

解 説

3D プリント材料の最新動向と今後の展望

萩原 恒夫*

(2015.6.19 受理)

Current Status of 3D Printing Material and its Future Aspect

Tsuneo HAGIWARA*

Additive manufacturing systems were invented about 30 years ago, and their products have been used in the field of various industries for utilizing our life, such as design, production and life science. Reentry the systems are called “3D-Printer” to give evolutionary technology for future production. In this paper the current status of the materials for these systems were reviewed. The properties of the 3D object, output of the 3D printer, is not enough level as common industrial products. Development and enhancement of the materials for each 3D printer is strongly needed to become common technology.

Keywords: Additive manufacturing, 3D Printer, Personal 3D Printer, 3D Object, Stereolithography, FDM, Powder bed fusion, Material jetting

三次元積層造形装置は、30余年前に発明され、形状確認や試作を中心に製造業で使われてきた。最近、これら装置は3Dプリンタと呼ばれることが多くなると共に、将来の製造技術として世界中で大きく注目されている。ここではこの3Dプリンタとその材料の現状を整理すると共に今後を展望した。3Dプリンタの出力である三次元造形物が広く一般に受け入れられるためにはその物性や機能性などの性能が重要である。しかし、現状ではその造形物が必ずしも十分な性能を有しているとは言えない。今後この技術がより発展するためには、装置の低価格化のみならず、材料の開発が強く求められている。

キーワード：三次元積層造形、3Dプリンタ、造形物、光造形、FDM、粉末床溶融積層

1. はじめに

30余年前の名古屋工業研究所の小玉秀男による光造形法の発明を端にして、3次元積層造形装置(Additive Manufacturing=AM装置)が種々開発され実用化され、製造業を中心に使われてきた。今日ではそれらを総称して3Dプリンタと呼ぶようになるとともに、我々の生活に身近なツールとして利用が始まった。2012年以降、メディアが過熱気味に報道してきた感があるが、3Dプリンタの可能性と共にその限界も理解されつつあり、2015年に入り多少の落ち着きを示すようになってきた。本解説では3Dプリンタの材料の最新動向を整理するとともにその将来について展望する。

2. 3Dプリンタ

2.1 3Dプリンタとは

各3Dプリンタ(三次元積層造形装置)の詳細については、それぞれの専門分野の方々が説明するのでここでは全体を見渡すこととする。3Dプリンタとは、液状の光硬化性樹脂、熱可塑性樹脂、プラスチック粉末、金属粉末、石膏粉末、砂等を用い、レーザービーム、電子ビーム、溶融押出し、インクジェット等を用い、3次元(CAD)データをもとに一層ずつ積み重ねることにより、三次元立体形状を積層造形して作成する装置である。これらは現在、方式によりTable 1のように細分化されている¹⁾。

最近では、三次元積層造形と切削を組み合わせたハイブリッドタイプが出現し新たな発展が開始されている。

2.2 3Dプリンタとその材料

各3Dプリンタの主な材料を整理したのがTable 2である。石膏の粉末や砂材料のような無機物、鉄、アルミニウム、チタンなどの金属粉末から液状感光性樹脂、熱可塑性樹脂に至るまでその材料は多種・多様に亘っているが、製造に革命をもたらすほど充実したものではなく、我々の日常生活で利用する材料を十分にカバーするには至っていない。これらの材料は装置

* 東京工業大学大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻
〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

* Department of Organic & Polymeric Materials
Graduate School of Science & Engineering
Tokyo Institute of Technology
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

Table 1 Additive Manufacturing Systems

三次元積層技術	英名	別名	材料	手段
液槽光重合法	Vat Photo-Polymerization	光造形法, SLA	光硬化性樹脂	LASER, ランプ
粉末床溶融結合法	Powder Bed Fusion	粉末焼結法, SLS, SLM, EBM	ナイロン 12 粉末, 金属粉末	LASER, 電子線
材料押し出し法	Material Extrusion	溶融樹脂積層法, FDM, FFF	ABS 樹脂, PC 樹脂, PLA など	熱
結合剤噴射法	Binder Jetting	インクジェット法, Z-Printer 法など	石膏粉, 砂, 水バインダー	インクジェット
材料噴射法	Material Jetting	PolyJet 法, MJM 法など	光硬化性樹脂など	インクジェット
シート積層法	Sheet Lamination	シート積層法, LOM 法	紙, プラスチックシート	LASER, カッターナイフ
指向エネルギー堆積法	Directed Energy Deposition	LENS 法など	金属粉末	LASER

Table 2 Materials for Additive Manufacturing Systems

方式	装置メーカー	材料		主用途
		カテゴリー	具体例	
液槽光重合-法/ LASER	3D Systems	光硬化性樹脂	エポキシ/アクリレートハイブリッド	試作分野
	CMET	光硬化性樹脂	エポキシ/アクリレートハイブリッド	試作分野
	DWS	光硬化性樹脂	アクリレート系	宝飾, 歯科
	Formlabs	光硬化性樹脂	アクリレート系	ホビー
液槽光重合法/DLP	EnvisionTEC	光硬化性樹脂	アクリレート系	宝飾, 歯科, 補聴器
	ASIGA	光硬化性樹脂	アクリレート系	宝飾, 歯科
材料噴射法/Ink-Jet	3D Systems	光硬化性樹脂	アクリレート系/ワックス	宝飾・歯科
	Objet (Stratasys)	光硬化性樹脂	アクリレート系	試作, 形状確認・歯科
結合材噴射法/Ink-Jet	3D Systems (Z)	石膏, ポリマー粉	石膏/水, 有機バインダー	デザイン・フィギュア
	ExOne	砂	砂+バインダー樹脂 (フラン樹脂など)	砂型铸造
	voxeljet	砂, PMMA 粉	砂/PMMA+バインダー樹脂	砂型铸造, 消失模型
粉末床溶融結合法/ LASER	EOS	ナイロン, 金属粉	PA12, SUS, Ti, Al, Co-Cr	試作, 生産, 歯科
	3D Systems	ナイロン, 金属粉	PA12, SUS, Ti, Al, Co-Cr	試作, 生産
	アスペクト	ナイロン, PP	PA12, PP	試作
粉末床溶融結合法/EB	ARCAM	金属粉	Ti (合金)	医療 (インプラント)
材料押し出し法 (FDM)	Stratasys	熱可塑性樹脂	ABS, PC, PEI, PPSF etc	試作, 形状確認
	3D Systems	熱可塑性樹脂	ABS, PLA	形状確認, ホビー
	RepRap 他	熱可塑性樹脂	ABS, PLA	ホビー

に限定されたものであり、革命をもたらすためには、材料からみるとまだ不十分であり、限界をも含んでいる。材料からみると発展途上と言うことになる。

Terry Wohlers の分類では、\$5,000 以下のものをパーソナル 3D プリンタとし、それより高額なものを工業用と位置づけて

いる¹⁾。本編でもその分類に従うこととする。まず、各方式ごとに、材料から整理すると次のようになる。

2.3 材料押し出し法 (溶融樹脂積層法; FDM)

今日 10 万円以下の廉価機が多数出てきているパーソナル 3D プリンタの代表的なものである樹脂押し出し法 (溶融樹脂積

層法：FDM法）から述べる。

FDM法は米国 Stratasys 社を設立した Scott Crump により、1988年頃に発明された。細い線状の熱可塑性樹脂を吐出ヘッド内部のヒーターで加熱熔融させ、極細のノズルから吐出させながらプロッタ方式で1層ずつデータに沿って樹脂を押し出し積層させて三次元モデルを造形する。

工業用途、特に試作モデルなどの用途には Stratasys 社が幅広く材料を提供している。その材料は Table 3 に示すように ABS樹脂をはじめ、ポリカーボネート（PC）樹脂、PC/ABSアロイ、ポリフェニルスルホン（PPSF/PPSU）樹脂、ポリエーテルイミド樹脂など、熱可塑性のエンジニアリングプラスチックからスーパーエンジニアリングプラスチックに亘っている²⁾。最近では結晶性樹脂と見なされているナイロン12（PA12）も使用できるようになってきているが、基本的には非晶性の熱可塑性樹脂である。

パーソナル3DプリンタはFDM方式から出発した。イギリスの Bath 大学を中心にオープンソースの RepRap プロジェクト

トが2009年の Stratasys 社の FDM 方式の基本特許消滅を視野に2005年にスタートすると共に、多数のベンチャー企業が立ち上がり、廉価版装置を提供して大きく発展した。中でも Bits from Bytes 社（BFB 社）と MakerBot 社が成功を収め、前者は 3DSystems 社に後者はストラタシス社に高額で買収された。3Dプリンタへの大きな注目の中、FDM装置が簡単な仕組みであることから、海外はもとより国内でも大小の企業が手がけ、30万円以下の装置が多数出現し、最も低価格なものは台湾の XYZ 社のダヴィンチ Jr. 1.0 で5万円以下となっている。これら低価格機は国内の一般家電量販店や DIY 店でも取り扱われるようになり、大衆化が加速度的に進んでいる。

その材料は主にポリ乳酸（PLA）線材であり、反りが小さく、造形は比較的簡単であるが、この材料自体水分に弱いことから、精度や物性の点で問題となることが多く、工業的な用途には不向きである。そんな中、PLA等に銅粉等の金属粉を混ぜたものや、木粉を混ぜて木質を表現したもの等、消費者目線の材料が種々出回っている。特に、安価なものは中国製のものが多く、品質にばらつきがあり、造形には注意が必要となる場合がある。

一部の装置では、工業用途を狙って ABS 線材の利用が可能になっているが、造形室温度制御なしに反りの少ない高精度な造形物を得るためには、造形ノウハウが少なからず必要であり、必ずしも容易ではない。しかし、まもなく、造形チャンバーの温度環境を制御する Stratasys 社の特許が切れるため、温度管理が難しい高性能な熱可塑性樹脂も利用可能になる考えられ、廉価機での工業用途展開が広がるものと推察される。そのためには、廉価機でも利用可能な高性能樹脂材料の開発と提供を国内の樹脂メーカーに期待したい。

2.4 液槽光重合法（光造形法）用液状光硬化性樹脂

小玉秀男により1980年頃に発明された光造形法（液槽光重合法）は、米国の 3DSystems 社を設立した C. Hull により1987年に実用化され、3Dプリンタの原点となった。ここでは液槽光重合法という呼称ではなく、従来の光造形法という言葉

Table 3 Materials for Material Extrusion Systems (FDM Systems) by Stratasys Ltd.

銘柄	適用
ABS-M30	汎用 ABS 材料
ABS-M30i	生体適合性材料 (ISO-10993)
ABSi	半透明
PC-ABS	高衝撃強度
PC	高引っ張り強度
PC-ISO	生体適合性材料 (ISO-10993)
ULTEM 9085	耐熱、難燃 (米連邦航空局・米連邦食品安全認証)
PPSF-PPSU	耐熱、耐化学薬品

Table 4 Typical Stereolithography Resins by CMET Inc.

	TSR-821	TSR-829	TSR-883	TSR-884	TSR-884 (熱処理後)
物性	靱性・ABS	高透明	高剛性・ABS	透明・耐熱	
粘度 (mPa・s) (25℃)	380	210	520	600	
液比重 (25℃)	1.12	1.07	1.12	1.1	
引っ張り強度 (MPa)	49	44	60	51	50
引っ張り伸度 (%)	13-15	8	5~8	3.1	4.4
引っ張り弾性率 (MPa)	1,800	1,670	2,730	2,370	2,090
曲げ強度 (MPa)	70	68	98	87	79
曲げ弾性率 (MPa)	2,225	1,840	2,710	2,260	2,080
衝撃強度 (J/m, ノッチ付)	48-49	34	37	30	25
熱変形温度 (℃)/高荷重	49-52	49	54	53	100
開始剤	アンチモン化合物			非アンチモン化合物	

を使うことにする。

光造形装置は(a)自由液面法からなる大型でレーザとスキャナよりなる従来型の装置と、(b)比較的小型で規制液面(下面照射)法の、レーザとスキャナの装置またはDLP装置とに分類される。

大型の光造形装置は355 nmの波長を有する半導体励起の固体レーザによる紫外光レーザーを光源としており、その液状光硬化性樹脂は高精度でかつ反りの小さなものを実現するために(脂環式)ジエポキシ化合物を主成分としラジカル重合性樹脂とオキセタンアルコール化合物を追加した、ハイブリッドタイプが現在は主流となっている。また、エポキシ基の反応を開始する光カチオン重合開始剤の非アンチモン化が図られ、非劇物扱いの光硬化性樹脂となっている。Table 4 にシーメット社の最近の代表的な光造形用樹脂を示す。

小型の光造形装置は、405 nmのLEDレーザを用いるものと、UVランプまたはLED光を用いるDLP方式との2タイプに分けられる。前者はイタリアのDWS社の装置、後者はドイツEnvisionTEC社のDLP機が代表的なものである。これらは、透明の樹脂桶の窓の下から光を照射し、造形物を吊り上げる方式であり、光硬化性樹脂材料はウレタンアクリレートなどを主材料とするアクリル系重合性組成物に限定されている。大型の光造形機と同様なエポキシ系光硬化性樹脂組成物を用いることは、光の波長に適合した光カチオン重合開始剤とラジカル重合開始剤の組み合わせがないために現在のところは不可能である。

大型の光造形機に主に用いられているエポキシ/アクリレートハイブリッドタイプの光造形用樹脂の硬化時の体積収縮率は、これに対してアクリレート系化合物だけの光硬化性樹脂は6%台と大きな違いがある。また、前者は生成するカチオンラジカルによる暗反応性があり、光照射が停止しても重合活性種が存在して、反応が完結するまで進行する。そのため水分に注意すれば比較的経時変化が小さい。これに対して、ラジカル重合だけのアクリレート系光硬化性樹脂は光照射の停止と共に反応は停止する。一般的に光照射での反応転化率は、一見反応が充分進んでいるように見えても二重結合の20%~30%が残るとされている。この残存二重結合基により経時変化を起し、変形の元となりやすい。また、造形物が造形中に未硬化の液状樹脂により膨潤が起ることが多く、そのため大型の造形物、特に薄物の大型造形物を精度良く得るのが不得意である。しかし、小さい造形物に限定することにより、これらの欠点は比較的抑えられることと、アクリレート系の光重合反応は低エネルギーで進行すること、さらには、いろいろな種類のアクリレート材料が容易に入手可能なため、医療や歯科用途などをはじめとして、いろいろな機能を有する光硬化性樹脂の開発が進んでいる。

2.5 廉価版光造形機

廉価版FDM機の出現を契機に三次元積層造形機(3Dプリンタ)が再び注目を浴びる中、2012年にDWS社の光造形機と仕組みが同じ、レーザとスキャナミラーを備えた廉価版光造形機Form1が30数万円という価格でFormlabs社から発表され3Dプリンタブームを加速している。

2014年になるとDWS社からX-FABなる低価格機が発表されている。更に、下面照射のDLP機はその構造が単純なことから、10社以上からEnvisionTEC社と同様な仕組みの低価格DLP機が発表されている。とくに最近ではASIGA社、KEVVOX社、RapidShape社などを始め、国内のローランドDG社や米国AutoDesk社などが次々と参入し競争が激化している。3Dプリンタは簡単な機構を有するFDM機から、高精度が期待できる低価格の液槽光重合(Vat Polymerization)機へと関心が移りつつある。2015年に入り台湾のXYZ社は22.9万円のForm1とよく似た造形機を上市しており、個人ユーザーでも手の届く範囲に装置はなりつつある。しかし、低価格機が真に普及するためには顧客が期待する性能の積層材料が求められるが、一部を除いて大半はこれからの樹脂開発を待つ必要がある。

ごく最近Autodesk社のDLP機Ember用のオープンソース樹脂PR48が発表された。その樹脂は基本的な造形を主目的とする脂肪族ウレタンアクリレートを主体とするアクリレート系光硬化性組成物である。既存の光硬化性樹脂のレベルと比較するとかなり基本的で、必ずしも充分顧客に応えられるものではないが、今後先進的な顧客がこれをたたき台として、自分にあった樹脂を開発するには必要な基本性能を有していると思われる。

2.6 光造形法の課題

光造形用樹脂は装置が実用化されて以来、電化製品などの筐体に多く使われているABS樹脂と同等の性能を目標に開発されてきた。ABS樹脂は熱変形温度が80℃以上を示すため、80℃以上の熱変形温度と十分な靱性を有すれば、実部品への応用が可能と考えられる。

しかし、長期にわたる精力的な開発にも拘わらず、靱性と耐熱性のトレードオフの壁が立ち上がり、いまだその物性到達にはかなりの隔りがある。顧客より光造形装置の適応拡大のためこのトレードオフの関係の壁を打ち破るブレークスルーが強く求められており、耐熱性と靱性を併せ持つ材料の開発にブレークスルーがあれば、試作用途のみならず、最終製品用途への道が開かれ、新しい切り口で再び光造形法が3Dプリンタの頂点に位置される可能性を有している。

光造形法では、他の方法ではなかなか得られない高精度と高透明を併せ持つ立体造形物が得られていることから、現状ではその利点をうまく利用することが得策と考えられる。たとえば、(a)宝飾用消失模型、(b)補聴器のシェル応用、(c)歯科応用などが最適と思われる。これら光造形用の光硬化性樹脂材料についての詳細な解説は筆者の最近の総説^{3,4,5)}を参考にしてほしい。

2.7 粉末床溶融結合法(粉末焼結;SLS, SLM)用材料

2.7.1 熱可塑性樹脂粉末

プラスチック粉末を炭酸ガスレーザービームの熱モードによる粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion;PBF)は、ナイロン11(PA11)粉末を用いて1980年台後半にテキサス大学のグループからスタートし、DTM社が設立された。DTM社は後に3Dシステムズ社に併合されている。ほとんど同時期にドイツのEOS社もこの粉末造形装置の販売を開始した。この装置の

Table 5 Plastic Powders for Powder Bed Fusion Systems by EOS GmbH.

銘柄	成分	特徴
Almide	アルミ入り PA12	高剛性, メタリック調
Carbomide	カーボンファイバー入り PA12	高強度, 高剛性, 軽量
PA2200	PA12	汎用材料
PA3200GF	ガラス入り PA12	高剛性, 高耐衝撃性, 高耐熱性
EOS PEEK HF3	ポリアリールエーテルケトン (PEEK)	高耐熱性, 高耐摩耗性, 耐薬品性
PrimaCast 101	ポリスチレン	消失モデル

Table 6 Metal Powders for Powder Bed Fusion Systems by EOS GmbH.

銘柄	成分	特徴
AlSi10Mg	アルミニウム合金	機械特性, 軽量
Cobalt-Chrome MP1	コバルト-クロム-モリブデン主体の合金	機械特性, 軽量, 耐食性, 耐熱性
Cobalt-Chrome SP2	コバルト-クロム-モリブデン主体の合金	生体適合性, 歯科用
DirectMetal 20	ブロンズ主体の合金	微細形状モデル
Stainless Steel GP1	ステンレス鋼 17-4/1.4542/SUS630	機械特性
Stainless Steel PH1	ステンレス鋼 15-5/1.4540	45HRC の硬度
Titanium Ti64	Ti6Al4V 軽合金	軽量, 生体適合性, 生体結合性

材料は今日では大半がドイツのエポニック社のナイロン 12 (PA12) となっている。この PA12 にはカーボンファイバー、ガラスビーズ、アルミ粉末などを混合して性能強化したものが広く利用されている (Table 5)⁶⁾。この粉末床溶融結合法の樹脂粉末は基本的に結晶性の熱可塑性樹脂が用いられる。PA12 が好んで用いられる理由としては、粉末が溶融して再度結晶化するまでの温度 (process window と呼ばれている) の範囲が広いこと、この process window 内で作業を行うことができ、歪みの小さな造形が可能となることに起因する。最近ではこの process window をより広げた材料の開発はもちろん、積極的に process window の狭い材料を使いこなす造形方法の開発も行われている⁷⁾。この PA12 粉末を中心とする積層法により、製品を直接製造することが最近行なわれるようになってきている。特に、金型を作成して大量に成形する量が確保できない、少量で多品種の分野で普及しつつある。

EOS 社ではエポニック社の PEEK 樹脂を利用した外科手術用インプラントの造形を進展させて、電子ビームなどによるチタン (合金) 粉末の造形物と同様な用途開発を進めていくもの推定される。

2.7.2 金属粉末

熱可塑性樹脂粉末の代わりに鉄やステンレスなどの金属粉末を用いて積層造形する方法は 3DSystems 社および EOS 社により実用化されてきた。また、ドイツでは Fraunhofer を核として、金属粉にレーザーを照射し焼結または溶融させて積層する研究開発が盛んに行われており、Concept Laser 社、SLM 社

などの数社がそれぞれの装置を上市している。金属 (合金) 粉末としては最近では殆ど利用可能になっている。Table 6 に EOS 社の金属粉末材料について示す⁶⁾。当初アルミニウム粉末の造形は殆ど不可能と思われていたがアルミニウム合金とすることでそれを可能としアルミニウムダイキャスト製品の試作に道を開いた。最近では殆ど金属 (合金) 粉末の積層造形が可能となってきている。

スウェーデンの ARCAM 社は 2002 年に高真空下で造形を行う電子ビームによる粉末床溶融装置を上市し、一つのカテゴリーを築いてきた。最近ではその生産性とその精度からレーザー焼結法よりもむしろ人気が高い。特にインプラント用のチタン合金 (Ti6Al4V など) やコバルト・クロム粉末の造形を得意としており、医療用途で多くの顧客を獲得している。経産省主導の国家プロジェクト TRAFAM でも、このような電子ビームによる装置の開発が進められており、装置の低価格化と造形物の高性能化を期待したい。

2.7.3 粉末床溶融の今後

FDM 方式のパーソナル 3D プリンタが特許切れを視野に生まれたように、2014 年に DTM 社出願の米国での粉末床溶融積層造形の重要特許が切れたことで、この方式でも多数の新規参入が期待されている。経産省の大型プロジェクト⁸⁾もこの特許切れに呼応したものである。

2014 年 9 月の TCT Show (英国・バーミンガム市) では、NORGE 社の ICE 9、ShareBot 社の SnowWhite の 2 機種 PA 粉末床溶融造形装置が展示された。これらは近いうちに製

品として出てくると思われる。小型ではあるが価格は300万円前後と従来機の1/10程度が想定されている。また、同年11月末のEuromold2014（ドイツ・フランクフルト市）ではTRUMPF社からライセンスを得たイタリア Sisuma 社が宝飾用途を想定した小型の金属粉末床溶融積層造形装置を展示しており、新たな参入者がこれからも続くものと思われる。一方、2012年に、Blueprinter ApS社よりデンマーク工科大学が2009年頃頃から手がけてきた、レーザを用いることなくPA粉末の造形が可能な、熱転写ヘッドによる融着タイプの積層造形装置（SHS; Selective Heat Sintering）が発表された。造形サイズはblueprinter M2で160×200×140mmと小さめではあるが、コンパクトな装置でかつ300万円前後と比較的安価なため徐々に顧客を獲得しつつある。

2.8 結合剤噴射法（インクジェット法）

2.8.1 Z-Printer 方式

1989年にマサチューセッツ工科大学（MIT）のサクスらにより、インクジェットノズルから出た結合材により粉末を固化させて積層することで立体形状を作成する方法が発明された。このライセンスを受けて設立されたZ-Corporation（後に3D Systems社に吸収）は、インクジェット法による積層造形装置（Z-Printer）を1996年に発表した。デンプン粉末を用いた最初の装置はその造形速度で、これまで発展してきた液槽光重合法や粉末床溶融積層法に大きな衝撃と驚きを与えた。造形物の精度についてはあまり議論をすることはできなかったが、造形時間を1/10～1/20に短縮することが可能となり、三次元積層造形に対する考え方を一変させた。この装置は、その後デンプン粉末の欠点を克服するために石膏粉末に変更するとともに家庭用2Dインクジェット印刷用カラーインクを用いてフルカラー化がなされた。造形速度と意匠性が優れていることから、今日、形状確認やデザイン確認の用途で多く利用されている。しかし、石膏粉末が材料であるためその表面性と物性では多くの妥協をしいられてきた。そんな中、3DSystms社は2013年暮れのドイツ・フランクフルトでの展示会（Euromold）でその積層材料をプラスチック粉末とする装置（ProJet4500）を発表し大きな期待を集めている。この装置で利用できるプラスチック材料の種類は広がるものと思われる今後の展開に注目したい。FDM法と同様にMITの基本特許も切れたことにより、ビジネスチャンスを開く他社から新しい材料を利用できる同様な装置が今後上市されるものと推定される。その一つが後に述べる米国ヒューレット・パッカード（HP）社のものであると思われる。

2.8.2 砂型製造用インクジェットシステム

自然砂や人工砂にフェノール系やフラン系のバインダー樹脂をインクジェットヘッドから吐出して鋳物用の砂型を作成する装置がMITのインクジェット方式のライセンスを受けたProMetal社のシステムを原点とするExOne社と、前記Z社のサブライセンスを受けたvoxeljet社から上市されている。

ExOne社の砂型造形システムは、砂型造形により木型や樹脂型を不要とし、試作品の鋳造はもとより、量産化も視野に入れることができ、鋳造金属製品の設計の幅を広げ、次世代のものづくりとして期待され、国内でも導入が進んでいる。従来法

に比較して複雑な造形が可能なので、中子の点数を大幅に減らすことができる。砂型鋳造機では極めて大型の装置の設計が容易であり、生産機を意識した装置として今後更なる発展が予想される。

2013年5月に経済産業省の「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」が国内の12者でスタートした。このプロジェクトは5年間で、ExOneに代表される砂型用3Dプリンタの数倍の造形速度と、中小企業でも購入できるような2000万円程度のシステムを目指し開発を進めている⁸⁾。2015年1月の3D Printing2015ではフラン系バインダーを用いたとする緑色した砂型積層物の展示があり開発が進んでいるものと推定される。

2.9 材料噴射法

イスラエルのObjet社（2012年12月Stratasys社に合流）からは光硬化性樹脂をインクジェットヘッドより吐出させた後、UVランプで硬化させるシステムが1998年に発表された。この技術は元々日本のブラザー工業により提案されたものであったが、Objet社により製品化された。現在では比較的安価な100～200万円の価格帯機から大型でかつ多種の材料が利用できる一億円近いものまで製品化されている。もともと、インクジェットヘッドの物理的制約から厚い樹脂層の積層が得意なため、その欠点を利用して15～16ミクロンの厚みで積層することにより、立体造形物を比較的高精細に造形することができる。

材料は現状ではアクリレート系の光硬化性樹脂で、剛性の高いものからゴムライクな軟らかいものまで十数種類が販売されている。上位機種であるCONNEXシリーズでは硬-軟2系統の樹脂など2種類の物性の異なる材料を同時に使用して積層が可能であり、例えば、透明な造形物中に不透明な部分を表現することも可能であり、多彩な造形物が得られる。2014年の2月に入ってStratasys社はこの方式のカラー造形機を発表した。上記3Dシステムズ社のカラー機ProJet4500やこのObjet 500 CONNEX3、さらに、FDM機でもカラー化が進んでおり造形物はフルカラー化の時代に突入している。

国内では、2011年からKEYENCE社がObjet機とよく似たシステムを市場に出している。この装置の特徴はObjet機と比較して安価であることと、サポート材を水溶性とすることにより多くの顧客を獲得している。しかし、モデル用材料は黄色透明なもの1種類に限定されており、今後種々の機能材料の提供が望まれている。

ごく最近では、ミマキエンジニアリング社より1000万色の造形が可能なUV3Dプリンタが開発され、まずは造形サービスから事業を開始するとの新聞発表があった。この装置の詳細は本解説の執筆時には明らかになっていないが、国産・フルカラーということで大きな期待がもたれている。また、昨年11月にはHP社から樹脂粉末をバインダーで固着して造形を行う新方式の高速3Dプリンタが発表され注目を集めている。この技術は出願特許から推定すると、2000年頃当時のミノルタ社が開発を行っており、その後富士フイルム社も同様な装置の開発を進めていた。HP社は2003年頃から開発を進めていたものと推定される。Euromold2014で紹介された造形物はZ方式

の石膏造形物と類似の外観と手触りであり、製品としては初期段階のものであり今後の改良が望まれる。

インクジェットノズルより、加熱溶融したワックス材を高分子バインダーとともに液滴として連続的に吐出し堆積固化させながら積層し、厚み制御を平坦化ローラで行うことで、ロストワックス鑄造用モデルを作成する Solidscape 社のものが古くからあり、造形速度の点からは不利であるが非常に微細な造形物を得意とするため宝飾や歯科のワックスモデルを作成するのに利用されている。最近では造形サイズの少し大きい精密鑄造の分野にも積極的に用途展開している。また、3DSystems 社からは ProJetHD3500 シリーズと呼ばれる材料噴射タイプの装置が上市されている。目的の造形物に UV 硬化材料を利用し、サポート材にワックスを利用するタイプや、造形物、サポート材の双方にワックス材を用いる宝飾用のタイプがあり、いわゆる 3D プリンタとして、適当な価格と扱いやすさで市場に浸透している。

2.10 シート積層法

紙に代表されるシート状材料を、レーザー (LOM 機) またはカッター (キラ機) で切り出し糊を付けながら積層するシート積層造形装置の歴史は古い。しかし、材料が紙であることから吸湿性などで精度が十分でなかったこと、オーバーハングの取り扱いが得意でなかったために普及を妨げ、その後撤退した。しかし、2012 年秋から紙を積層してフルカラー造形物を作成できる比較的安価な Mcor IRIS プリンターが上市された。このシステムも本質的にはオーバーハングが得意ではないが、立体地図などの用途を限って使うことで効果を発揮するため、他の積層造形機とは異なった用途を目指して展開している。

2.11 指向エネルギー堆積法 (Directed Energy Deposition)

Fe, Ni に代表される金属粉末等を吹き付けながら炭酸ガスレーザーやファイバーレーザーなどのエネルギー線で直接溶融させて形状を作成する方法が OPTOMECH 社等から提案され、改良が続けられている。また、ドイツでは Fraunhofer を中心に盛んに研究開発が進められている。この方法では、金属粉末の組成を変化させることにより、傾斜材料の作成も可能であり、別の方向からも期待が大きい。

日本では同様な狙いで、笠原らのグループによりアーク溶接機にヒントを得た積層造形機が提案され、武藤工業が実用機の開発を行い、2015 年 1 月の 3D Printing2015 で試作機を発表した。既に国内の製造業に 1 号機が納入されたと聞いている。この方法では高価なレーザー装置が不要であるとともに市販のアーク溶接用の線材が利用可能のため、装置と稼働の双方からの低価格化が期待できる。

これらはいずれも肉盛り溶接と同様ではあるが多彩な加工が可能であり、大きな可能性を持っている。

3. ハイブリッド型積層造形装置

松下電工 (現パナソニック) と松浦機械により、金属粉末床溶融積層と切削を組み合わせたハイブリッドタイプが主に成形用金型製作を目的に開発され「LUMEX」という愛称で、地域の工業試験所などを中心に導入が行われてきた。金属粉末をレ

ーザで溶融積層しながら数層に一回積層端面等を切削して成形型としての機能を確保する造形方法である。あまり大きな成形金型の作成には不向きであるが、比較的小さい、たとえば 200 mm 程度の金型の作成には短期間で対応できることと最近の 3D プリンタブームとともに期待が高まっている。2014 年 10 月の JIMTOF2014 で OPM 社を傘下に入れた Sodick 社から同様のハイブリッド機が発表され注目を集めた。

Euromold2013 で DMG/森精機から指向エネルギー堆積方式に切削を組み合わせたハイブリッドタイプの積層造形機「SAUER」が展示され連日大きな話題を集めた。その後、JIMTOF2014 で、前記 SAUER 機とともにヤマザキマザックからも同様なハイブリッド機が展示され、注目を集めた⁹⁾。比較的短時間に切削精度の造形物が得られるとことであり、これらの方式は金属部品や成形型の修正や変更にも有用と思われ、今後このようなハイブリッドタイプの開発が盛んになるものと推定される。

4. 材料から見た 3D プリンタの今後の行方

Wohlers Report2015¹¹⁾によると 2014 年の積層造形用材料の市場は約 US\$640 M であり、そのうち US\$298 M が光硬化性樹脂と見積もられている。粉末床溶融樹脂材料は 1,930 t と推計され大凡 US\$160 M と思われる。金属材料は US\$48.7 M であり、残りが樹脂溶融押出し (FDM) 材料と石膏粉末材料である。これらの市場は前年比で 20% 以上の伸びを示したと報告されている。今後も同様またはそれ以上の割合で市場が拡大すると推定している。

IDTechEx 社の市場調査報告「3D プリンタ材料の状況、将来性、市場予測 2014-2025 年」¹⁰⁾では、少し違った割合を推定しているが、基本的に現状では光硬化性樹脂が半数を占めていて、当分、この構成比はほぼ変わらずに市場が拡大するものと推定している。

現状パーソナル 3D プリンタ、特に FDM タイプの装置で使える材料の大きな進展が期待されているが、しばらくは汎用熱可塑性樹脂に限られるものと推定され、プラスチック製品の主材料であるエンジニアリングプラスチックを使いこなすまでには少し時間がかかると思われる。一方、光硬化性樹脂を使った装置も低価格化が進行すると思われるが、日常製品やその部品と同等または近い性能の造形物が作成可能になるのは、液状樹脂を光で硬化させて造形するという制約から、殆ど不可能と推定される。

「誰もが容易に各種部品、部材を任意の材料で製造できる」ようになる日が訪れることは、殆ど夢物語に近いことと思われるが、安価な 3D プリンタの登場で、モノづくりに対する意識改革は既に始まっている。

経済産業省では 2020 年に 3D プリンタ関連市場で 20 兆円を超える予想を展開しているが、そのためには大きな役割を果たす材料開発が、データ作成ツールの開発や装置の高機能・低価格化と共に必要である。(本解説は拙著がベテロテック 2015 年 6 月号に寄稿したものをベースにその後の進展を加えたものである。)

References

- 1) T. Wohlers; "Wohlers Report 2014", (Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA.
- 2) Tsuyoshi Mayumi, "From Rapid-Prototyping to Rapid Manufacturing", Sokeizai, **53** pp. 25-30 (2012)
- 3) Tsuneo Hagiwara, "Current Status and Future Aspect of the Stereolithography and its Product", Sokeizai, **53**, pp. 51-57 (2012)
- 4) Tsuneo Hagiwara, "Application of 3D Printer, Typical Examples by Stereolithography", Optical and Electro-Optical Engineering Contact, **52**, No. 8 pp. 30-38 (2014)
- 5) Tsuneo Hagiwara, "Review for the 3D Printing Materials", PETEROTECH, **38**, pp. 402-410 (2015)
- 6) Toshihiko Maeda, "Application of Laser Additive Manufacturing System", Sokeizai, **53** pp. 53-59 (2012)
- 7) Toshiaki Niino, Abstract for 5th AM Symposium, Jan. 21, 2015, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo
- 8) Technology Research Association for Future Additive Manufacturing; TRAFAM: <http://www.trafam.or.jp>
- 9) Report appeared in OPTRONICS, 2015, No. 1 pp 109-110.
- 10) <http://www.idtechex.com/research/reports/3d-printing-2015-2025-technologies-markets-players-000423.asp>
- 11) T. Wohlers: "Wohlers Report 2015," Wohlers Associates, Fort Collins, Colorad, USA.



萩原 恒夫

1974年群馬大学大学院工学研究科（応用化学専攻）を修了。1974年帝人（株）入社，帝人東京研究センターにて感光性樹脂，導電性高分子の研究に従事。1990年筑波大学より導電性高分子の研究で理学博士。1994年より帝人製機（株），2001年よりシーメット（株）にて光造形用樹脂の研究・開発を担当。2010年より現職。2011年4月～2015年3月山形大学有機エレクトロニクス研究センター客員教授。2015年4月より東北大学大学院医工学研究科非常勤講師（兼務）。

Reference Catalogs from 3D Printer Manufacturer

- A) CMET Inc., <http://www.cmet.co.jp>
- B) 3D Systems Inc., <http://www.3dsystems.com>
- C) Stratasys Ltd., <http://www.stratasys.com>, <https://www.marubeni-sys.com/>, http://jp.objet.com/Portals/15/docs/PDF/Brochure/Objet_System_Matrix_JP_sml.pdf
- D) EOS GmbH, <http://www.eos.info>, NTT-Data Engineering Systems, <http://www.nttd-es.co.jp>
- E) ExOne Japan, <http://www.exone.com/jp>
- F) DWS s.r.l., <http://www.dwssystem.com>.
- G) EnvisionTEC GmbH, <http://www.envisiontec.com>
- H) ARCAM AB, <http://www.arcam.com>
- I) Yamazaki Mazak Corporation, <http://www.mazak.jp>
- J) DMG MORI SEIKI Co. Ltd., <http://www.dmgmori.com/blob/336988/9fa37a242d86a2ebdc000d914189e14d/j142jp-pdf-data.pdf>
- K) Blueprinter AsP: <http://www.blueprinter.dk>