

3Dプリンター の未来

著者：ティム・ラセター、ジェレミー・ハッチソン・クルパット
監訳：青井 堅

3Dプリンターの流行を表す例として文中にkickstarterの事例があるが、日本のクラウドファンディングkibidangoでも3Dプリンターがプロダクト部門の最高額となる約1,000万円を集めた。この人気の新技術は自社の事業・戦略にどのような影響を与えるのだろうか。本稿では、3Dプリンターを事例としつつ、新技術の将来予測に広く活用できる手法を紹介している。新たな「新技術」が出てきた際にも、流行に惑わされずに見極めたい際に活用できるであろう。(青井堅)

経営者にとって、新技術が真に画期的な技術なのかを見分けることは非常に難しい。そうであってほしいという願望が入ってしまうからである。「とくに未来を予測することは非常に困難である」と、ノーベル賞を受賞したデンマークの物理学者ニールス・ボーアも言っている。実際、セグウェイなど誤った未来予測に惑わされた事例は枚挙にいとまがない。今、ブームとなっているイノベーションとして3Dプリンターが挙げられるが、その実態は不明瞭である。そこで、この3Dプリンターをケーススタディとして、流行に乗って飛びついてしまう前に、長年検証された予測手法を用いて、その新技術を検証することの重要性をお伝えしていきたい。

現在、3Dプリンターが製造業界を大きく変革するのではないかという期待が高まっている。投資・金融情報サービスのモトレイ・フル社が2013年9月に出したレポートでは、この新技術が「11万2,000にのぼる中国の工場を閉鎖に

追い込み～(中略)～アメリカで、21世紀の産業革命を実現させる」とまで言い切っている。我々も製造業の中心が西欧に戻ってきたところを見たい気持ちは山々だが、彼らほどの確信は持てない。何百万人も中国人労働者に解雇通知を突きつける前に、まず一歩下がって、経験曲線のフレームワークを用いて3Dプリンターを分析するべきであろう。そして、どのようにして成長して、消費者による技術導入に対応していくのかを知る必要がある。そのうえで、製造業界の構造が広範囲に渡って変化すると予想する前に、規模の経済と総仕入れコストが投資決定にどう作用するかをよく考えるべきである。

3Dプリンターが新しい生産モデルを提供するという点、それ自体に疑問を差し挟む余地はない。3Dプリンターによって、高価な専用の設備機械は不要になる。そして、従来の打抜き、旋削、裁断といった減法式製造法ではなく、加法式の

ティム・ラセター

バージニア大学ダーデン経営大学院教授。The Portable MBA (Wiley, 2010)、Strategic Product Creation (McGraw-Hill, 2007、ロナルド・カーバーとの共著)など4冊の著書がある。旧ブーズ・アンド・カンパニーの元ヴァイス・プレジデント。オペレーション戦略に関して25年以上の経験を持つ。

ジェレミー・ハッチソン・クルバット

バージニア大学ダーデン経営大学院助教授。イノベーションを専門とし、企業がイノベーション戦略をいかに実施しているかを重点的に研究している。過去10年以上にわたる、戦略、イノベーション、エンジニアリングの実務経験を持つ。

青井 堅 (あおいけん)

(ken.aoi@strategyand.pwc.com)

Strategy&(旧ブーズ・アンド・カンパニー)東京オフィスのシニア・アソシエイト。消費財・小売業、製造業を含む幅広いクライアントとともに、全社戦略、商品戦略、新規事業戦略、組織構造改革などのプロジェクトを行ってきた。過去、ベンチャー企業の実務経験を持つ。

積層造形法であるため、使用する資材が少なくすむ。また、3Dプリンターの価格はどんどん下がっており、愛好家向けに350ドルを切る製品を販売しているベンチャーも存在する。しかし、それでも我々の技術予測分析は、近い将来に3Dプリンターが工場生産に取って代わるとは示していない。

技術予測の有効な手法：経験曲線

技術予測の最も有効な手法の1つとして、航空宇宙技術者セオドア・P・ライトが発見した「学習曲線」が挙げられる。ライトは1936年に発表した論文で、長年にわたる航空機製造経験に基づいた、時間の経過に伴うコスト減少予測のための数理モデルを提示した。具体的には、航空機建造に必要な労働時間は、経験と実践を積むことで技能と効率が高まるため、製造したユニットの累積数の関数として減少することを予測できると主張した。つまり、ユニットの累積製造数が2倍になるごとに、労働時間数は決まった比率で減少することになる。このライトが提示した「学習曲線 (the learning curve)」と呼ばれる指数曲線は、初めのうちは急速に下がるが、累積生産数を倍増させるために必要なユニット数が大きくなると最終的には横ばいになる。

1960年代には、ボストン・コンサルティング・グループのブルース・ヘンダーソンが、ライトの発想をもとに「経験曲線 (the experience curve)」のコンセプトを打ち出した。人件費だけでなく、ユニット当たりの総製造原価に適用すれば、この指数曲線をより幅広い製品に応用できると主張したのである。また、ほぼ同時期に

ゴードン・ムーアがコンピュータチップに対する深い知識に基づいて同じような見解を示した。有名な「ムーアの法則 (Moore's Law)」である。ムーアは促進要因として、累積生産量ではなく時間を用いた。コンピュータチップ1個あたりのトランジスタの数は毎年2倍になっており、今後10年間も同じペースで増え続ける。その結果、10年後にはチップ1個当たりのトランジスタの数は6万5,000という(当時としては)途方もない数になると主張したのである。

1975年、インテル社を共同設立していたムーアは過去のデータを紐解き、自分の主張が正しかったことを証明したが、今後の予想を「2年ごとに倍増」に修正した。この法則の限界についてはいまだに議論が続いているものの、安定した改善率は半導体産業を牽引しており、最新世代のチップには10億超のトランジスタが組み込まれている。

研究者は今でも、これらの予測手法の実証的妥当性をテスト・確認し続けている。複雑系研究で知られるサンタフェ研究所の研究チームは、2013年初めに発表された論文で、さまざまな時期・期間に渡る60以上の技術についてのコストと生産量のデータを収集・検証している。たとえば、1969年から2005年まで集積回路を追ったデータがある。研究チームは、累積数が2倍になるごとにチップに組み込まれたトランジスタのコストが43%下がっていること、また37年間、1.2年ごとに累積生産量が2倍になっていることを発見した。そして、すべてのデータを検証した結果、多くの技術が一定の速度で生産高を倍増させ、かつ一定の速度でコストを押し下げていることを示した。

しかし、彼らは同時に、そのカーブは技術に

新技術の費用曲線を予測するためには、 数量の増加速度とコスト低下の速度の両方を 考える必要がある

よって大きく異なることを発見した。たとえば、ハードディスクドライブは1989年から2007年にかけて、1.1年ごとに累積生産量は倍増し、コストは49%減少していた。一方、ポリスチレンは1944年から1968年までの間、累積生産量が倍増するのに3.5年もかかり、コストは16%しか減少していない。また、ガスレンジは、ポリスチレンよりはるかに費用曲線のカーブが急だった。1947年から1967年までに累積生産量が2倍になったのは1回だけだったのに、その際コストは32%減少していた。

したがって、新技術の費用曲線を予測するためには、数量の増加速度とコスト低下の速度の両方（「経験曲線の勾配（the slope of experience curve）」とも呼ばれる）を考える必要がある。そこで問題は次のようにまとめられる。すなわち、3Dプリンターの曲線はマイクロチップとガスレンジ、どちらの曲線に近いのかである。

「経験曲線」から見た 3Dプリンターの未来

一般消費者向けの3Dプリンターの価格帯が350ドルであることは経験曲線が下がってきていることを明示しているものの、この製品はまだ成長の初期段階にある。3Dプリンターの比較的短い歴史は、3Dシステムズのチャックハルが、1986年に基盤技術であるステレオリソグラフィ（光造形法）を発表したときから始まる。しかし、固体レーザーが進歩し、この技術がラピッドプロトタイピング（積層装置）の基礎技術として確固たる地位を築くまでにその後10年近くかかった。

近年、注目を集めている3Dプリンターの消費者向け転用は、一般家庭への普及というよくある制限に直面した。この制限によって潜在的市場規模は限定されるため、急拡大へと経

験曲線を牽引するために必要な数量倍増のスピードに影響が生じる。似たような技術の例では、たとえば、先進国の世帯の約3分の1がテレビを2台以上所有しているが、ストーブを2台以上持っている世帯はほとんどいない。また、パソコンが登場してから30年後に西欧の4億8,000万世帯の70%が少なくとも1台を所有しており、また、新興国の13億世帯の4分の1近くがパソコンを所有している。

それでは、小型の卓上型3Dプリンターの浸透率はどの程度になると予測できるだろうか。新興企業パイレーツ3DがKickstarter（米国のクラウドファンディングサイト）で資金調達に成功した例に、潜在的可能性を見ることができると。同社の家庭用3Dプリンター「バッカニア」のプロジェクトは、347ドルという低価格で使いやすい3Dプリンターのプロジェクトで、わずか30日間で3,500人から140万ドルを調達して、目標としていた10万ドルを簡単にクリアした。しかし、潜在的な普及率を評価するには、通常のプリンターと比較したほうがよいであろう。標準的なプリンターは、操作が極めて簡単である。また、家庭用プリンター1台で、白黒でもカラーでも、写真用光沢紙でも普通紙でも、写真でも文章でも印刷できる。こうした汎用性があるからこそ、家庭用プリンターは一般に普及しているのである。

一方、3Dプリンターの場合はそうはいかない。金属用プリンターでABS樹脂はプリントできず、ABS樹脂用プリンターで他の樹脂をプリントすることもできない。また、設計者は操作をどんどん簡単にはしているものの、いまだ最低限の技術知識は必要であり、そのレベルは通常のプリンターと比べてはるかに高い。加えて、仮に3Dプリンターが将来簡単になるとしても、現在、簡単で便利な家庭用プリンターがあるにも関わらず、多くの人たちが大きな仕事はフェデックス・オフィス（日本でのフェデックス・キン

コース)などに外注しているということを忘れてはならない。一般の消費者がフォークなどをウォルマートでは買わずに、3Dプリンターで作るという近未来を思い描くことには無理があるのではないだろうか。

我々は間違っているかもしれない。3Dプリンターは使いやすくなり、スマートフォンのように一般に広く普及するのかもしれない。業界が年間何百万台もの3Dプリンターを生産すれば、生産量の増加によってこの装置の経験曲線がもっと早く下がることになるのかもしれない。だが、曲線はどれだけ急な勾配を描くのだろうか。また、生産量はどれだけ速さで倍増するのだろうか。最も楽観的な予測でも、3Dプリンターの販売数の伸びはマイクロプロセッサには及ばない。安くはなるだろう。しかし、ムーアの法則と張り合えるような数にはならない可能性が高い。さらにマイクロプロセッサとは違い、3Dプリンターは元々ある技術を組み合わせたものである。プリンターを動かすマイクロプロセッサはコストを急速に押し下げるであろうが、プリントヘッドを駆動させるアクチュエーターなど部品の多くはそれ自体の曲線がすでに大きく下がっているため、今後下がる可能性は低い。また、コストの大部分はプリンターの躯体部分やケースに関わるものであり、(非常に小さいものだけを製造したい場合を除いて)小型化の恩恵を受けない。したがって、3Dプリンターの経験曲線は、マイクロチップよりはガスレンジに似たものになりそうである。すなわち大きいと驚くほどの勾配ではなく、倍増までの速度は比較的ゆっくりした曲線である。

製造におけるコスト・ドライバー

経験曲線は、新技術の妥当性と将来性を分析する1つの手段だが、3Dプリンターが製造業界の構造を変革するかを検証するには、十分に

実証済みのコンセプトをさらに2つ使用する必要がある。それは「規模の経済」と「総仕入れコスト」である。製品をどこでどのように製造するかを検討するときは、生産規模も重要だが、場所と輸送コストも同様に重要である。

産業革命初期のビジネス的思考を支配したのは「規模の経済」というコンセプトだった。この理論はアダム・スミスの分業のメリットに関する所見に基づき、企業が大きくなるほど分業のための専門分野を創出する機会が増えると結論づけた。時が経つにつれて、議論の中心は労働の分業から、労働者を排除するオートメーションへとシフトした。大きな企業ほど、最新の生産技術に投資することができ、より少ないリソースでより多くの生産高を生み出していった。キャドバリー、ゼネラル・モーターズ、シーメンスといった巨大企業の成長がこのコンセプトの正しさを証明している。20世紀前半、これらの企業は優れた生産能力を利用して、規模の経済を元にグローバル市場に製品を供給していった。

20世紀半ばには、規模の経済を輸送にも応用したことで、グローバル規模の大規模生産という現在のモデルが広がった。1956年には、トラック運送会社を起業したマルコム・マククリーンが、インターモーダル用コンテナを標準化するという構想を実現すべく船会社を買収した。マククリーンは、トレーラー・トラックを船舶に積み込んで、コンテナを空にして中身を詰め直すことをせずにそのまま積み下ろせれば、グローバルなサプライチェーンをさらに効率的に利用できると考えていた。製造業者はコンテナ船を使用することによって、途上国市場の廉価な労働力を利用して、その後、安価な輸送方法で先進国市場に商品をもう一度戻すことができるようになった。

これらのコンセプトは現在も見ることができると。たとえば、中国深圳の電子機器受託製造

我々は3Dプリンターをめぐる喧伝すべてを鵜呑みにはしないが、3Dプリンターが変化を促す可能性については希望を持っている

大手のフォックスコンは、3平方kmの広さの複合施設に10以上の工場を集中させ、そこで数十万人の労働者を働かせることにより、規模と安い人件費という2つの強みを組み合わせている。運送業界でも規模の経済の追求は続き、2013年7月にはマースク・グループが1万8,000個のコンテナを輸送できる世界最大のコンテナ船を就航させた。

経験曲線と同じように、規模の経済も製品の種類によって異なり、人件費の重要度も大きく変わる。例として、「ムーアの法則」に今も従っているインテルの半導体チップを見てみよう。初めのシリコンチップを製造するウェハー工場の建設には何十億ドルもの費用がかかる。また、これらの工場の多くは先進国にある。それは資本集約度や知的財産保護のほうで、人件費よりも重要だからである。一方、縫製工場の場合は、大きな工場を造っても同型のミシンの後ろに座る工員が増えるだけで規模の経済のメリットは限られている。規模曲線の勾配を大きくするために、少量生産時は不経済だった優れた加工技術を導入して生産量を増やす方法がある。しかし、縫製工場にはそのような可能性はないので、多くの縫製工場は小規模であり、人件費の安い国に存在している。

製品ごとに最善のシナリオは異なるため、どの業種でも生産戦略を練るときには、総原価をできるだけ抑えるために規模の経済、安価な労働力、輸送コストのトレードオフをつねに検証している。為替や賃金の変動、生産技術の進歩によっても、最適な答えはつねに変化する。そして、今回の根本的に異なるトレードオフを持つ3Dプリンターの出現によって、新しく分析する必要が生じたのである。

3Dプリンターは パラダイムシフトを起こすか 愛好家向けに留まるか

中国人労働者不要論は、3Dプリンターによって規模の経済を求めらる必要がなくなるという怪しげな仮説から生まれた。しかし、3Dプリンターによって小規模生産が可能になるとしても、射出成型や一体成型などの従来技術はなおも大量生産という形で規模の経済を提供するだろう。

さらに、3Dプリンターがどれだけ安くなったかと関係なく、生産工場はその原料に関して規模の経済を活かし続けるだろう。3Dプリンターは通常、1立方インチ当たり約84セントの樹脂を消費する。これは、世界中の典型的な工場で生産される樹脂製品の原価よりずっと高い。ブルックリンのメーカーボット・インダストリーズ社は、ABS樹脂の1キロスプールを48ドルで提供している。一方、射出成型工場はタンクローリーで運ぶほどのプラスチック用樹脂をその何分の1かの価格で仕入れている。一般消費者が3Dプリンター用の樹脂を本当に魅力的な価格で調達することは決してないだろう。手作りで作るのは趣味としてはよいが、大量生産された製品に実際に取って代わりはしないのである。

とはいえ、3Dプリンターは製造業の根本的なパラダイムシフトを起こすほどではないと思われる一方で、特定の加工品の生産場所やビジネスモデルに大きな影響を及ぼすことはありうる。たとえば、サンフランシスコのモドラー社は25万ドルの3Dプリンターを使って顧客がデザインしたものを生産し、一般の愛好家から医療機器メーカー、映画スタジオまであらゆる人にサービスを提供している。今のところ同社が生産しているのはプラスチック部品だけだが、創業者のジョン・ヴェグファーはガラスや金属、セラミックにも対応することを考えている。

また、ステーブルズ社は、紙の層に着色、裁断、糊づけすることで、強度のある木材に似たプリントをするエムコア・テクノロジーズ社製の機械を使い、欧州でこの分野に参入した。

3Dプリンターの支持者は、この製造法が特定のニッチ分野でどれだけ価値を提供できるかに焦点を当てるべきである。たとえば、エアバス・グループはすでに3Dプリンターを使っており、これまでのどの生産方式よりも強く軽い遠隔操縦航空機を製造している。これは構成部品を組み立てるのではなく、翼全体をプリントすることで可能になった。また、全部品を同時に建造することで(あるいは複数の部品を1つの部品に変えることで)、最終組立におけるミスが起きにくくなり、時には組立プロセス自体がなくなる。

おそらく、産業界での3Dプリンターの最も有望な使い道は、スペアパーツの生産と在庫だろう。たとえば、NASAは国際宇宙ステーションでのスペアパーツと工具の製作への3Dプリンターの使用を検討している。これは工具類や特殊な交換部品など、あまり動きのないものの場合にとくに有効である。つまり、宇宙ステーションであらゆる作業を行うのに必要なすべての工具や重要性の低いもののスペアパーツよりも、3Dプリンター1台のほうが、必要なスペースはずっと小さく、そして軽くなるのである。NASAの例は極端なケースだが、自動車や電化製品のディーラーのような企業にとっても、ある程度小さくて量も出ない修理部品は、大量の在庫を抱えておくよりも、必要に応じて修理工場プリントしたほうがメリットがある。

また、デジタルデザインを快く共有してくれる人たちのおかげで、新しいビジネスモデルが生まれるかもしれない。たとえば、3Dプリンターユーザーはメーカーボット社の3Dモデル共有サイトThingiverseにおいてオープンソースコミュニティを築いている。このコミュ

ニティはまだできたばかりだが、アイデア豊富な起業家たちは3Dプリンター業界を揺るがし、後に標準になるようなビジネスモデルをきっと見つけ出すだろう。高い初期投資を必要としない生産手段が利用可能になることは、より公平な競争の場を形成し、より多くのデザイナーをオープンな競争へと向かわせる。そして規模の経済を持たない企業は、費用効率の高い方法でパイロットデザインを作れる。しかし、その一方で売れるデザインは最終的には大量生産へと移行するであろう。

3Dプリンターの希望ある未来

我々は、予測に基づき、3Dプリンターをめぐる楽観論のすべてを鵜呑みにはしていない。しかし、3Dプリンターが起こす変化の一部については希望を持っている。1つには、3Dプリンターはグローバルな製造業の基本構造は変えないが、おそらくはデジタルデバイドの架け橋となり、製造業に新たなチャンスをもたらすだろうことである。経済的に恵まれない遠隔地とのコミュニケーションを開くことと平行して、廉価な共有3Dプリンターは村人たちに工具、交換部品あるいは単純な医療用器具をプリントすることを可能にするだろう。また、(かなり高度な精巧さが必要になるが)患者自身の細胞から移植臓器をつくることを夢見る研究者もいる。

そして、近い将来可能になるとは思えないものの、ナノテクノロジー分野への活用や、必要な原料の家庭廃棄物からの再生ができるようになれば、経済的なトレードオフは完全に変化する。我々は自宅にいながらにしてモノを生産するようになり、やがては、モノを大量生産する工場が時代遅れになるような世界に住むことになる。だが、それはかなり遠い未来になるだろう。

“A Skeptic’s Guide to 3D Printing,” by Tim Laseter and Jeremy Hutchison-Krupat, strategy+business, Issue 73, Winter 2013.