

technologyforecast

2014年
Issue 2

2
3Dプリンターの未来

24
ソフトウェア
イノベーション：
3Dプリント体験を手軽に

42
3Dプリント革命における
造形材料の役割

54
「3Dプリントの発想力」
を伸ばす

3Dプリントの未来：
試作製作を超え完成品の適用へ



目次

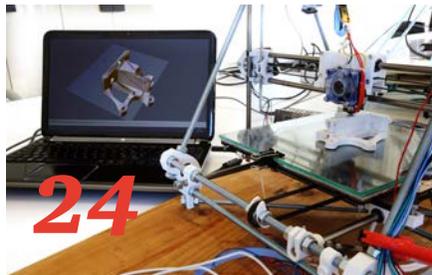
2014年
Issue 2

特集



3Dプリンターの未来

3Dプリンターの処理速度や使いやすさが向上し、複数材料への対応や能動装置の製作が可能になった今、ラピッドプロトタイピング（敏速に試作製作すること）以外にも用途が広がっている。



ソフトウェアイノベーション： 3Dプリント体験を手軽に

3Dモデルの調達、作製、最適化、プリントが簡単になり、品質が向上するにつれ、試作製作以外にも3Dプリントの活用が可能になる。



3Dプリント革命における 造形材料の役割

3Dプリンターの解像度の向上、材料の選択肢の拡大、特性の制御方法の進化とともに、試作製作にとどまらずさまざまな使い方が生まれる。



「3Dプリントの発想力」を伸ばす

3Dプリントが、設計、製造、使用、修理にわたる内外のバリューチェーンを時間とともに徐々に変えていく可能性がある。このような中、企業が競争優位性を維持するにはどうしていけばよいのだろうか？

関連インタビュー



Andrew Boggeri氏

FSL3D社
主任技術者
3Dプリント市場の黎明



Joshua M. Pearce博士

ミシガン工科大学教授
イノベーションの加速
が3Dプリンターの未来
を拓く



Gonzalo Martinez氏

Autodesk社
戦略担当ディレクター
トポロジー情報の先へ



Nancy Liang氏

Mixee Labs社
共同創業者
3Dプリントを身近なも
のに



Eric Duoss博士

ローレンス・リバモア
国立研究所
材料工学研究者
新たな特性を持つ材料
の開発



Christine M. Furstoss氏

GEグローバルリサーチ
センター技術担当
グローバルディレクター
3Dプリントで
競争優位性を獲得

3Dプリンターの未来

Alan Earls, Vinod Baya



3Dプリンターの処理速度や使いやすさが向上し、複数材料への対応や能動装置の製作が可能になった今、ラピッドプロトタイピング（敏速に試作品製作すること）以外の用途も広がっている。

3Dプリンター技術の開発は、「プリンターとプリント方式」、「設計およびプリントに必要なソフトウェア」、「プリントに使用する造形材料」の3つの領域が緩やかに連携して進んでいくだろう。

積層造形とも呼ばれる3Dプリント技術の登場は1980年代にさかのぼる。当時は実用性やコスト効率の面で問題があり、製品製造や商業的な大量生産には見合わなかった。しかし今、このような問題が克服されるとの期待が高まっている。

さまざまな技術の発展により、ミッドレンジ（中価格帯）の3Dプリンターが登場した。これは、卓上型ながらハイエンドシステムが持つ機能の多くを備え、併せて低価格も実現している。プリンター速度も向上しており、開発中のある高性能プリンターでは現時点の最高速マシンの500倍のスピードでの製作が可能である。主要特許の期限切れが迫る現在、イノベーションが加速していくことが見込まれる。

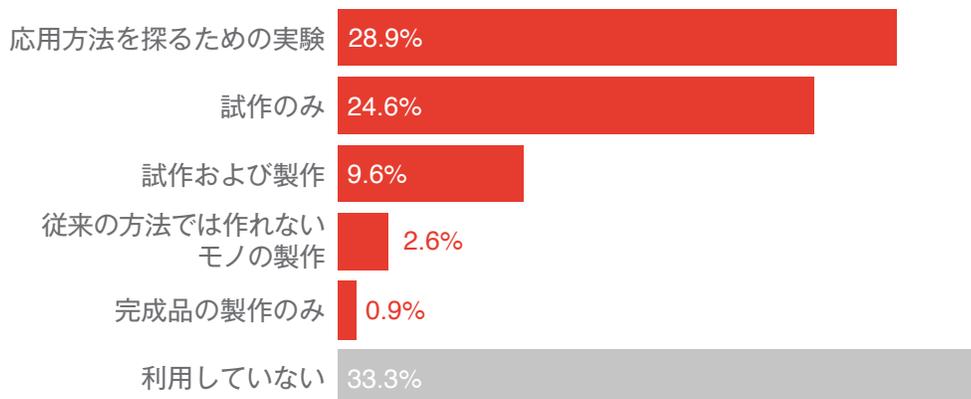
PwCが100社以上の製造会社を対象として実施した調査では、すでに3分の2が3Dプリントを利用していた（図1を参照）。ただし、そ

の大半は従来と同様に、実験あるいはラピッドプロトタイプング（敏速に試作製作すること）を目的としていた。市場調査会社Canalysは今後の状況変化により、3Dプリンターおよびサービスの世界市場が2013年の25億米ドルから2018年には162億米ドルに成長すると予測している（複合年間成長率45.7%）¹。

このように上昇基調にあるとはいえ、3Dプリント業界にはさまざまな課題がある。ラピッドプロトタイプングの重要性はこれからも変わらないが、さらなる広がりは見込めない。従って、これまでの試作製作から本格的な完成品製作へと軸足を移していくことが望ましい。すでに3Dプリンターを使って完成品を製作している補聴器や歯列矯正装置のメーカーの例もある。これからは3Dプリントを全面的に活用して、あるいは従来の製造工程を3Dプリントで補うことにより、他の方法では制作不能な製品を作っていくべきである。

図1：3Dプリントの用途：試作品から完成品へ

あなたの会社では3Dプリント技術をどのように利用していますか？



出典：PwC and ZPrime survey and analysis, 2014年2月実施

¹ Canalys, "3D printing market to grow to US\$16.2 billion in 2018," news release, March 31, 2014. <http://www.canalys.com/newsroom/3d-printing-market-grow-us162-billion-2018#sthash.jovzltNE.dpuf>.

表1：さまざまな業界での3Dプリンターの新たな用途

業界	3Dプリンターの新たな用途
自動車産業、 製造業	<ul style="list-style-type: none">・ 多数の部品を使用した複雑な1つの部品製作・ 生産用具の製作・ 予備部品の製作・ 商品開発期間の短縮（短期間でのプロトタイピング、形成、適合検査）
航空宇宙	<ul style="list-style-type: none">・ 従来の方法では対応できない複雑な形状の部品製作・ 部品の密度、剛性などの材料特性の制御と評価・ 部品の軽量化
製薬/医療	<ul style="list-style-type: none">・ CTスキャンやMRIに基づく正確な解剖モデルを使った手術計画・ 個人に合わせた整形外科用インプラントや人工器具の開発・ 3Dプリントで製作した人体模型を使った医療トレーニング・ 医薬品開発中の試験に使用する生体組織の立体プリント
小売	<ul style="list-style-type: none">・ 個人の嗜好に合わせた玩具、ジュエリー、ゲーム、室内装飾、その他製品・ 自動車や住宅の修理のための予備部品や交換部品
スポーツ	<ul style="list-style-type: none">・ 従来の方法では対応できない複雑な形状を持つ部品製作・ 個人の体形に合わせた安全装備の製作・ 個人の生物力学データに基づいたサッカーシューズ用スパイクプレートの製作・ 複数材料および多色を使った試験用試作品の製作

設計および製造戦略を進化させるために、多くの業界で3Dプリントソリューションがすでに導入されている（表1を参照）。3Dプリンター技術の開発は、「プリンターとプリント方式」、「設計およびプリントに必要なソフトウェア」、「プリントに使用する造形材料」の3つの領域が緩やかに連携して進む。今号のPwC *Technology Forecast*では、これらの各領域を取り上げる。ここでは、3Dプリンターおよびプリント方式のトレンドを、処理能力、複数造形材料の管理、完成品の製作能力の点から評価する。ソフトウェアや材料そのものについては別に取り上げる。

様変わりする3Dプリンター業界

3Dプリントでは、プラスチックポリマーや金属などのさまざまな造形材料（インク）で数百あるいは数千もの層に形成し出力する²。一般的に、多くのプリント技術は材料に依存している（「3Dプリント技術」を参照）。例えば、プラスチックには熱溶解フィラメント製法（FFF）、感光性ポリマーには光造形法、金属にはレーザー焼結法が使用される。

2 3Dプリントでのプリントアウト材料である「インク」は押出または吹付方式のあらゆる材料を指し、方式はインクジェットに限定されない。

さまざまな 3D プリント技術

- **光造形法 (SLA)**：本3Dプリント技術では、紫外線ビームを使って液状樹脂を硬化させ、連続層を固着させる。
- **熱溶融フィラメント製法 (FFF)**：熱可塑性プラスチック材料を溶融させたものを押し出して積層し、前の層に次の層を固着させる。ABS (アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)、ポリ乳酸ポリマーなどがよく使用される。
- **選択的レーザー焼結法 (SLS)**：FFFで使用する液状物質ではなく、ナイロン、チタン、アルミニウム、ポリスチレン、ガラスなどの粉末状物質を使用する。インクジェットプリンターとほぼ同様に、粉末状物質をプリント面に一斉に吹き付ける。レーザーを使い、粉末状物質を層ごとに焼結または熱溶融させる。
- **選択的レーザー溶融法 (SLM)**：SLSと似ているが、粉末状物質を熱溶融させるのではなく、超高温で溶融させる。
- **電子ビーム溶融法 (EBM)**：SLSと似ているが、電子ビームを使用する。
- **薄膜積層法 (LOM)**：金属、プラスチック、紙などの材料の薄膜を連続層で固着させ、形状を切り出す積層法。形状をさらに機械やドリルで加工する場合もある。

現在の主な用途であるラピッドプロトタイプングの先にあるチャンスをつかむには、次の3つの領域における向上が不可欠である。

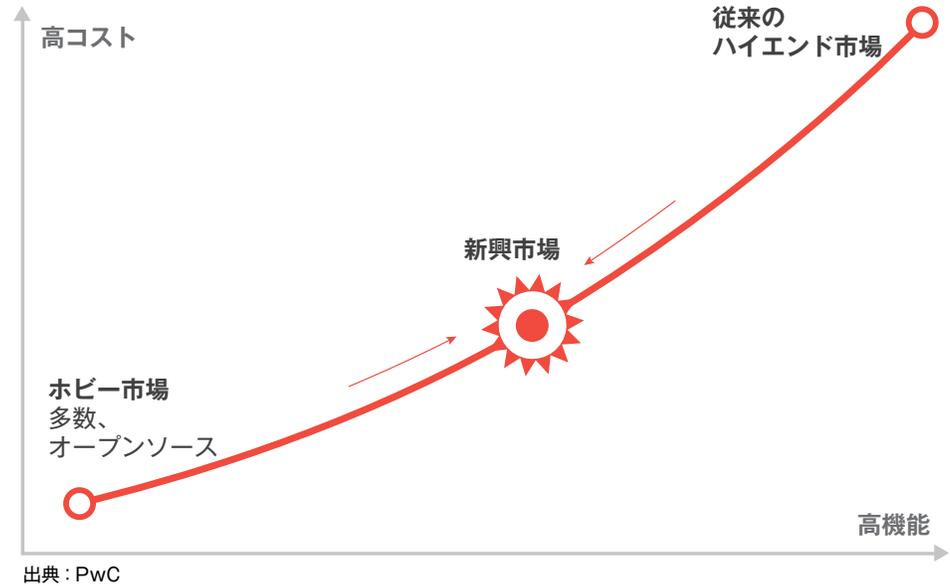
- **処理性能**：速度、解像度、自動操作、使いやすさ、信頼性、反復性などの重要な処理性能特性の向上
- **複数造形材料への対応と多様性**：複数材料への対応（1つの製作物に複数の材料を使用できる機能など）
- **完成品**：一体型センサー、バッテリー、電子部品、マイクロマシンシステム (MEMS) などのモジュールを組み込んだ完全に機能する能動装置の製作

現在の3Dプリンターには、高コストで高性能か、低コストで低機能の両極端しかない (図2を参照)。ハイエンドプリンターは主に法人向けや3Dプリントサービス機関向け、ローエンドプリンター（多くはオープンソースのRepRap³プリンターから派生）は消費者やホビー愛好家向けである。

この中間にあたるプリンターが登場したのは昨年のことである。新参から古参までさまざまなベンダーから販売されているミドルクラスプリンターは、低価格ながらハイエンド並みの機能を備えている。例えば、光造形法を採用したFSL3DやFormlabsのプリンターは小型だが解像度が高く、数千米ドルと低価格である。MarkForgedの卓上プリンターでは炭素繊維複合材を使ったプリントが可能で、価格を5,000米ドル未満に抑えている。多色プリントが可能で3D SystemsのCubeJetも5,000米ドル未満と低価格でありながらプロ向け機能を搭載している⁴。

3 RepRapは初期の卓上3Dプリンターの一つ。RepRapは自己複製機械であり、RepRap3Dプリンターそのものの自己複製可能である。詳細については、<http://reprap.org/wiki/RepRap>を参照。

4 Brian Heater, "The CubeJet promises pro-level 3D printing in a consumer form factor for under \$5,000," *Engadget*, January 7, 2014, <http://www.engadget.com/2014/01/07/cubejet/>



プリンターの処理性能を左右する要因はさまざまだが、大きな課題は出力速度と使いやすさである。

Gartnerでは、法人からの需要が強い機能とパフォーマンスを兼ね備えたバリュー 3Dプリンターの価格が2016年までに1,000米ドルを切ると予測している⁵。今後数年でプリンターの性能向上は加速しそうだが、その出力性能と内容はプリント技術やベンダーによって大きく異なるだろう。

3Dプリンターのパフォーマンスにおける新たなトレンド

プリンターの処理性能を左右する要因はさまざまだが、大きな課題は出力速度と使いやすさである。

プリンターの高速化

一般的に、3Dプリントには長い時間がかかる。単純な製作物でも、数時間、あるいは数日かかるのが常である。改良を重ねて新しい方式を生み出すことが、プリンターの高速化という課題の解決につながる。「高品質部品を使用したりレーザーの設計や動きを最適

化したりすることで、さまざまな改善が可能となる」と、光造形法を採用した卓上プリンターを販売するFSL3Dの主任技術者、Andrew Boggeri氏は言う。例えば、Formlabsが提供する光造形法プリンター Form 1+では4倍の強さのレーザーを使用し、前世代のForm 1からプリント速度を50%向上している⁶。

今日のほとんどのプリンターでは、1つのプリントヘッドから材料を押し出している。複数のプリントヘッドから同時に押し出す方式にすれば、複数の材料、または同材料を色違いで使用できるようになり、製作時間も短縮される。また、プリントヘッドを増やすことで、1回分の製作時間で同じ設計物を複数製作できる。このようなイノベーションにより、プリント速度はプリントヘッドの増加とともに直線的に向上する。

ホビー用としては、Roboxからデュアルノズルのプリンターが販売されており、シングルノズルの3倍の速度が得られるという。

⁵ Pete Basiliere, *How 3-D Printing Disrupts Business and Creates New Opportunities*, Gartner G00249922, April 2014.

⁶ Signe Brewster, "Formlabs reveals the Form 1+, a faster and more reliable SLA 3D printer," *Gigaom*, June 10, 2014, <http://gigaom.com/2014/06/10/formlabs-reveals-the-form-1-a-faster-and-more-reliable-sla-3d-printer/>

「他の機器と比べ、これらの（愛好家向けホビー用3D）プリンターの維持には高いコストがかかります」

—Joshua Pearce准教授、
ミシガン工科大学

特に大型製作物では、速度が課題となる。大型であるほど多くの造詣材料をノズルから出す必要があるが、一方でノズルから出る材料の量は一定である。Oak Ridge National Laboratoryと工作機械メーカー Cincinnati Incorporatedは協力してこの課題の対応に取り組んでおり、大規模な積層造形システムを開発中である⁷。ポリマーをすばやく堆積させる大型ノズル、インチ単位ではなくフィート単位で切断する高速レーザーカッター、プリントヘッドの動きを高速化する高速モーターを組み合わせる。このシステムが完成すれば、従来の10倍の大きさ、200倍～500倍の速度でポリマー成分をプリントできるようになる。

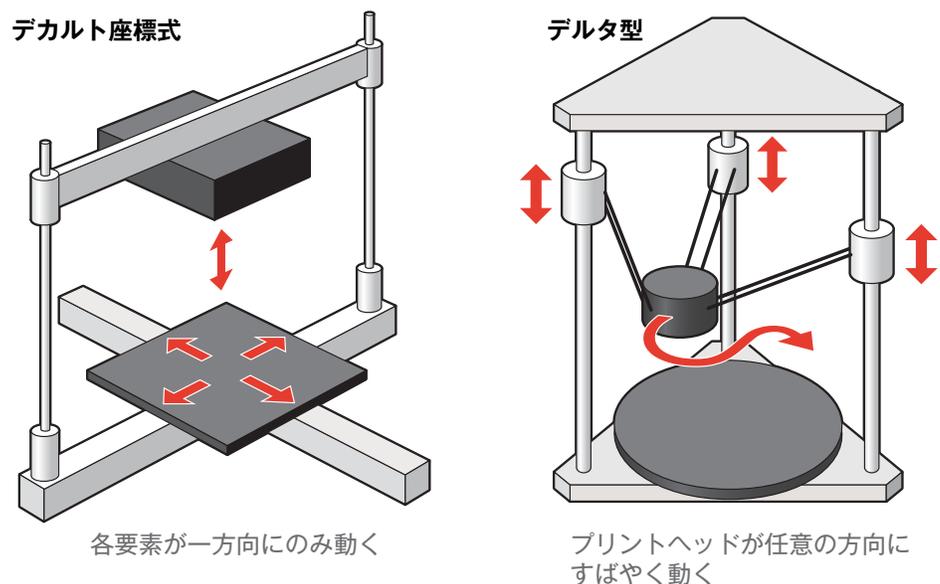
プリントヘッドの駆動方式やアーキテクチャはさまざまなものが使われている。現在一般的なのは、1つのプリントヘッドを平面上で2次元に動かすデカルト座標式プリンターである。一方、デルタ型プリンター（デルタロボットプリンター）というものがあり、ロボッ

トのようなアームで平行四辺形を作る（図3を参照）。「デルタ型プリンターには速度をはじめとする大きな利点があり、やがてデカルト座標式プリンターに代わって市場を席巻することになると思われる」と、オープンソースの3Dプリンターを積極的に支持するJoshua Pearce准教授（ミシガン工科大学）は予測している。デルタ型ではプリントヘッドが軽量で移動距離が短いため、高速化が可能となる。

プリンターの自動化と簡易化

既存の3Dプリンターでも、多くのタスクを自動的に実行している。ただし、一部のホビー用プリンターでは、エラーを最小限に抑えるために、定期的なプリントヘッドのクリーニング、ベッドの水平位置調整、修理、保守等の手作業を必要としている。「他の機器と比べ、これらの（愛好家向けホビー用3D）プリンターの維持・保守には高いコストがかかります」とPearce准教授は指摘する。このような手作業をいかに軽減または解消していくが、今後数年にわたる課題である。

図3：デカルト座標式とデルタ型



出典：PwC

⁷ Oak Ridge National Laboratory, "ORNL, CINCINNATI partner to develop commercial large-scale additive manufacturing system," news release, February 17, 2014, <http://www.ornl.gov/ornl/news/news-releases/2014/ornl-cincinnati-partner-to-develop-commercial-large-scale-additive-manufacturing-system->.

支持構造の生成、部品の方向付けなど、多くの一般的なエラーや信頼性の問題の原因となっている機能を自動化すれば、ホビー用プリンターの使いやすさは向上するだろう。例えば、製作台が水平でない場合、作業が無駄になる可能性がある。Robox、XYZprinting、MakerBotなどの多くのプリンターでは、自動水平機能によって製作台が校正される。将来はプリントプロセスをリアルタイムに監視し、不具合や（CADツールで生成された3Dモデルの）設計からの逸脱を検知し、適宜介入できるようなフィードバックシステムが期待されている。このような機能が加わることで、プリントプロセスの信頼性と反復性が高まるだろう。

複数材料への対応という点では、他に勝る有望なプリント方式がある。FFF方式はプリントヘッドの追加により他のポリマーを扱えるため、既存の技術を大きく拡張しなくても複数造形材料への対応が期待できる。マルチヘッドプリンターは、Hyrel 3D、XYZprinting、MakerBotから数千米ドル未満で販売されている。

「複数材料のプリントでは、Voxeljetなど、インクジェットのような技術が現時点においても、将来性もあります」とBoggeri氏は考える。選択的レーザー焼結などの方式では、インクジェット技術を使用している。インクジェット技術では、すでに複数のプリントヘッドを使用しているため、粉末状の基材としてプリント可能な範囲で複数材料を扱うことができ、異なる材料でできた部品を1回で製作できる。この技術は、現在、Voxeljet、Stratasys、3D Systemsなどのハイエンド機種で提供されている。

2Dプリンターのインクジェット印刷は1970年代からあるが、3Dプリントのインクジェット方式が可能となったのはわずか7年前のことであり、Objet（現在はStratasysに吸収）がPolyJetと呼ぶしくみを採用してからである。複数の造詣材料をさまざまな配合で吹き付けることで、硬質プラスチックからゴム状、不透明から透明までさまざまな新しい材料特性を作り出すことができる。最近では、多色プリントも可能になっている。StratasysのObjet500 Connex3プリンターは複数材料、多色の3Dプリントが可能である。14の材料特性、10の色で部品を製作できる⁸。

「複数材料のプリントでは、Voxeljetなど、インクジェットのような技術が現時点においても、将来性もあります」

—Andrew Boggeri氏、FSL3D

3Dプリンタの材料対応における新たなトレンド

材料にはプラスチック、金属、セラミック、ウール、生体由来物質などがあるが、ほとんどのプリンターでは扱える材料は1種類だけである。製作物の利便性を高め、市場を拡大するためには、1回の製作で複数の材料を処理できるようになる必要がある。しかし、材料そのもののさまざまな要因が、この課題を困難にしている。例えば、大半のプロセスは、投入温度や光周波数の狭い範囲に対応する最適な材料を前提として構築されている。プリンターは熱や光を使って物質を液化したり凝固させたりして、特定の形状を作り出す。少なくとも現在の技術では、材料が変わると、この処理ができなくなってしまう。

⁸ Stratasys, Objet500 Connex3, *How to Maximize Multi-Material and Color Possibilities*, 2013.

図4：この写真のハンドグリッパー試作品では、色の異なる軟質ポリマーと硬質ポリマーを組み合わせている。ヘッドフォン試作品では、さまざまな色の複数の材料を使用している。



出典：Stratasys



金属やプラスチックなどさまざまな系統の材料を1回の製作で組み合わせて使用するには、さらなる進化が必要である。

今日、ポリマーなどの1系統の材料に対応する複数材料プリンターは、設計者が形状と機能、適合性、使用感をチェックするための試作製作を目的としている。図4は、Connex3プリンターで製作した複数材料のハンドグリッパーとヘッドフォンの試作品を示している。

金属やプラスチックなどさまざまな系統の材料を1回の製作で組み合わせて使用するには、さらなる進化が必要となる。この方面の研究開発はごく初期段階にあり⁹、製品化は5年以上先になりそうである。

完成品製作における新たなトレンド

完成品、または半完成品製作の実現はさらに遠い。ほとんどの完成品は複数の材料でできているため、複数材料に対応する機能の登場は大きな一歩である。しかし、センサー、電子部品、バッテリーなどの部品を1回で組み込むとなると、乗り越えるべき障害が非常に多くなる。材料、プリント方式、積層法と既存出力手法の組み合わせなど、さまざまな領域において、研究開発が進められている。

材質科学における大きな課題は、センサー、電子機器、バッテリーなど多様な種類の製作品の基礎となるインクの開発である。Xerox PARCでは、回路やアンテナ、RFIDタグをプリントして製作物に直接取り付けられるようなインクを開発中である¹⁰。同様に、ハーバード大学工学・応用科学学部のJennifer A. Lewis教授は、プリント可能なインクとして超小型リチウムイオンバッテリーの基本構成要素の開発に成功している¹¹。

積層造形の未来は無生物のみに限られない。Lewis教授は生体組織を制作するためのバイオインクを開発している。複数のプリントヘッドとカスタマイズしたインクを使用して、毛細血管を備えた複雑な生体組織を製作した¹²。一部の製薬会社ではすでに3Dプリントで製作した組織を医薬品の検査に使用している。

9 Michael Molitch-Hou, "Metal-Plastic Voxel 3D Printing Pursued by Arizona State University," *3D Printing Industry*, April 2, 2014, <http://3dprintingindustry.com/2014/04/02/3d-printing-metal-plastic-voxel-arizona-state-university/>

10 "Print me a phone," *The Economist* (US), July 28, 2012, <http://www.economist.com/node/21559593>

11 Mike Orcutt, "Printing Batteries," *MIT Technology Review*, November 25, 2013, <http://www.technologyreview.com/demo/521956/printing-batteries/>.

12 The Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering at Harvard University, "An essential step toward printing living tissues," news release, February 19, 2014, <http://wyss.harvard.edu/viewpressrelease/141/>

バイオプリントでは通常、2種類のインクを使用する。一つは生体物質、もう一つは組織と細胞を培養するヒドロゲルである。血管を加える突破口となったのは、加熱ではなく冷却で溶けるという通常とは異なる特性を持つ第三のインクの開発であった。この特性を利用して、相互接続されたフィラメント網をプリントした後、材料を冷却して融解させる。その液体を吸い上げ、組織内に中空管、つまり血管網を作る。このような造形が可能なのは3Dプリントだけである。3Dプリントには、従来の方式にはなかった新たな可能性がある。

完成品の製作は、微細なナノレベルまたは顕微鏡レベルだけの話ではない。OptomecはAurora Flight Sciences、Stratasysと協力して、電子部品とセンサーを含む、小型ドローン向けの航空機翼の完成品をプリントにより製作した¹³。翼の製作に使用したのはStratasysのFFFプリンターである。センサーと回路は、Optomecのエアロゾルジェットシステムを使って翼に直接出力されている。インクジェットプロセスではプリントヘッドから1 mm先の平面に微小インク滴を堆積させるが、エアロゾルジェットプロセスではナノ粒子ベースの材料を微小液滴にし、ノズルから塗布する。5mm以上の距離から、曲面や不整形のプリント面にも対応できる。そのため、100分の1mm未満の電子機器のプリントも可能である。

CIOは3Dプリントの推進者になりうるか？

今のところ、3Dプリントの影響を受けているのは製品開発、製造、サプライチェーンといった部門に限られているようだ。しかし、3Dプリントの可能性を最大限に広げて生かすためには、CIOやIT部門の協力が必要だ。

その理由を以下に挙げる。

- CIOは革新的技術としての3Dプリントの可能性をビジネス目標と関連させて他の幹部と話し合い、評価できる。
- 3Dプリンターと関連機器（スキャナー、カメラなど）はネットワーク接続、保護、管理を必要とする新規デバイスである。
- 3Dプリントによって発生する新しい製品開発および製造関連データを取得、保護、分析、運用すれば、ビジネス優位性につながる。
- トランザクションシステムによっては、製造やサプライチェーンのプロセスの変更に対応するための変更が必要である。
- 3Dプリントの導入に伴い、デジタルファイルを使って商品を複製できるようになるため、知的財産の窃取に関する課題が生じる。

3Dプリント革命によって大量の情報が発生し、事業運営をさまざまな面で変更する必要がある。今後、企業では3Dプリンターの利用が確実に広がっていく。3Dプリントをビジネスにフル活用するためには、CIOが3Dプリントによって各部門にもたらされる可能性と課題をじっくりと検討し、トレンドを先読みすることが求められる。

3Dプリントと他の造形方式を組み合わせようという試みもある。例えば、iRobotは完全自動ロボットによる3Dプリンターの特許を申請した。複数のマニピュレータを備え、完成品を製作するためのフライス加工、ドリルなどのプロセスに対応している¹⁴。

イノベーション加速により高い期待の実現が近づく

3Dプリンター市場は急変のときを迎えている。有名ベンダーおよびベンダーと起業家、愛好家の間でイノベーションが起り、エンタープライズクラスの機能を備えた低価格のミッドレンジプリンターが市場に普及する準備が整った。

さらに、技術特許にも間もなく変化が見られそうである。FFFの主要特許が切れた5年前、オープンソースコミュニティはFFF技術を低コストプリンターにすばやく採用した。これが速度、品質、解像度、使いやすさの向上のきっかけとなっていった。

¹³ "Revolutionary 'Smart Wing' Created for UAV Model Demonstrates Groundbreaking Technology," Optomec, 2006, <http://www.optomec.com/revolutionary-smart-wing-created-for-uav-model-demonstrates-groundbreaking-technology/>
¹⁴ Cabe Atwell, "iRobot Takes Humans out of 3-D Printing Equation," *Design News*, March 13, 2013.

2014年には多くのレーザー焼結法に係る特許も期限切れを迎える。「RepRapやFFFに起こったような急速なイノベーションが、レーザー焼結方式の3Dプリンターにも起こることを期待している」とPearce准教授は述べている。MetalbotやOpenSLSなどのコミュニティはすでに、オープンソースのレーザー焼結方式卓上プリンターの開発に取り組んでいる。FFFプリンターと同じくらいのスピードでイノベーションが進めば、金属を扱える低価格の卓上プリンターが数年以内を実現するかもしれない。

現在、3Dプリンターおよびサービス市場は二極化している。ローエンドは機能がホビー用に限られており、ハイエンドは高価で購入者が乏しい。市場の拡大には、パフォーマンスの向上、複数材料への対応、完成品の製作を実現する中価格帯プリンターの開発が続けることが不可欠となってくる。PwCでは、このような開発への継続的な取り組みがやがて市場の急拡大への扉を開くと考えている。

3Dプリント市場の黎明

FSL3DのAndrew Boggeri氏が語る

3Dプリンターの未来

——設計者と購入者の集う新たな市場の誕生

聞き手：Vinod Baya、Bo Parker



Andrew Boggeri氏

FSL3D社 主任技術者
レーザーベースの光造形法技術を採用し、高品質な消費者向け卓上3Dプリンターを製造

PwC:御社の概要について、また3Dプリンター市場への参入についてご説明いただけますか？

Boggeri氏: はい。FSL3Dは、2010年に当社の創立者が立ち上げたFull Spectrum Laserの一部門です。

Full Spectrum Laserは中国のレーザーカッターを再販する企業として出発しました。中国製カッターの機構はまずまずでしたが、電子機器はお粗末で、ソフトウェアはほとんど使いものになりませんでした。そこで、レーザーを制御する高出力の組み込み回路基板とソフトウェアフロンティアを独自に開発しました。さらに、カスタム設計のハイエンド金属マーキングレーザーも販売しました。

こうした活動の中で、検流計（ガルボ）の制御システムの開発という貴重な経験を得ました。ガルボはレーザービームを操作するための機器です。それぞれが直流モーターであり、小型ミラーに取り付けられた軽量シャフトを持つ組み込みフィードバックを備えています。ローター慣性を最小限に抑え、高速かつ高精度でビームを操作できます。ミラーのわずかな偏向が遠距離での高速動作を生み出します。

「長期的には、5年後には製造拠点を持つ必要のない 中規模企業が主流を占めるようになるでしょう」

3Dプリンターの普及が進んでも、卓上プリンターで採用されていたのはFFF（熱溶解フィラメント製法）技術でした。数種類の3Dプリンターを所有していた当社では、よく試作に3Dプリントを使用していました。それほど経験豊富だったわけではありません。しかし、レーザーでの経験から、レーザーベースの卓上3Dプリンターの開発に商機があるのではないかと考えました。そこでKickstarterで10万米ドルの資金を募ったところ、33日で819,000米ドル以上が集まりました。Pegasus Touchは、光造形法（SLA）を採用した当社の卓上プリンターです。

PwC：レーザーベースの卓上3Dプリンターを2,000米ドル前後の価格帯で販売できるのはなぜですか？

Boggeri氏：レーザー 3Dプリンターのコストの大部分はレーザーモジュールです。ブルーレイプレーヤーの普及という大きな変化により、レーザーモジュールのコストが下がりました。ブルーレイダイオードの価格が下がったため、当社の狙う価格帯で卓上プリンターを作ることが可能になったわけです。

最初に検討したのはDLP映像表示技術でした。MIP光造形法、つまりマスクイメージ投影です。MIPでは、ビームを動かす代わりに、層のイメージ全体を投影し、層全体を一度に硬化させます。ただし、この方式では非常に時間がかかります。この技術では電球を使用し、光が広く拡散するため、樹脂の硬化には層あたり数秒かかるのです。試作してみて、やはりレーザーを選びました。

PwC：ハイエンドプリンターと比べて、パフォーマンスはどうですか？

Boggeri氏：まず、大きな違いは価格です。速度と使いやすさでは当社のプリンターの方が優れています。品質は同等以上です。ハイエンドプリンターでは系統の異なる樹脂を使用しており、化学的性質も異なるため、硬化させるには高価なレーザーダイオードが必要です。そのため、完全に透明なレンズを作るにはハイエンドプリンターが必要です。このような樹脂では高い忠実度と優れた特性が得られます。当社は光学的向上に懸命に取り組み、10分の1の価格で同等のプリンターを実現しました。

PwC：現在出回っているほとんどのプリンターでは、扱える材料は1種類のみです。プリンターが複数材料に対応するには、何が必要なのでしょう？

Boggeri氏：これは3Dプリントにおける大きな課題です。当社のSLAは単一材料を扱う技術です。複数材料に対応するには、樹脂やレーザーの種類を増やす必要があるかもしれませんが、しかし、対応の幅が広がることでプリンターが複雑化し、問題も生じるでしょう。複数材料プリントには、複雑化せず低コストでプリントヘッドを追加できるFDM（熱溶解積層法）プリンターの方が有利です。ただし、一般的な複数材料プリンターではVoxeljet技術が使用されています。Voxeljetでは、インクジェット印刷と同様に材料が液滴化されます。複数材料プリントには、この方式が今後も有望だと思います。

「高品質部品を使用したり、レーザーの設計や動きを最適化したりすることで、さまざまな改善が可能です」

PwC: 金属を使ってプリントできる卓上プリンターはいつごろ登場するでしょうか？ アーク溶接を利用した金属プリンターのことを耳にしたのですが。

Boggeri氏: DMLS（直接金属レーザー焼結）方式の卓上金属プリンターは出てこないと思います。金属プリンターでは、レーザーで固めた金属微粉末が使用されます。DMLS金属プリントのコストを下げるのは至難の業です。第一に、金属を溶かすために必要なレーザーは通常、高出力のファイバーレーザーです。そのようなレーザーはエントリーレベルでも1万5,000米ドル～2万米ドル以上します。しかも、エントリーレベルではDMLSに十分な出力が得られません。第二に、材料である金属微粉末のコストは1Kgあたり600米ドル以上です。とはいえ、DMLSでは非常に細かい製作が可能であるため、複雑な形状にも対応できます。

現在のところ、溶接ベースの卓上プリンターには、溶接台が数ミクロンではなくmm単位であるという欠点があります。高解像度を必要としない製作物向きであると言えるでしょう。

PwC: 3Dプリンターの欠点として、動作の遅さがよく挙げられます。1回の製作に数時間かかることもあります。今後、プリンター速度が向上する見込みはあるのでしょうか？ それとも、現時点で物理的な限界に近いのでしょうか？

Boggeri氏: 高品質部品を使用したり、レーザーの設計や動きを最適化したりすることで、さまざまな改善が可能です。卓上レーザープリンターの中では当社の製品が最速です。制御電子部品によって500Hzでレーザーを振動させ、1秒あたり3,000mmのプリントを実現しています。

SLAプロセスの中で時間がかかるのは、除去と重ね塗りの部分です。樹脂を除去し、次に硬化させる樹脂の薄層を重ねるには、ヘッドを引き離すか傾ける必要があります。現在よりも樹脂を除去しやすい特殊な剥離塗料を研究中です。成功すれば、品質を維持しつつ、この処理にかかる時間を2分の1、あるいは3分の1に短縮できます。

速度に関連するもう一つの要因は、樹脂の硬化スピードです。レーザーを高速化し、樹脂の硬化時間を大幅に短縮できれば、現在の1秒あたり3メートルから1秒あたり10メートル～20メートルへの向上が可能です。レーザーの操作よりも、化学反応の方がずっと速く進みます。

「3Dプリントツールの改良と自動化が進んだ今、人々が携帯電話用に回路基板だけを購入し、自宅や最寄りの3Dプリントセンターで残りの部分を好きなように作るようになる日を思い描けるようになりました」

フィラメントプリンター（FDM）では、プラスチック溶融レオロジーの特性が速度に影響します。現在の高速プリンターは、1秒あたり300mmほどの速度でプラスチックを重ねていきます。これをさらに高速化しようとする、めちゃくちゃな代物しかできません。ヘッドの動作速度には物理的な制限があるでしょう。

速度の向上が見込めるのは、インクジェットベースのプリンターです。多数のヘッドを1つの層に対して同時に動作させることができます。問題は、ヘッドの数を増やすことで生じるコストと複雑さです。

PwC：3Dプリンターの促進にあたり、業界が対応すべきはどのような課題ですか？

Boggeri氏：3Dプリントのエコシステムは、プリント設計のデジタルファイルに依存しています。問題は、消費者が設計の販売と購入をどのように行うのかということです。消費者向けにSTL（光造形法）形式のファイルの販売するオンラインライブラリはすでいくつかあります。設計の価格が40米ドル～50米ドル以上することは珍しくありません。高度な彫刻はさらに高価で、製作に600米ドル、設計に2,000米ドルほどかかります。今のところ、STLファイルのコピーや再利用を防止する方法はありません。設計者は保護されていないのが現状です。保護策がないため、設計の価格が高止まりしていると言えます。これでは未来はありません。

必要なのは、AppleのiTunesのように99セントで衝動買いしてしまうような市場です。この程度の価格なら、さまざまな設計を試せます。当社が実現しようとしているのはまさにこれです。近い将来、現実のものとなるでしょう。プリンターにタッチスクリーンを搭載し、PCがなくてもプリンターから設計ライブラリストアを利用できるようにします。このストアは、AmazonやiTunesと組み合わせたようなものです。

市場が設計者と購入者をつなぐのです。当社のプリンターはデジタル著作権管理（DRM）機能を備え、個別のシリアル番号で暗号化されます。ソフトウェアモデルの販売方法はアプリと似ています。設計者はモデルのコピーをプリンター所有者に販売できます。モデルを使用できるのは購入者のプリンターのみです。

設計が盗まれたり際限なくコピーされたりする恐れがなくなれば、99セントや5米ドルといった手頃な価格での販売が可能になります。低価格化により、エコシステムに参加する設計者が増え、普及が進みます。

PwC：今後どのような変化が起こるとお考えですか？

Boggeri氏：個人間での売買が始まると思います。最新技術を用いてモノ作りをするデジタル職人がいます。3Dプリンターを生産拠点とすれば、一般家庭での製作が可能になります。すでに小規模には始まっており、価格低下とともに加速するでしょう。

長期的に見ると、5年後には生産拠点を持つ必要のない中規模企業が主流になるでしょう。3Dプリントツールの改良と自動化が進んだ今、人々が携帯電話用に回路基板だけを購入し、自宅や最寄りの3Dプリントセンターで残りの部分を好きなように作るようになる日を思い描けるようになりました。

3Dプリントの可能性は特に玩具業界で注目されています。新しい玩具を作り出すのに、50万米ドルもの設備や何カ月にもわたる開発期間が不要になるからです。1カ月～2カ月で作った玩具のデジタル設計を5米ドル～10米ドル程度で販売すればよいのです。このシナリオなら、ごく低リスクで短期間に製品を投入できます。

PwC：今後5年で、集積回路の製作は可能になるでしょうか？

Boggeri氏：はっきりとしたことは言えません。Optomeclには興味深い技術がありますが、まだ広く利用されてはいません。組み込みの電子トレースに3Dプリントで製作した部品を使用することはできるでしょうが、部品のほんだ付けは必要です。最初はハイエンドプリントや高機能プリンターに限られるのではないかと思います。少々複雑なシステムなので、すぐに卓上になることはないでしょう。集積回路を製作できるプリンターは5年以内に日用品として一般家庭に普及するかと問われれば、その答えは否です。ただ、5年後には、そのようなプリンターとトレンドが一般に知られるようになるとは思いますが。



イノベーションの加速が 3Dプリンターの未来を拓く

3Dプリンターをもっと安く、もっと使いやすく
——ミシガン工科大学Joshua Pearce准教授の取り組み

聞き手：Vinod Baya、Bo Parker



Joshua M. Pearce博士
ミシガン工科大学准教授
Michigan Tech Open
Sustainability Technology
Labの責任者を務め、著書に
『Open-Source Lab: How to
Build Your Own Hardware
and Reduce Scientific
Research Costs』がある。

PwC：3Dプリントのエコシステムにおいて、ご自身の研究の位置付けについてご説明いただけますか？

Pearce氏：私たちの活動は、3Dプリントのオープンソース化というトレンドを体現するものです。低コストを実現し、グローバルな協力によってイノベーションを起こそうとしています。私たちが開発したプリンターの価格は通常、500米ドル未満です。キットから組み立てるか、プリンターで自己複製（RepRap）して自作ができるようになっています。元は英国で開発された技術ですが、いまや世界に広がっています。

PwC：将来、低価格プリンターはどの家庭にも普及すると思いますか？

Pritchard氏：はい、一般的になると思います。以前、3Dプリンターを家庭で使用するものの経済性について、初期調査を行いました。対象としたのは週末の25時間未満で製作できる20の家庭用品です。調査の結果、何を作り、どの程度使用するかにもよりますが、製作物の品質が十分であれば、プリンターを購入した方が同等品を購入するよりも300米ドル～2,000米ドルの節約になります。3Dプリントではカスタマイズが可能なので、この上限に近い金額分が浮くことになると思います。いまや、プリント用のオープンソース設計は何十万も出回っています。

「基本的な物理プロセスに大きな変更を加えなくても、現時点よりさらなる向上の余地があることは明らかです」

リサイクルを考慮すると、経済性はさらに高くなります。私たちが開発したRecycleBotを使用すれば、プラスチックごみをFFF（熱溶融積層法）プリンターの原料としてリサイクルできます。牛乳容器などのプラスチックごみが3Dプリンターの原料になります。現在、商用フィラメントの価格は1キログラムあたり35米ドル以上します。リサイクルしたプラスチック容器を使用し、労力を計算外とすれば、材料費は1キログラムあたり10セント程度まで下がり、実質無料になります。つまり、環境負荷の低減と収益性を両立できるのです。

一般家庭でも1年以内にプリンターのコストを回収できるうえ、環境にも配慮できます。3Dプリンターの購入に踏み切る理由は十分すぎるほどあります。

PwC：一般家庭に普及するには、どのような課題を克服する必要がありますか？

Pritchard氏：現在、非常に多くの課題がある状態です。今のところ、ローエンドプリンターはいずれも用を成しません。使いこなすには、ある程度の技術的な能力が必要です。工学の学位とまではいかないにしても、焼結技能や工具の知識などが求められます。他の機器と比べ、これらの（ホビー用3D）プリンターの維持には高いコストがかかります。高品質な部品を製作するには、常に調整が必要です。このような理由から、3Dプリンターを利用するのはホビー愛好家や技術者に限られています。

PwC：先ほどプラスチックを原料として利用するRepRapプリンターのお話が出ましたが、卓上金属プリンターはまだ世に出ないのでしょうか？

Pritchard氏：金属溶接ロボットが利用されていた時期もあります。昨年開発したRepRapをMIG（金属不活性ガス）溶接に取り付けければ、鋼鉄プリントが可能で、設計ソースは同じ幾何学STL（光造形法）データファイルです。金属チップと金属プリント台の間を繰り返し往復します。チップが溶け、金属の小液滴を1秒に何度も繰り返し塗ることで層を形成します。その後、製作台を垂直方向にして作業を繰り返し、3D金属体を製作します。

PwC：現在のプリンターでは、複雑さやサイズにかかわらず、製作に数時間かかります。将来はもっと短時間で製作できるようになるのでしょうか？ それとも、すでに物理的な限界に近いのでしょうか？

Pritchard氏：長期的にはどうなるかわかりませんが、近い将来の可能性についてでしたらお話できます。デルタ型プリンターはヘッドが軽量なので、速度はデカルト座標式プリンターの2倍以上です¹。現在市場に出回っているデルタ型プリンターはわずかですが、これからは状況が変わります。デルタ型プリンターには速度をはじめとする大きな利点があり、やがてデカルト座標式プリンターに代わって市場を席巻することになるでしょう。

¹ デカルト座標式プリンターでは、x、y、zの3次元を使用する。プリントヘッドはxy水平面上を、製作台は垂直次元z上を動く。デルタ型プリンターではアームが平行四辺形を作り、プリンターヘッドはピックアンドプレイスロボットの端部のように3次元で動く。

「RepRapやFFFに起こったような急速なイノベーションが、レーザー焼結方式の3Dプリンターにも起こると思います。特許が切れ、オープンソースコミュニティがFFF方式を使用できるようになれば、イノベーションは大きく加速するでしょう」

また、ローエンドプリンターが成熟するにつれ、プロフェッショナル向けハイエンドプリンターと同様に、パフォーマンス向上機能を備えるようになります。例えば、設計者がソフトウェアで考慮に入れることができるため、曲線のところで速度が落ちることがなくなります。絶対的な物理的限界がどの程度なのかは定かではありませんが、物理プロセスに大きな変更を加えなくても、さらなる向上の余地があることは明らかです。

PwC: 近い将来、ハイエンドプリンターだけでなくローエンドにも搭載されるようになる機能には他にどのようなものがありますか？

Pritchard氏: ハイエンドプリンターにはフィードバック制御機能があります。遠からず、ローエンドプリンターにも搭載されるようになるでしょう。また、金属プリントにはレーザー焼結法という別のプロセスを使用しており、間もなく特許切れを迎えます。そのため、RepRapやFFFに起こったような急速なイノベーションが、レーザー焼結方式の3Dプリンターにも起こると思います。特許が切れ、オープンソースコミュニティがFFF方式を使用できるようになれば、イノベーションは大きく加速するでしょう。

自動校正機能も同様です。一般ユーザーにとっては、手動で校正するよりも、プリンターの自動校正ボタンを押すだけの方が簡単です。この機能がローエンドにも搭載されるようになれば、3Dプリントが本格的に普及していく

でしょう。コスト、使いやすさ、プリンターの組み立てやすさなどの面でも、イノベーションが起こります。現時点では、ハイエンド焼結機ではマイクロレベルの解像度でのプリントはできませんが、2年後にはラボで卓上の粉末または液体プリンターを使って可能になっているかもしれません。

PwC: プリントに複数の材料を使えないことは業界が直面している大きな制約となっています。今後の見通しはいかがでしょうか？

Pritchard氏: 複数材料への取り組みはまだ始まったばかりです。FFF方式を使用した低コストプリンターには複数のプリントヘッドがあり、2つの色、あるいは軟質プラスチックと硬質プラスチックのように2つの材料を使用できます。この方面の開発も特許で守られています。例えば、2つのプリントヘッドを備えたある3Dプリンターメーカーでは、プリントヘッド2がプリントヘッド1で行った作業を汚してしまい、製作物が台無しになるという課題に直面しています。この問題の解決策が、作業中に一方のヘッドをどかしておくか、垂直軸(x軸)上で両方のプリントヘッドを動かせるようにすることであることは明らかです。このように解決策がはっきりしていても、このような機能はいずれも特許で保護されており、期限切れになる時期はばらばらです。関連する特許が切れれば、複数のプリントヘッドを動かす小型機械レバーなどの機構が出てくるでしょう。

「業界が前進するには、標準化が不十分であるという大きな課題に対応する必要があります」

PwC: 標準化が未整備であるため、材料のパフォーマンスに信頼性がないようですが、いかがでしょうか？

Pritchard氏: その通りです。業界が前進するには、標準化が不十分であるという大きな課題に対応する必要があります。私たちはいち早く3Dプリンターの機構検査を行い、RepRapプリンターの抗張力を調べました。RepRapユーザーグループに、規格に従って犬用の骨の設計をプリントし、できたものを送るよう依頼しました。私たちもプリンターを使って同じ設計から犬用の骨を作り、それぞれの強度特性を検査しました。

検査でわかったことは、同じ材料と設計を使っていても、システムが違えば、できあがってくるものが違うということです。つまり、使用する構造や材料、プリンターの機種や使用方法とは別に、考慮すべき第三の因子が存在するのです。機械工がレーザーで材料を切るのとは違い、非常に複雑な仕組みです。

幸い、多くはソフトウェアによる制御が可能です。間もなく、ローエンドプリンターにもフィードバックループの仕組みが導入されると思います。例えば、吐出されるプラスチックの実際の温度が目的の硬化タイプに適した温度かどうかを確認できるようになります。このフィードバックループは2年後には実装されると考えています。

PwC: もう一点大きく興味のある領域として完成品の製作があります。電子部品や導電体をプリンターで製作するプロジェクトをお持ちであるとうかがっています。これらの成果として何を試みようかとされていますか？

Pritchard氏: 私の大きなゴールとして、Arduino（マイクロコントローラ基板）をプリントできるようにすることを設定しています。これは3Dプリンターの頭脳にあたる部分で、基本的にわれわれのオープンソースラボで使用している全ての科学的機器に組み込んでいます。

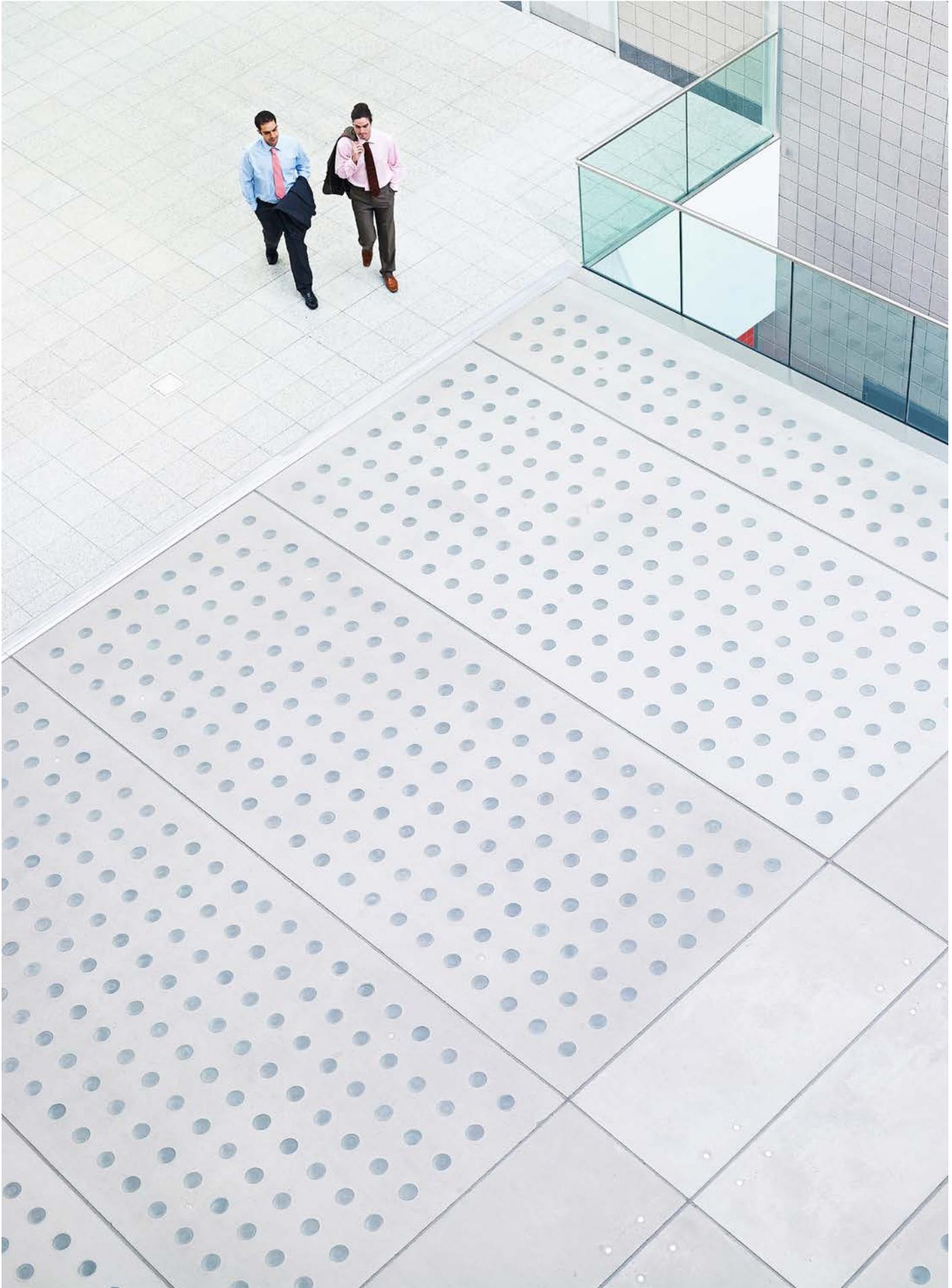
例えば、携帯型水質検査器の制御には、20米ドルで販売されているArduinoや簡易電気回路を使用しています。検査器そのものにArduino基板をプリントできれば、全体をさらに小型化でき、Arduino基板から不要なものを取り除いてカスタマイズすることも可能になります。Arduino対応の簡易電子マイクロコントローラを実現し、コストも削減できます。オープンソースの水質検査器の登場により、2,000米ドルの装置を50米ドルで製作できるようになります。2,000米ドル～5,000米ドルのコストがかかっていたさまざまな装置の総コストを、20米ドル未満に抑えられます。

PwC：ご存じのように、ムーアの法則はコンピューター業界の成長を把握し予測するに有用な方法でした。3Dプリント業界にも同様に何か参考になる手法はありますか？

Pritchard氏：3Dプリント市場促進を測定するものとしては、無料かつオープンソースのデジタル設計図の爆発的な増加が一つの例であると考えています。現在、一般消費者にとっての最大の障害はCADの知識がないことです。多くの企業が簡単で使いやすい設計ソフトウェアツールの開発に取り組んでいます。現実として、消費者が求める大抵の要件は、非常に洗練され、設計図はプロ並みの完成度となるものです。

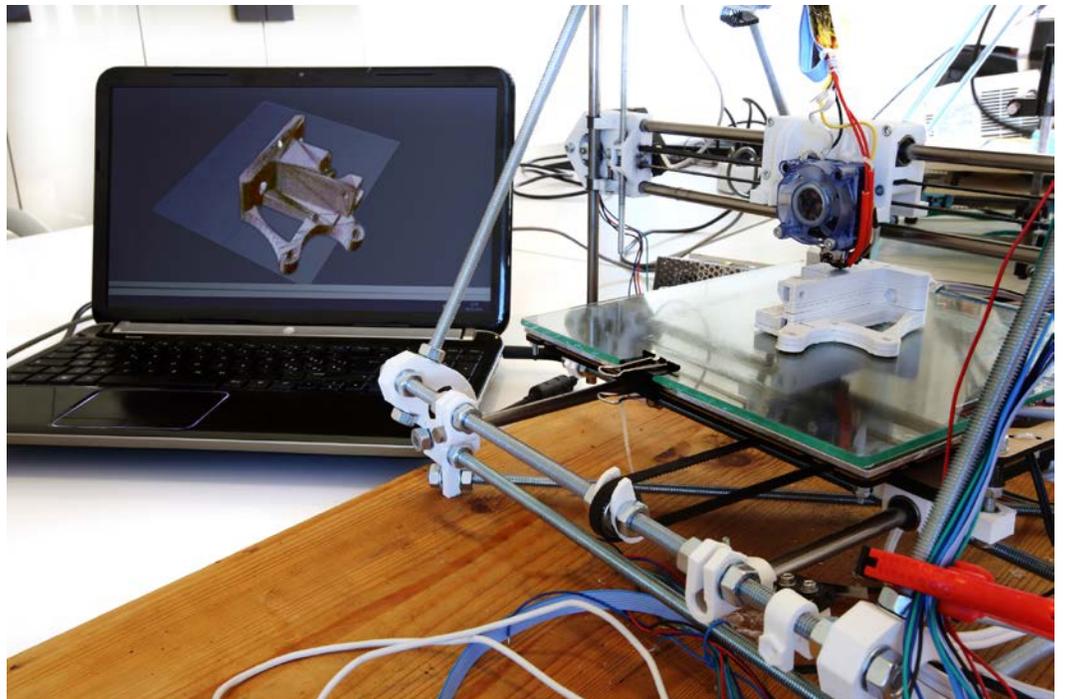
数百人、いやもしかすると数千人規模のプロが自作の設計図を共有化しています。無料で使用できる設図の数を調べると、飛躍的に増加していることがわかります。ダウンロードできるプリント用設計図はすでに数十万に上っており、数百万に迫る勢いです。プリンターを購入して自宅に置く、学校のプリンターを使用する、プリンターを一定時間レンタルするというように方法はさまざまですが、製作したいものの設計図がすでに存在する可能性は十分にあります。すでに存在する設計図を自分用にカスタマイズできるところまできたのですから、基本的な環境は十分すぎるほど整いました。

設計の増加とともに、3Dプリンターを所有または使用できることの価値は高まります。今はまだ、製作方法が根本から変わる新しい世界の入り口に立っているにすぎません。



ソフトウェアイノベーション： 3Dプリント体験を手軽に

Alan Earls, Vinod Baya



3Dモデルの調達、作製、最適化、プリントが簡単になり、品質が向上するにつれ、プロトタイピング以外にも3Dプリントの活用が可能になる。

本特集は「3Dプリントの未来」に関する第2の記事である。最初の特集ではプリンターそのものの技術革新に着目したが、ここでは進化する3Dプリントにおいてソフトウェアが果たす役割を考える。第3の特集では、3Dプリントの成長につながる材料の進化を探る。

3Dプリント用ソフトウェアは、3Dプリンターの機能を補完し、進歩を加速するとともにそれ自身も進化し続けている。イノベーションはいくつかの領域に集中している。パッケージを開けた状態で、もしくは簡単な設定変更をただけですぐに3Dの設計ができるようになり、また、非常に使いやすく低コストの設計ツールの開発、スマートフォンを3Dスキャナーとして使用する設計プロセスの誕生などが挙げられる。

このようなイノベーションとともに3Dプリントの進化の中核となるのがソフトウェアである。企画検討、3次元設計、3Dプリンターへの設計データの投入、プリントプロセスの監視と管理からなる3Dプリントのライフサイクル全体を、ソフトウェアによって扱うことができるようになる。ソフトウェアにより、コンピューターとプリンター間のインターフェースが定義され、自動化を推進し、システムはより賢くなり、エコシステム全体を円滑にするプロセスが統合される。

「3Dプリンターの未来」で述べたように（P2参照）、3Dプリンターによる積層造形には高い期待が寄せられている。その期待に応えられるかどうかは、ラピッドプロトタイピングから完成品の製作へと路線変更の可否にかかっている。この路線変更のカギを握るのが、ここで取り上げるソフトウェアイノベーションだ。完成品を製作するには、高度な自動化、

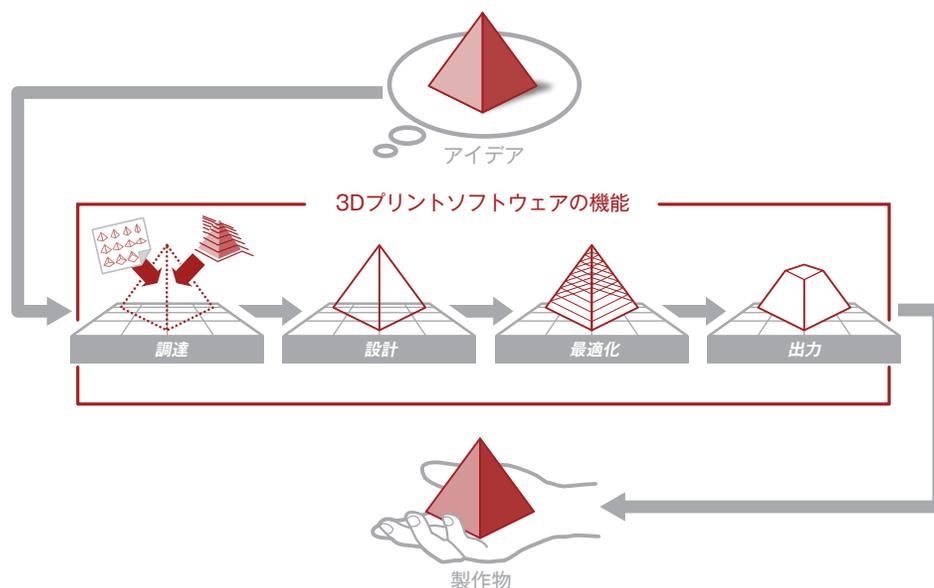
信頼性、反復性が必要となる。なお、プリント材料の進化については別に取り上げる。

3Dプリントにおいてソフトウェアが果たす役割

前述のとおり、ソフトウェアの役割は、制作物のデザインから完成まで、3Dプリントのライフサイクル全体にわたっている。図1では、このライフサイクルの4つのフェーズにおけるソフトウェアソリューションについてまとめている。

- ・ **調達**：既存の3Dモデルへのアクセス、または既存の製品から3Dモデルの作製を可能にするソフトウェア。3Dモデルの新しいライブラリやスキャンソリューションが含まれる。
- ・ **設計**：実物をデジタルで表現した3Dモデルを作製するためのソフトウェア。従来のCADソリューションや、3Dモデルを作製するような新しい方法が含まれる。
- ・ **最適化**：コスト、速度、材料などを考慮し、プリントの精度、品質、完成度を高めるために3Dモデルを精緻化するソフトウェア。
- ・ **出力**：最適化の結果を受けてモデルの出力準備をし、正常に出力されるようにプリントプロセスを実行するソフトウェア。

図1：制作物の構想から完成までの4つのフェーズにおける3Dプリントソフトウェア



商用もしくはオープンソースのデザインライブラリにより、既製品化された3Dモデルをさらに改変またはカスタマイズすることが可能になる。

ソフトウェアはどのような領域を差別化できるか

以下に示す3Dプリント業界の抱える課題の多くは、ソフトウェアによって解決が可能となる。

- ・ **3Dモデルの作製が困難**：ほとんどのCADソリューションはトレーニングを積んだ設計のプロフェッショナル向けである。そしてプロですら、3Dプリンターや3Dプリントソフトウェアを使いこなすためには、新たなスキルの習得が必要だ。
- ・ **プリンターの使い勝手が悪い**：3Dプリントプロセスの中には不明瞭で予測できないことが起きることもあり、完成までにかなりの作業を要する。同じプリンターでも異なるプリンターでも、安定した出力結果を得ることが難しい。
- ・ **生産量、品質、コスト効率が不十分**：既存の技術では、製作物に不具合や見込み違いが生じ、材料が無駄になりコストが増加することがある。

3Dプリントによる完成品の製作：標準規格が担う役割

新技術の利便性を高めて普及させるには、適切な標準規格の存在が重要な意味を持つ。3Dプリントでも同様である。業界が完成品の製作に向けて舵を切る一方で、2つの重要な領域での標準規格の策定が進んでいる。一つは、ソフトウェアやプリンターのさまざまなカテゴリにわたって製作物情報を交換するための標準ファイル形式だ。もう一つは、材料とプリンターのパフォーマンスに関する規格である。

STL（光造形法）は長い間、さまざまなCADプログラムやプリンターで設計情報を共有するための形式として使用されてきた。STLでは表面形状や物体のトポロジーが記述され、材料や色の情報は含まれない。この欠点を克服するために、AMFというオープンなファイル形式が誕生した。AMFでは、色、材料、格子などの属性がネイティブサポートされる。

これは公式のASTM規格であり、これによってどのCADソフトウェアでも3Dプリンターで製作できる3D製作物のトポロジーや組成を記述できるようになっている。

2013年後半、米国商務省の機関である標準技術局は3Dプリントの規格を促進させる2件の許可を下した。一つはプロセス制御と3Dプリントで製作された部品の検査のための一連の統合ツールの開発、もう一つは3Dプリントで製作された部品の高品質と使用許可に関するものである。材料とプロセスのパフォーマンスを証明する規格が定めれば、プロトタイプング以外の用途にも3Dプリンターを安心して選択できるようになる。

・ソフトウェアおよび規格は、完成品の複雑かつ機能的なディテールをキャプチャーし転送されない：3Dプリント技術は、複数材料、内蔵センサー、回路、バッテリーなどを含む完成品の製作を目指して進化している。ほとんどのモデリングソフトウェアでは、この情報収集からプリンターへの送信がシームレスに実現できていない。

次のセクションでは、これらの課題に対する新しい解決方法を説明する。

設計の調達

ごく最近までは、ユーザーは設計を自作しなければならなかった。しかし、CADデザインライブラリや3Dスキャン技術の登場により、デジタルモデルの設計を既存のデジタルモデルや物理模型から得られるようになり、設計にかかる工数が大幅に削減できるようになった。

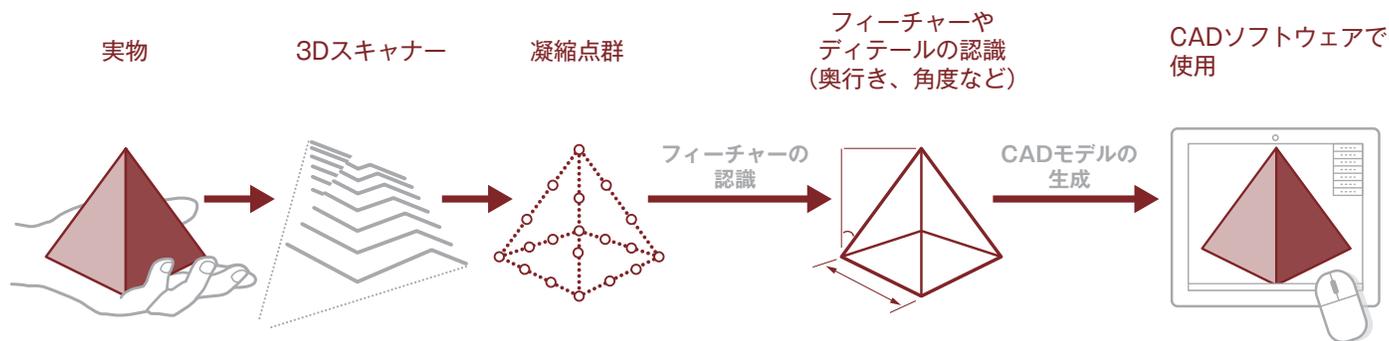
デザインライブラリ

商用およびオープンソースのライブラリにより、3Dモデルが既製品化し、さらに改変またはカスタマイズすることが可能になる。ユーザーはライブラリを使用して、高度な設計ソフトウェアを習得しなくても3Dプリントを体験できる。MakerBot（Stratasysの子会社）が立ち上げたThingiverseでは、数千の無料設計を共有してダウンロードできるようにしている。ユーザーはダウンロードした設計をそのまま使用するか、または変更を加えて使うことができる。そのため、高度なスキルを持たなくても、3Dモデルの設計が可能になった¹。3D Systemsが提供するCubifyサービスでは、設計者が設計図をアップロード、共有、コラボレーションおよび適宜出力することが可能なライブラリを、提供し、維持している。

AutoCADソフトウェアの製造者であるAutodeskは、70万人の設計技術者が集うオンラインコミュニティGrabCADと提携している。GrabCADでは最近、GrabCAD WorkbenchというWebベースのコラボレーション環境を導入した。設計を共有、表示、注釈して活用できるようになっている。このGrabCAD Workbenchは、Autodeskのオンライン設計ソリューションであるAutoCAD 360およびFusion 360でネイティブサポートされている。ShapewaysやSculpteo、Materialise、Ponokoなどの3Dプリントサービス会社ではデザインライブラリの拡大が続いており、誰もが簡単に3D設計を選択、校正、プリントできる。

1 Andy Greenburg, "Inside Thingiverse, The Radically Open Website Powering The 3D Printing Movement," *Forbes*, December 10, 2012.

図2：今日の3Dスキャンソリューションでは、CADソフトウェア向けに実物からCADモデルが生成される



実物のスキャン

ユーザーが再形成、修正、精緻化したい物体は既に存在することが多い。実物があれば、3Dスキャナーを使って3Dモデルを生成できる。図2にその手順を示す。

3Dスキャナーで使用される方法と技術は、レーザー、X線、さまざまな色の光など、物体との距離（短距離、中距離、長距離）や物体の大きさ（小型、大型）によって異なる。これらはいずれも凝縮点群、つまり物体の外部表面を詳述するx、y、z座標の集合を生成する。この生データをソフトウェアでさらに分析して、物理特性や、半径、長さ、角度、奥行きなどのパラメータを識別する。

ハードウェアとソフトウェアを組み合わせることで図2のサイクル全体に対応し、CADモデルの生成をシームレスに行う完全なシステムも登場している。例えば、Matterform 3DスキャナーはHDカメラとデュアルレーザー、回転台、分析ソフトウェアを備え、3Dモデルを生成する。実物を回転台に置き、あらゆる角度からスキャンして0.43mmの分解能でディテールを取得できる。同社は、ソフトウェアのさらなる向上により、3Dカラーリングがより高度な要件に対応できるようにすると表明している²。CreaformのGo!SCAN3DとHandySCAN 3D、LMI TechnologiesのHDI、StratasysのMakerBot Digitizer、3D SystemsのSenseも同様である。

ただし、全てのソリューションに3Dスキャナーが必須というわけではない。すでに一般に普及しているデジタルカメラを活用して、実物の平面（2D）写真からCADモデルを生成できるものもある。Autodeskのスマートフォンおよびタブレット用アプリ、123D Catchでは、人物、風景、静物をあらゆる角度から20枚以上撮影し、その写真を処理して3Dモデルを生成できる³。

設計ソフトウェア：3Dモデルの作製

CADソフトウェアは30年以上に渡り、製作物の3D設計およびモデルを作製する方法として利用されてきた。主要CADソフトウェアベンダーの原点は平面の機械製図である。やがて3D機能が一般的なものになり、立体の設計、シミュレーション、視覚化とともに、CNC（コンピューター数値制御）機械工作などの切削加工が可能になってきた。Autodesk、Dassault Systèmes、Siemens、PTCなどから、さまざまなCADソリューションが提供されている。一般的に、これらのソリューションは高度な機能を備え、技術者やプロフェッショナルを対象としており、複雑なシステムやデバイスを設計するために幅広いコマンドオプションや機能を搭載している。

「(3Dプリントの登場により、) もはやトポロジー情報のやりとりだけでは不十分です」

—Autodesk,
Gonzalo Martinez氏

² "Color Scanning with Matterform," *Matter and Form* (blog), October 8, 2013, <https://matterandform.net/blog/Color-Scanning-with-Matterform>.

³ Autodesk 123D Catch, <http://www.123Dapp.com/catch>.

従来のCADソフトウェアでは、習熟に年単位の時間がかかっていた。そこで、素人にとっても使いやすく、低価格のCADソリューションが生み出された。手頃な価格でありながら十分な機能を備えたソリューションは設計および製造業界で多数のユーザーを獲得し、ホビー市場を掘り起こしてきた。

転機となったのは、Webブラウザでの3D操作および処理のサポートだった。それまではブラウザで3D操作をサポートするためにプラグインをダウンロードする必要があり、多くのユーザーに敬遠されていた。この状況に変化が訪れたのは、インタラクティブな3Dグラフィックのレンダリング用にWebGL (Web Graphics Library) がブラウザに広く搭載されるようになったためである。Mixee Labs、Dreamforgeなどの新興ベンダーはWebGLを活用し、従来のデスクトップCADの機能をブラウザに搭載している。2013年にはAutodeskがクラウドベースの3Dモデリングソフトウェア、Tinkercad⁴を一般ユーザー向けに復活させた。Tinkercadはシンプルなインターフェースを持つ、ブラウザベースの3D立体モデリングツールである。

初心者にとっては、真っ白な状態から始めるのは敷居が高い。作業を簡単にするために、もっと気軽に始められるようにもする必要がある。「誰もが真っ白な状態から始められるわけではありません。ゼロからモデルを作るのではなく、フィギュアなど目的に合った製作物カテゴリ用テンプレートが用意されている方がユーザーにとっては便利です」と、新興企業Mixee Labsの共同設立者Nancy Liang氏は述べている。Mixee Labsでは、一連の設計パラメータを最初から用意している。ユーザーはブラウザインターフェースを通じて設計プロセスに参加し、パラメータを調整する。同社はデザインライブラリも構築しており、サードパーティーの設計者の協力を得てMixee Labsプラットフォームで3D設計および製作物を顧客に提供している。

また、使いやすさをさらに向上するために、3Dモデルの作製および操作のインターフェースを考え直す動きも見られる。新興企業ZeroUIは人間本来の能力に着目し、カメラの前で対象物を動かし操作することによる設計に取り組んでいる。社名にも、コンピューターの使用を最小限にしようという意思が表れている。CEOのRaja Jasti氏は次のように語っている。「現在のツールに真っ向から対抗しているわけではありません。あらゆるユーザーが創造力を発揮して3Dプリントを活用できるように、別の方法を提供しているのです」

ZeroUIなどが取り組むイノベーションが可能になったのは、3Dセンサーの普及によるところが大きい。Appleによる3Dセンサー開発企業PrimeSense⁵の買収、Intelが先日発表したRealSense技術⁶、GoogleのProject Tango⁷から、3Dおよび奥行きを認識する機能がラップトップやスマートフォン、タブレットに標準搭載されるようになり、インターフェースのイノベーションが急激に進む可能性があると考えられる。

完成品を3Dプリンターで製作するには、基本的な形状やトポロジーにとどまらず、材料、色、その他のディテールに取り組む必要がある。設計ソフトウェアのカギとなるイノベーションは、完成品のディテールへの取り組みである。「3Dプリントでは製作プロセスで電子部品やセンサーを組み込むことができるため、設計ツールがその機能に対応し、ディテールを含む情報をプリンターに送信する必要があります。もはやトポロジー情報のやりとりだけでは不十分です」と、Autodeskの戦略的研究担当ディレクター、Gonzalo Martinez氏は述べている。

例えばStratasysのObjet Studioソフトウェアでは、複数材料の3D設計をばらばらのシェルに分解し、それぞれに材料や色を割り当てることができる。主剤は3種類から選択でき、ソフトウェアによって材料の選択肢が示され、ユーザーがシェルをクリックするたびにドロップダウンパレットが表示される⁸。

「誰もが真っ白な状態から始められるわけではありません。ゼロからモデルを作るのではなく、フィギュアなど目的に合った製作物カテゴリ用テンプレートが用意されている方がユーザーにとっては便利です」

—Mixee Labs,
Nancy Liang氏

4 Rakesh Sharma, "The Problems With Reinventing CAD Software," *Forbes*, August 9, 2013.

<http://www.forbes.com/sites/rakeshsharma/2013/08/09/the-problems-with-reinventing-cad-software/>.

5 Chris Velazco, "Done Deal: Apple Confirms It Acquired Israeli 3D Sensor Company PrimeSense," *TechCrunch*, November 24, 2013. <http://techcrunch.com/2013/11/24/apple-primense-acquisition-confirmed/>.

6 Will Findlater, "Intel's RealSense camera: gesture control and 3D scanning built into your next PC," *Stuff*, January 16, 2014. <http://www.stuff.tv/intel/intel-reveals-realsense-tiny-kinect-camera-thatll-be-built-your-next-tablet-laptop-and-all-one>.

7 Rich McCormick, "Google reportedly building Project Tango tablets that can see the world around them," *The Verge*, May 23, 2014. <http://www.theverge.com/2014/5/23/5744060/google-making-project-tango-tablets-for-io-conference>.

8 "Using Objet500 Connex3 for Prototyping," Stratasys.

<http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/precision/objet500-connex3>.

また、Advanced SolutionsのTissue Structure Information Modeling (TSIM)ソフトウェアは、組織構造の3Dデジタルモデルの設計、視覚化、コラボレーション、シミュレーション、分析の機能を備えている。このソフトウェアの利用者は医師で、主にモデル化のために使用される。細胞層の配置、細胞型、粘度などのディテールもモデル化でき、3Dプリントで複雑な組織を完成品として製作できる。

Materialise、CADspanでも同様の機能が提供されている。

物体を立体としてプリントすることを前提としているソフトウェアもある。簡単で便利だが、もちろん時間がかかり大量の材料が必要である。最適化ソフトウェアにより、材料使用とプリント時間の両方を最適化する内部格子構造が作製される(図3を参照)。目的は、強度、剛性、その他の要件を満たす設計に必要な材料の使用量を最小限に抑えることにある。

設計コンサルティングを行うWithin Technologiesでは、Within Enhanceなどの最適化ツールを提供している。このツールでは目的の重要、最大変位、剛性などのさまざまなパラメータを情報として入力し、目標を達成するために最適化された内部3D格子と外皮をカスタム設計して、サードパーティープリンターに情報を出力する。立体構造から格子構造への変換は、netfabbのSelective Space Structuresソフトウェアでも可能である。

同じ手法を使用するWithin Technologiesの別のサービスでは、技術者や外科医がチタン製の3D医療移植片を設計しリモートプリントできる。ソフトウェアは無料でダウンロードでき、移植片の設計やサードパーティー製造業者へのファイルの送信も容易となっている¹⁰。

図3：この航空宇宙用材料には、軽量化と用途に耐える強度を両立する格子構造が使用されている



出典：Laser Institute of America (LIA)

「現在のツールに真向から対抗しているわけではありません。あらゆるユーザーが創造力を発揮して3Dプリントを活用できるように、別の方法を提供しているのです」

—ZeroUI,
Raja Jasti,氏

3Dプリント設計の最適化

CADソフトウェアは3次元設計の汎用モデリングツールであり、用途は3Dプリント関連に限らない。つまり、CADソフトウェアで作製された全ての設計が3Dプリントに対応し、問題なく製作できるわけではない。機能をあきらめずに設計を修正するには新しいソフトウェアソリューションが役立つ。これは、これまでの製造業での「製造性考慮設計」という概念に近い。

「3Dプリント考慮設計」の概念はさまざまな課題に対応している。例えば、垂直断面から薄片が飛び出ているとき、支持を追加しないと、3Dプリント中に自重で崩壊または変形する可能性がある。この場合、ソフトウェアによって一時的な支持を追加する変更を加え、プリント後に除去すればよい。また、3Dモデルの防水性もソフトウェアで判断できる。穴や亀裂、欠損がなく、プリンターが物体の内外を認識できなければ、防水性があると言える。さらに、プリントに使用する材料を減らし、コストを削減するために、内部を空洞化することも重要だ。

3Dプリントサービス会社であるShapewaysでは、3Dプリントを最適化するために、Mesh Medicサービスを提供している。netfabbとともに提供しているこのサービスは、「3Dプリントのスペルチェック」と称されている。Shapewaysにアップロードされたファイルを取得し、表面の穴など、3D設計ソフトウェアで防げなかった欠陥がないかどうかを検査する。この自動化ツールにより95%の穴が修復され、生産量が大幅に増加するとされている⁹。

9 “Shapeways Mesh Medic—a netfabb Cloud Solution Success Story,” netfabb, <http://www.netfabb.com/casestudies/shapeways.php>.

10 Ann R. Thyrt, “Design & 3D Print Custom Metal Implants,” *Design News*, December 9, 2013, http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1392&doc_id=270238.

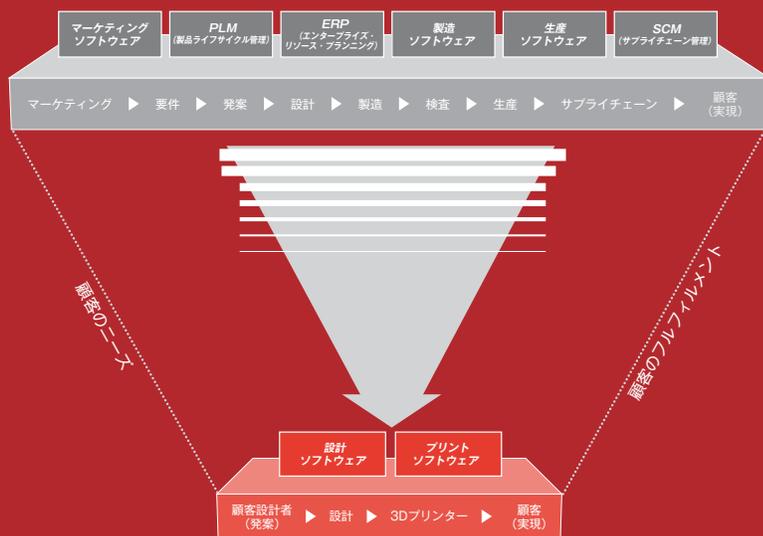
3D プリントソフトウェアは既存エンタープライズシステムとともに進化すべき

企業において、3Dプリントは単独のプロセスではないし、そうあるべきでもない。「3Dプリントが真新しい技術から一般的な技術になれば、従来の製品および製造データ管理システム間とのインターフェースが必要になります」と、PwCの製造業部門プリンシパル、Mark Thutは述べている。

3Dプリントの実現とともに、開発および設計部門から製造および生産部門へと製作物が直接やりとりされるようになる。このように直接つながることで、3Dプリントとサプライチェーン、ERP（エンタープライズ・リソース・プランニング）および製品ライフサイクル管理（PLM）システムが統合され、単なる製造技術としてではない価値が発揮されるだろう。

長期的に見て、3Dプリントは発案から実現までの期間を短縮する（図Aを参照）。マーケティングから実現までにかかっていた長い期間はおそらく解消され、中間部門の多くは自動化、再構成、転換されるか、不要と見なされるようになる。例えば、3Dモデルを使ってシミュレーションを行えば、さまざまな用途に対応した検査を実行できる。

期間短縮が企業のアーキテクチャやシステムに影響を与えることは間違いない。マーケティング、設計、製造、サプライチェーンといった部門の各システムは、データ共有のために統合されている。実現までの期間が短くなれば、コンプライアンスや業務遂行に必要なデータを取得しつつ、全体に必要なシステムやプロセスの数は減る。



図A：3Dプリントの使用により、発案から実現までの期間が短縮され、アーキテクチャーやバリューチェーンの各所のシステムの範囲に影響が及ぶ。

ソフトウェアが製作を支援

ほとんどの3Dプリンターでは、使用前に時間をかけて多くの設定作業を行わなければならない。プリントプロジェクトでは定期的な管理も必要だ。このような使いづらさの問題に対応するソフトウェアが登場し進化を続けている。重視されているのは、プリント用モデルの準備（スライス）、プリントヘッドの方向付け、自動水平調整、自動校正、品質チェックのためのフィードバックなどだ。

モデルをプリントするには、事前に（仮想的に）薄層にスライスし、材料を塗布するプリンターヘッドの軌道を定義する必要がある。スライス方法は使用する材料やプリント方式、プリンターの種類によって異なる。

スライシングソフトウェアは3D設計をプリント可能な層に分割し、プリントヘッドまたはツールの軌道を計画して、設計ファイルをプリンターの機能に合わせる。市場では、このニーズを満たす多くのソリューションが低価格または無料で提供されている。オープンソースのクロスプラットフォームソフトウェアであるSlic3rの気が高まったのも、従来に比べて使いやすかったからだ。クローズソースのKISSlicerは、複数の押出機と自動パッキング（1回で複数の部品を効率的にプリントするサイクル）をサポートしている¹¹。

特にホビー市場では、自動化が有望だ。例えば、出力品質と反復性を確保するために、製作台は水平でなければならない。Printrobotの新ユニットは自動水平調整機能を備えるようになった¹²。

また、品質向上のためのリアルタイムのフィードバックを得るためにもソフトウェアが重要だ。Stratasysと、米エネルギー省の管轄下にあるオークリッジ国立研究所は、炭素複合材による積層造形の改良に取り組み、工程間検査方式の開発に協力して取り組んでいる。工程間検査方式では、製造上の欠陥をリアルタイムで識別し、上流にフィードバックを提供して修正措置を開始する。マルチレイヤプログラムでは、後工程分析に代わって、工程間分析および修正を目指す¹³。

11 Craig Couden, "Know Your Slicing and Control Software for 3D Printers," *Make*., November 19, 2013, <http://makezine.com/magazine/guide-to-3-D-printing-2014/know-your-slicing-and-control-software-for-3D-printers/>.
12 Cabe Atwell, "Printrobot Unveils All-Metal 3D Printer," *Design News*, April 17, 2014, http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1386&doc_id=272794.
13 Leslie Langnau, "Turning FDM into a mainstream manufacturing process," *Make Parts Fast*, July 2, 2012, <http://www.makepartsfast.com/2012/07/3941/turning-fdm-into-a-mainstream-manufacturing-process/>.

Sigma LabsでもPrintRite3Dという工程間検査技術が導入された。3Dプリントで高品質な金属部品を製作できる、ソフトウェアおよびハードウェア製品スイートである。

このようなイノベーションによって、発案から製作までの道のりが確実に、さらなる品質の向上、コストの効率化が可能になる。

結論

ソフトウェアはエコシステム全体を一体的に強固に結び付けるものとして、3Dプリントの進化において極めて大きな役割を担っている。プリンターや使用する材料のイノベーションには比較的長い時間と多額のコストがかかり、物理的な限界に近づいている。ソフトウェアによる機能および経済性の向上の余地は大きい。

ソフトウェアイノベーションを調達、設計、最適化、プリントに集中させることで、3Dプリント技術はもっと身近で使いやすいものになる。ソフトウェアを通じて、複数材料、多色、完成品への対応を進めることで、プリンターや材料の進化も促される。これら全てが連動して、単なる試作から完成品の製作へと業界の路線転換が進む。

ソフトウェアを活用することで、プリンターの高機能化と自動化が実現され、素人でも簡単に使用できるようになる。今後数年間で、ソフトウェアを使用した3Dプリントは大きな進化を遂げるだろう。

トポロジー情報の先へ

積層造形の進化を促す

3Dプリントソフトウェアの発展

——AutodeskのGonzalo Martinez氏に聞く

聞き手：Vinod Baya、Bo Parker



Gonzalo Martinez氏
Autodesk社 CTO室
戦略的研究担当ディレクター

PwC: Autodeskが行っている3Dプリントの取り組みについてご説明いただけますか。

Martinez氏: 当社が3Dプリントに着目したのは5年前のことです。当時販売されていた3Dプリンターのほぼ全機種で、大型、小型の物体、複数の材料などを試しました。3Dプリンターを作製および使用している企業とのソフトウェア提携を戦略的に進めるために何が必要かを見極めるためです。

これまでとは異なる方法での製造を可能にする3Dプリントは、当社にとって非常に戦略

的な意味を持っています。3Dプリントが従来の製造方式に取って代わるということではなく、3Dプリントと従来の製造をうまく組み合わせ、両方の長所を生かしていくことになるでしょう。

当社は長年、設計、視覚化、シミュレーション用のツールを提供してきましたが、このたび新たに「製作」の市場に参入しようとしています。製作では、3Dプリント、従来の製造方式、CNC（コンピューター数値制御）、ロボティクスの利用の4つを組み合わせ、製品をビジョンに進化させます。

「当社では、切削加工、積層造形、ロボティクスを組み合わせて活用するソフトウェアソリューションの提供を目指しています」

PwC：そのビジョンとはどういうことですか？

Martinez氏：積層造形が従来の製造方式に取って代わるとは思っていません。実際はお互いに補完する関係にあり、両方を組み合わせて使用する必要があります。当社では、切削加工、積層造形、ロボティクスを組み合わせて活用するソフトウェアソリューションの提供を目指しています。

レーザー凝結溶接を行う多軸フライス盤など、積層造形と切削加工を組み合わせて複雑な形状を作り出す機械はすでにできています。まず、フライス盤で切削加工を行います。その後、プリントヘッドを取りかえてレーザー凝結溶接で積層造形を行い、金属の層を重ねます。そして再び切削に切り替え、最小限の除去を行って表面を仕上げます。

PwC：そのビジョンの実現に向けて、どのような取り組みをされていますか？

Martinez氏：これまでは主にプロフェッショナル向けのソフトウェアを提供してきましたが、今後はプロフェッショナルとホビー愛好家（生産消費者）、消費者の3つのグループを対象として、3Dプリント全体に対応するソフトウェアを開発します。3Dプリントのエコシステムに役立つ多くのソフトウェアイノベーションに取り組んでいます。

ソリューションの開発にあたっては、使いやすく、身近なものにすることを重視しています。例えば、プロフェッショナル向けのWebベース3DモデリングツールFusion 360は、クラウドを介して行っています。Fusion 360は非常に使いやすく、複雑な設計に対応できる優れたツールです。アプリケーションを所有する必要はなく、レンタ

ルして使用量に応じて料金を支払うことができます。レンタル方式と使用量によっては、ごく手頃な価格で利用できます。消費者向けには123Dなどのソリューションがあります。使い方は簡単で、Webブラウザからアクセスできます。

当社では、3Dプリントをもっと身近なものにするために、Sparkという無料のオープンプラットフォームを開発しています。Sparkは設計ソフトウェアと3Dプリンターの間での情報交換を改善します。製作を開始する前に、ソフトウェアによって自動修正や最適化が行われます。Sparkには各種APIを組み込み、材料科学の企業からクラウドで出資を募った新興企業までさまざまな組織が3Dプリントを活用してイノベーションを起こせるようにしています。

ハードウェア、ソフトウェア、材料の緊密な統合は、3Dプリントのイノベーションの加速に不可欠であると考えています。リリースする3Dプリンターを参考事例として、Sparkプラットフォームの威力を示し、これまでとは違う3Dプリントのユーザーエクスペリエンスを提供します。

PwC：シンプルにすることをそれほど重視するのはなぜですか？

Martinez氏：従来の製造方式では、ソフトウェアや機械を操作できるようにするために、多大な時間とコストをかけたトレーニングが必要です。技術者やプロフェッショナルを育てるなら、訓練するのは当然です。

しかし、3Dプリントでは事情が異なります。プリンターを使用できれば、わずかな操作で複雑な物体をすばやく製作できるのです。3Dプリンターからの2、3の質問に答えれば、すぐに3Dプリントが始まります。

「プロセスをシンプルにするほど、3Dプリント技術がユーザーにとって便利で身近なものになります」

世の中ではもっと簡単なカスタマイズと製作が求められており、そこに商機がある——。当社はそのことに気付きました。社内実験で、3Dプリント全体でのエクスペリエンスが重要だということがわかりました。当社は設計と製作の全てをもっと安くする工夫を重ねました。ソフトウェアは設計、視覚化、製作のエクスペリエンスを容易にし、シームレスにするものであるべきです。製作は、プリンターを接続してもサービス会社に依頼しても可能です。プロセスをシンプルにするほど、3Dプリント技術がユーザーにとって便利で身近なものになります。

PwC：従来の製造方式とはどのような点が異なりますか？

Martinez氏：従来の製作方式では、技術者は真っ白な状態から設計を始めます。そこで当社は、製作物や実物に基づく原案を用意しておけば便利になると考えました。今は誰もがスマートフォンなどで写真を撮影できます。実物をさまざまな角度から撮った写真から三次元モデルを構築できたら便利ではないでしょうか？ Autodesk 123D Catchアプリでは、写真から3Dモデルを構築できます。構築したモデルの操作やプリンターへの送信が可能です。

PwC：3Dプリントの大きなトレンドとしては、1回の製作で複数の材料や色を使用する方向に向かっています。ソフトウェアはこの機能にどのように対応しますか？

Martinez氏：これは設計ソフトウェアというより、通信形式や規格の問題です。今のところ、この点ではまったく状況が整っていません。CADソフトウェアからプリンターへの情報転送にはSTLファイル形式が使用されます。STLファイル形式では扱うのは基本的に製作物の形状や形態で、非常に単純です。複数の材料や色は認識されません。

現在はSTLからAMFへの移行が進んでおり、ハードウェアおよびソフトウェアメーカーはAMFのさらに先に目を向けています。

設計ソフトウェアで複数材料または多色情報を処理する場合、ユーザーがプリンターソフトウェアを使ってプロセスで使用する材料と色を割り当てるといった煩雑な作業が必要になります。当社はこの処理をシンプルにしようとしています。

この課題の解決は、3Dプリンターを使った試作品だけではなく、完成品を製作するためのエコシステム全体のために必要です。完成品を製作するようになれば、材料の種類は現在の150を優に越えます。

「もはやトポロジー情報のやりとりだけでは不十分です」

PwC: 御社のこれまでの活動から、3Dプリント用の設計ソフトウェアを開発するのは自然な流れだと思います。他にどのようなタイプのソフトウェアに投資なさっていますか？

Martinez氏: 3Dプリントでチタンまたはステンレス鋼の部品を製作する場合、従来の製作方式よりも3Dプリントの方が高コストです。しかし、部品をくりぬき、強度などの要件を満たすために必要などころにだけ材料を残すことができます。重さは10分の1で、従来方式で製作したのと同じ強度の部品を製作できます。用途によっては、この方式の方が合理的です。航空機や自動車では、製作物の寿命期間中に多くの燃料を節約できます。

そこで課題となるのが、ソフトウェアを使用していかに軽量化するかということです。顕微鏡レベルでは、格子のような構造、ハチの巣状の構造を用います。このような課題への対応にはソフトウェアが役立ちます。製作物の壁の間にハチの巣状の構造を作ることで、軽量化と強化を実現するとともに、3Dプリントで製作しやすくなります。このような構造の構築は従来の方式では不可能でした。

PwC: その例で軽量化を実現したように、設計の最適化にソフトウェアが役立つということですね。他はいかがですか？

Martinez氏: そうです。重さや熱性能など、パフォーマンスに関する重要な特性の設計を最適化します。

他に、プリントでも最適化を行います。例を挙げるなら、プリントの信頼性はずっと課題となっていました。設計によって問題なくプリントできたりうまくいかなかったりするばらつきがあるのです。設計に方向付けやプリント時の支持構造物が欠けていることがあるためです。プリンターによっては、隙間などがある場合にエラーメッセージが表示されます。

解決策がすでにあるものもあります。例えば、自動支持生成ソリューションの中には、多くの追加材料が使用されるものがあります。当社は支持部の材料を90%減らし、複雑な形状を構築するために必要な支持構造を構築できるアルゴリズムを開発しました。

AutoCAD、Inventor、Fusionなど当社の主要ソフトウェアでも、確実にプリントできる100%保証付きのSTLファイルが生成されるよう努力を重ねています。

また、複数材料の研究も行っています。STL形式で扱えるのは形状とトポロジーのみで、材料や色の情報は含まれないからです。

PwC：3Dプリンターで完成品を製作することが可能となりましたが、ソフトウェアはどのように活用されますか？

Martinez氏：3Dプリンターで複雑な完成品をプリントできるようになりましたが、私たちはその先のことを考えています。未来の技術は現在とは異なったものになるでしょう。3Dプリントでは製作プロセスで電子部品やセンサーを組み込むことができるため、設計ツールがその機能に対応し、ディテールを含む情報をプリンターに送信する必要があります。もはやトポロジー情報のやりとりだけでは不十分です。

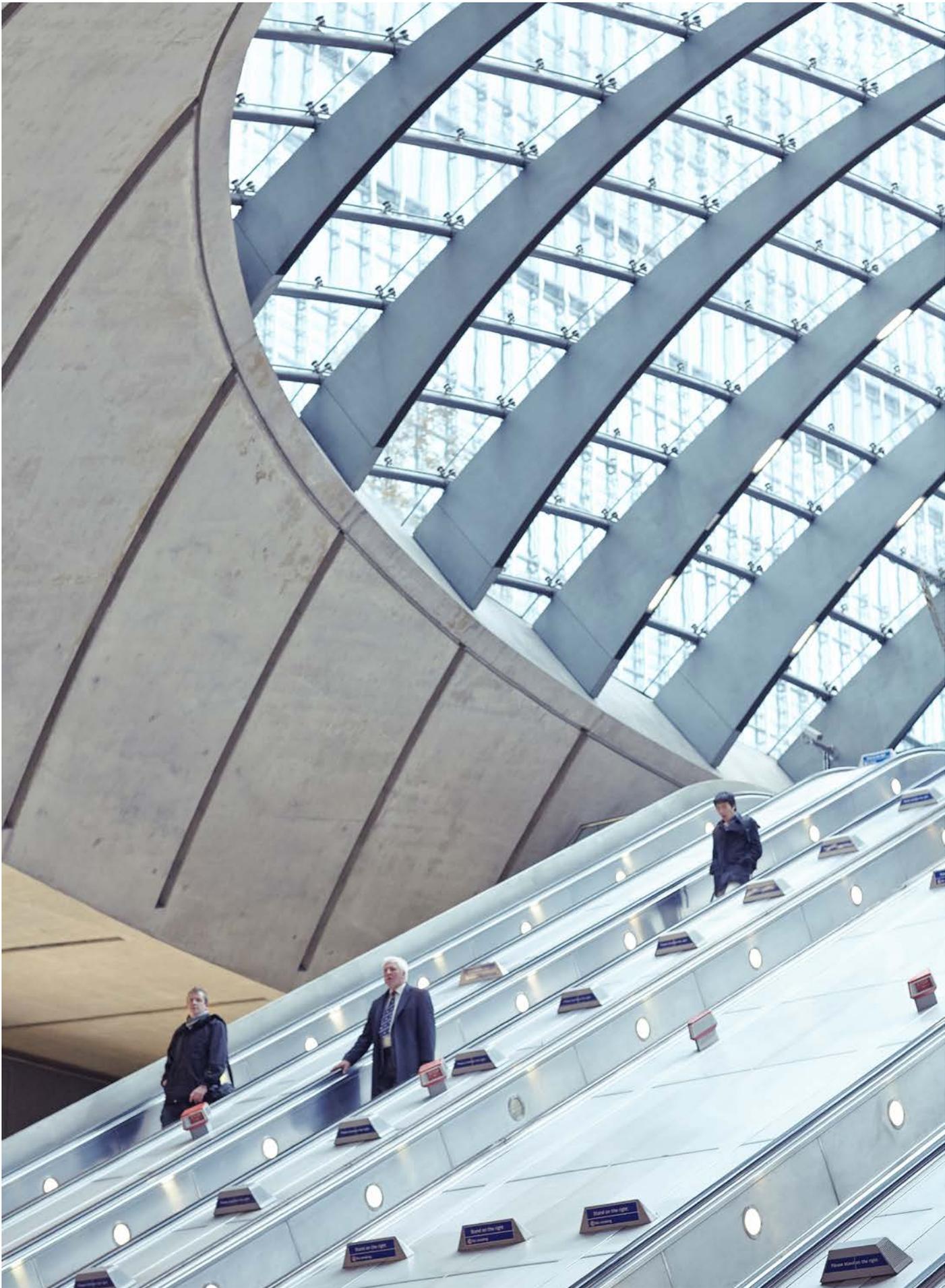
例えば、センサーや電子部品を内蔵した製作物では複数の材料を使用することになるため、製作段階でどの材料をどこに使用するか

を指定する必要があります。現在のCADソフトウェアはこの作業に対応していません。金属焼結機の特定の位置で特定の方法で金属を溶融させる場合、ユーザーがそのように指定できる必要があります。

現時点では、CADソフトウェアで形状を指定し、3Dプリントソフトウェアで使用する材料と色を指定しています。

PwC：今後はトポロジーのみではなく、もっと多くの情報を扱う方向へと移行するのですね？

Martinez氏：そうです。完成品の材料や回路、センサーなどについて情報をやりとりすることになります。

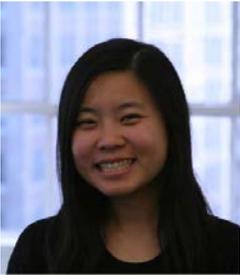


3Dプリントを身近なものに

3Dプリンターで作る定番のモノとは？

Mixee Labs社のNancy Liang氏が予測する未来

聞き手：Vinod Baya、Bo Parker



Nancy Liang氏

Mixee Labs社 共同設立者、
設計および業務主任

PwC：まず、Mixee Labs社を設立した経緯をお伺いできますか？

Liang氏：Mixee Labsを立ち上げる前、私はShapewaysという3Dプリントサービス会社に在籍しており、3Dプリントが世間から大いに関心を持たれていることを知っていました。しかし、多くの人は自分が何を作りたいのかをはっきり認識していなかったり、アイデアを形にする方法がわからなかったりといった状態でした。コンテンツ生成の面に大きなギャップがあったのです。どうすれば人々が自分だけのカスタマイズアイテムを作るようになるだろうか、と考えました。

Mixee Labsでは、CADソフトウェアの使い方を知らなくても、ユーザーが製作物をカスタマイズしたり、設計者が自作の設計を公開したりする作業が簡単にできるプラットフォームを開発中です。本プラットフォームにより、他のユーザーも各自の好みに合わせて設計のパラメータやスタイルを調整できます。

PwC：御社のソフトウェアはどのような機能を備えていますか？

Liang氏：設計者の意見を聞き、3Dプリントでアイデアを実現できるかどうかを検証しています。消費者が購入できなくては意味がないので、経済的であることも重要です。

例えば、製造コストも考慮に入れます。3Dプリントでは、製作物の複雑さではなく、使用する材料の量がコストを左右します。プリントにかかる時間と材料使用量は体積に関係しているため、体積ベースの価格設定となっています。体積ベースの価格設定では奇妙なことが起こります。例えば、物体の高さを2インチから4インチへと倍増させると、材料量は8倍になり、コストが8倍になるのです。

「当社にとっての課題は、ユーザーが気軽に始められるような仕組みを作ると同時に、自由に設計できる余地も十分に残すことでした」

このことはあまり考慮されていません。あるいは、空洞化しなければ材料を大量に使用することになり、非常に高コストになる可能性があることが理解されていないのでしょう。

そこで、私たちは設計者の教育にも力を入れています。3Dプリントのための設計方法、カスタマイズ方法、適正価格の設定方法、各種材料の長所と短所、さまざまな材料の活用方法などです。

PwC：プラットフォームの構築にはどのようなテクノロジーを使用しているのですか？

Liang氏：Ruby on Rails、JavaScriptなど、一般的なWebフレームワークを使用しています。3Dレンダリングに使用しているのは、ブラウザ向けの3DフレームワークであるWebGL（Web Graphics Library）です。当社はWebGLの普及を生かしています。WebGLでは、サーバーの応答を待つ必要がありません。ユーザーインタラクションは完全にクライアント側で行われるため、3D設計の表示およびインタラクションはすばやくスムーズです。

WebGLを採用して正解でした。取り組みを始めた時点では、Internet ExplorerでWebGLがサポートされていませんでした。現在のIEバージョン11ではサポートされています。今後はWebブラウザでの3Dソフトウェアが有望です。

PwC：WebGLによって、どのようなことが可能になったのでしょうか？

Liang氏：WebGLはWebブラウザでグラフィックをレンダリングするためのJavaScript API（アプリケーションプログラミングインターフェース）の一種です。以前は3DグラフィックのレンダリングにJavaまたはFlashプラグインが必要でした。そのため使いにくく、大量のCPUを消費していました。

また、設定パラメータはわずかで、あらゆるインタラクションをサーバーに送信していました。サーバーが処理を行って新しいファイルを生成し、ブラウザに返されたファイルがレンダリングされるという手順です。問題は非常に時間がかかることでした。

WebGLは最初からブラウザに搭載されています。ブラウザは表示装置のグラフィックプロセッサに直接アクセスできるため、高速です。そのため、インタラクションと3Dアニメーションをリアルタイムでサポートすることが可能になりました。

PwC：何かお気づきの点はありますか？

Liang氏：調査の際、設計者から興味はあっても技術的知識のない素人までのさまざまな潜在的ユーザーにお話を伺いました。そこでわかったのは、多くの人は自分が何を作りたいのかをはっきり認識していないということでした。CADプログラムがごく簡単でも、どこから始め、何を目標せよよいのかがわからないのです。

誰もが真っ白な状態から始められるわけではありません。ゼロからモデルを作るのではなく、フィギュアなど目的に合った製作物カテゴリ用テンプレートが用意されている方がユーザーにとっては便利です。

当社にとっての課題は、ユーザーが気軽に始められるような仕組みを作ると同時に、自由に設計できる余地も十分に残すことでした。そこで試みたのが、設計のパラメータ化です。パラメータを操作すると、設計が変わります。どの部分をパラメータ化するかは設計者が決めます。

「最終的に重要なのは製作物であり、製作プロセスではありません」

私たちは試行錯誤を経て、3Dプリント用設計を最適化する方法を見つけ出しました。3Dプリント用にあらかじめ最適化されたテンプレートがあれば、作業とコストを軽減できます。透明性も重要です。作業を始める前にコストや製作物の外観を把握でき、プリンターで製作できることがわかるということです。

PwC：顧客となるのはどのような人ですか？

Liang氏：主な顧客は、3Dプリント可能なカスタマイズされた設計を求めている消費者と、設計を作成して市場に提供したいと思っている設計者です。

PwC：どのような課題があると思われますか？

Liang氏：目下の大きな課題はコストです。3Dプリントサービスを利用してコーヒーマグを作ると、40米ドル～50米ドル程度かかります。加えて、設計者にも料金を支払う必要があり、かなりの費用がかかります。このことは設計者や消費者には理解されていないと思います。消費者の間でこの技術を普及させるには、価格を低く抑えなければなりません。

設計コストには細心の注意を払っています。例えば、当社のWebサイトに掲載しているフィギュアは低コストで製作できるようにモデリングされています。だからこそ25米ドルという価格で提供できるのです。もし3Dプリントの知識がないモデラーに依頼すれば、フィギュアの価格が跳ね上がるうえ、プリンターで製作できない可能性もあります。

PwC：3Dプリンターではどのようなモノが多く製作されるとお考えですか？ 3Dプリンターで作る定番のようなものはありますか？

Liang氏：私たちは3Dプリンターをフレームワークとして捉えています。従来の方式では不可能だが、3Dプリンターなら可能になるのはどんなことだろうか、と考えるのです。しかし、このような考え方は少数派で、多くの設計者が技術的な視点にとらわれています。3Dプリンターで何を作れるだろうか、という発想しかないのです。3Dプリンターで作れるからといって、その方が得策というわけでもなければ、消費者に求められているわけでもありません。

フィギュアが3Dプリンターで製作されたものか大量生産されたものかは、顧客にとってはどうでもよいことです。重要なのは、ディテールの出来です。最終的に重要なのは出来上がったモノであり、製作プロセスではありません。

フィギュアというカテゴリを作ったのは、大量生産方式では製作できないものだからです。また、多くの人にとって便利だからでもあります。友人や家族、同僚へのプレゼントになる小さなフィギュアが作れます。

3Dプリンターの有望なユーザーは、独立した小規模設計者だろうと考えています。DIYの世界では、自分で作ったり、地域の設計者から購入したりといった大きな変化が見られます。これを可能にしているのが3Dプリンターです。

市場テストと販売を短期間で行えるようになり、設計者が参加しやすくなりました。ジュエリーも期待できます。例えば、指輪を作る場合、さまざまなスタイルとサイズに対応する必要があり、大量生産では非常にコストがかかります。3Dプリンターを使用すれば、ジュエリーライン全体をカスタムサイズにすることができます。

PwC: 3Dプリントによるパーソナライゼーションを、従来の製造プロセスに組み込むべきということでしょうか？ 所有物のカスタム要素が特別感などにつながるのですか？

Liang氏: そうです。要素としては2つあると思います。一つは特別感です。自分の持ち物は他の人とは違う、世界に一つしかないものであるという優越感ですね。イニシャル入れと似ています。

もう一つは、いわば「自作欲」です。特別感や多少の特徴ではなく、まったく新しいものを作り出したいという願望を持つ人が市場に増えています。わが子のセーターや自分のニット帽を手編みしたり、スクラップブックを作ったりすると根底にある理由は同じです。店でアルバムが売られていても、自分だけの

スクラップブックを作るのは、個人的な思い入れがあつてのことです。

クラフト市場を動かしている人間本来の欲求と同じです。市場としての規模は巨大です。3Dプリンターによって自作の幅が広がった今、大きな将来性があります。

PwC: 複数材料への対応はいかがでしょうか？ 1つの製作物に複数の材料を使用できますか？

Liang氏: 最新の「ポブルヘッド」では、2つの異なる材料を使用しています。頭部と体には石膏砂岩、バネには柔軟性に優れたナイロンのプリントスクリーンを使用しています。現時点では、2台のプリンターで製作した後、組み立てています。

注目していただきたいのは、材料だけではありません。3Dプリントと大量生産というような、3Dプリントと他の技術の組み合わせ方です。例えば、3Dプリンターでイヤリングを製作した後、大量生産でイヤリングのフックをまとめて作るといったことが可能です。例としては単純ですが、このようなことです。

3Dプリント革命における 造形材料の役割

Lamont Wood, Vinod Baya



3Dプリンターの解像度の向上、造形材料の選択肢の拡大、特性の制御方法の進化とともに、ラピッドプロトタイピングにとどまらずさまざまな使い方が生まれる。

これは「3Dプリントの未来」に関する3番目の特集である。最初の特集ではプリンター自体の新技术に着目し、2番目の特集では3Dプリント用ソフトウェアのイノベーションを扱った。3番目のこの特集では、3Dプリントの成長につながる造形材料の進化を探る。

3Dプリンターを単なる試作ではなく、製品版作製的手段として用いるには、プリンターで使用する造形材料がさらに進化が必要がある。解像度の向上も引き続き必要だ。プリントに使用する造形材料の種類、特に金属の種類も増やさなければならない。さらに、1回の製作プロセスで複数の造詣材料を組み合わせ使用できるように、造形材料とプリントプロセスを最適化する必要もある。例えば、金属とプラスチックを組み合わせ回路やバッテリーなどを作れるようにするなどが必要である。

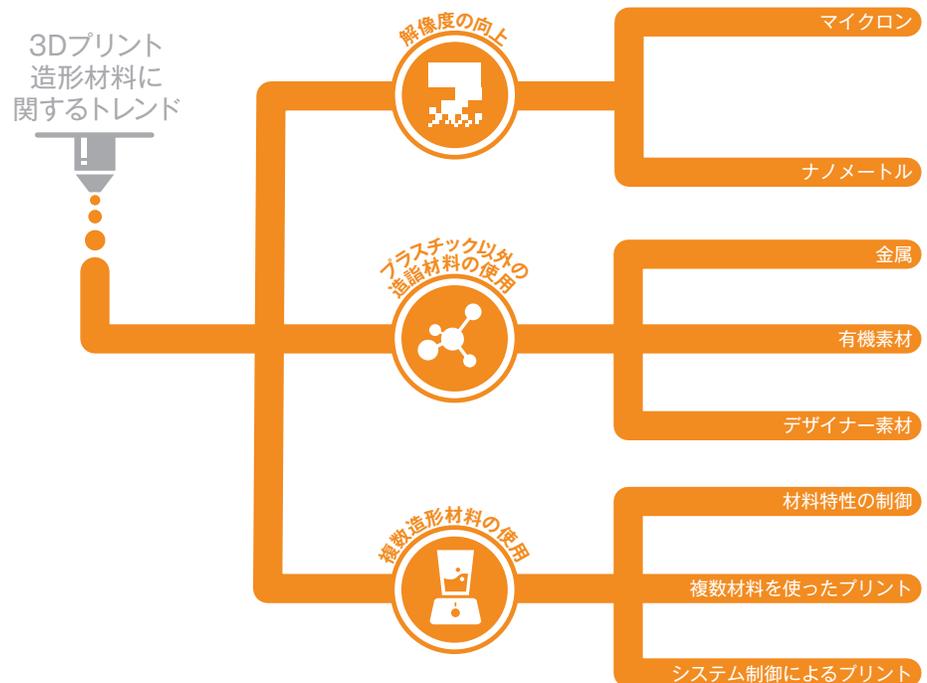
幸い、これらの領域でのイノベーションは着々と進んでいる。

材料をカスタマイズする方法が生まれ、設計プロセスに新たな側面が加わりそうである。このようなカスタマイズでは、化学的処理によって目的の機械、熱、電気、その他の特性を実現することで、新しい材料を作り出すことができる。

「3Dプリンターの未来」で述べたように、3Dプリンターによる積層造形には高い期待が寄せられている（P2参照）。その期待に応えられるかどうかは、ラピッドプロトタイピング製作から完成品の製作へと路線変更の可否にかかっている。この路線変更のためには、ハードウェアやソフトウェアの進化だけではなく、材料のイノベーションも求められる（P24参照）。3Dプリンターをさらに普及させるには、幅広い材料の選択肢と、パフォーマンスの制御と安定が不可欠である。本特集では、3Dプリンターに使用する造形材料（インク）に関する3つのトレンドについて考える（図1を参照）。

- ・ **解像度の向上**：より細かいディテールを表現するために解像度を向上
- ・ **プラスチック以外の材料の使用**：使用する材料の範囲を拡大
- ・ **複数材料の使用と特性制御**：複数の材料を使用して、独自の特性を持つ新しい配合を生み出し、完成品の製作を可能に

図1：3Dプリント業界における造形材料進化のトレンド



現在の3Dプリンターの解像度は、一般的な卓上プリンターでの100μmから、最先端プリンターでの0.1μmまでさまざまだ。

より高解像度へ

解像度とはプリント時のディテールの細かさを表し、これらは造形材料やプリント方法と関係している。3Dプリントの単位は、1,000分の1mmに相当するマイクロメートルである（国際単位はマイクロメートル、μm）。現在の3Dプリンターの解像度は、一般的な卓上プリンターでの100μmから、最先端プリンターでの0.1μmまでさまざまである。

身近なところでは、事務用紙の厚さがおよそ100μmである。100μmの解像度を持つ製作物は、100μmの材料の層が重なってできている。そのため、高さが100μm未満の造形は作れず、作る場合の高さは100μmの倍数でなければならない。解像度が100μmの製作物には上質な合板のような積層の質感がある。そこから仕上げを行うか仕上げを施さずにその質感を生かすかどうかは、用途によって異なる。

解像度が50μm未満になると、積層の質感は感じられず、射出成形法で作ったものと区別がつかなくなる。ほとんどの3Dプリントプロセスでは、各層のサイズはプリントヘッドから押し出される液滴のサイズの制限を受ける。

「外科医が手術室で使用するのに十分な本物らしさをもった解剖模型を作るには16μmは必要だということがわかっています。ただし、16μmで将来にわたって十分だとは言いきれませんが」と、ProofXのCEO、Dima Elissa氏は述べている。

マイクロメートルよりさらに小さいのがナノだ。1ナノメートル（nm）は1,000分の1マイクロメートルに相当する。nmは現時点では研究所で扱われる最先端の世界だ。「プリントに使用した最も小さいノズルは直径500nmという極小サイズです。後処理で作った最小の造形は200nmでした」と、ローレンス・リバモア国立研究所の材料科学者、Eric Duoss博士は語る。

これらの造形は細菌ほどのサイズだ（図2を参照）。その先にはさらに小さな粒子の世界がある。極小世界のサイズに対応するようになれば、製作が根底から変わる可能性がある。卓上SLA（光造形法）プリンターのOWL Nanoでは、すでに0.1μm（100nm）の解像度を実現している¹。

図2：3Dプリント材料に求められるサイズの対数図表



出典：PwC, 2014

mm = ミリメートル μm = マイクロメートル nm = ナノメートル

¹ Cabe Atwell, "Stereolithography down to 1/10 of a micron—Old World Laboratories' Nano 3D printer," SolidSmack, September 2, 2014, <http://www.solidsmack.com/fabrication/stereolithography-110-micron-old-world-laboratories-nano-3d-printer/>, viewed October 30, 2014.

プラスチック以外の材料の使用

現在、3Dプリントで主に使用されている材料は、熱溶解積層法（FFF）プリンターで使用される熱可塑性物質と、光造形法（SLA）プリンターで使用され特定の光の波長で硬化する性質を持つホトポリマー樹脂である。いずれも前述の解像度の課題を乗り越えて発展している。

熱可塑性物質の利点は、加熱により軟化し、室温で硬化する点だ。主なものとして、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン（ABS）とポリ乳酸（PLA）がある。ABSは、おもちゃの積み木から緩衝ヘルメットまでさまざまな製品に広く使用されている構造用プラスチックだ。PLAは有機物からできており、堆肥可能で人体内での生物分解性を持っているため、移植に使用できる。

ABSの欠点は、冷えた場合に縮みや歪みが生じやすいところだ。そのため、製作を成功させるには高温の造形チャンバーが必要とされ、その分のコストとプロセスの複雑さが上積みされる。PLAの方が製作は簡単だが、製作物がもろい傾向がある。このような背景から、業界では、抗張力と衝撃強度が高く、歪みのない熱可塑性物質が求められている。

熱可塑性物質の使用には多くの課題が伴うが、幅広い実験の機会も生まれる。「化学的処理によって最終製作物の強度を上げることは十分に可能です。物理特性は化学的処理によって操作できます」と、MadeSolidのCEOとして3Dプリンターの先進材料開発に取り組む Lance Pickens氏は述べている。同社はABSと同等の強度と、PLAのような使いやすさを兼ね備えたPET+という材料を作り出した。

「複合流体とFFFへの応用の可能性についても研究が進んでいます。複合流体は粒子と懸濁媒体が混ざったもので、多くの場合は粘弾性を持っています。つまり、標準条件では個体のようにふるまい、剪断時には液体のように振る舞います」とDuoss博士は説明する。ポリマー塗料を例にとるとわかりやすい。ブラシで塗れば広がるが、そうでなければ壁に密着して固まる²。それと同様に、ノズルから押し出された複合流体は固まり、室温で形状を維持する。このような進歩により、FFFでは現在の限られた熱可塑性物質ではなく多くの材料を使用できるようになる。

やがて低価格の不活性セラミック圧電プリントヘッドが登場すれば、熱を使わずに液体を堆積させることが可能になり、FFFプリンターで使用する材料の幅が広がるだろう、とPickens氏は述べている。現時点では、このようなプリントヘッドは約1,500米ドルするため、業界では粘度も沸点の範囲が限られた材料しか使用できない低価格のサーマルプリントヘッドばかりに使用されている。

近い将来、FFF方式でもSLA方式でも、フルカラーで写真のようにリアルなモデルを製作できるようになる可能性がある。OVEは紫外線で硬化するカラーインクを開発し、FFFおよびSLAプロセスで使用できるようにした。3Dプリントの各層に色の2Dプリント層が重なり、インクジェットプリントのように幅広い色を使用できる³。

「SLAプロセスの中で時間がかかるのは、除去と重ね塗りの部分です。SLAプリントに使用する樹脂は、製作スピードに合わせて最適化され、部品から素早く取り除けるようになるでしょう」と、3Dベンダー FSL3Dの主任技術者、Andrew Boggeri氏は語る（P12参照）。「この（除去と重ね塗りの）部分のスピードを2倍、あるいは3倍に引き上げても、品質は維持できます」

「化学的処理によって最終製作物の強度を上げることは十分に可能です。物理特性は化学的処理によって操作できます」

— MadeSolid,
Lance Pickens氏

2 "Shear thinning." Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Shear_thinning, viewed October 30, 2014.

3 Eddie Krassenstein, "First Full Color Consumer Level Stereolithography & FDM 3D Printers Coming Soon From OVE," 3DPrint.com, July 17, 2014, <http://3dprint.com/9493/ove-full-color-3d-printers/>, viewed October 30, 2014.

カギを握っているのはナノテクノロジーかもしれない。金属粒子の溶融温度は、粒子サイズが50nmより小さくなると急低下するからである。

金属を使った製作

近い将来、3Dプリントでの金属の使用が大きく進むことが期待されている。現在、金属を使った製作は主に選択的レーザー焼結法(SLS)で行われている。産業界では、高コストだが高出力レーザーを備えた大型機械が圧倒的に有利である。しかし、新たな材料とナノスケールで動作するプリンターヘッドを使用すれば、卓上FFFプリンターで金属を使った製作が可能になる日は近い。

カギを握っているのはナノテクノロジーかもしれない。金属粒子の溶融温度は、粒子サイズが50nmより小さくなると急低下するからである。このサイズはたばこの煙粒子やウイルスと同スケールの世界である(図2を参照)。

例えば、銅の溶融温度は通常、1,000°C (1,832°F) である。ところが20nmの銅粒子になると、台所のオーブンでも可能な280°C (536°F) で溶融する。このようにほとんど知られていない物理特性により、卓上3Dプリンターで金属を使った製作の可能性が見えてくる。

Pickens氏はそれぞれに固有の温度で「鋼鉄などの金属合金を扱える」と考えている。「必要なのはエネルギーだけです。ナノテクノロジーは3Dプリント材料の未来であり、3Dプリントを家内産業から製造テクノロジーへと変貌させるでしょう。どのような新製品が誕生するか予想もつきません」

ナノテクノロジーが普及するに、妥当な価格、等級、一貫したサイズの金属ナノ粒子が産業規模で提供されるようになる必要がある。そのような粒子は自然資源としては存在しない。フィルムやコーティングのプロセスを発展させるか、あるいはまったく新しい独自のプロセスを導入するか？ 産業規模の製造プロセスが模索されている。

工場で金属を使用する3Dプリンターでは、ナノ粒子は最も重要なものではない。産業界では、金属部品の作製の最初の手順に必要なものとして高温装置がすでに一般化しているからである。支持構造の除去や表面仕上げといった後続手順では、工場の機械での熱処理が必要となる。

「一般的に、金属の使用は(融点の低い)アルミニウムから真鍮まで徐々に広まっていくでしょう。高張力鋼を使用するようになるのはまだずっと先の話です」と、ジョージ・ワシントン大学のDavid Alan Grier教授(コンピュータ科学)は語る。

有機物質、その他の材料

生体組織から移植に使用する身体の一部を製作できることはすでに実証されている。患者の体から組織を採取し、その組織を使って必要な部位を作ることが可能である。このような方法は、やけどをした場合の植皮⁴や骨置換⁵に使用される。

この技術をさらに発展させ、血管を組み込んだ生体組織の設計と生成を行う。ハーバード大学では、Jennifer A. Lewis教授の監督下、血管を備えた生体組織を生成できるバイオインクが開発されてきた。複数のプリントヘッドを使用して、細胞間基質と生体抗生物質を作る。別のプリントヘッドでは加熱ではなく冷却で溶ける材料を使用する。フィラメントを網状にした組織にした後、材料を冷やして溶融させて除去すると、空洞の管が血管になる⁶。こうして、35µmの血管が形成される。

4 "Printing Skin Cells on Burn Wounds," Wake Forest School of Medicine, <http://www.wakehealth.edu/Research/WFIRM/Research/Military-Applications/Printing-Skin-Cells-On-Burn-Wounds.htm>, viewed October 30, 2014.

5 Dan Thomas, "Using 3D-Bioprinting for Artificial Bones," ENGINEERING.com, July 24, 2014, <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/8134/Using-3D-Bioprinting-for-Artificial-Bones.aspx>, viewed October 30, 2014.

6 Susan Young Rojahn, "Artificial Organs May Finally Get a Blood Supply," MIT Technology Review, March 6, 2014, <http://www.technologyreview.com/news/525161/artificial-organs-may-finally-get-a-blood-supply/>, viewed October 30, 2014.

ProofXのElissa氏は、このような開発活動は個別化医療や精密医療に向かうトレンドによるものだと指摘している。生体抗生物質はさておき、手術室で使用するものは加圧滅菌器や乾熱滅菌に真に耐えるものである必要がある。求められているのは、創傷包帯に使う普通の綿のような繊維を使ってプリントできる機械である。

「マイクロ構造設計により、これまでは不可能だった特性を持つ材料を生み出しています」

— Eric Duoss博士、
ローレンス・リバモア
国立研究所

3DプリンターベンダーのMarkForgedからは、炭素繊維を使って耐衝撃性部品を製作できる機械がすでに発表されている⁷。

複数材料を使った完成品の製作

現時点では3Dプリンターは、完成品ではなく完成品に組み込む部品の作製に使用されている。例えば、ギアボックスに取り付ける個々のギアや、化学物質の容器となるバッテリー用シリンダーなどである。3Dプリントの至高の目標は、ガスケットなど全てを含む完全なギアボックスや、必要な化学物質を内包しすぐに使える状態のバッテリーそのもののような、完成品を製作することである。これを実現するには、複数の材料、特に金属とプラスチックを扱えるプリンターが必要であることは明らかである。

1台のプリンターで金属とプラスチックを組み合わせて使用することは、融点が異なるため困難を伴う。しかし、この課題解決に向けて新たな方法が研究されている。「最初の工程で構造を作り、2番目の工程で機能を追加し、3番目の工程でさらに機能を追加するという手順を実施し、とてもうまくいきました」と、ローレンス・リバモア国立研究所のDuoss博士は語っている。

Duoss博士は、既存の3D構造に材料を追加するこの複数工程を「決定論的堆積」と呼んでいる。要求される技術は、通常のプリントよりも高度だ。各ステップで異なる材料を使用することで、材料を混ぜ、特定の材料を別の材料に埋め込むことができる。

卓上での合金とマイクロ構造

マイクロン、あるいはナノスケールで材料を扱う3Dプリンターでは、各種材料を組み合わせ、カスタマイズされた物理特性を持つモノを製作できる。設計者は材料を組み合わせ、靱性、弾性、伝導性、その他の特性を必要などところに追加できる。内部に空洞を設ければ、軽量化も可能となる。

この研究はローレンス・リバモア国立研究所などが行っており、設計者は材料と空洞の組み合わせによって熱膨張などの特性の係数を調整している。「マイクロ構造設計により、これまでは不可能だった特性を持つ材料を生み出しています」と、Duoss博士は述べている。このプロセスには、特性に基づいて材料を選択するためのアッシュビーチャートが不可欠だ。ケンブリッジ大学のMichael Ashby教授の名をとったこのチャートを使用して、強度と密度、強度とコスト、抵抗力とコストなどの特性に従って幅広い材料を比較する（P48図3を参照）。未来の製作システムにはアッシュビーチャートのデータが組み込まれ、材料特性の決定が形状の決定と同じくらい設計プロセスに不可欠なものになる可能性がある。

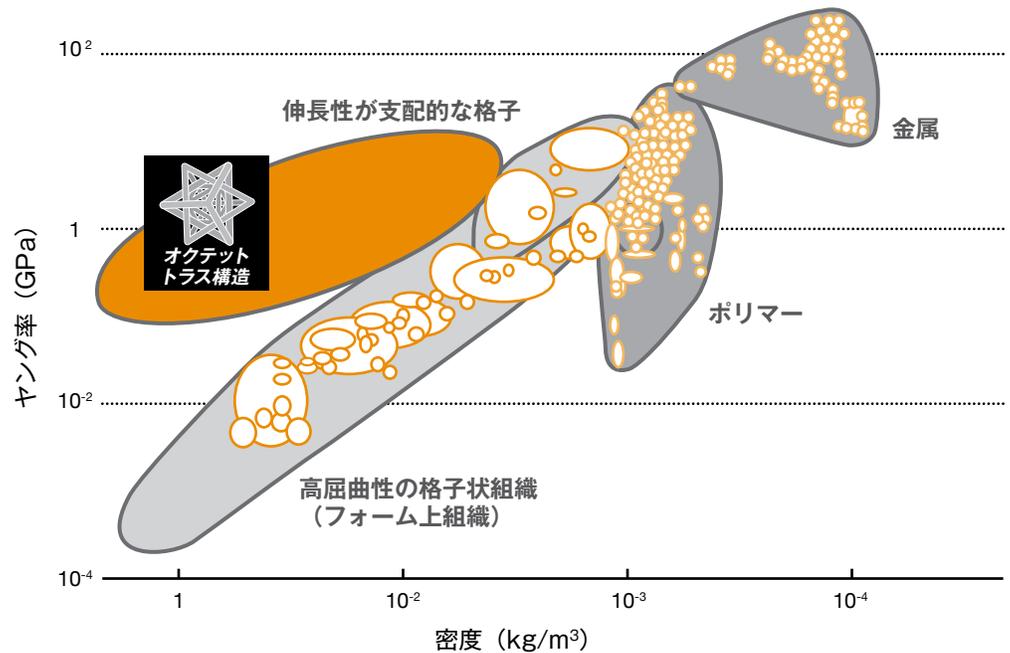
さらに、製作物のどこにどの材料を使用すべきかをシステムが自動で判断し、使い分けをするようになるかもしれない。しかし、サプライヤによって特性が保証された材料を使用する場合と、システムが計算し、その場で組み合わせた成分の特性に依存することには、根本的な違いがある。

「3Dプリンターから製作物を取り出したときに、期待どおりの品質が確保されなければなりません。そうでなければ、商用への訴求力は限られます」と、Grier氏は注意を促している。

⁷ Alexandra Chang, "New 3D Printer by MarkForged Can Print With Carbon Fiber," *Popular Mechanics*, January 27, 2014, <http://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/news/new-3d-printer-by-markforged-can-print-with-carbon-fiber-16428727>, viewed October 30, 2014.

図3：製作物の物理特性をカスタマイズするための比較情報を示すアッシュビーチャートの例

高伸長性の格子状組織をあらわすオレンジの楕円形の領域は、マイクロ構造設計で開発された材料に、これまでアッシュビー材料選択チャートに含まれていなかった領域が含まれていることを示しており、材料が持ち得る新たな特性を意味している。



出典：Adapted from Lawrence Livermore National Laboratory

標準化と経済性

現時点では、異なる機械で製作されても、同じ部品が同じ特性や寸法を持つことを保証する標準は存在しない。このことは、試作から完成品の製作への移行を阻む大きな課題となる。そこで標準化に向け非営利団体EWI (旧 Edison Welding Institute) が運営するAdditive Manufacturing Consortiumが乗り出そうとしている⁸。

Grier氏が指摘しているように、一つ確実に言えるのは、3Dプリントの導入に最も真剣に取り組む業界が必要とする材料が一般的になるということである。おそらく3Dプリントに

よってコストの問題を解決できる業界が本腰を入れてくるだろう。例えば、高コストであっても特殊な交換用部品の在庫を確保しておき、急ぎ必要になった場合は遠隔地に即時納品しなければならないというような事情が背景にある業界において推進されると考えられる。

「航空会社、トラック会社、空調設備ベンダー、医療機器メーカーは、必要な部品を現地で急ぎ製作できるようになります。全ては状況に合わせた経済的合理性から生まれます。ただ流行っているからという理由では何も生み出されないでしょう」とGrier氏は述べている。

8 For more information, see Additive Manufacturing Consortium, <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/>, viewed October 30, 2014.

変化のペース

3Dプリントの最初の方式である光造形法が発明されたのは1984年である。それ以来、コンピューターチップのトランジスタ数は2年ごとに倍増するというムーアの法則に従って、コンピューターの処理能力は3万倍以上に向上してきている。そして今、世の中は様変わりし、数百万人の人々がデジタル化されたオンラインのライフスタイルを追求するようになってきた。

しかし、コンピューターで操作されるのはほぼ質量のない電子である。物体の機能性には、ムーアの法則のような指数関数的な増加は起こり得ない。それゆえに3Dプリントの世界では、終わることのない材料の実験が続いている。完璧な材料を実現する解決策は存在しない。結果を高精度で計算するだけである。銅合金の一種である青銅が発明されたのは少なくとも6,500年前だが、新しい銅合金の開発は今なお続いていく。

問題は、3Dプリント材料に取り組む人材の数とリソースが解決策を期待できるだけの十分な量に達したかどうかだが、その答えは肯定的なようである。解像度は細菌レベルに達し、日常的に使用できる材料は金属や生体組織、各種プラスチックなどにまで広がっていく。部品ではなく完成品の製作が可能になる。製作物の形状だけではなく物理特性を操作することもできるようになる。規格や標準が定まり、商業的に成り立つようになるだろう。

これらの機能を備えた3Dプリンターが手頃な価格で普及するのは確実だ。わからないのは、それがいつ起こるかということだけである。

新たな特性を持つ材料の開発

材料科学の進化による選択肢の拡大
——ローレンス・リバモア国立研究所の
Eric Duoss博士に聞く

聞き手：Vinod Baya



Eric Duoss博士

ローレンス・リバモア国立研究所
材料科学者および技術者
先進材料および製作を研究

PwC：どのような研究をなさっているのでしょうか？

Duoss博士：新しい材料や、積層造形の新しい方式の開発に重点を置いて研究を行っています。一般的な方法では作れない小さい、マイクロスケール、ナノスケールのフィーチャーを製作できる新しい3Dプリントプロセスを生み出そうとしています。この新しいプロセスでは、1つの部品に複数の材料を使用できます。また、積層造形では複雑な形状を作ることができるため、マイクロ構造を設計することで、密度、剛性、強度、熱膨張などの材料特性を調整、制御できます。マイクロ構造設計により、これまでは不可能だった特性を持つ材料を生み出しています。

PwC：研究対象は材料のみですか？

それとも、プリントプロセスについても研究されているのでしょうか？

Duoss博士：両方です。2つの間で共通しているものが材料科学です。目指しているのは、構造、プロセス、特性、パフォーマンスの関係を明らかにすることです。つまり、材料、プリントプロセス、後処理がどのように作用して最終的な部品特性とパフォーマンスに影響しているのかを理解することです。そのため実験とシミュレーションを重ねています。

PwC：材料特性をどのようにして制御するのですか？

Duoss博士：構造設計の場合、マイクロスケールまたはナノスケールで材料の配列を変えて制御します。例えば、剛性と強度が非常に高く、かつ軽量のマイクロ構造のプリントに成功しています。

「後処理で作った最も細かいフィーチャーは200nm以下を立証しました」

また、熱膨張係数（CTE）とヤング率を計算した構造も設計したことがあります。そのためには、まったく異なる材料を、隙間を空けて同じユニットセルに正確に配置します。ユニットセルを構成して、計算されたCTEを持つ格子にします。CTE値にはゼロも含めて正の値から負の値まであります。CTEが負の値である場合、加熱によって縮みます。構造化材料については、積層造形以外の方法では製作が困難または不可能という点が共通の課題になっています。

PwC：解像度はどうなっていますか？

Duoss博士：プリントの解像度は個々のプロセスによって異なります。DIW（Direct Ink Writing）というプロセスでは、押出方式で直径が非常に小さいノズルを使用します。ノズルのサイズによって最終的なフィーチャーのサイズが決まります。プリントに使用した最も小さいノズルは直径500nmという極小サイズです。後処理で作った最も細かいフィーチャーは200nm以下を立証しました。ふだん製作するフィーチャーのサイズは1 μ m～500 μ mが多いです。ただし、一般的に、解像度が向上すれば製作時間が長くなります。

PwC：3Dプリント全体において、ご自身の研究はどのように位置づけられますか？

Duoss博士：これまでの3Dプリント（積層造形）では、ハードウェア設計者と機械技術者がプリンターとプロセスの開発に取り組んできました。これからは材料にも注目が集まるでしょう。3Dプリントプロセスの性能が向上し、複雑な形状も製作できるようになったことは、設計者にとって好ましいことです。ただし、既存の3Dプリントプロセスでは希望する材料を使用できない、または特性を実現できない点は引き続き課題となっています。私

たちは主にそのような課題を解決するために研究を行っています。既存プロセス、また新しいプロセスでは、どのような新しい材料を使用できるかを考え、新旧のプリントプロセスに合った材料の開発に取り組んでいます。

社内の3Dプリントプロセス用に開発する新しい材料は年間で10種類～20種類です。この研究開発は初期段階であり、商用化するとは限りません。ローレンス・リバモア国立研究所では、製作用の新材料の認定や証明の方法も研究しています。

PwC：既存プロセス向けの新しい材料の例を挙げていただけますか？

Duoss博士：DIW向けに、新しいエラストマー材料の開発に取り組んでいます。弾力がある伸縮自在の材料です。この方式は桌上3Dプリンターで一般的に採用されている熱溶融積層法（FDM）に近いのですが、加熱ノズルを使いません。いずれも押出機を備えています。FDMの材料は熱可塑性プラスチックです。加熱されたプラスチックは溶融し、流動体となります。この流動体をノズルから押し出すと、冷却されて硬化します。

DIW向けには、インクと呼ばれる複合流体を設計しています。こちらは室温で押し出し可能です。複合流体は粒子と懸濁媒体が混ざったもので、多くの場合は粘弾性を持っています。つまり、標準条件では個体のようにふるまい、剪断時には液体のようにふるまうように変化します。

DIWでは、ノズルからインクが出るときに剪断減粘が起こるようになっていきます。つまり、剪断時に粘弾性（流体の流れづらさ）が低下します。

「将来は（モデルによる）予測が可能になり、部品の設計段階で（材料の）パフォーマンス特性を分析して調整できるようになるとよいと思っています」

ノズルから出た流体は基本的に半固体か固体となり、室温でも形状を保ちます。これまでのFDMでは一部の熱可塑性プラスチックしか使えませんでした。この進歩によって今後は押出方式にさまざまな可能性が生まれます。開発中のエラストマー材料を含め、材料の幅が大きく広がります。特定の流動特性（レオロジー特性）を持つ複合流体を開発することがイノベーションになります。

PwC：流体やマイクロ構造などに関する知見についてお話しいただきましたが、データの収集、分析、共有はどのように行うのでしょうか？

Duoss博士：LLNLでは、プリント中の材料の挙動を複数の異なる長さおよび時間スケールで調べる先進モデルを開発しています。例えば、LLNLの研究者であるWayne Kingは、金属ベースの積層造形におけるレーザー溶融プロセスのモデル化に取り組んでいます。このモデルで、レーザーが材料に及ぼす作用、プリントプロセス中の温度勾配、溶融プロセス中のマイクロ構造の変化、急速加熱または冷却による残留応力などを分析します。

このモデルを完成品に応用すれば、これらのプロセス条件が完全品全体のパフォーマンスにどのように影響するかがわかります。LLNLの高性能コンピューターでマルチスケールモデルを使用すれば、積層造形プロセスのデータ収集、分析、共有を効果的に行うことができます。

PwC：そのモデルを使用すれば、最終製作物の特性を予測できるのですか？

Duoss博士：このモデルはまだ初期段階です。将来は（モデルによる）予測が可能になり、部品の設計段階で（材料の）パフォーマンス特性を分析して調整できるようになるとよいと思っています。また、このモデルによって最終製作物の認定や証明の動きが加速することも願っています。このようなモデルに大いに関心が集まっているのもそのためです。私が出席した多くの業界イベントでは、積層造形プラットフォームのメーカーからもエンドユーザーからも、モデルの進化と精緻化が望まれていました。一般的に、そのような進化と精緻化を実現するには、LLNLにあるような高性能コンピューターが不可欠です。

また、積層造形には層を重ねるという特徴があります。その場（リアルタイム）の特性評価により、製作プロセスの各ステップでデータを取得できる可能性があります。これはビッグデータに関する問題であり、取得した全データをできればリアルタイムで分析する方法が必要です。例えば、私たちは製作中に金属の特性評価を行う方法を考案しようとしています。十分な精度で迅速に対応できれば、製作時に不具合が発生した場合、途中で破棄するか、可能であれば戻って不具合を修正できます。もちろん、取得したデータを使ってモデルの精緻化および検証を行い、予測の精度を高める方法も模索しています。

PwC:完全に機能する完成品の製作はどのように実現するのでしょうか?

Duoss博士:完成品を製作するには、複数の材料を使用する必要があります。最初のプロセスで構造を作り、2番目のプロセスで機能を追加し、3番目のプロセスでさらに機能を追加するという手順はとてもうまくいきました。基本的に1つの製作サイクルには複数のステップがあります。このようなマルチステップのプロセスを「決定論的堆積」と呼んでいます。

決定論的堆積は従来の3Dプリント方式とは少し異なり、既存の3D構造の上に材料を重ねます。一般的な3Dプリント技術では、平坦基板から層を重ねていきます。3D構造に材料を堆積させるには、かなり高度な技術、精度、参照が必要です。

3D形状に3Dプリントで製作するのは非常に斬新な試みです。顧客やエンドユーザーからは、「既存の大型デバイスに追加するにはどうすればよいか」という質問が押し寄せるでしょう。多くの場合、デバイスはまっすぐな単純な形ではなく、曲線型で複雑な形をしています。複数のプロセスを結合する前に、この問題を解決する必要があります。

これは、かつてアンテナや無線デバイスの構築で採ったのと同じ手法です。また、金属材料、バッテリー、電極、レジスタなどにも取り組んでいます。最終的には完全に機能するスマートな能動装置を製作できるように、必要なツールセットを準備しています。

PwC:製作に複数の材料を使用することについて、どのようなことがわかっていますか? 将来はどのような可能性があるのでしょうか?

Duoss博士:有機物のように、同じ種類の材料を扱うのであれば、比較的簡単です。硬質プラスチックと軟質プラスチックを組み合わせることで使用できるプリンターはすでに存在します。しかし、プラスチックと金属というように種類の異なる材料を組み合わせる場合は難しくなります。

私たちはマイクロレベルおよびナノレベルで得たこれまでの知見を生かし、同じ部品に複数の材料を使用できるマイクロ流体コントロールシステムを開発しました。使用するツールは同じですが、1つの材料をチャンバーに流し込み、イメージを撮影し（感光性樹脂の場合）、選択した場所で硬化して、材料を取り除きます。その後、次の材料を流し込みます。これらの層はごく薄く、マイクロスケールです。さらに、硬化方法によっては、材料間の勾配を滑らかにすることもできます。

このような制御が可能なのは、感光性樹脂を知り尽くしているからこそです。樹脂が光にどのように反応するか、また硬化プロファイルや反応速度論、深さ、光の吸収などを把握しています。私たちの持つプロセスモデルは、製作プロセスを加速できるだけでなく、樹脂そのものを動かし変化させる方法を理解するのに役立っています。

ただし、複数材料を使った3Dプリントを完全に実現し、プラスチック、金属、セラミックを組み合わせた部品を1つのプロセスで作れるようになるには、さらなる研究開発が必要です。将来は、センサーや電子部品、構造要素などを含むさまざまな能動装置を3Dプリンターで製作できるようになるでしょう。

「3Dプリントの発想力」を伸ばす

Bo Parker



3Dプリントにより、設計、製造、使用、修理にわたる内外のバリューチェーンが時間とともに徐々に変化していく可能性がある。競争優位性を維持するにはどうすればよいのだろうか？

これは「3Dプリントの未来」に関する4番目の特集である。最初の特集ではプリンター内部の新技术に着目し、2番目の特集では3Dプリンター用ソフトウェアのイノベーションを、3番目の特集では3Dプリンターの成長につながる材料の進化をテーマとして取り上げた。ここでは、3Dプリンターを活用した競争優位性の獲得について考える。

妊娠12週間ほどの胎児の姿。私たちの多くは、超音波画像によってわが子の姿を垣間見る。画像品質はここ数年で格段に向上した。昔と比べてそのことに気づく人もいるだろう。将来は3Dプリントで体の内部も可視化できるようになるであろう。画像はさらに鮮明になり、低コスト化も進む。

GEは他社に先駆けて、超音波検査に3Dプリンターを使用した。当初は医療目的だったが、現在は航空機のメンテナンス、石油抽出、発電など、安全や性能を重視するさまざまな業界における非破壊検査へと用途を広げている¹。GEの動向は、PwCが実施した3Dプリント調査の結果と一致している。3Dプリントはインターネットと同様の汎用技術であり、現在の製品やサービスのさまざまな面を変えるとともに、未来にも大きく影響を及ぼす可能性を持っている。

3Dプリントは、設計、製造、使用、修理という内外のバリューチェーンを根底から変える力を秘めている。本レポートの特集では、産業界で進む3Dプリントに関連して、プリンター²、ソフトウェア³、材料⁴の進化を取り上げた。ここではその締めくくりとして、企業が3Dプリントを競争優位性へとつなげるにはどうすればよいのかを探る。

3Dプリントとインターネット：新奇なものへの好奇心

インターネットは製品やその他の情報を広めるためのチャンネルとして始まった。今では、顧客との関係、サービス提供、効率性、機敏性に関するデジタル変革の中核として、ビジネスに不可欠なものとなっている。初期にインターネットへの対応を怠った企業の多くはすでに姿を消したか、競争にあえいでいる。

それと同じことが3Dプリントでも起こる可能性がある。現在、大半の企業は3Dプリンターをプロトタイピングのための製造技術と見ているが、完成品の製作が可能になり、内外のバリューチェーンに変化が起これば、その影響は数十年単位の長期に及ぶ。いずれは3Dプリントによってビジネスが一変するだろう。デジタルに限った話ではない。「3Dプリントは、デジタルとアナログが真の意味で出会う分野の一つです」。これはGEグローバルリサーチセンターで製造および材料技術を担当するグローバル技術ディレクター、Christine M. Furstoss氏の言葉だ。

現在はまだ初期段階であり、3Dプリントを導入して自社製品や運用に組み込んでいく道筋はまだ明らかではないかもしれない。企業での3Dプリントの応用方法は、業種や製品ポートフォリオ、サプライチェーン、ビジネスモデルなどによって異なる。3Dプリントをビジネスに生かすには、試行錯誤が必要だ。単にプリンターを購入すれば済む話ではない。さまざまな発見、実験、経験を通じて、時間をかけて3Dプリント戦略を練っていくことになる。3Dプリントを導入した企業には、今すぐにも戦略策定に着手することをお勧めする。

最初に取り掛かるべきこと

着手にあたっては、GEが超音波センサーで得た経験が参考になるだろう。

- ・製作が困難または高コストだが、重要な部品を特定する。GEの超音波センサーは、セラミックデバイスの多数の小型チャンバーを使用して音波を作り出し、感知する。従来の製造では、材料を数百万に細かく切断するためダイシングに頼っていた。時間がかかり、スライシングプロセスでの失敗はある程度避けられなかった。そこで、より信頼性が高く低コストな方法として、3Dプリンターが真っ先に検討された。

1 "Three-dimensional printing: An image of the future," *The Economist*, May 19, 2011, <http://www.economist.com/node/18710080>, accessed November 18, 2014.

2 「3Dプリンターの未来」(P2参照)

3 「ソフトウェアイノベーション：3Dプリント体験を手軽に」(P24参照)

4 「3Dプリント革命における造形材料の役割」(P42参照)

「3Dプリントは、自社の製品だけではなく設計プロセス全体について新しい考え方ももたらします」

– GE, Christine Furstoss氏

- 3Dプリントを使って部品の性能を向上する。従来の方法で細かい切断を行っているのは、センサーに直線型の形状しか使用できない。3Dプリンターを使用することで、スライシングから離れて新しい方法を試みる事が可能になった。GEの経験から、3Dプリンターを使って複雑で無作為な形状にした方が高解像度の画像が得られることがわかっている。
- 高性能部品を応用できる他の業界を探す。3Dプリントによって高周波での音響処理が可能になり、医療で求められる以上の高解像度を実現できることがわかった。こうして、高解像度の非破壊型検査が新たな用途として見出された。

GEは、ジェットエンジンの燃料ノズル、エンジンブラケット、タービン翼にも3Dプリントを応用した。活用の場は製造だけではない。「3Dプリントは、自社の製品だけではなく設計プロセス全体について新しい見方をもたらします」とFurstoss氏は語っている。

試作品から完成品へ

現在の3Dプリントの主な用途は試作（プロトタイピング）だ。重要ではあるが、競争力にはつながらない。3Dプリント市場が加速するのは、試作品ではなく完成品を製作するようになってからだろう。「当社は単に検証のための試作を目的として3Dプリントを行っているではありません。試作だけではなく、完成品も作っています」とFurstoss氏は述べている。

今のところ、3Dプリンターで完成品を作っている企業はまだほとんど存在しない。GEはジェットエンジンの燃料ノズル⁵を、Invisalignは年に数百万のカスタム歯列矯正具⁶を3Dプリントで製造している。ボーイング787ドリームライナーでは、30以上の部品が3Dプリントで

作られている⁷。LockheedはNASAの衛星に3Dプリントで製作した完成品を組み込むようになった⁸。いずれの企業も限られた3Dプリント機能をいち早く活用することに成功している。

PwCが行った3Dプリントに関する調査では、現在のプリンター、関連ソフトウェア、材料の限界と、3Dプリントエコシステムで進む開発活動に注目している。次に要点をまとめる。

プリンター

現在、3Dプリンターおよびサービス市場は二極化している。ローエンドは機能がホビー用に限定されており、ハイエンドは高価で購入者が乏しい。さまざまなプリンターがあるが、パフォーマンスの制限がある。例えば、製作スピード、スピードがスループットに及ぼす影響、複数材料の使用の可否、小型コンピューターやセンサーなどの完成品の製作の可否などである。

このような制限への対応については、本PwC *Technology Forecast*の「3Dプリンターの未来」の項目で取り上げたとおりである。ハイエンドプリンターの価格は下落し、サービス会社は乱立している。市場の拡大には、パフォーマンスの向上、複数材料への対応、完成品の製作を実現する中価格帯プリンターの開発を続けることが不可欠である。

ソフトウェア

ソフトウェアは3D製作物の調達や設計を自作するために不可欠である。設計者とユーザーのインターフェースとして、またプリント用ファイルの受け渡しにも役立つ。ソフトウェアイノベーションの余地は大きい。最も重要なのは、3Dプリント技術の体験を単純化できるようにし、それゆえに広く手軽にすることである。

5 "Fit to Print: New Plant Will Assemble World's First Passenger Jet Engine With 3D Printed Fuel Nozzles, Next-Gen Materials," *GE Reports*, June 23, 2014, <http://www.gereports.com/post/80701924024/fit-to-print>, accessed November 18, 2014.

6 Drevno, "How 3D Printing is Creating Unique Products," *Inside3DP*, September 3, 2014, <http://www.inside3dp.com/3d-printing-creating-unique-products/>, accessed November 18, 2014.

7 Shanie Phillips, "Boeing's 3D Printed 787-9 Dreamliner Wows at Airshow," *Inside3DP*, July 24, 2014, <http://www.inside3dp.com/boeings-3d-printed-787-9-dreamliner-wows-airshow/>, accessed November 18, 2014.

8 Robert L. Mitchell, "3D printing makes its move into production," *Computerworld*, August 13, 2014, <http://www.computerworld.com/article/2490930/enterprise-applications/3d-printing-makes-its-move-into-production.html>, accessed November 18, 2014.

現在のソフトウェア機能は、プリンターの機能に応じたものである。設計上の選択肢と製作物の性能特性は限られ、使用できるのは単一材料のみと、完成品の製作にはほど遠い。PwCは、今後、材料とプリンター機能が進化すれば、ソフトウェアもすぐにその進化に対応した管理機能を備えるようになるものと予測する。それら全てが連動して、単なる試作品製作から完成品またはコンポーネントの製作へと業界の路線転換が進んであろう。

材料

物体の機能性には、ムーアの法則のような指数関数的な増加は起こり得ない。それゆえに3Dプリントの世界では、終わることのない材料の実験が続いている。完璧な解決策は存在しない。結果を高精度で計算するだけである。材料特性のため、プリント解像度には限界がある。使用できる材料はごく数種類である。3Dプリント製作物の最終的な材料特性を予測するには時期尚早である。ナノスケールの分子間相互作用を考慮すればなおさらである。問題は、プリント材料に取り組む人材の数とリソースが解決策を期待できる臨界量に達したかどうかにかき尽きる。

その答えは肯定的なようだ。PwC *Technology Forecast*でも、材料に関する重要な進展を取り上げた。解像度は細菌レベルに達し、日常的に使用できる材料は金属や生体組織、各種プラスチックなどにまで広がっていく。将来、3Dプリンターでは部品ではなく完成品の製作が可能になる。製作物の形状だけではなく物理特性を操作することもできるようになる。規格が定まり、商業的に成り立つようになるだろう。これらの機能を備えた3Dプリンターが手頃な価格で普及するのは确实だ。わからないのは、それがいつ起こるかということだけである。

3Dプリンティングを理解したか？

3Dプリントの用途は従来の月並みな用途である試作品製作にとどまらず、企業に大きな可能性をもたらす。次に要点をまとめる。

- 3Dプリンターに求められていることは、高速化と使いやすさ、複数材料への対応、能動装置の製作である。
- 3Dモデルの調達、作製、最適化、プリントが簡単になり、品質が向上する必要がある。
- 解像度の向上、材料選択幅の拡大、特性制御の手段の発展が不可欠である。

しかし、全てが完璧になるまで待つてはならない。商用のものが出回る時期まですら待つてはいけない。3Dプリントはすでに広く利用可能な技術であり、さまざまな業界の製品やサービスに応用できる。しかし、「3Dプリントの発想力」を持ち、製品の設計、製造、サービスに生かせる企業はまだ少ない。企業はこの新しい考え方をすぐにでも学び、採り入れるべきである。

なぜ今なのか？

以下に、企業が3Dプリントを検討すべき理由を挙げる。

- 3Dプリントの影響は、設計、製作、使用、修理にわたる内外のバリューチェーンにおいて、時間とともに徐々に表れる。
- 3Dプリントの手法を理解し、現在のバリューチェーンに組み込むには、時間をかけて調査と実験を行うことになる。競争優位性を維持するには、早期に着手する必要がある。
- 3Dプリントにおけるイノベーションは多方面にわたって急速に行われる。イノベーションを活用できるよう、3Dプリントの実務経験を十分に積んだ人材が必要だ。
- 3Dプリンターによってさまざまなことが可能になれば、より高度な計装およびフィードバック制御が求められるようになる。いち早く3Dプリントを導入している企業が有利な立場に立つだろう。

3Dプリントで 競争優位性を獲得

3DプリントによってGEの製造はどのように変わったか？
GEのChristine Furstoss氏に聞く

聞き手：Vinod Baya、Bo Parker



Christine M. Furstoss氏

GEグローバルリサーチセンターで、
グローバル技術ディレクターとして
製造および材料技術担当

PwC：GEではどのようなことを担当されていますか？

Furstoss氏：GEグローバルリサーチセンターで、製造および材料技術に関する組織の責任者を務めています。GE全体のサプライチェーンや技術部門のリーダーとともに、評価、成長戦略の策定、重要プロセスの導入、業界最先端の製品ののための材料開発を行うことが主な業務です。

今年から始まったイニシアチブでは、新しい材料に投資し、効率性、性能、寿命の向上に重点的に取り組んでいます。当社の会長は常日頃から、当社は材料を販売しない材料企業だと話しています。その点が他社との主な違いです。また、製造プロセスを知らずして材料を語

ることはできません。今後も新しい製造技術への投資を続け、当社が「アドバンストマニファクチャリング」と呼んでいる先進製造を進めていきます。

PwC：先進製造とはどのようなことですか？
また、3Dプリントはどのように位置付けられているのでしょうか？

Furstoss氏：先進製造は1つの特定の技術や工場方式を指すわけではありません。新しい製造技術を通じて、自社の製品や市場における地位、競争力を向上しようとする取り組みです。その中で、3Dプリント、そして材料の加工、形成、ドリルなどの新しいタイプの機械加工を活用します。

「先進製造は、製造がどのように変わり、設計から修理までのバリューチェーンにどのような影響があるかを理解するための包括的なビジョンです」

先進製造は、製造がどのように変わり、設計から修理までのバリューチェーンにどのような影響があるかを理解するための包括的なビジョンです。先進製造には4つの段階があり、3Dプリントは多くの段階に関係があります。

最初の段階はコンセプトと設計です。その多くはクラウドソーシングを通じて可能になる見込みです。先日のジェットエンジン用ブラケット設計の公開競争では、3Dプリントを活用してブラケットを大幅に軽量化できました。既存のブラケットから84%の軽量化を実現し、案件を勝ち取ることができました。このプロジェクトでわかったことは、考えてモノを作り出すことができるということ、そして世界のどこでも適切な人材が見つかるということです。これがコンセプトと設計の段階への影響です。

3Dプリンターが最も活用されるのは、次の機械加工、細工、製作の段階です。ラピッドプロトタイピング、ラピッドツーリングなどにより、切削加工などを行います。

3番目の段階は製造のデジタル化と革新です。当社では「ブリリアントファクトリー」と呼んでいます。工場をジャストインタイム方式でよりスマートにします。工場の数を増やして分散操業したり、原材料や消費の場に近づけたりといったことです。このように工場にも影響が及びます。

最後にサプライチェーンです。未来のサプライチェーンではデジタルとアナログが融合し、サプライチェーンの経済性と効率性を変えるでしょう。このような変化が、これまでにないモノの誕生につながります。

PwC：バリューチェーンの全段階が影響を受けるのなら、企業はどのように対応すればよいのでしょうか？

Furstoss氏：製造の組み立てラインの後、次の大きなパラダイムシフトは先ほど触れたブリリアントファクトリーです。リアルタイムデータを使ってリアルタイムの意思決定を現場で行い、バリューチェーンの中で閉ループフィードバックを行います。企業はこのフィードバックループを通じてバリューチェーンを管理できます。

フィードバックループは2つあります。一つは工場から製造技術部門へのフィードバックループ、もう一つは修理部門から技術部門へのフィードバックループです。多くの製品を手がける当社では、全てのメンテナンスや修理を故障影響分析と捉えています。問題の原因を突き止め、技術部門にフィードバックして設計を改善します。

組み立てデータ、使用時のデータ、修理データに基づくフィードバックがあれば、バリューチェーン全体で閉ループのフィードバックを実現でき、GEの大きな特長となります。

「当社は単に検証のための試作を目的として3Dプリントを行っているのではありません。試作だけではなく、完成品も作っています」

PwC: 御社では3Dプリントをどのような場で使用されていますか？

Furstoss氏: 当社は単に検証のための試作を目的として3Dプリントを行っているのではありません。試作だけではなく、完成品も作っています。

3Dプリントでは、部品を年単位ではなく日単位で作ったり、タービンや機関車、新しい照明器具のテストを行ったりと、これまでにない体験ばかりです。適切な材料で設計するというのも新しい発想です。技術的にまだ初期の段階で、材料に応じてプロセスの最適化を行っていないため、設計は完璧ではないでしょうが、テストを行うには十分です。例えば、製品の効率化と二酸化炭素排出量の削減のため、温度を200度上げて燃料が燃えるかどうかを調べることができます。

3Dプリントは、自社の製品だけではなく設計プロセス全体について新しい見方をもたらします。また、3Dプリントは、デジタルとアナログが真の意味で出会う分野の一つです。あるいは、分析とソフトウェアの出会いと言ってもよいでしょう。プロセスから設計へ、設計から機械へ、そして製作において、ソフトウェアが統合されるのです。

PwC: 3Dプリントを利用するにあたり、克服しなければならなかった課題はどのようなことですか？

Furstoss氏: 乗り越えるべき課題は多くありました。まず、従業員のスキル不足です。材料技術者と製造技術者がソフトウェアを習得する必要があります。先頃発表されたデジタル製造協会には当社も産業パートナーに名を連ねており、その活動を通じて習熟を図ります。

さらに、多くの企業が3Dプリントの導入に二の足を踏んでいるのは、ソフトウェアを含む制御が課題となるからです。つまり、ループ全体が閉じられていないのです。それでは、当社が提唱するブリリアントファクトリーが実現されているとは言えません。3Dプリントを産業に利用するには、ループを閉じる必要があります。2、3の部品や試作品を作るだけではなく、完全あるいは完全に近い部品を大規模に製作するためには、閉ループが不可欠なのです。

PwC: 3Dプリントによって新しい材料の開発や取り扱いが容易になりましたか？

Furstoss氏: 3Dプリントの材料については、チャンスと課題が背中合わせになっています。新しい材料を生み出し利用するチャンスがある一方で、その新しい材料をいかに新製品に生かすかが課題となります。材料特性を証明する規格や標準がないからです。鋼片の鍛造、鋳造においては、特性は既知です。一部を取って切削工具を当ててみなくても、強度はわかっています。サプライヤの証明付きなので、具体的に何をどうすればよいかはわかっているのです。

「3Dプリントを通じて、工場の現場、部品の設計、カスタマイズ、修理の活動を柔軟に理解できます。そこに積層造形の利点があります」

積層造形では、レーザー強度、堆積速度、粉末品質といったパラメータが材料特性に及ぼす影響がわからなければ、全てをテストする必要があります。たとえ作るのに72時間かかったとしても、問題が見つければ処分することになります。それでは効率的な方法とはいえません。

現在はサンプルの数を絞り、形状と特性を同時に検討します。実は、このことは大きな意味を持っています。形状と特性を検討することで大きな可能性が生まれる一方で、分子の動きを細かく把握するという重い責任も負うことになるからです。私には性能特性を満たし、信頼性の高い製品を作る責任があります。どうすれば確実にそのような製品を作ることができるか、複雑な部品を検査するにはどうすればよいかを考えています。

PwC：企業における3Dプリントへの取り組みを分析するにはどうすればよいでしょうか？従来の造形法と比較すべきですか？

Furstoss氏：現在の状況によります。製造コストだけの比較では判断を誤る可能性があります。場合によっては従来の造形法よりも3Dプリンターの方が時間もコストもかかります。しかし、競争条件が変わり、新しい市場に参入できる可能性もあります。

例えば、さまざまな部品で構成される燃料ノズルを3Dプリントで作ると、従来の造形法の5倍のコストがかかるとしましょう。

しかし、燃料ノズルの軽量化、強化、効率化により、スルーputをX%向上できるジェットエンジンを販売できる可能性が出てきます。それほど複雑な計算式ではありませんが、技術者からは疑問の声があがる可能性があります。「なぜそんなことをするんだ？従来の造形法なら2,000米ドルで済む。3Dプリントで製作した場合は10,000米ドルで、時間は2倍かかる」。しかし実は、燃料ノズルが4%軽量化されるため、製品寿命全体で考えれば10万米ドルの生産性向上につながるのです。そう考えると、計算式全体がまったく違ったものになります。

これからの先進製造の世界では、常にこのような計算が従業員の頭にあるようにするにはどうすればよいかを考えなければなりません。私たちはそこを理解し、うまく生かそうとしています。

PwC：3Dプリントは他の領域にどのように影響しますか？

Furstoss氏：積層造形法では、従来より短時間で新しい設計や新しい材料を柔軟に探ることができます。時間をかけて検討しなくても、すぐにプリントしてみればよいのです。ただ、3Dプリンターを活用するには、高度な分析力が必要です。当社では、プロセス側での柔軟性を高めるため、機械をより緻密に制御する方法を探っているところです。

私は3Dプリントが研究に多大な影響を与えると考えています。3Dプリンターはデータの重要性を示す製作ツールであるだけでなく、また、既存の環境を変えずに、複数の材料をすばやく操作して組み合わせることができる研究ツールでもあります。現在、種類の異なる鉄鋼を溶融させるには、全ての工具を入れ替えなければなりません。そうしないと、実験によって全てが汚染されるからです。積層技術を材料調査および研究ツールとして使用できる可能性が出てきたのはごく最近のことです。

3Dプリンターの各種機能により、他の造形法での基準も上がります。これまでに述べた閉フィードバックループ、統合、所要時間の短縮などの全てが3Dプリンターによって実現可能であることが明らかになります。すると、全ての機械、全ての加工、全ての材料に、そのような機能が求められるようになります。全てが学習の機会であり、成長の機会でもあります。

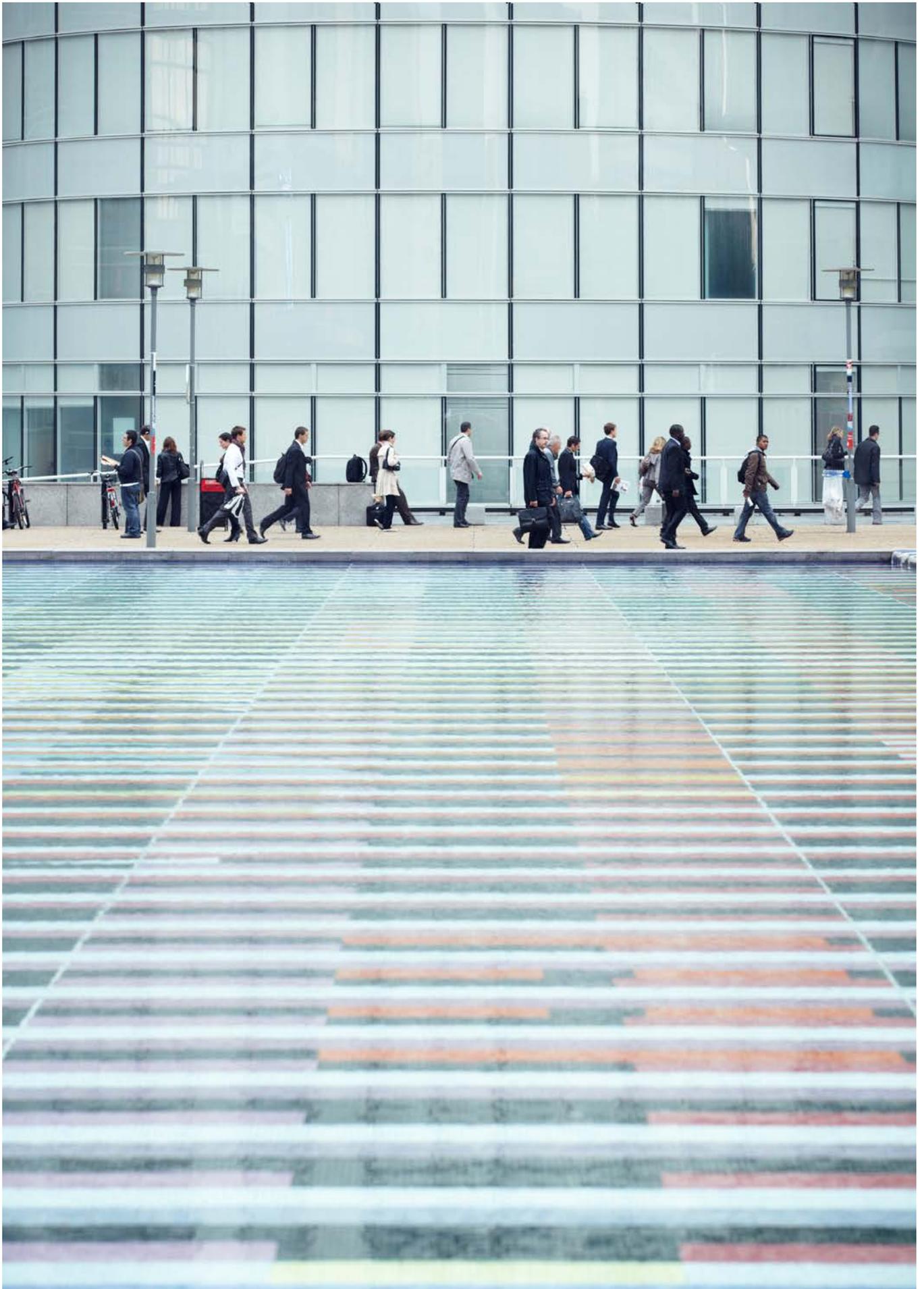
PwC：御社での3Dプリントの長期的な見通しはいかがですか？

Furstoss氏：研究が進むにつれ、見通しも変わっています。カスタマイズが必要な分野で

は、すでに3Dプリンターを使って成長を加速しています。石油・ガス業界は当社にとって大きな成長源であり、複数の顧客がいます。油井・ガス井はそれぞれ目的も所在地も異なるため、プロジェクトごとに大幅なカスタマイズが必要です。発電用製品も同様です。コアユニットはありますが、構成は顧客によって異なります。個々の顧客のニーズに合わせて製品を柔軟に拡張できるのは、3Dプリントがあるからこそです。

今後は設計から修理までのバリューチェーン全体に3Dプリントを活用したいと考えています。3Dプリントによってどのような加工が可能になるのでしょうか？ また、既存の部品にどのようなフィーチャーを加えることができるのでしょうか？ これらは現在、研究中です。私はよく、いずれは当社の部品の50%以上を積層技術で扱うようになるかと語っています。50%以上を3Dプリンターで製作するという意味ではありません。しかし、加工、修理、テストを通じて、これまでにない製品が生まれるかもしれません。

3Dプリントを通じて、工場の現場、部品の設計、カスタマイズ、修理の活動を柔軟に理解できます。そこに積層造形の利点があります。



謝辭

Advisory

US Technology Consulting Leader

Gerard Verweij

Chief Technologist

Chris Curran

US Industrial Products

Industry Leader

Robert W. McCutcheon

Strategic Marketing

Lock Nelson

Bruce Turner

US Thought Leadership

Vice Chairman, Client Service

Rob Gittings

Center for Technology and Innovation

Managing Editor

Bo Parker

Editors

Vinod Baya

Alan Morrison

Contributors

Alan Earls

Galen Gruman

Bill Roberts

Lamont Wood

Editorial Advisor

Larry Marion

Copy Editor

Lea Anne Bantsari

US Creative Team

Infographics

Chris Pak

Tatiana Pechenik

Layout

Jyll Presley

Web Design

Jaime Dirr

Greg Smith

Reviewers

Robert Chwalik

Matthew Schweintek

Mark Thut

Thomas Waller

Brian S. Williams

Special thanks

James Bono, Lawrence Livermore

National Laboratory

Jennifer Gentrup, Autodesk

Lynn Hendrickson, GE Global Research

Ken Ma, Lawrence Livermore

National Laboratory

Industry perspectives

During the preparation of this publication, we benefited greatly from interviews and conversations with the following executives:

Stephen Biller

Chief Manufacturing Scientist

GE

Andrew Boggeri

Lead Engineer

FSL3D

Dr. Eric Duoss

Materials Scientist and Engineer

Lawrence Livermore

National Laboratory

Dima Elissa

Co-Founder and CEO

ProofX

Christine M. Furstoss

Global Technology Director

of Manufacturing and

Materials Technologies

GE Global Research Center

David Alan Grier

Computer Science Professor

George Washington University

Raja Jasti

Founder and Chief Executive Officer

ZeroUI

Nancy Liang

Co-founder, Design and Business Lead

Mixee Labs

Gonzalo Martinez

Director of Strategic Research

for the Office of the CTO

Autodesk

Dr. Joshua Pearce

Associate Professor

Michigan Technological University

Lance Pickens

CEO and Founder

MadeSolid

H. Jerry Qi

Associate Professor

Georgia Institute of Technology

Prabhjot Singh

Manager, Additive Manufacturing Lab

GE Global Research Center

Mark Thut

Principal, Industrial Products Practice

PwC

Luke Winston

Sales and Operations Lead

Formlabs

用語

3D プリント出力、 積層造形法

断面形状のレイヤーを積層することにより3D物体を制作する方式。本出力処理には多様な素材、またはインクが使われる、最も一般的に利用されるのはプラスチックポリマー、金属である。

試作品

3Dデジタルモデルから制作される準備段階の物理的な製作物。コンセプト、プロセス、形態が機能するか等のテストおよびさらなる製品の改良に向けたフィードバックの収集のために制作される。

完成品

最終消費者またはサプライチェーンの顧客にいつでも販売または物流可能な3Dデジタルモデルによる最終段階の物理的な製作物

熱溶解フィラメント 製法 (FFF)

熱可塑性プラスチック材料を溶解させたものを押し出して積層し、前の層に次の層を固着させる3D出力方式

光造形法 (SLA)

紫外線ビームを用いて液状樹脂を硬化させ、連続層を固着させる3D出力方式

選択式レーザー焼結法 (SLS)

ナイロン、チタン、アルミニウム、ポリスチレン、ガラスなどの粉末状物質を用い、多数のノズルからプリント面に吹き付ける方式、レーザーを使い、粉末状物質を焼結、溶解させて1層、1層をプリントする

お問い合わせ先

プライスウォーターハウスクーパース株式会社
〒104-0061
東京都中央区銀座8-21-1 住友不動産汐留浜離宮ビル
03-3546-8480（代表）

松崎 真樹
パートナー
maki.matsuzaki@jp.pwc.com

宮田 靖
ディレクター
yasushi.y.miyata@jp.pwc.com

一山 正行
シニアマネージャー
masayuki.m.ichiyama@jp.pwc.com

www.pwc.com/jp

PwC Japanは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社（PwCあらた監査法人、京都監査法人、プライスウォーターハウスクーパース株式会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む）の総称です。各法人は独立して事業を行い、相互に連携をとりながら、監査およびアシュアランス、ディールアドバイザリー、コンサルティング、税務、法務のサービスをクライアントに提供しています。

PwCは、社会における信頼を築き、重要な課題を解決することをPurpose（存在意義）としています。私たちは、世界157カ国に及ぶグローバルネットワークに208,000人以上のスタッフを有し、高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスを提供しています。詳細はwww.pwc.com をご覧ください。

本報告書は、PwCメンバーファームが2014年MM月に発行した『technologyforecast Issue 2 - The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products』を翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、英語版と解釈の相違がある場合は、英語版に依拠してください。

電子版はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.com/jp/ja/japan-knowledge/thoughtleadership.html
オリジナル（英語版）はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing.html

日本語版発刊月：2015年12月 管理番号：I201501-4

©2015 PwC. All rights reserved.

PwC refers to the PwC Network and/or one or more of its member firms, each of which is a separate legal entity. Please see www.pwc.com/structure for further details. This content is for general information purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.