

特集 ■ 3D プリンタと VR

デスクトップ 3D プリンタの最新動向



池田 潔

日本バイナリー

Ikeda Kiyoshi

1. はじめに

RepRap プロジェクトに代表されるオープンソースの組み立てキットとしてスタートしたパーソナル 3D プリンタは、2009 年ニューヨーク・ブルックリンで創業した MakerBot Industries 社 [1] の完成品 3D プリンタ Replicator の成功によって、一部の愛好家向けと見なされていたものが、あっという間にホビイストの域を超えて、いわゆるプロシューマと呼ばれるユーザ層に広がり、大学や企業のディマンディングユーザに受け入れられるのに時間はかからなかった。

一躍世界的なマーケットリーダに成長した MakerBot Industries 社は、2013 年に産業用 3D プリンタ界の二大勢力の一つである Stratasys の傘下に入り、同社にとって第 5 世代となる 5th Generation シリーズとして、プリントボリュームの異なる 3 種類の製品を発売、今も精力的に市場を牽引している (図 1)。このような、これまでにない低価格帯の熱溶解積層 (FFF: Fused Filament Fabrication) 方式のデスクトップ 3D プリンタの普及に伴い、ABS や PLA といった熱可塑性プラスチックが大部分であった材料に多様性が出てきた。熱溶解積層方式の 3D プリンタは、機種ごとに専用の材料を使用する必要があるプロフェッショナル 3D プリンタと異なり、スプールに巻かれたフィラメントと呼ばれる細長いワイヤー状の材料を共通で使用するため (一般的にフィラメントの径は 1.75mm と 2.8 ~ 3mm が

ある)、大手化学メーカーからスタートアップまで、材料を専門に提供する企業の参入がにわかに進んでおり、金属質やゴム状などといった特殊材料も市場に出て来始めた。

本稿では、注目の新材料とそれに関連する技術や製品の最新の動向について紹介したい。

2. 金属質フィラメント

2.1 青銅・銅

マスタバッチ (高濃度色素コンパウンド) とバイオポリマに豊かな経験を持つオランダ Helian Polymers 社 [2] は、高品質フィラメントを掲げて 3D プリンタビジネスに参入、ColorFabb ブランドを立ち上げた。PLA に PHA (polyhydroxyalkanoate) を配合した PLA/PHA フィラメントは、一般的な PLA よりも強靱で折れにくく、PLA では難しかった部品の嵌合も可能にしている。PHA も PLA 同様に生物由来のため 100% の生分解性を持つ。

ColorFabb シリーズの bronzeFill と copperFill は、その PLA/PHA に青銅または銅の粉末を混ぜ合わせたフィラメントで、一般的な PLA と同様の設定でプリントでき、レイヤー間の溶着性は PLA よりもむしろ優れている。4g/cc の密度を持つため、本物の青銅や銅には及ばないものの (8.70g/cc, 8.96g/cc)、通常の PLA (1.24g/cc) での造形物に比べて手に持つとずっしりとした重量を感じる。

プリントしたままの状態では金属質には見えないが、やすりがけすることで、表面に金属の粒子が露出し、リアルな質感が表出されてくる。粗めの紙やすりから始めて、徐々に細かくして行き、さらにスティールワールで表面を磨く。仕上げに銅磨きを使えば、見た目に完璧な青銅製や銅製に見える作品が出来上がる (緑青付けの処理も可能)。ColorFabb の次の金属質フィラメントとして、真ちゅうの粉末を混合した brassFill の発売が発表されている (図 2)。

金属混合フィラメントは、金属粒子により効率よくフィラメント内を熱が伝わるため、ホットエンド部ですぐに加熱され、ノズルを出るとすぐに冷えて固まる。張



図 1 Replicator 5th Generation 3D プリンタ



図 2 copperFill 後処理前と後処理後 (口絵にカラー版掲載)

り出した部分で通常の PLA よりもよい結果が出ることになるので、例えば、あごや鼻、耳などの張り出し部の多い胸像を造形するために大きなプラスとなる。ColorFabb の金属混合材料に導電性はないが、置物やアクセサリなど、金属の質感が効果をもたらす用途に活用できる。

2.2 ステンレス・鉄

米国ワシントン州の ProtoPlant 社 [3] も、Proto-pasta ブランドとして金属質材料を始め、ユニークな材料を提供している。ステンレスフィラメント (Stainless Steel PLA) は、PLA にステンレスの粉末を混ぜたもので、ステンレスならではの美しい鏡面反射を持つ質感を表現できる。プリントしたそのままの状態では鋳物のように見えるが、磨き上げることでまったく違ったフィニッシュになる。ワイヤブラシで磨くにつれて徐々に光沢が増し、研磨機で仕上げるとレイヤーも見えなくなり、本物のステンレスのような光沢が得られる。ただし、材質としてはステンレス粉末が混ざった PLA なので、むしろ標準的な PLA よりも強度は低い。フィラメント状ではやや壊れやすいので扱いに注意が必要である。Magnetic Iron PLA (鉄) は、PLA に鉄の粉末を混合した材料で、含有する鉄成分によって強磁性を持つため磁石に吸い付く。また、表面にやすりをかけて鉄の粒子を空気に触れさせた上で食塩水に 2~3 日浸けておくと錆も生じるので、レトロな質感を表現するのもおもしろい。ステンレスフィラメント同様に、強度は標準的な PLA よりも低い。

2.3 導電体

Proto-pasta Conductive PLA は、導電性のあるカーボンプラックと分散剤を PLA に配合したもので、その導電性は、レイヤーに対して垂直方向 (積層方向) が $30\Omega\cdot\text{cm}$ 、レイヤー面に沿った方向で $115\Omega\cdot\text{cm}$ 、全体的な体積抵抗率としては $15\Omega\cdot\text{cm}$ との仕様が発表されている (1.75mm 径のフィラメントで長さ 10cm の抵抗が $1.8\text{K}\Omega$ 、2.85mm 径フィラメントの場合で 600Ω) (図 3)。

2.4 ビスマス・タングステン (高密度)

放射線医療機器の開発請負に多年の経験を持つ Turner Medtech 社 (米国ユタ州) [4] が開発した高密度 ABS フィラメントは、医療機器や工業製品の開発におけるプロトタイプングをデスクトップ 3D プリンタで可能にする材料として注目されている。GMASS と呼ばれるこの材料



図 3 Proto-Pasta 導電性材料 使用例 (口絵にカラー版掲載)



図 4 GMASS 高密度フィラメント

は、ビスマスまたはタングステンを ABS に独自のブレンドで調合し、ABS プラスチックのデザインの柔軟性を持ちながら、 $2.7\sim 4.0\text{g/cc}$ の本物の金属に近い密度を持っている (図 4)。重量のあるモデルを自由な形状で製作できるため、スポーツ用品などでのウエイトやバランスの作成や、その高い密度による放射線遮蔽や振動吸収といった効果も期待できる。さらに、材料に鉛を含まないため、環境に優しい。X線装置メーカーの設計者がコリメータの試作設計や開発過程におけるコストと時間を大幅に節減、いち早く製品を市場にリリースできる。

3. その他の特殊フィラメント

3.1 木材質フィラメント

ColorFabb woodFill は、約 70% の PLA/PHA に 30% の木質繊維を混合したフィラメントで、木材のような見た目、軽さ、質感、さらには木の香りをも表現する。材料に含まれる木材微小片により通常のプラスチック材料に比べて積層ピッチが目立ちにくく、切削や着色と行った後処理も可能である。本物の木材よりもやや延性があるため、ふつうの取り扱いにおいて折れにくい木材質フィラメントを用いた応用例として、ポーランドで行われた教会の古い木像のレプリカ制作が特に知られている。祭壇に並ぶ木像を 3D スキャナでスキャンし、そのデータから実物大のモデルを木材質フィラメントで 3D プリントしている。スキャンデータは 3D プリンタが造形可能なサイズに収まるように分割され、3 台の 3D プリンタを駆使して出力。積層ピッチは部位ごとに求められるディテールに応じて、 0.3mm と 0.1mm を使い分けた。高さ約

150cm の一つの像の制作に、1 個あたり約 15m³ の大きさの分割エレメント約 80 個が貼り合わされた。プリントに要した時間は、1 エレメントあたり 4～14 時間で (平均すると 8 時間 / エレメント)、作業時間は 600 時間以上にも及んだ。完成した木像は着色され、木の質感を持つ完成度の高いレプリカとして高く評価されている。

木材質の材料としては LAYWOOD-D3 も Kai Parthy の作品として比較的早くから知られており、木材繊維を 40% 含有、造形時の温度設定によって色が変わる特質を持っている (高温ほど濃くなる)。woodFill 同様に切断や切削といった後処理が可能で、着色もできる。

ColorFabb ではさらに PLA/PHA に 20% の竹繊維を配合したフィラメント bambooFill を販売しており、竹細工や工芸品のような造形物を制作することができる。

3.2 蓄光フィラメント

蓄光性の顔料を PLA や ABS に混合した蓄光フィラメントが、MakerBot や ColorFabb などから発売されている。フィラメントそのものは白やクリーム色だが、暗い中に置くと蓄えられた光が発光する。より強く長く発光させるには、強い光で長時間露光させることも重要だが、造形を 100% フィルで行うことによっても発光効果を高めることができる。キーホルダーやストラップ、インテリアなど、生活の中での実用品や、暗い作業環境での蓄光塗料とはまた違った特徴的な標識などに応用されている。

4. 多材料対応 3D プリンタ

特殊材料フィラメントは、市場にある一般的な熱溶解積層式デスクトップ 3D プリンタでの使用を前提とするため、3D プリンタ製品のハードウェア仕様に制限を受けざるを得ない。どんなに優れたプリント材料を開発しても、それを正しく出力できる能力を持つプリンタが必要なのは言うまでもない。

多様な材料を熱溶解積層式のデスクトップ型 3D プリンタで出力するには、ホットエンドの温度を通常の ABS や PLA を溶かすレベルの 200℃～250℃近辺からさらに高温にする必要がある。エンジニアリンググレードの材料は、かなり高温の持続温度を必要とする。たとえば、ポリカーボネートを正しくプリントするには 300℃以上の射出温度が必要になる。このような高温は、高額な工業用 3D プリンタでのみ可能であったが、デスクトップ型 FFF 方式でそれを可能にしたのが、米国 Airwolf3D 社 (カリフォルニア州)[5]である (図 5)。

Airwolf3D 社が JRx と名付けたジャミングフリーのホットエンドは、材料を滑らかに送り出すためにテフロンを使用しているが、高温に弱いテフロンをサーバルバリアによってヒータから隔離することで、315℃までの高温を持続しながら滑らかに材料を送ることができる。その



図 5 Airwolf3D 3Dプリンタ (口絵にカラー版掲載)

結果、ポリカーボネートやナイロン材料でのプリントが可能となるため、高い強度の造形物の製作を実現する。

JRx ホットエンドの技術は、二つのエクストルーダを持つデュアルエクストリュージョンモデルにも大きな効果をもたらしている。二つの材料を同時に使用できるデュアルエクストリュージョンは、2色混合のプリントや、サポート材として溶解性材料の使用といった利便をもたらすが、二つのエクストルーダのアラインメント、温度、材料送り制御の難しさがあり、それが目詰まりや液だれといった問題を生じさせる場合がある。Airwolf3D のデュアルエクストルーダ JRx2 は、二つのホットエンドが一体に作られている。一体化された二つのホットエンドはズレることがないので、XY 軸のアラインメント問題を解決し、ユーザによるキャリブレーションは不要である。

Airwolf3D 社の 3D プリンタが対応する幅広い材料の中から、特徴的なものをいくつか紹介したい (これら材料には Airwolf3D 社以外の 3D プリンタでも使用可能なものも含まれる)。

(1) ポリカーボネート

試作品による機能性試験のためには、強くて耐久性のある材料が求められる。PLA や ABS をベースにした材料は、そのような要求に必ずしも適していない。この要求を満たすのが、工業製品にも用いられているポリカーボネートフィラメントである。高温材料であるポリカーボネートは高い耐熱性を持ち、耐衝撃性にも非常に優れている。レイヤー間の溶着にも優れ、表面の仕上がりもすばらしい。高い透明度を持つことから、光学部品や自動車のヘッドランプに使用されている。ホットエンドの温度設定 315℃で、良好な出力結果が得られる。

(2) Bridge ナイロン

Taulman 社の Bridge ナイロンは、ABS と一般的なナイロンフィラメント (ナイロン 645 など) のギャップを橋渡しするという意味で、"Bridge" と名付けられたもので、簡単にナイロン素材による 3D プリントができる。ナイロン 645 相当の強度特性を持ちながら、溶着性の高さといった 3D プリントに適した特性を備えている。高い強度を持ちながら、一般的なナイロンに比べるとわず

かながらに柔軟性も持つ。従来のナイロン材料の主な問題として湿度の問題があったが、Bridge ナイロンは湿気に強く、管理も容易で簡単にプリントできる。

(3) PC/ABS アロイ

PC/ABS はポリカーボネートと ABS を混合した材料で、強固で弾性のある部品を作ることができる。極めて丈夫な材料で、大型のプロフェッショナル 3D プリンタ用材料として用いられている。標準の ABS に比べて、熱たわみ、耐衝撃性、剛性、そして表面仕上げが優れている。

(4) TPU

TPU は Thermoplastic Polyurethane(熱可塑性ポリウレタン樹脂)の略で、弾力性、透明性、油への耐性、耐摩耗性、せん断強度などといった、多くの優れた特性を持っている。TPU は、自動車の計器パネル、キャスター車輪、電動工具、スポーツ用品、医療機器など工業製品で広く使用されている。レイヤー間の溶着性に優れ、積層段差が目立たない。

(5) HIPS

HIPS は High Impact Polystyrene(耐衝撃性ポリスチレン)の略で、ABS によく似た特性を持ち、Limonene で溶けるサポート材として用いられる。2ヘッドのプリンタを用いることで、モデル本体とサポート材を同時に出力できるため、複雑な形状の造形が可能になる。

(6) Soft PLA

Soft PLA はゴムのような質感と機能を持つ柔軟材料で、弾性とわずかな可鍛性を持つ。通常の PLA と同じ扱いでプリントでき、サポート部も簡単に除去することができる。完成品の用途が曲げ伸ばしされるのであれば、強度を持つために最小の積層ピッチでの出力が好ましい。造形物はその柔軟性から衣類として用いられる場合も多い。

(7) TPE

TPE は Thermoplastic Elastomer の略で、Thermoplastic Rubber とも呼ばれる。非常に柔軟、かつ高い強度を持つ。造形物はまるでゴムのように、元の形状に戻る。

ショア硬度(反発硬さ) 85A は、自動車のタイヤに相当する。NinjaFlex のブランド名で知られ、豊富なカラーバリエーションが用意されている滑らかなフィードイングで、フィラメントも取り扱いやすい。

(8) LayBrick

3D プリント材料の開発者として著名な Kai Parthy による材料で、極めて細かい石膏粉末と無害のコポリエステルで作られたナチュラルな無機充填剤で作られており、その造形物は石のような手触りを持つ。比較的低めの設定温度でプリントすると表面が滑らかになり、高温になるにつれて砂岩のような質感になる。造形物は表面を着色したり研磨することができる。湾曲がないので巨大な造形物に適している。

(9) BendLay

やはり Kai Parthy の作品で、透明アクリル樹脂のような極めて高い透明度を持ち、弾力性に富み、伸縮する。ほとんど透明なモデルを製作できる。家庭用品や食物に安全なブタジエンを元に作られた材料で、レイヤー間の溶着性が高く、簡単にプリントできるフィラメントである。

(10) T-glase

Taulman 社のポリエステル樹脂フィラメントで、FDA 認可のポリマーで作られているため、食器や容器といった食品に直接触れて使用することができる。極めて透明性が高く、水晶のような質を持つ。アクリルやガラス、PET フィルム上で簡単にプリントできる。

(11) IGUS IGLIDUR L180-PF Tribo-Filament

ポリマーベアリングなどのエンジニアリングプラスチックメーカー、ドイツ igus 社によるフィラメントで、一般的な PLA や ABS 材料に比べて 50 倍以上の耐摩耗性、耐擦傷性を持つ。耐用試験によって裏付けられた品質と寿命は、可動部品としての使用に十分耐え、実用レベルの試作品を短期間そして低コストで製作できる(図6)。Airwolf3D 社では、より安定した 3D プリントを提供するために、ABS のプリントに適した加熱ベッド塗布用接着剤 Wolfbite を発売した。加熱されたガラス製ベッド

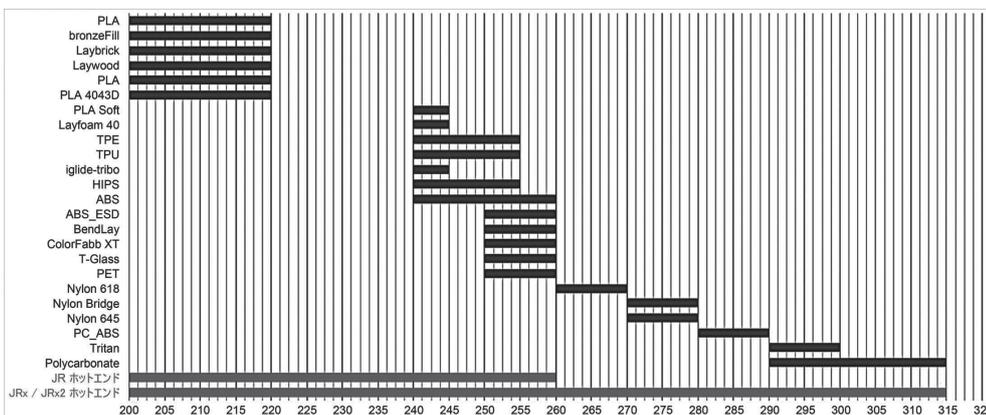


図6 プリント材料とホットエンド加熱温度



図7 フィラメント製造機 (口絵にカラー版掲載)

に使用できるこのユニークな液剤は、表面科学とポリマー科学を専門とする Cerritos College の Miodrag 教授と共同で開発されたものである。

ABS は、その丈夫な特性と後処理の柔軟度によって 3D プリントの材料として好まれているが、正しくプリントするには相応に処理された表面上に造形しなければならぬ。よくある処置としては、PET(ポリエチレン・テレフタレート)フィルムまたは Kapton テープをガラス板表面に貼り、溶かした ABS やアセトンに表面を塗るといった方法がある。しかしこの場合、何回か使用するうちにフィルムは損傷し、部分的に剥がしにくくなったり、フィルムごと剥がれてしまうことが生じる。Wolfbite は、PET フィルムや Kapton テープを貼ることなく、直接ブラシで表面に塗布する。軽く塗るだけで、数プリントで使用できる。ABS は反ることなく、プリント中にしっかりとベッドに固定される。しっかりと貼り付き、しかも簡単にプリントを外せる。造形物が完成後冷却されると、簡単に取れるので、造形物の底面も滑らかな仕上がりになる。PLA 用の接着剤の発売も予定されている。

5. フィラメント製造機

FFF 方式のデスクトップ 3D プリンタが世に出始めた当初から、ペレット状の原材料の 5 倍から 10 倍するフィラメントの市場価格の高さは指摘されており、さらにプリントの失敗やサポート材として使用された残材料の再利用の期待から、2012 年には Desktop Factory Competition として、ペレットからフィラメントを作る装置(フィラメントエクストルーダ: 図 7) を 250 ドル以下で製作するというコンペティションが開かれた。そこで優勝した Lyman Filament Extruder をヒントにフィラメントエクストルーダの完成品の商品化のために 2014 年にイギリス・ロンドンで設立されたのが Noztek 社 [6] である。

Noztek Pro は、射出成形機の射出ユニットとほぼ同じ原理で働く。ホッパに入れられたペレットは加熱溶融されながらスクリューでバレル内を送られ、先端のノズルからフィラメントとして押し出される。安定したペレット送りのために、装置全体を 45° 傾斜して設置するブラケットが付属している。材料に応じて温度を設定して (ABS は 180 ~ 200°C, PLA は 165 ~ 175°C), ヒータの電源を入れると、15 分ほどでエクストルーダバレルが設定温度に加熱されるので、ペレットを注入してモータの電源を入れる。材料の特性に応じた温度や送り速度の設定にもよるが、1 分間で約 1m のフィラメントが抽出される (1kg のロールを作るのに約 3 ~ 4 時間)。

ペレットを購入しての安価なフィラメントの作成や再利用の目的だけでなく、異なる色の材料を混ぜ合わせて独自の色のフィラメントを作ったり、特殊な材料を開発

するためにも使用できる。また、Noztek では 600°C まで加熱できる高温ヒータをオプションで用意しており、PEI(非晶性熱可塑性ポリエーテルイミド)、PEEK、TPE といったより高い溶融点を持つ熱可塑性樹脂のフィラメントを作成することも可能である。さらに、バレルにバンドヒータを追加することで、粉末状の材料からもフィラメントを作成できる。1.75mm および 3mm 用それぞれのノズルが付属するので、使用する 3D プリンタに合った径のフィラメントを作成できる。作成されるフィラメント径の誤差は 0.04mm 以内、3D プリンタ各社の純正フィラメントに劣らない品質を持っている。また、エクストルーダのオプションとして、速度制御が可能なフィラメント巻き取り機が用意されている。

フィラメントエクストルーダは Filabot 社 (米国バーモント州) [7] の製品も知られており、さらにコンシューマをターゲットとして Omni Dynamics 社 (英国) [8] から Strooder というコンパクトな製品がキックスターターでの受注を開始した。また、米国オハイオ州の Sculptify [9] 社は、フィラメントを用いずにペレットから直接溶解積層を行う 3D プリンタ David の発売を発表した。ABS や PLA ばかりでなく、多様な材料への対応を謳っている。

6. 最後に

プラスチック以外の多様な材質での 3D 造形を、手軽に利用できる FFF 方式デスクトップ 3D プリンタで簡単に行えることは、インハウスマニファクチャリングの比率をさらに高め、それは単にコストの軽減ばかりでなく、豊かなクリエイティビティにもつながる。そして、造形材料のバリエーションは、これまで思いもつかなかったような新しい 3D プリンタの用途を開拓するものと期待される。

- [1] MakerBot Industries (<http://www.makerbot.com>)
- [2] Helion Polymers (<http://colorfabb.com>)
- [3] Proto Plant (<http://www.proto-pasta.com>)
- [4] Turner Medtech (<http://www.turnermedtech.com>)
- [5] Airwolf3D (<http://airwolf3d.com>)
- [6] Noztek (<http://www.noztek.com>)
- [7] Filabot (<http://www.filabot.com>)
- [8] Omni Dynamics (<http://omnidynamics.co.uk>)
- [9] Sculptify (<http://sculptify.com>)

【略歴】

池田 潔 (IKEDA Kiyoshi)

1993 年日本バイナリー株式会社入社。主に触覚インタフェース装置などバーチャルリアリティ関連製品の輸入販売に従事し、現在、営業部門責任者。