

3Dプリンターとその応用－光造形法を中心に

東京工業大学 萩原 恒夫

1. はじめに

3Dプリンター（三次元積層造形法）は2012年後半から大きな注目を集め、「第三次の産業革命を引き起こす可能性をも秘めている」とまで言われ大きな話題を集めている。本稿では3Dプリンターについて、その違いを簡単に述べるとともに、これらの中で最も古い歴史を持つとともに高精細で高精度の造形物を与えることで、日本の製造業で最も広く使われている液槽光重合法（光造形法）を中心に、現状とその応用について述べる。

2. 3Dプリンター (三次元積層造形装置) とは

2-1 3Dプリンターの定義

3Dプリンターとは、三次元(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、砂等の積層材料に対して、レーザビーム、電子ビーム、溶融押し出し、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三次元立体形状を精度良く作成する装置である。2009年のASTM会議で統一された分類によれば、これらは方式により表1のように分類されている⁽¹⁾。

これら3Dプリンターの世界市場はWohlersらの報告によると、産業用で年率20%以上の伸びを示し、産業向け装置の2013年の設置台数は10,000台前後となっている⁽²⁾。また、材料押出法(FDM)が中心の個人向け3Dプリンターは毎年倍々の伸びを示し、2013年には全世界で推計約73,000台、国内推計では約10,000台前後となっている。装置とその周辺を含めた全世界の市場規模は2013年で3,100億円と見積もられ、2020年には2兆1,000億円に達すると推定されている。今日個人向け3Dプリンターが爆発的に普及していることから、市場規模の拡大はこれらの推計値よりはるかに大きなものとなる可能性を秘めている⁽³⁾。

産業用3Dプリンターの用途は多岐に亘っており、

表1 3Dプリンターの分類

積層技術	英名	別名	材料	手段
液槽光重合法	Vat Photopolymerization	光造形法、SLA	光硬化性樹脂	レーザ、ランプ
粉末床溶融結合法	Powder Bed Fusion	粉末焼結法、SLS、SLM、EBM	PA粉、金属粉	レーザ、電子線
材料押出法	Material Extrusion	溶融樹脂積層法、FDM法	ABS、PCなど	熱
結合剤噴射法	Binder Jetting	インクジェット法、Z-Printer法	水系バインダー	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	レーザ、カッターナイフ
指向エネルギー堆積	Direct Energy Deposition	LENS法など	金属粉末	レーザ

従来からの形状確認やプレゼンテーション、試作品（プロトタイプ）製作が主体であったが、金属鋳造用の消失模型や金属型のパーツ、機能部品等々への利用が拡大し、これらの用途のが全体の半数近くに達している。このことから最終製品またはそれに近いところでの活用が急激に進んでいることを示している⁽²⁾。

2-2 パーソナル3Dプリンターの出現

2000年に入った頃から比較的安価（数百万円）な材料押出法のDimension機（Stratasys社）や、デンプン粉や石膏を水性バインダーで固着するZ-Printer機（Z社）などの積層造形機が出現し、3Dプリンターという名称が使われるようになった。

その後、Stratasys社のFDM方式の基本特許が2009年に切れるのを見越して、2005年になるとイギリスを中心とする大学発のオープンソースプロジェクト（RepRap）が立ち上がり拡大していった。特許が切れた2010年頃からBfB（Bits from Bytes）社やMakerbot社を始めとする多くのベンチャー企業が廉価版FDM装置の製造・販売を開始して大きな成功を収めている⁽²⁾。

2012年にはクリス・アンダーソンが自身の著書“Makers”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3の産業革命が起きるやもしれない。」とした。一方、オバマ大統領は、2013年2月の一般教書演説の中で、3Dプリンターにより、アメリカに新しいハイテク産業と雇用が生まれるとした⁽⁴⁾。

これらを契機として、全世界でテレビ・新聞などのメディアが連日取り上げ「3Dプリンター」が1つのファッショントンになっている。

2014年1月の米国・ラスベガスでのConsumer Electronics Show (CES) 2014では低価格の液状光硬化性樹脂を用いる光造形装置が多数出現し、興味の中心が低価格FDM機から高精度・高精細が期待される低価格光造形機へと移行している。今後はこの低価格機の行方が注目される。

3. 液槽光重合法 (光造形法)について

槽に満たした液状の光硬化性樹脂液表面に紫外線や可視光線を照射し一層ずつ硬化させ造形テーブルを下降させながら積層する光造形法は1980年に、液状の光硬化性樹脂にネガを通して紫外線を照射して印刷版

を作成する展示・デモをヒントに名古屋市工試の小玉秀男氏により発明され、その後、3Dシステムズ社やシーメット社により実用化された。この上面から光照射するタイプ（自由液面法）の光造形装置の光源は基本的に紫外線レーザであり、当初はHeCdレーザ（325 nm）が使われたが直ちにArイオンレーザとなり、その後半導体励起の固体UVレーザ（355 nm光）となり、現在に至っている⁽⁵⁾。

比較的小型の光造形装置では、紫外線や可視光を光源とするDLPを用いるプロジェクター方式や405 nmのLEDレーザを用いて、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タイプも普及している。この下面照射タイプの装置では樹脂液を平滑化するためのリコーターを持たないことで駆動系が簡単となる。ごく最近の低価格光造形装置では全てこの下面照射方式を採用している。

このように、光造形法については、上面から光照射する大型のタイプ（自由液面法）と下面から光照射する比較的小型のタイプ（規制液面法）の2種類に大別される。

3-1 自由液面法（上面照射タイプ）の光造形装置

国内のシーメット社や米国の3Dシステムズ社の2社が製造・販売する代表的な自由液面タイプの大型光造形装置は図1のような構成で主として産業用の高精度な試作品の製作などに用いられている。図1に示すように、THG現象を利用した固体レーザから発信した355 nmのレーザ光はAOMなどの光変調機、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の光硬化性樹脂の液面（自由液面）の

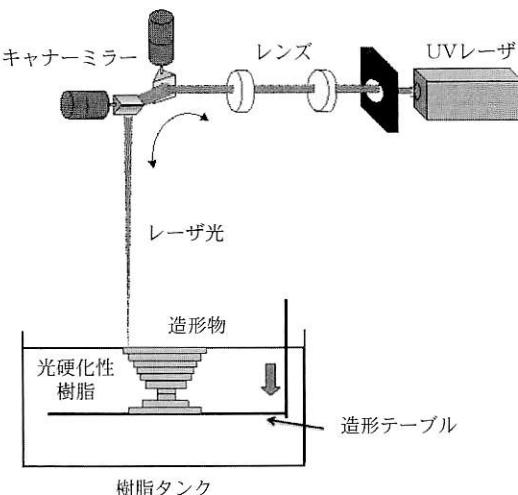


図1 上面照射タイプの大型光造形装置の構成

上から所定の積層厚み（通常0.1～0.15 mm）になるようにレーザ光（0.2 mm前後のビーム径）を制御しつつ照射して、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すことにより所望の三次元物体を作成する⁽¹⁾。

この方式は比較的大型の装置（500 mm～1 mサイズなど）の設計が容易のため、自動車や家電分野などの基幹産業の試作用として活躍している。光造形用樹脂としては、経時変化が小さく、高精度が要求される試作分野に主として用いられていることから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型の光硬化性樹脂が用いられている。さらに最近では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ともに、組成物粘度低減による機械動作ロスの改善により造形速度を向上させたものが主流となり、シーメット社、3Dシステムズ社およびDSM-SOMOS社からその樹脂が提供されている。また、筆者らが精力的に取り組んできたエポキシ系樹脂の開始剤の非アンチモン化が進行し、シーメット社はそのラインナップを完成させ樹脂材料を非劇物扱いとしその取り扱い性を向上させている⁽⁵⁾。

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20年を超える樹脂開発の経験上得た知見から、韌性と耐熱性のトレードオフの関係の壁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ほとん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中心に利用されている。光造形用光硬化性樹脂の詳細な解説は筆者の総説⁽⁵⁾⁽⁶⁾を参考にしてほしい。

3-2 規制液面法（下面照射タイプ）の光造形装置

産業用の光造形機は自由液面方式が主流であるが、古くは三井造船社が液の下面からレーザ光を照射する規制液面法を開発して上市したが、この方法では大きな造形物を得ようとすると作業テーブルからの脱落や硬化物と透過ガラス面との剥離にやや問題があったため、間もなく事業から撤退した。

その後2000年頃国内で、この下面照射の規制液面法を採用し、小型で可視光のレーザを利用した光造形機がアウトストラーダ社から、当時として極めて廉価な300万円程度で販売され、教育機関等に多く納入された。数千万円の装置が中心であった光造形機の市場にこのような低価格機の参入は画期的なものであった。ほぼ同時期に可視光ランプとDLPプロジェクターを用

いた液状光硬化性樹脂の積層造形機がドイツのEnvisionTec社から発売されこの装置でも大きな造形物を得ることに努力が払われていたが、その後、比較的小さくて付加価値の高い補聴器や宝飾関連の造形物を得ることに方針転換して行った。

2007年にイタリアのDWS社⁽⁷⁾は下面照射タイプ（図2）で、レーザを用いる光造形機を開発して宝飾市場に参入した。今日ではDWS社はレーザ描画による高精細・高精度を生かして宝飾用途での3Dプリンター市場をEnvisionTec社と二分するまでに至っている。

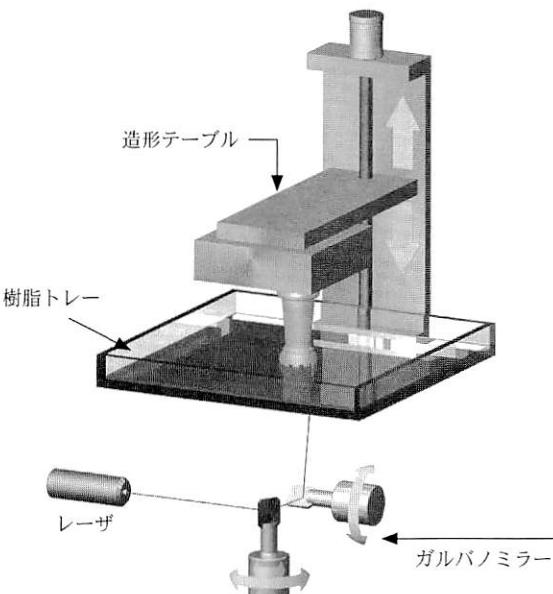


図2 DWS社のスキャナタイプの構成

以上述べた産業用の光造形機（液槽光重合タイプ）の特徴について表2にまとめる。

4. 材料噴射型光硬化性樹脂装置

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。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

表2 工業用途用光造形機（液槽光重合法タイプ）

方式	メーカー（国）	造形サイズ（mm）	材料	主な用途
自由液面法レーザ	3D Systems（米）	250×250×250 650×750×550 1,500×750×650など	・エボキシーアクリレートハイブリッド、 ・フィラー入りエボキシーアクリレートハイブリッド、など	試作、形状確認・デザインレビュー、機能試験、消失模型、歯形
	シーメット（日）	400×400×300 610×610×500 800×600×400	・エボキシーアクリレートハイブリッド、 ・フィラー入りウレタンアクリレート、 ・光硬化性シリコーン、など	試作、形状確認・デザインレビュー、機能試験、消失模型、医療モデル
規制液面法レーザ	DWS（伊）	65×65×90 130×130×90 150×150×200など	・アクリレート ・フィラー入りウレタンアクリレート、など	宝飾鋳造、歯科鋳造、仮歯、歯形試作、形状確認
規制液面法 DLP(LED) ランプ	EnvisionTec（独）	40×30×100 84×63×230 160×100×230 457×457×457など	・アクリレート ・フィラー入りウレタンアクリレート、など	宝飾鋳造、補聴器シェル、歯科鋳造、試作、形状確認

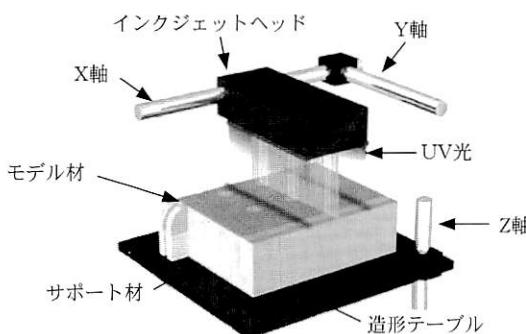


図3 Stratasys社MJM (Objet機) の仕組み

できる。この装置の仕組みは図3に示すように、かなり複雑なものである。

材料はアクリレート系の光硬化性樹脂で、高透明樹脂やフィラーエンrichの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シリーズでは硬一軟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」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た積層造形が可能なため、今までの積層造形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を発表した。バインダー吐出タイプの石膏粉を用いるインクジェット機のみであったカラー造形が光硬化性樹脂を用いる装置でも可能となりデザイン検討などの用途拡大が期待される。

また、3Dシステムズ社もObjet機に比較的よく似た機構ではあるが、造形物には光硬化性材料を利用し、サポート材にワックスを利用する装置Projet3500シリーズを意匠確認モデル用や歯科用に上市している。これらは、光硬化性樹脂を用いて造形物を得るという立場から本解説では言及した。

5. 液槽光重合法（光造形法）の応用

液槽光重合法は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、(d)工業用の微小モデルの試作品、(e)フィギュアーマスターモデル（図4）などに積極的に利用されている。高精度の要求される補聴器のシェルや歯科用途では個々人で形状が異なる

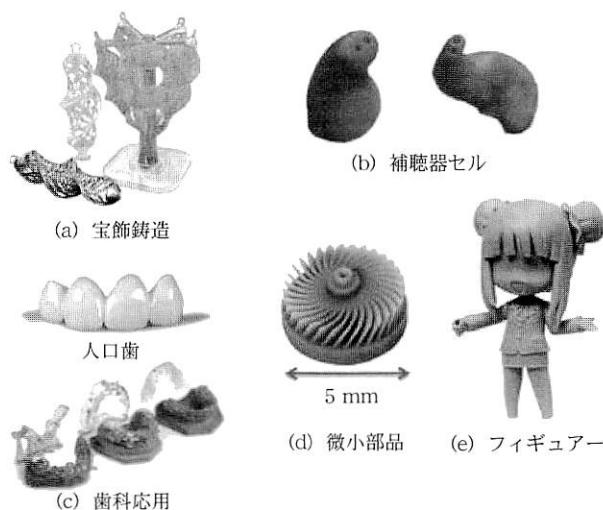


図4 液槽光重合法（光造形法）の応用例

ため、スキャナデータをもとにした液槽光重合法が最適である。ヨーロッパではEnvisionTec社の造形装置を用いたシーメンス社の補聴器作成が補聴器市場をほぼ独占しているとのことである。光造形の歯科への最初の応用は、間接利用ではあるAlign Technology社⁽⁸⁾の矯正歯科用途が代表的なものであり、米国ではすでに1,700万人以上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、これを利用する歯科用途開発が進んでいる⁽⁹⁾。石膏印象を経由した従来工法からデジタルデータの利用への転換が開始された。その1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や仮歯・人工歯の作成方法が提案されている。この分野での液槽光重合法、すなわち光造形法が今後とも大きな役割を果たすものと推定される。

6. 光造形法の今後

三次元積層造形（AM）法の原点である光造形法の発明からすでに30年以上が経過し、引き続いて発明されたその他のAM法を含めて基本特許が消滅することでAM装置が再び大きく注目されている。これらは3Dプリンターとして周知され、商品立案・デザイン・設計や個人の活動を中心とした生活付随物、自己表現・ファッショニ・芸術などの分野で広く展開され始めている。

液槽光重合（光造形）法はその得意とする透明性と高精度が求められる試作や機能試験の分野や、高精度・高精細が生きる精密機械分野、さらに医療・歯科向けにその役割が大きく拡大している。

〈参考文献〉

- (1) 丸谷洋二・早野誠治：“解説3DプリンターAM技術の持続的発展のために”，オプトニクス社刊（2014年5月）
- (2) T. Wohlers：“Wohlers Report 2013”，及び“Wohlers Report 2014”，（Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, USA）
- (3) i-MAKERS.news, ホームページ：
<http://i-maker.jp/3dprinter-market-2-5684.html>
- (4) YouTube : <http://www.youtube.com/watch?v=Yw1jAdMgsW8>
The White House :
<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address>
- (5) 萩原恒夫：“光造形用樹脂とその造形物の現状と将来”，素形材，Vol.53, No.10, pp.51-57 (2012)
- (6) 萩原恒夫：“材料から見た3Dプリンターの現状と将来”，素形材，Vol.54, No.9, pp.37-44 (2013)
- (7) イタリアDWS社ホームページより：
<http://dwssystems.com>シーフォース社ホームページより：
<http://www.seaforce.co.jp>, <http://www.digitalwaxasia>
- (8) Align Technology 社 : <http://www.aligntech.com>
- (9) 大竹範幸：“3Dプリンターにより造形技術の歯科臨床応用－補綴臨床における造形方法と精度検証”，補綴臨床, Vol.47, No.3 (2014)

【筆者紹介】

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

『日・韓・英』技術用語ハンドブック

B6判・400頁

定価：2,500円+税

『日・中・英』技術用語ハンドブック

B6判・388頁

定価：2,500円+税

「建築・土木」、「電気・電子」、「機械」、「コンピュータ・情報処理・通信」、「エネルギー」、「環境」の6分野の頻出用語を収録。

日本工業出版(株)

フリーコール 0120-974-250

netsale@nikko-pb.co.jp