

3D プリンターとは “What is 3D Printer?”

More than 30 years have passed since the stereolithography, mother of 3D Printer was invented by Mr. Kodama of Nagoya. From end of 2012, the 3D Printer becomes very much popular in all over the world. In this review, the current status of the 3D Printer is reviewed and discussed, and the future is forecasted.

東京工業大学大学院理工学研究科
Department of Organic & Polymeric Materials
Graduate School of Science & Engineering, Tokyo Institute of Technology

萩原 恒夫
Tsuneo Hagiwara

1. はじめに

三次元積層造形法 (Additive Manufacturing: AM 法) の原点である光造形法が小玉氏により発明されてから 30 有余年がたち、今日再びこの積層造形に対して大きな風が吹いている。光造形法に続いて他の 3 次元積層造形法が種々開発されるに至り、大きな発展を遂げている。最近この三次元積層造形法は総称して 3D プリンターと呼ばれるようになり、2012 年の下半期からにわかに注目され、「産業革命を引き起こす可能性を秘めている」とまで言われて、全世界で大きな期待を集めている。この 3D プリンターについて、2014 年 7 月現

在のその特徴と課題について整理し、その将来についてその可能性を展望する。

2. 3D プリンター

2.1 3D プリンターとは

三次元積層造形 (AM=3D プリンター) とは、3 次元 (CAD) データをもとに、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、熔融押し出し InkJet 方式等を用いて一層ずつ積み重ねることにより、成形用の型や切削工具等を用いずに立体形状を精度良く作成する方法である。2009 年に ASTM 国際標準化会議で統一された AM 法の分類によれば、これらは方式により下記のように細分化される。

- (a) 液槽光重合 (Vat Photopolymerization) : 液状感光性樹脂をレーザービームやランプで硬化させて立体形状とする方法で、従来からは光造形法 (Stereolithography: SLA) とも呼ばれている。
- (b) 粉末床熔融結合 (Powder Bed Fusion) : ナイロンなどのプラスチック粉末や金属粉末を炭酸ガスレーザーやファイバーレーザーの熱モードで熔融して三次元に積層する方法で、粉末焼結積層法 (Selective Laser Sintering: SLS、金属粉末を溶かして積層する方法は場合により Selective Laser Melting: SLM) とも呼ばれている。
- (c) 材料押し出し (Material Extrusion) : ABS などの熱可塑性樹脂ワイヤーを熔融して、細い加熱ヘッドより吐出させて積層する方



萩原 恒夫

東京工業大学大学院理工学研究科 有機・高分子物質専攻
産官学連携研究員
理学博士

群馬大学大学院修士了。
1974 年帝人株式会社入社、1990 年筑波大学より理学博士。
1994 年より帝人製機株式会社、2001 年よりシーメット株式会社常務取締役樹脂開発部長。
2010 年 6 月より現職。
2011 年 4 月より山形大学有機エレクトロニクス研究センター客員教授兼務。
専門：有機光化学、感光性樹脂、三次元積層造形技術
E-Mail : thagiwara@hino.email.ne.jp

法で溶融樹脂積層法 (Fused Deposition Modeling: FDM) とも呼ばれている。数年前に Stratasys 社の FDM 法の基本特許が消滅したことから、この FDM 装置技術がオープンソース化されて低価格機が出現し、今日の 3D プリンターブームの一因となっている。

- (d) 結合剤噴射 (Binder Jetting) : デンプン粉末や石膏粉末に水性バインダー剤をインクジェットヘッドから吹きつけ固化させて三次元モデルを作成する方式でマサチューセッツ工科大学 (MIT) のサックス氏らにより発明され、Z 社がシステムを開発したことから Z-Printer 方式とも呼ばれている。この MIT の発明は砂をポリマーバインダーで固める砂型 casting 用途 (ExOne 社) にも展開されている。
- (e) 材料噴射 (Material Jetting) : 光硬化性樹脂をヘッドから吐出しながらランプで硬化・積層する Objet 方式や、ワックス材などをヘッドから吐出する方式が挙げられる。
- (f) シート積層 (Sheet Lamination) : 紙やプラスチックフィルム、アルミニウムシートなどをレーザーやカッターナイフで裁断しながら接着積層する方法。
- (g) 指向エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) : Fe、Ni 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で直接溶融させて形状を作成する Laser Energy Net Shaping: LENS 法など。
- (h) ハイブリッド型積層造形システム : ごく最近では、この LENS 方式に切削を組み合わせたようなハイブリッドタイプ (ドイツ DMG-MORI や韓国の InssTek 社など) が出現した。

これらの各方式について、後で詳細に述べることにする。

2000 年代に入り比較的安価な Stratasys 社の FDM 装置 Dimension や旧 Z 社 (現 3D Systems 社) の Z-Printer が出現して 3D プリンターと呼ばれる装置群が現れた。その後、2009 年に樹脂溶融押し出し法である FDM 方式の基本特許が切れることを契機に大学発のオープンソースプロジェクト (RepRap 等) が立ち上がることで、BfB (Bits from Bytes) や Makerbot を始めとする多くのベンチャーが FDM 方式の廉価版システムを販売を開始し大きな成功を収めた。この FDM 方式の廉価版がメディア等に連日取り上げられるようになり、3D プリンターとしてにわかに注目されるに至った。名

称については、三次元積層造形法や Additive Manufacturing (AM) 法よりは親しみ易くかつ直感的に理解しやすい 3D プリンターという言葉が用いられるようになり、今日では AM 装置が総称して 3D プリンターと呼ばれるようになった。

2.2 今、なぜ 3D プリンターなのか

2012 年後半より突然「3D プリンター」に注目が集まるようになった。その理由を整理してみると、以下のように思われる。

- (a) 高性能 PC の低価格化、そのグラフィック環境の飛躍的発展
- (b) 3D CAD システムの低価格化と普及により、3 次元データが比較的簡単に生成できるようになった。
- (c) 3 次元積層造形法 (Rapid Prototyping: RP から AM) の技術的蓄積、その技術の大衆化、そして Rapid Manufacturing (RM) 化。
- (d) RP、AM 装置の発明の多くが 1980 年後半に出願され、20 年以上が経過したため基本特許が切れたこと。そして、FDM 方式のオープンソース化 (RepRap Project)。(大学発) ベンチャー機の大量進出、BfB、MakerBot などの成功。
- (e) 生活の質の向上と物作りへの欲求の増大、などの素地ができていた。

そんな折、クリス・アンダーソン “Makers” の著書の中で、「3D プリンターというすごい技術が出てきて、ここ数年で急速に進化している。今はまだ特定の用途にしか使えない技術だが、数年後～10 数年後に驚くような進化を遂げるだろうと予測される。そうなれば、第 2 の産業革命が起きるやもしれない。」とした (NHK 出版訳)。その後、オバマ大統領は、2013 年 2 月 13 日に行われた一般教書演説のなかで、3D プリンターに言及し、「3 つの製造業ハブを立ち上げて積層造形に焦点を当てるとし、こうしたハブを 15 箇所作り、アメリカが新しい仕事と製造業の磁石になるよう注力する」ことを提案した。このハブを設けることで、米国に新しいハイテク産業と雇用が生まれるという。

これらを契機として、国内では経済産業省の素材産業室を中心に勉強会や研究会が立ち上がるとともに、メディアも連日取り上げることとなり、大きな風が吹いている。2013 年度には砂型プリンターの国家プロジェクトがスタートするとともに、2014 年度には金属造形用積層造形装置開発の大型プロジェクト (TRAFAM) が 2014 年 4 月 1 日よりスタート

表1 データから立体形状へ

機械加工法	操作	自由度	大量生産	単品製作	加工の具体例
除去加工 (切削)	-	○		○	旋盤、マシニングセンター、研削 放電加工、フライス盤 等々
付加加工	+	◎		○	溶接、ろう（ハンダ・銀ろう）付け、 三次元積層造形（AM）
成形加工 (塑性)	+ -	△	○		射出成形、鍛造・圧延・せん断 プレス・曲げ・絞り

(-：のぞく、+：加える)

した。その内容は、三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発）であり次のような内容となっている。

- 31者による大型コンソーシアムによる委託開発
- 予算規模としては、平成26年度は、A：32億円、B：5.5億円を上限
- A：次世代型産業用3Dプリンタ技術開発とする、電子ビーム金属粉末積層タイプとLASERビーム金属粉末積層タイプ
- B：超精密三次元造形システム技術開発とする平成25年度にスタートした砂型プリンター開発

また、内閣府を中心とし、NEDOを基軸とするSIPプログラムも2014年度中にはスタートし、この中で3Dプリンター関連の各種開発が進むものと推定している。これらをきっかけに日本全体が3Dプリンターによるものづくりへ大きく前進しようとしている。

3Dプリンター装置は上記したようにいくつかの方式に分かれ、それぞれ材料は汎用的なものではなく、個別なものとなっている。これら3Dプリンターの顧客にとっては装置そのものも重要であるが、基本的には出来てくる立体形状物が重要であるためその材料に注目することが必要となる。

2.3 成形方法の比較

なぜAM法が注目されるかを成形方法から見るとする。データから立体形状への成形方法についてAM法と他の成形方法と比較したのが表1である。加工法は旋盤やマシニングセンターを使う切削に代表される除去加工、溶接やろう付け、AM法の付加加工、そして射出成形や鍛造・プレスなどの成形加工（塑性加工）に大別したとき、この表で分かる

ようにAM法に特徴的なのが成形物への自由度である。この自由度が大きい故、3Dプリンターを使えば何でも容易に出来るということになる。通常の射出成形や切削法では作成が困難なデザインなどがいとも簡単に具現化できる。芸術家やデザイナーは自分の作品を形にして発表することができるし、設計者は所望の性能が発揮できる製品の試作や製品を形にすることができる。しかし、構造上の制約は簡単に取り払うことが可能であるが、AM法ですべて所望の材料が使うことが出来るとは限らない。解決しなくてはならない、装置・材料などの制約があり、現状では必ずしも何でも出来るというわけではない。

3. 3Dプリンター各論

3.1 液槽光重合法（光造形法）

槽に満たした感光性樹脂に紫外線や可視光線を照射し一層ずつ硬化させ積層する光造形法は1980年に光硬化性樹脂にネガを通して印刷版を作成するデモをヒントに小玉秀男氏により発明された。この光造形装置の光源としては基本的には紫外線レーザーであり当初はHeCdレーザーが使われたが直ちにArイオンレーザーとなり、現在の半導体励起の固体UVレーザー（355nm光）に至っている。図1に示すように、THG現象を利用した固体レーザーから発信した355nmのレーザー光はAOMなどの変調機を通しレンズ等を通過後、ガルバノスキャナーミラーにより描画を制御しつつ液状硬化性樹脂を所定の硬化厚み（通常0.1mm～0.15mm）に一層ずつ硬化させ、作業テーブルを下降させながら積層する。この積層を所定の回数繰り返して所望の三次元物体を作成する。

最近の小型の光造形装置ではUVランプや可視光光源のDLP方式や405nmのLEDレーザーを用いて、下面から光照射して作業テーブルを引き上げながら積層するもの（図2）も

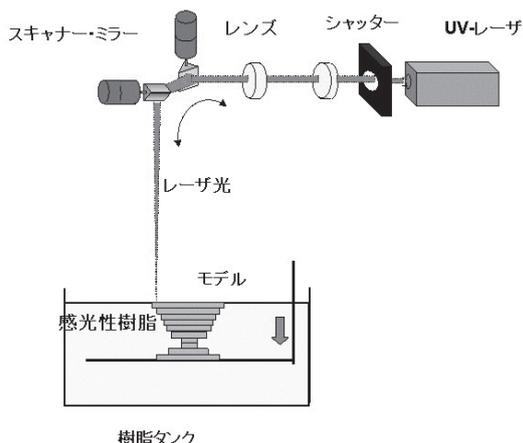


図1 液層光重合法（光造形法）の仕組み

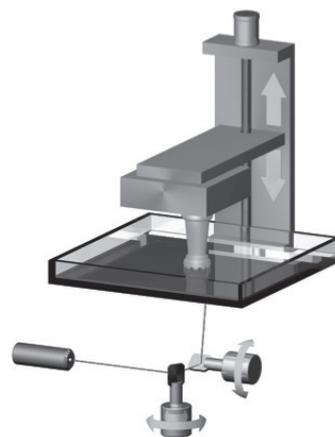


図2 DWS社の下面照射機の仕組み

表2 最近の光造形樹脂の分類とそのメーカー

メーカー	指標								
	高精度	靱性	ABS ライク	高透明	透明・耐熱	高耐熱	フィラー入	鋳造用	ゴムライク
		伸度 >10%	高靱性 高 HDT	高透明	透明・耐熱	高 HDT	高曲弾性率	易消失	Shore A 70 Shore A 50
シーメット	(TSR-820)	TSR-821 TSR-831	TSR-832 TSR-883	TSR-829 TSR-839	TSR-884	-	TSR-755		TSR-1920 TSR-510
ADEKA	HS-680	-	HS-696	-	-	-	-	-	-
JSR	(SCR-701)	SCR-712X	SCR-735 SCR-737	SCR-776	SCR-780	SCR-740	(SCR-802)		-
DSM-SOMOS	(SOMOS-7120)	SOMOS 9120 SOMOS 9420	SOMOS 14120 SOMOS DMX100 SOMOS Next	WaterShed XC-11122	-	ProtoTherm12120	(ProtoTool 20L) NanoTool NanoForm 15120	ProtoCast- 19122	(ULM-17220)
3D システムズ		Accura 25	Accura Xstream Accura 55	Accura 60	-	Accura 48HTR Accura Peak	(Bluestone) Accura CeraMAX	CastPro	-
3D システムズ (旧 Huntsman)		SL-7840	SL-7800 SL-7810 SL-7820	SL-7870	-	-	-	-	-

() 内はカタログから消えたもの

よく知られている。この下面照射タイプは樹脂液を平滑化するリコーターを持たないため装置が簡単となるが、作業面からの脱落の可能性があり大きな造形物の作成には不向きである。そのため、小さくて高精度が要求される付加価値の高いものの造形が主に行われている。その例としては、補聴器の製作、宝飾用鋳造原型、フィギュアの原型、歯科鋳造原型、仮歯や人工歯などが代表的なものである。

代表的な上面照射タイプの大型装置の光造形用液状樹脂は、多官能アクリレートと（脂環式）ジエポキシ化合物を主成分とする所謂、ラジカル反応とカチオン反応のハイブリット樹脂仕様となっており、更に、最近筆者らが最初に採用したように、オキセタンアルコール化合物を共存させて、エポキシ化合物の反応速度の改善を図ると共に、組成物粘度低減によるメカニカルな動作の改善により造形速度を向上させたものが殆どとなっている。

また、最近では、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、液状樹脂が非劇物扱いとなり取り扱い性が向上している。

AM法により作成した立体形状物の利用は基本的には形状物の物性・性能が重要であり、顧客は最終的に自分の目的に叶った材料を求めることになる。そのため立体形状物の材料物性が自ずと議論の対象となる。表2に各社の現状の光造形樹脂についてまとめて示した。

光造形システムの発明当初から実部品への応用が期待されているが、筆者らの長い間の樹脂開発の経験上得た知見から、靱性と耐熱性のトレードオフの関係の壁（図3）を超えることが極めて難しく、熱可塑性エンジニアリングプラスチックと同等な性能を得ることは殆ど不可能と思われる。そのため、光造形法だけの大きな利点である透明性や高精度を生かした用途を積極的に展開している。光造

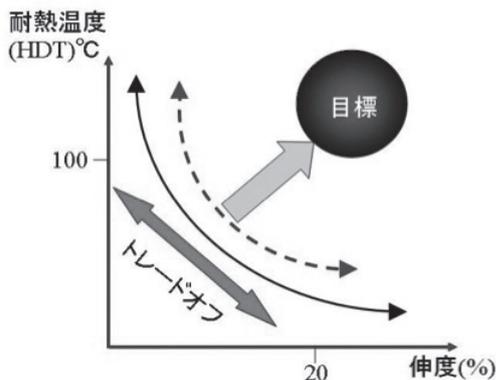


図3 耐熱性と靱性のトレードオフの関係

形用光硬化性樹脂材料についての詳細な説明は筆者の最近の総説（素形材、Vol. 53, No.10 (2012) 51-57）を参考にしてほしい。

光造形法では、例えば、高精度な造形物が得られるのでその用途を積極的に活用した (a) 宝飾用消失模型、(b) 補聴器のシェル応用、(c) 歯科応用などが積極的に利用されている。補聴器のシェルや歯科では個々人で形状が異なるため、スキャナデータをもとにした AM 法がぴったりである。ヨーロッパでは EnvisionTec 社の造形装置を用いたシーメンス社が補聴器市場を独占していると言われている。光造形の歯科への最初の応用では、AlignTechnology 社の矯正歯科用途が代表的なものであり、米国では既に千数百万人に適応され大きな成功を納め今日に至っている。ごく最近、3Shape 社の製品に代表される口腔内デジタルスキャナーの開発が進み、歯列データが極めて簡単に立体形状データとして汎用の STL データで出力されるようになったため、これを利用した用途開発が大きく期待されている。石膏印象を経由した従来工法からデジタルデータ利用への大きな転換が開始された。その一つとして、セラミック製人工歯の土台となる鋳造物の作成、仮歯や人工歯の作成方法が変わろうとしている。

2014 年 1 月の Consumer Electronics Show (CES) 2014 では、革新的な家電新製品の発表に加えて、新規な 3D プリンターが多数発表されて大きな話題となった。特にこの CES2014 では廉価版光造形装置が多数発表された。2012 年後半に発表された Formlab 社の Form1 の光造形装置 (SLA 機) がイタリア DWS 社の類似マシンであるにもかかわらず、機能を絞って民生用途に 35 万円前後という低価格で発売されたため 2013 年に大きな話題となった。2014 年の CES では DWS 社から DWS-XFAB (図 4) な

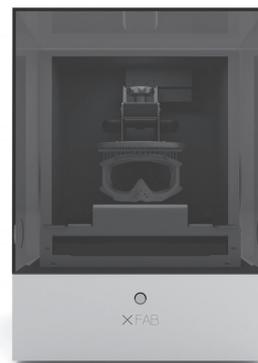


図4 DWS 社低価格光造形機 XFAB

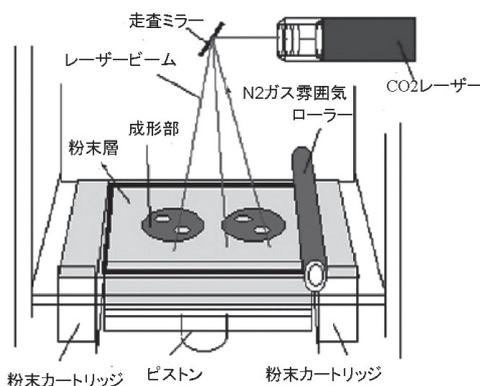


図5 粉末床溶融結合法（粉末焼結法）の概略図

る低価格機をはじめとして DLP 機を含め多くの低価格光造形装置が出現した。今後、低価格 FDM 機から低価格 SLA 機へと注目が移っていくことが予想され、3D プリンター機の流れとして注目したい。

3.2 粉末床溶融結合法（粉末焼結積層造形法）

ナイロン 12 からなるエンジニアリングプラスチック粉末を主体とするレーザービームの熱モードによる粉末焼結法は、1980 年後半のテキサス大学のグループからスタートし、1987 年米国特許が出願され DTM 社が設立され、多くの注目を集めたが、まもなく 3D システムズ社に併合された。ほとんど同時期にドイツの EOS 社もこの方法を採用して積層造形機の販売を開始した。この装置は図 5 で示すように、先の光造形法の液状樹脂がナイロン 12 粉末や金属粉末に置き換わったと思えば理解しやすい。

この粉末焼結法で利用されている材料の大半はナイロン 12（ポリアミド 12、PA12）で、ドイツ・エボニック社がほぼ独占供給している。一部 PA11 がアルケマ社から提供されてい

表3 EOS社の主な粉末焼結用材料

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の仲間)	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
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

表4 金属粉末床溶融結合積層システムメーカー

メーカー	製品例	国
3D システムズ	ProX100, 200, 300	米国
EOS	EOSINT-M 400	ドイツ
REALIZER	SLM 100, 250, 300	ドイツ
Renishaw	AM250	英国
CONCEPT LASER	M1 cusing, M2 cusing	ドイツ
SLM Solutions	SLM50HL, SLM150HL	ドイツ
Arcam	Q10, Q20	スウェーデン
ASPECT	RaFaEl550, RaFaEl300	日本

る。ナイロン粉末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も利用されている。また、日本のトリアル社によりポリプロピレン (PP) 粉末が開発され上市され多くの期待を集めた。しかし2～3年前に資金難から営業活動が停止され、2014年現在でも活動の話がないのは残念である。一方、EOS社では外科手術でのインプラントとして期待されるスーパーエンブラのPEEK誘導体の利用を可能としている。表3にはEOS社の代表的な材料を示す。

ドイツではFraunhoferを核として、金属粉にレーザ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いる。金属(合金)粉末として最近では殆どどのものが利用可

能になっている。既に表4に示すようにこの装置には多数のメーカーが参入して熾烈な戦を展開している。2014年にはDTM社出願の米国でのSLSの重要特許が切れたことにより、さらに多数の新規参入が予想されている。日本の経産省の大型プロジェクトもこの特許切れと無関係ではなさそうである。

スウェーデンのARCAM社は金属粉末の積層造形法としては他より遅く2002年に電子ビームを用いた装置を上市した。当初は造形物のできばえが優れていなかったため注目度が低かったが、最近ではその生産性からSLSやSLMなどの金属粉末レーザ焼結法よりも多くの支持を得ていると言われている。特にインプラント用のチタン金属やその合金(Ti6Al4V

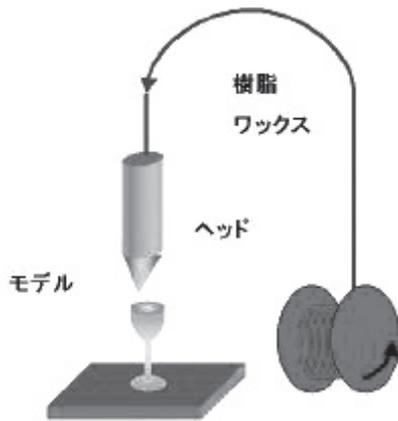


図6 材料押出法（溶融押出法）の仕組み

など）やコバルト・クロム粉末の造形では他を大きく引き離していると言われている。この電子ビーム造形装置開発でも経産省の大型プロジェクトで取り組み、日本電子や多田電機などのメーカーが中心となって開発が行われるものと推定され、その成果に期待したい。

3.3 材料押出法（溶融樹脂積層法；FDM）

米国ストラタシス社を設立した Scott Crump 氏により、1988 年頃 FDM 方式が発明された。細い線状熱可塑性樹脂をヘッド内部のヒーターで熱して溶融させ、極小のノズルから吐出させながら 1 層ずつデータに沿って積層させて三次元モデルを造形する。図 6 にその概略を示す。種々材料で高精度な造形物を得るために Stratasys 社は長い年月をかけてその装置を完成させてきた。射出成形と同様に樹脂材への水分を極力さけるために、金属あるいはプラスチックのパッケージに乾燥剤とともに収められており、その線材の直径は $1.75 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ にコントロールされている。線材は溶融まで水分に触れないように隔離されて供給されている。また、FORTUS 機では造形室チャンバーが 70°C にコントロールされている。造形中の接着性や反りに対応しているものと思われる。

FDM 機の方法は ABS 樹脂をはじめ、ポリカーボネート樹脂、PC/ABS アロイ、PPSF/PPSU 樹脂、ULTEM（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など）の広範囲な材料が使用できる。

ストラタシス社の上位機種である FORTUS シリーズでは広範な材料（表 5）の利用が可能であるが、普及機種である Dimension シリーズや u-Print では ABS-M30 相当の ABS-Plus 樹脂に限定している。ストラタシス社の造形物

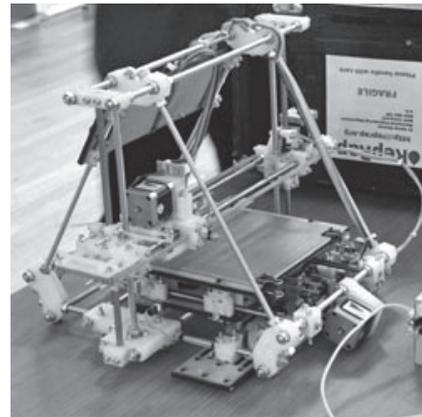


図7 RepRap 機

表 5 Stratasys 社 FORTUS シリーズの材料

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

PC：ポリカーボネート

(FDM 方式) は当初積層面 (x-y 方向) は強いが積層方向 (Z 方向) は弱いとされてきたが、材料の流動性の改善や造形条件が改良され現在では殆ど問題がないレベルになっている。そのため CAD データから直接最終製品と同等のものを得られ製品開発に極めて有効なものとなってきた。しかし、現状オーバーハング部でのサポート材としては苛性ソーダ水溶液で可溶なカルボキシル基 (-COOH) を含有する共重合高分子を用いているため、必ずしもその操作性に優れるとは言い難く、今後はより安全性の高い材料、例えば単純な水に溶解するようなサポート材の開発が期待されている。簡易で安全なサポート材の開発が進めば工業用途に利用できる高精度な造形物が低価格 FDM 機で得られるようになり、ものづくりの最前線で活用が一層広がるものと思われる。

3.4 FDM 法によるパーソナル 3D プリンター

イギリスの Bath 大学を中心にオープンソー

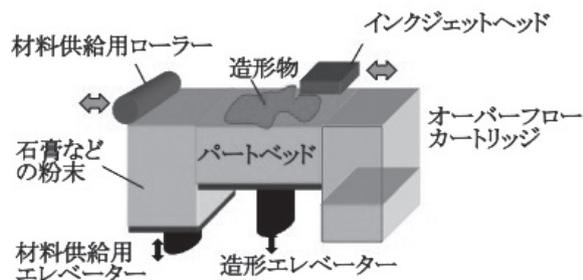


図8 結合剤噴射法 (Z-Printer) の概略図



図9 3DSystems 社 ProJet4500 機

スの RepRap (図7) プロジェクトが2005年にスタートし、大きく発展した。ストラタシス社の基本特許が米国で2009年に切れたことを契機に次々にベンチャー企業が立ち上がった、中でも Bits from Bytes 社 (BfB 社) と MakerBot 社が大きな成功を収め、その結果、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。低価格機である 3D システムズ社の Cube が2013年から家電量販店で取り扱われるようになり、3D プリンターの大衆化が進んでいる。最近では5万円程度の安価な装置も出てきており、我々一般個人が身近にパーソナル 3D プリンターに触れることが出来るようになってきた。

3D プリンターへの大きな注目の中、装置は海外はもとより国内でも多くの大小の企業が手がけ始めたことより更に大きな発展と成長が期待されるが、それらの材料は主に ABS 樹脂とポリ乳酸 (PLA) であり、材料は限定されている。このうちポリ乳酸はモデル材とサポート材の双方に利用されているが必ずしもその物性は満足できるものではない。これら低価格機の材料は中国産が多く、比較的安価 (3,000 円～5,000 円程度/kg) で売られている。

ABS 材と PLA 材が低価格機の主な材料のため、一般ユーザが制限なくいろいろな部品やモデルを作成するためには、更に高性能な材料、Stratasys 社の FORTUS シリーズで利用しているようなエンジニアリングプラスチックを安価に利用できることが求められる。そのため材料開発を材料メーカーである大企業に期待したい。さらに、上記したようにサポート材においても水可溶性の安全な材料の開発が強く求められる。

3.5. 結合剤噴射法 (インクジェット法)

3.5.1 Z-プリンター

1989年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) のシーマ氏、サックス氏らによりノズルから

出た水系の結合材により粉末を固化させて積層することでモデルを作成する方法が開発された。このライセンスを受けて設立された Z コーポレーションは、インクジェットによる積層造形装置 (Z-Printer) を1996年に発表した。その装置の仕組みは図8 (アスペクト社早野氏の資料より) に示す。

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光造形法や粉末焼結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の粉末に変更するとともに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より、形状確認やデザイン確認の用途で多く利用されてきた。最近では3D “プリクラ” 的に街頭等でデータを撮り、後日、マスコット人形的な肖像が送られてくるといったサービスもスタートしている。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いる。そんな中、3DSystems 社は2013年暮れのドイツ・フランクフルトでの Euromold2013 でその材料をプラスチック粉末とする図9のような ProJet4500 を発表し大きな期待を集め、2014年春から全世界で販売が開始された。この装置によるプラスチック材料の種類はさらに拡大するものと推定され今後の展開に注目したい。FDM 法と同様に MIT のインクジェット方式の基本特許が切れていることから、ビジネスチャンスを得る他社から新しい材料を利用できる同様な装置が上市されるものと推定され、目が離せない。

3.5.2 砂型鑄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



図 10 ExOne 社 S-Print 機



図 11 VoxelJet 社 VX-1000 機

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 3 次元積層造形法が最近大きな注目を集めている。この方式には、Z-Printer と同様に 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 社の砂型プリンター（図 10）と、Z 社からサブライセンスを受けた VoxelJet 社のもの（図 11）がある。中でも ExOne 社の砂型造形システムは、最近国内でも多くのところで導入が進んでいる。この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ている。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。材料は Z-Printer と同様に多種の材料を利用できないが、砂型鋳造機として極めて大型の装置の設計が容易であり、生産を意識した装置として今後は一層大きな発展が予想される。

2013 年 5 月の末に経済産業省の「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 年後をめどに、ExOne に代表される砂型用 3D プリンターの 10 倍の造形速度と、中小企業でも購入できるような 2,000 万円程度の価格機を目指したものである。ただし、既に空洞化した鋳物産業での生産にこの技術と装置が浸透することは、容易なことではないと思われる。

VoxelJet は、造形物の付加価値を高めるために、造形物が直接建築物の壁となるような用途や、PMMA 粉末を固着して直接消失模型に使用するシステムも上市し、新しい用途開発に積極的である。

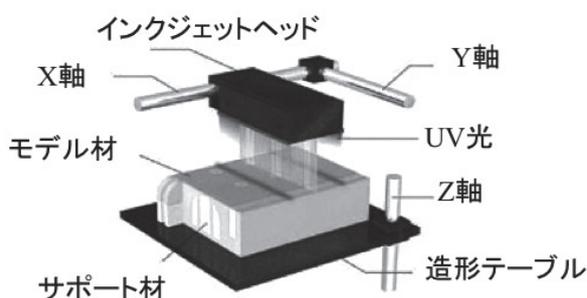


図 12 材料噴射法（Objet 機）の仕組み

3.5.3. 材料噴射（Material Jetting）

イスラエルの Objet 社（2012 年 12 月ストラタシス社に統合）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 ランプの光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 万円価格帯機から大型でかつ多種の材料や色彩の材料が利用できる数千万円の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不得意なため、その欠点をうまく利用して 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度に造形することができる。この装置の仕組みは図 12 に示すように、かなり複雑な機構を有している。

材料はアクリレート系の光硬化性樹脂で、フィラー入りの剛性の高いものからゴムライクな柔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 系統の樹脂をユーザが欲しい物性に近づけて造形できる「デジタルマテリアル」



図 13 Stratasys 社 Objet500 CONNEX3 機のカラー造形物

の使用が可能となっている。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なことより、今までのAM機ではなし得なかった造形物を簡単に得ることができる。例えば、透明な樹脂と不透明な樹脂を組み合わせることにより、透明な筐体中に不透明なものを表現することも可能である。その例として、妊娠中の胎児の状況を再現した造形物が日本から発表され多くの話題を集めた。このようにこの装置では極めて多彩な表現を可能としている。2014年の2月に入って Stratasys 社はこの方式のカラー造形機 Objet 500 CONNEX3 を発表して大きな衝撃をAMユーザに与えた。その造形物を図 13 に示す。前記 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た。

Objet 社が歯科向け応用を開始したのは2011年ごろからであるが、巧みな造形表現により米国を中心にサージカルガイド作成で多くの顧客を獲得していると聞いている。

一方、インクジェットのノズルより、加熱溶融したワックス材を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ものして、ロストワックス铸造用モデルを作成する Solidscape 社のものがあり、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・歯科のワックスモデル作成用に利用されている。また、3D システムズ社も比較的良好な機構ではあるが、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装置や、宝飾用のワックスモデルのための装置を数種類上市している。

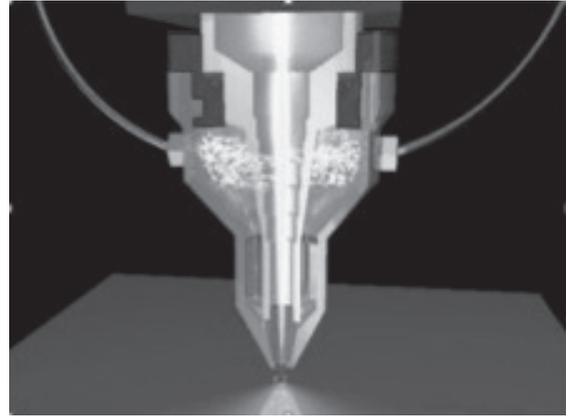


図 14 指向エネルギー堆積法のヘッド部 (Frounhofer 資料)

3.6 シート積層 (Sheet Lamination)

紙に代表されるシート状材料を、レーザ (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法があったがオーバーハングの取り扱いが得意でなかったために嫌われ2社とも撤退した。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部が得意ではないが用途を限って使えば新しい切り口があるものと積極的に販売活動を展開している。

一方、アルミニウムシートをデータ形状に切断後、超音波で接着させて積層させる方法が Solidica 社から発表されて久しい。この方式は中川東大名誉教授による積層金型づくりに似たものであり、きっかけがあれば注目される可能性も残されている。

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

Fe、Ni 金属粉末等を吹き付けながら炭酸ガスレーザやファイバーレーザーなどで直接溶融させて形状を作成する Laser Energy Net Shaping : LENS 法 (図 14) が OPTOMECH 社から提案され、改良が続けられている。また、ドイツ Fraunhofer でも盛んに研究開発が進められている。日本では同様な狙いでは、農工大の笠原教授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も提案されている。

3.8 ハイブリッド型積層造形装置

ごく最近では、Euromold2013 で DMG-MORI 精機からレーザー焼結の一種である LENS 方式に切削を組み合わせたとようなハイブリッドタイプの積層造形機「SAUER」



図 15 ハイブリット造形機 DMG-MORI 社 SAUER 機



図 16 松浦機械の LUMEX 機

表 6 各 3D プリンターとその材料

方式	メーカー	材料		主用途
		カテゴリー	具体例	
光造形/ 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
	Form1	光硬化性樹脂	アクリレート系	ホビー
光造形/ DLP-lamp	Envisiontec	光硬化性樹脂	アクリレート系	宝飾、歯科
	ASIGA	光硬化性樹脂	アクリレート系	宝飾、歯科
インク ジェット	3D Systems	光硬化性樹脂	アクリレート系/ワックス	宝飾
		光硬化性樹脂	アクリレート系	歯科
	Stratasys (Objet)	光硬化性樹脂	アクリレート系	形状確認
	3D Systems (Z)	石膏	石膏/水	デザイン・フィギュア
	Solidcape	ワックス	ワックス+バインダー樹脂 (Polyester)	宝飾
粉末焼結 /LASER	EOS	ナイロン、金属粉	PA12, SUS, Ti, Al, Co-Cr	試作、生産
	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
溶融積層 (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
	RepRap 他	熱可塑性樹脂	ABS, PLA	ホビー

(図 15) が展示され連日大きな話題を集めた。比較的短時間に切削精度の造形物が得られるとのことであった。同様なシステムが既に韓国の InssTek 社からは販売されている。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装置の開発が盛んになるものと推定される。

松下電工（現パナソニック）と松浦機械により、金属溶融積層と切削のハイブリットタイプが主に成形型の製作を目的に開発され「LUMEX」（図 16）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。金属粉末をレーザーで溶融積層しながら数層

に一回積層端面を切削して成形型としての機能を確保する造形法である。大きな成形型の作成には適していないが、200 mm 程度の比較的小型の型の作成には短時間で対応できることから最近の 3D プリンターブームとともに期待が高まっている。

3.9 3D プリンター材料

各 3D プリンターについてその材料を整理したのが表 6 である。石膏の粉末や砂材料のような無機物、スチール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。これらは

表7 各3Dプリンターの価格帯（対数価格）

方式	メーカー	価格帯 (万円)			
		10	100	1,000	10,000
光造形/LASER	3D Systems			■	■
	CMET			■	■
	DWS			■	■
光造形/DLP-lamp	Form1	■			
	Envisiontec			■	■
インクジェット	ASIGA		■		
	3D Systems			■	■
粉末焼結/LASER	Objet (Stratasys)			■	■
	3D Systems (Z)			■	■
	Solidcape			■	■
	EOS			■	■
溶融積層(FDM)	3D Systems			■	■
	アスペクト			■	■
その他	Stratasys			■	■
	3D Systems (BfB)	■			

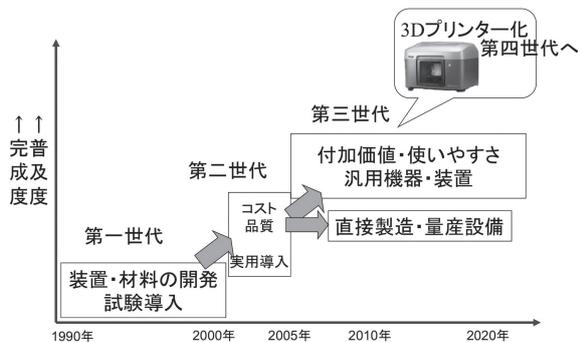


図17 AM装置（3Dプリンター）市場の推移

ユーザのニーズに応じて使い分けられている。しかしながらこれらの材料は装置とともに限定されたものであり必ずしも顧客のニーズに対応できているとは言い難い。そのため、3Dプリンターが発展するためには今後さらに広い要求に答えるべく材料開発を行うことが重要である。

4. 3Dプリンター市場の推移

図17にAM装置（3Dプリンター）市場の推移を示す。1980年代後半に発明があり、1990年からの約10年間の第一世代は、装置の開発や試験導入の世代であり、多くの装置が上市された。その後装置としての成熟が進み、そのコストや品質が問われ、めざましい発展とともに淘汰された第二世代を経て、必要不可欠なツールとしての広く利用される第三世代へと推移した。3Dプリンターと呼んでいるFDM機のDimensionやインクジェット機のZ-Printerの普及を経て、パーソナル3Dプ

リンターが立ち上がった第四世代へと進化している。パーソナル3Dプリンターは台数ベースで2013年に72,500台（Wohlers Report2014）と台数では業務用全3Dプリンターの7倍程度となっている。しかし、販売額からみるとまだ僅かであるが、爆発的な3Dプリンターブームに後押しされ、数年後には工業用ハイエンド機と拮抗するようになるものと推定されている。

5. 3Dプリンターの価格

3Dプリンターの価格について整理したのが表7である。価格はパーソナル3Dプリンターの10数万円から業務用ハイエンド機の1億円超のものまでであるので、対数価格で示した。当初、Stratasys社のDimensionとZ-Printerが500万円程度で販売されてから3Dプリンターの分野が確立された。最近では200万円前後が業務用では低価格帯の一つの目安となっている。ところが2010年あたりからパーソナル3Dプリンター（Terry Wohlers氏定義の50万円以下のもの）といえるFDM機が先に述べてように、基本特許消滅に伴うベンチャー企業大量出現により50万円以下で販売されるようになると、低価格化が起こりあつという間に新しい時代が開かれた。最近では国内メーカーから10万円前後の教育用途を狙ったものや、将来ハイエンド機を意識した20万円程度の低価格機がいくつか販売されるようになった。海外製品では5万円前後のFDM機がたくさん出てきており今後の行方は混沌としている。

6. 3D プリンターの今後の行方

いま大きな話題となっているパーソナル 3D プリンターを利用することにより、将来「誰もが容易に各種部品、部材を任意の材料で製造可能になる」ということがテレビなどのメディアでたびたび放映されているが、筆者は否定的である。パーソナル 3D プリンターで使える材料は限定的であり、その材料は、汎用熱可塑性樹脂や一部エンジニアリング樹脂に限られている。また、我々の生活の中で広く使われているプラスチック製品やその部品と同等精度または近い性能のものが作成可能となるのは極めて厳しいと考えている。積層造形は比較的形狀に制限がないが、造形方向により物性を発揮できなかつたり、多少ではあっても積層の段差があることとともに、緩斜面での段差は目立ちやすい。また工業製品並みの十分な造形精度を確保することが並大抵なことではないからである。

更に、金属の立体形状物を得るためには極めて高価な装置と環境が必要であり、このような金属造形装置が安価になり、身近なものになるためには、今後 10 年以上の年月が必要と推定される。全く新しい安価な方式が発明され普及することも考えられるが、製品に求める顧客の要求は常に極めて厳しく、日々利用している工業製品は完成品度の高いものである。そのことを思えば最終製品レベルのものを 3D プリントすることはほとんど不可能と思われる。

筆者のように材料の開発に長い間携わってきたものにとっては、「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ことは、極めて可能性は小さいと考えている。

安価な 3D プリンターの登場で、モノづくりに対する意識の変化は起こっている。しかし、3D プリンターを使うには、まず 3 次元データが必要であることから、3D CAD や 3D スキャナが自由にかつ意識せず使える環境が必要がある。3 次元 CAD で最終製品レベルのデータを作成することは個人の範囲ではなかなか容易ではない。今後は簡便でかつ高度な無償 3 次元 CAD が普及してくると推定されるが、それでも習得にはある程度の努力が必要と思われる。

7. 今後のものづくりに及ぼす 3D プリンターの影響

AM 法が発明されてからすでに 30 年以上が経過し、すでにもものづくりの世界では広く普

及 (RP、RM としての利用) している。そのため、この技術で、モノづくりのあり方特に産業としてのものづくりに変化は殆ど起こらないと考える。特に、高品質・安価・大量生産という枠組みには影響を及ぼさないものと考えている。

しかし、企業内でのデザイン検証・機能検証が極めて身近になり、今までの試作という生産に近いところから、商品立案・デザイン・設計という上流に広く使われるようになってきたことと、試作に大きなハードルがあった小さい企業には有効な手段となると考える。そのため、ベンチャービジネスの可能性が増大すると思われる。

また、個人の活動を中心とした生活付随物や表現・デザイン・ファッション・芸術などの分野で 3D プリンターは広く展開されていくものと思っている。創作活動としての「ものづくり」は活発になることで試作屋や出力サービスは一層盛んになるものと推定される。デジタルカメラとインクジェットプリンターによりフィルム会社と DPE 店舗が閉鎖されたのは異なる展開を推定している。

材料および 3 次元データの状況から、「3D プリンターにより産業革命が起こるか」という問いに対しては、簡単には「Yes」という答えは返ってこない。

8. 将来展望

3D プリンティングの消費者潜在ニーズ調査が MM 総研により 2013 年 3 月 27 日報告された。その結果、3D プリンティング (立体造形) に興味がある消費者は 5 割を超える共に、3D プリンティングには多彩な用途を期待していることが示された。また、「パーソナルファブリケーション」の普及可能性については、「大量生産・消費型の産業構造とは異なり、個人が自分の欲しいものを手軽に作成する、また創造していくという新しい構造の産業が生まれてくるのではないかと報告している。上述したように筆者も同様に考えている。

しかし、2013 年 5 月のマッキンゼー報告「Disruptive technologies 2025」では過剰とも言える期待を示し、2025 年には 6 兆円～20 兆円/年・世界という予想を示した。同様に経産省では 2020 年に 3D プリンター関連で 20 兆円を超える予想を展開している。この額は一つの大きな産業にも匹敵するものである。そのためには材料開発を含め、データ作成ツールの開発も装置の低価格化とともに必要であり、かなり楽観的に数値といえる。筆者は、

このように大きな期待を持つことは逆に大きな失望にも繋がると考えている。ニッチな市場ではあるが、3D データが真に活躍すると考えられる医療・歯科向けの発展を含めて市場の健全な育成が大切と考えている。

(本解説は、筆者が参考文献5である2013年の素形材誌に寄稿したものに新規な事項を追加し整理し直したものである。)

参考文献

- 1) T. Wohlers: “Wohlers Report 2013”, 及び “Wohlers Report 2014”, Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA.
- 2) 丸谷洋二・早野誠治 “解説 3D プリンター”, オプトロニクス社, 2014年5月
- 3) 萩原恒夫ホームページ; <http://www.thagiwara.jp>
- 4) 萩原恒夫 “素形材”, Vol. 53, No.10 (2012) pp51-57.
- 5) 萩原恒夫 “素形材”, Vol. 54, No.9 (2013) pp37-44.
- 6) 各社 3D Printer メーカーのカタログ
(ア)シーメット株式会社;
<http://www.cmet.co.jp>
(イ)米国 3D Systems Inc.;
<http://www.3dsystems.com>
(ウ)米国 Stratasys 社及び丸紅情報システムズ社;

<http://www.stratasys.com>,
<https://www.marubeni-sys.com/>,
http://jp.objet.com/Portals/15/docs/PDF/Brochure/Objet_System_Matrix_JP_sml.pdf

- (エ)ドイツ EOS 社及び NTT-Data エンジニアリングシステムズ社;
<http://www.eos.info>,
<http://www.nttd-es.co.jp>
- (オ) ExOne 社; <http://www.exone.co.jp>
- (カ)イタリア DWS 社及びドイツ EnvisionTec 社;
<http://dwssystem.com>,
<http://www.envisiontec.com>
- (キ)スウェーデン ARCAM 社;
<http://www.arcam.com>
- 7) マッキンゼーレポート (2013年5月);
http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/disruptive_technologies
- 8) MM 総研レポート (2013年3月);
<http://www.m2ri.jp/newsreleases/main.php?id=010120130327500>
- 9) 前田寿彦 “素形材”, Vol. 53 No.2 (2012) pp53-59.
- 10) 真弓 剛 “素形材”, Vol. 53 No3 (2012) pp25-30.
- 11) 萩原恒夫 “Euromold2013 報告” (非公開)