報産業と3Dプリンタ

これまでは3Dプリンタというハードウェアを中心に見てきたが、コンピュータと同様ハードウェアが進化する過程ではソフトウェアも大きく進化する。3Dデータが存在して初めて造形が可能となるため3Dデータの作成は重要であるが、データ作成のソフトウェアはまだ使いやすいとはいいがたく、今後さらなる改良や開発が必要である。そしていかに効率よく無駄を省いて製造するかについてもソフトウェアが果たす役割は大きい。たとえば、複数の造形物をいかに多く造形エリア内にレイアウトするかや材料の使用量を最も少なくする最適な配置を決めるか等は、ソフトウェアがこなす機能である。

さらに今後工場内で多数の3Dプリンタが稼働するようになれば、これらをシステムとして最適に稼働させ、生産時間やコストを最小化する統合化されたシステムの開発が必要となる。また、ネットワークを介して世界に分散する3Dプリンタの稼働状況を監視し、メンテナンスのタイミングや生産量、在庫数を管理するようなシステムも必要となる。

このような状況下では、ソフトウェア開発者といえども、常に3Dプリンタの動向や最新技術について情報を入手するとともに、実際に3Dプリンタが使われる現場についての理解も必要となるであろう。

■3Dプリンタで競争力を増す米国の製造業

米国のObama大統領は2013年2月の一般教書演説で、3Dプリンタでアメリカの製造業を復活させると述べたといわれている。この政策は掛け声だけでなく内容も伴って着実に実行されつつあるように思える。3Dプリンタの研究機関NAMII (National



図-8 3Dプリンタ用材料評価装置 (MateriART-3D)

Additive Manufacturing Innovation Institute) を設立して技術開発を強化するとともに、全米の学校1,000カ所に3Dプリンタやレーザ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(名称変更)された。この施策の本質はものづくりの楽しさを子どもたちに体験してもらい、ものづくりに関心を持つ子どもを増やし、後にこれらの子ども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いえる。パソコンやゲーム好きの子ども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さまざま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プリンタ好きの子どもたちが、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くと期待されている。

■日本はどう取り組むべきか

日本は今後この3Dプリンティング技術とどのようにかか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であると考え、その理由はいくつかあるが、まずこの基礎となる技術はすでに日本にあり、それらを強化することにより、世界のトップランナーになることが可能である

と考えるからである。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得ると考えられる。2番目の理由としては両方式とも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くと考えられ、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いえるからである。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いえる。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。

インクジェット方式の3Dプリンタの研究開発では、吐出材料に合わせてインクジェットヘッドの駆動波形等のチューニングを効率化できる装置が求められていることから、筆者はそのための装置として材料評価装置「MateriART-3D」(図-8)を開発した。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している。実際の材料開発にはインクジェット飛翔液滴状態の観察や液材に合わせてヘッドの駆動条件を最適な値に設定すること、さらには積層の厚みや液滴サイズ等さまざまなパラメータを可変しての造形実験が必要である。このような装置を利用して、今後有望なインクジェット分野で日本独自の材料開発や造形手法の研究開発が進展することが望まれる。

3D プリンタをブームに終わらせないために

現在、3Dプリンタは急速に用途を拡大しつつ発展している。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 とするならば、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 が到来したといえるのではないだろうか。

立体造形という広義の 3D プリンタには実はより長い歴史があることは前編で述べた。3D プリンタに長年携わってきた方にいわせると、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「ブーム」という言葉に私は不満である。ブームという言葉は、来てすぐに去っていくものを表す言葉だ。今回の 3D プリンタの拡大はブームではなく、明らかに新しいトレンドだ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、非常に多くの企業に関心を持ち、実際に人、物、お金、時間がこの分野に投入され始めていることを目のあたりにしているからである。

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いていたあの時代と、こんなに時間がかかって精度の悪いものしか作れない 3D プリンタは使えないとっている今の時代がまったく同じ風景に見えるのは私だけではないはずである。

3D プリンタの拡大がものづくりに与える影響は非常に大きなものであり、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いえる。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は事実として認め、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ときが来ているといえる。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) 山口修一：3D 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、日本画像学会誌, Vol.53, No.2, pp.119-127 (2014).
- 2) 3D Systems, Inc., <http://www.3dsystems.com/> (accessed 2014-2-25).
- 3) 一見大輔：入門 立体形状のラピッドプロトタイプング, オーム社 (2013).
- 4) 須川賢洋：3D プリンタの社会的問題と法政策の一提言, 情報処理, Vol.55, No.7, pp.634-635 (July 2014).
(2014 年 11 月 18 日受付)

山口修一 yamaguchi2@microjet.co.jp

1983 年東京工業大学理工学研究科修了。同年エプソン (株) に入社。1997 年マイクロジェット社設立。2013 年大阪大学工学研究科博士後期課程修了。工学博士。2014 年 (株) 3D プリンター総研設立。3D プリンターの研究開発に従事。