

# 設計・施工を刷新する 建設3D プリンター

写真1 ■ セメント系材料用の3Dプリンター工場で新しい橋のパーツを製造するデモンストレーションの様子。ロボットアーム型の3Dプリンターで、モルタルを層状に重ねていく(写真:BAM Infra)

3Dプリンターで橋や住宅を造る……。海外ではそんな事例が散見され始めた。型枠を使わずに有機的な形状のセメント系構造物を製作できる3Dプリンター。建設現場を工場に変える力を持つだけでなく、これまで施工が難しかった新しい構造や形状を具現化する可能性も秘める。海外に比べて出遅れている日本でも、技術導入や開発の動きが出てきた。現状と展望に迫る。(長谷川 瑤子=本誌、奥野 慶四郎=フリーライター)

## CONTENTS

先進地ルポ	世界最長に挑め 橋の“印刷”が始まった	▶29
INTERVIEW	100年前の施工方法から脱却を アイントホーフェン工科大学教授 テオ・サレット氏	▶33
データで見る最前線	4300億円市場に世界は動き出した	▶34
建設業のココを変える	スタートアップが導くプリント革命	▶36
	総覧!建設3Dプリンター業界地図	▶41
日本企業の挑戦	自動化や新構造を見据えて始動	▶42
革新への道筋	設計思想を抜本的に変え現状打開	▶46



## 先進地ルポ

## 世界最長に挑め 橋の“印刷”が始まった

オランダの首都アムステルダムから列車に乗って1時間半。同国唯一の「発明都市」と呼ばれるアイントホーフェン市の一角に、その工場はあった。大きめの体育館ほどの広さを持つ施設に入ると、中央でレールの上に据えられた高さ2mほどのロボットアームが目飛び込む。

ここは、オランダの建設会社BAM Infra (バムインフラ)などが立ち上げた欧州初のセメント系材料用の3Dプリンター工場だ。橋や住宅などの大型構造物やその部材の製造拠

点として2019年1月に開設された。

「フェンスの外に出てくれ。今から“印刷”を始める」。ヘルメットをかぶった男性がこう口火を切ると、ノートパソコンのキーを叩くと、ロボットアームが緩やかに動き出した。先端に備えたノズルからクリーム状のモルタルを吐出して約1cmの厚さで積層。みるみるうちに1mほどの高さがある中空のブロックを築き上げた(写真1~3)。

バムインフラは3Dプリンターで橋を造り、架設した実績を持つ数少





写真2 ■ 大型構造物の製造に特化した建設用3Dプリンター工場。写真奥のサイロからポンプでモルタルをロボットアーム先端のノズルに送る(写真:BAM Infra)

ない建設会社の1つだ。アイントホーフェン工科大学などと共同で、17年10月に当時世界初だったセメント系材料による3Dプリンター製自転車・歩行者橋を完成させた。

同社は現在、新たな挑戦に踏み出している。完成すれば世界最長となる新たな3Dプリンター橋の建設を、40万ユーロ(約4900万円)超で受注したのだ。

#### 型枠不要ならではのデザインに

新たな橋は、オランダ東部のナイメーヘン市を流れる川に架かる延長29m、幅3.5m、5径間の自転車・歩行者橋だ。オランダの公共事業・水

管ナーのミシェル・ヴァン・デル・クレイ氏が共同で進める国を挙げたプロジェクトで、公共事業・水管理局が工事の発注と監督を担う。

最大の特徴は、流線形をふんだんに使ったデザインにある。担当したヴァン・デル・クレイ氏は、「従来の施工方法では到底実現できない造形を目指し、自然界にある無駄のない形状に行き着いた」と説明する。

3Dプリンターを使う最大の利点は、型枠が不要になることだ。型枠を組みにくい空洞や曲面を自由に配置したデザインを採用できる。桁と橋脚の接合部は、木の幹から枝が伸びる様子を再現したという(図1)。橋は39個の部材に分けて“印刷”

した後、架設現場の近くで組み立てる。20を超える桁部材は完成後に1径間ずつ鋼材を通し、プレストレスを導入して一体化する。バムインフラは19年5月に冒頭の3Dプリンター工場で部材の製作を開始。性能照査と並行して進め、19年7月末までの架設を目指す。

#### 積層速度の絶妙なさじ加減を探る

この規模でセメント系材料を用いた3Dプリンター橋は前例がなく、品質や安全性の確認に、従来の基準を適用できない。

そこで、公共事業・水管理局は実橋の部材製作に先立ち、中央1径間分の実物大試作品と試験方法の体系



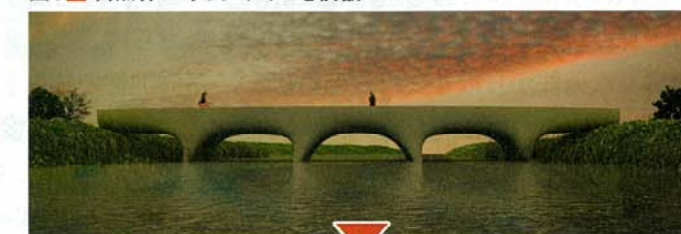
写真3 ■ プリンターの稼働中、人はフェンス内に立ち入らず、全てコンピューターで制御する(写真:このページは特記以外は本誌)



写真5 ■ 積層したモルタルの表面に凹凸が残っても、内側の層間に隙間はなく、一体化しているのが分かる

化をアイントホーフェン工科大学建築環境学部のテオ・サレット教授に依頼。載荷に伴うひび割れやたわみの発生量を調べたところ、架設後に想定される荷重の3倍近い重さに耐えられると確認できた(写真4)。

図1 ■ 自然界にあるデザインを模倣



積層可能なパーツに分割



ナイメーヘン市に架設予定の橋のイメージ。3Dプリンターで製造しやすい部材に分けて構築する(資料:上はMichiel van der Kley/Pim Feijen、下はBAM Infra)



写真4 ■ 実物大の試験体を使った荷重試験の様子。アイントホーフェン工科大学のテオ・サレット教授が性能試験を監修した(写真:BAM Infra)



サンゴバン・ウィーバー・ビーミックス  
マーケティングマネジャー  
マルコ・ヴォンク氏

ポンプ内で圧力が加っている間は流動性が高くなり、吐出されて減圧するとゲルのように固まる、特殊なモルタルを開発した。実は、原型となる材料は1990年代には開発してあった。当時は3Dプリンターに欠かせない設計やロボット制御のデジタル技術が成熟しておらず、普及には至らなかった。(談)



バムインフラ  
プロジェクトリーダー  
ピーター・バックー氏

「1年目は利益が出ないかもしれない。だが将来、確実に伸びる技術だ」。こう会社を説得して、3Dプリンター工場の開設にこぎ着けた。建設会社で事業化を決めた企業はほとんどない。デジタル化やロボット技術の経験を早くから積んでおけば、新しい市場を開拓できると信じている。(談)





## INTERVIEW

# 100年前の施工方法から脱却を

アイントホーフェン工科大学建築環境学部教授 テオ・サレット氏

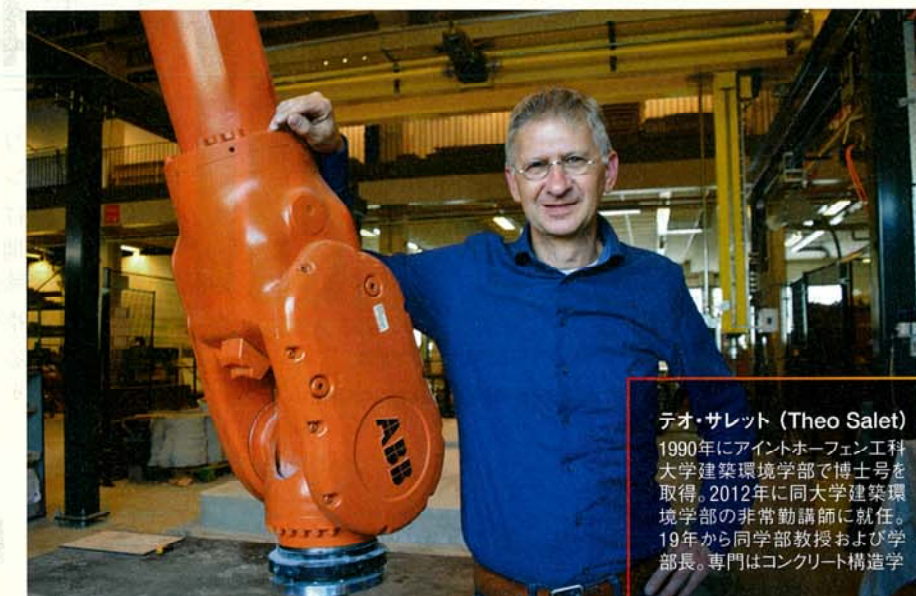
環境負荷の軽減や生産性の向上、多様化する需要への対応——。今の建設業が直面している課題を解決するには、産業全体のデジタル化が不可欠だ。3Dプリンターには、その流れを加速させる力がある。

構造物の設計では既にBIM(ビルディング・インフォメーション・モデリング)などが浸透し始めている。にもかかわらず、コンクリートの施工方法は100年前からほとんど変わっていない。ロボット技術を活用して効率化する余地は大きいはずだ。

当然、一筋縄ではいかない。3Dプリンターで積層したモルタルは一般的なコンクリートと同じように、圧縮に強く引っ張りに弱い特徴がある。圧縮力で力を伝えるアーチ構造にしない限り荷重を支えられず、構造物としての使い道がほとんどない。そこで、3Dプリンターで造った構造物をどのように補強するかが重要になる。

2017年にバムインフラと共同で架設した3Dプリンター橋では、複数の桁部材に鋼材を通し、プレストレスを加えて一体化する方法を採用した。さらに、3Dプリンターのノズルを改造し、モルタルを積層しながら中央に鋼製のワイヤを埋め込めるようにした。

ワイヤを入れる最大の理由は、桁



テオ・サレット (Theo Salet)  
1990年にアイントホーフェン工科大学建築環境学部で博士号を取得。2012年に同大学建築環境学部の非常勤講師に就任。19年から同学部教授および学部長。専門はコンクリート構造学

の横断方向の強度を高めるためだ。橋軸方向にプレストレスを加える際、埋め込んであるワイヤは桁が横断方向に変形しようとする力に抵抗する。これにより、桁の横断方向にも一定のプレストレスを加えられる。

### 繊維補強の新たな可能性を開く

さらに、合成繊維や鋼繊維を使った補強にも取り組んでいる。実は、3Dプリンティング技術と繊維補強はとても相性がいい。

繊維材料は、モルタルを積層しながら、必要な箇所に必要な量だけ配置できる。繊維の分布を製造過程で全て記録することも可能になるので、どんな種類の繊維をどのように

配置するのが最適なのかを、データに基づいて考えられるようになる。

いずれは、施工現場に3Dプリンターを設置して、部材や構造物を必要に応じて構築できるようにしたい。現状の技術で、一定の品質を確保するには、気温や湿度を自由に調整できる屋内の工場でプリント作業をする必要がある。しかし、これでは従来のプレキャスト・コンクリートに対して優位性を示しにくい。

屋外でプリントするには、ロボットが周囲の環境に合わせて添加材などを適切に調整する必要がある。人工知能など最先端の制御技術を取り入れることはもちろん、地道なデータの蓄積も欠かせない。(談)

層状にモルタルを打ち重ねる技術は一見、シンプルだ。だが、実際には様々な条件から最適な組み合わせを見つけなければならない。

積層速度を例に見てみよう。モルタルはロボットアームの先にあるノズルから出てすぐに固まり始める。一方、プリントしたモルタルを次に重ねた層と一体化させるには、ある程度の流動性を保つ必要がある。積層時の流動性が不十分だと、層間に空隙が生じてコールドジョイントを起こす恐れがあるからだ(写真5)。

半面、モルタルの硬化が不十分な状態で積層を続けると、上の層の重みで下の層が変形して崩壊しかねない。モルタルが硬化を始めるまでの時間を計算に入れて、プリンターのノズルが動く速度や移動経路を細か

く調整する必要がある。

さらに、モルタルの状態は配合する添加材の量や水の温度の他、気温や湿度などでも変わってしまう。バムインフラはモルタルを提供するSaint-Gobain Weber Beamix(サンゴバン・ウィーバー・ビーミックス)と共同で、ミキサーやノズルなどに取り付けたセンサーのデータを分析し、最適な条件を探ってきた。

### 24時間施工も夢じゃない

環境問題に対する意識は世界随一といわれるオランダ。同国政府は建設用3Dプリンター技術の採用に積極的な姿勢を見せる。型枠の制限がない特徴を生かせば、従来よりも合理的な設計を実現できる。材料の無駄を減らし、CO<sub>2</sub>の排出量や廃棄物

量を削減する効果が見込める。

メリットはこれだけではない(図2)。工期短縮や省力化など、機械化による生産性向上への期待も大きい。バムインフラの工場では現状、橋軸方向の長さが1m弱の部材を1つ製作するのに約1日を要する。だが、将来は材料の練り混ぜからロボットによる製造までの工程を完全に自動化して、時間短縮を図る考えだ。

「1日24時間、休みなく製造を続けられるようになれば、橋を丸ごと造り上げるのに1週間もかからない。いずれは価格競争力で従来工法を上回る場面が確実に出てくる」。バムインフラでプロジェクトリーダーを務めるピーター・バックー氏は、3Dプリンターがより実用的な技術となる未来を見据えている。

図2 ■ 3Dプリンターが建設業にもたらす7つのメリット



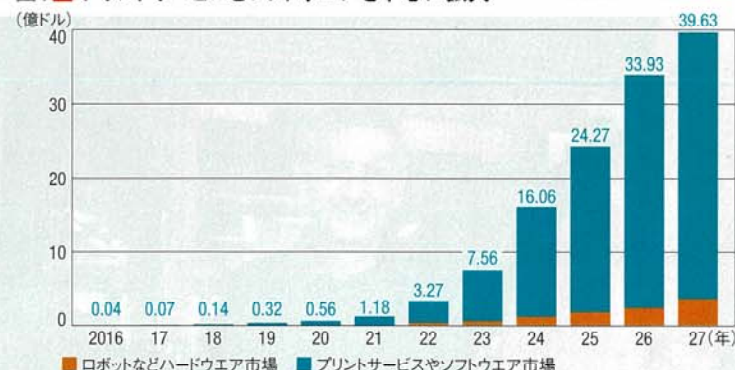
取材を基に本誌が作成



# 4300億円市場に世界は動き出した

## 市場規模の拡大は加速する見通し

図1 ■ プリントサービスとソフトウェアを中心に拡大



米調査会社SmarTechによる建設用3Dプリンターの市場予測 (資料:SmarTech)

10年たたないうちに  
**40億ドル規模へ**

米南カリフォルニア大学のバロク・ホシュネビス教授がセメント系材料を積層して建物を作る構想を打ち出したのは1990年代後半のこと。その後、欧州を中心に研究開発が活発化。2010年代に入って建設業界の巨大企業による投資が加速した。関心の高まりやデジタル技術の発展に伴い、今後、市場の急速な拡大が予想される。27年には約40億ドル(約4300億円)規模に成長するという米国の調査会社による試算もある。

## 中国が大型化で存在感

2019年6月現在、3Dプリンターで造った構造物の世界最高および世界最長の記録は、中国が独占しているもようだ。上海のに本社を置くWinSun(ウィンサン)は、15年に3Dプリンター製の5階建て集合住宅を公開し、世界最高を宣言した。集合住宅は展示用とみられるが、鉄筋などで3Dプリンター製の壁材を

補強して「中国の建築基準に準拠した」(同社発表)と説明している。一方、19年1月には精華大学の研究チームが3Dプリンター製の歩道橋を完成させたと発表。長さ26.3mのアーチ橋で、世界最長を記録した。現在、オランダで長さ29mの3Dプリンター橋の架設が決まっており、記録は近く更新される見通しだ。

高さ世界一  
**約14m**



(写真:WinSun)

橋長世界一  
**約26m**



(写真:精華大学)

## “インスタント住宅”が登場

住宅1軒を造る時間  
**24時間以下**



(写真:ICON)

2018年3月、米国のスタートアップが小規模な住宅を3Dプリンターで24時間以内に建設したと発表した。ほぼモルタルだけでできた住宅は、途上国の低所得者への提供を想定したものだ。建設コストは4000ドル(約43万円)と格安。地震が少ない地域で、住宅を安く素早く整備する手段として注目を集める

## 国を挙げた技術開発の動きも

**英国**

2017年に、3Dプリンター技術に関して、18年から25年にかけての国家戦略をまとめた。ラフバラー大学を中心に、産学連携の技術開発が進んでいる

**オランダ**

公共の橋や人が住める住宅など、実用的な構造物の建設プロジェクトでの3Dプリンター活用で先頭を走る。建設用3Dプリンター技術に取り組むスタートアップも多い

**中国**

2010年以降、ウィンサンが手掛けた事業を中心に、3Dプリンターを使った大型建設プロジェクトが多数報じられている。ただし、詳細は不明。16年と17年には、政府が3Dプリンター技術の商用活用に向けたアクションプランをまとめている

**スイス**

2014年に、スイス連邦工科大学チューリッヒ校が中心となり、建設のデジタル化に関する専門の国立研究センター「dfab」を設立。3Dプリンターを含む多様な技術開発を民間パートナーと進めている

**アラブ首長国連邦**

2030年までにドバイの新規建造物のうち25%を3Dプリンターで建設することを目標に掲げる。21年までに3Dプリンターに対応した建築基準を整備する予定

**シンガポール**

南洋理工大学が3Dプリンター技術に特化した研究所を2016年に開設し、建設業への応用にも取り組む。政府は国立研究財団を通じて、研究所に10年間で4200万シンガポールドル(約33億円)を超える出資を行う計画

**米国**

国防総省が、軍の兵舎や臨時橋梁などを3Dプリンターで製造する研究開発を進める。米航空宇宙局(NASA)は、2014年から19年にかけて3Dプリンターで火星に住居を建設する技術のコンテストを開催した

## プリンター購入は2000万円から

現在、建設用3Dプリンターは、ロボットアーム型とガントリー(門)型の2種類が主流となっている。ガントリー型はプリンターの幅や高さによって製造できる構造物の大きさが制限される。一方、ロボットアーム型はプリンターの据え変えが容易で、造形の自由度が高い。プリンターの価格はロボットアーム型の方が高い傾向にあるようだ。

(写真: CyBe Construction)



販売価格を公開している会社の資料に基づく、最も安いもので約2000万円。上位機種では1~2億円に上るものもある。ただし、プリンター本体が安価でも、専用のモルタルをセットで購入しなければプリントできない製品もあるため、見積もりには注意が必要だ。

建設用3Dプリンターの価格帯  
**2000万~2億円**



門型プリンターの例 (写真:本誌)

## 建設用3Dプリンター 施工のキーワード

### ▶チキソトロピー性

物体に応力を加えた時に流動性が一時的に低下し、放置すると元に戻る性質を指す。プリンターから吐出された後に形を崩さないよう、使用材料はこの性質を備える必要がある

### ▶ビルダビリティ(積層性)

材料が自重で崩れることなく、ただけ上に積層できるかを指す。3Dプリンターならではの指標。時間経過に伴う材料の圧縮強度などによって変わってくる

### ▶押し出し性能

3Dプリンターで使う材料が、ノズルから途切れずに吐出できるかを見る指標。材料の流動性だけでなく、ノズルが動く速さや向きなどにも影響を受ける



# スタートアップが導くプリント革命

3Dプリンターに可能性を見だし、建設業界に新風を吹き込もうとするスタートアップ。その技術を取り込もうと、世界最大規模の建設系企業も協業や出資を申し出る。注目のスタートアップ5社が挑む建設業界の革新に迫った。

## XTreeE

### 自前のデザイン技術が強みに

年間5兆円超を売り上げる欧州最大手の建設会社Vinci（バンシ、フランス）から3Dプリンター技術の“お墨付き”を勝ち取ったスタートアップがある。フランスで2015年に創業したXtreeE（エクストリー）だ。17年11月、バンシのグループ会社がエクストリーへの出資を明ら

かにした（写真1）。

エクストリーは、モルタルを積層する3Dプリンターで、高さ4mの支柱や大型のパビリオンなどを造った実績を持つ（写真2）。バンシの他、セメント大手のラファージュホルシム（スイス）、ABB（スイス）、ダッソー・システムズ（フランス）といった巨大企業と提携し、現在も3Dプリンターを使った複数の建設プロジェクトを手掛けている。

エクストリーの強みは、高い品質と意匠性を兼ね備えた技術力だ。ロボットや材料などの積層に関わる技術だけでなく、3Dプリンター製造に適した設計を追求するデジタルデザインも一部、自社で手掛ける。

「製造と設計、両方の技術を磨かなければ建設用3Dプリンターの発展はない」。エクストリーのゼネラルマネジャーを務めるジャン・ダニエル・クン氏はこう言い切る。プリント技術だけが先行しても、適切な設計が伴わなければ従来のプレキャスト・コンクリートと比べたメリットが小さく、導入が進まないからだ。

### 欲しい時に欲しい形の部材を調達

さらに、エクストリーは長期的な目標として、3Dプリンターに関するデータを統合するプラットフォーム

の構築を掲げる。設計者や資材メーカーとのやり取りを1つのサービスに統合し、顧客が欲しい時に欲しい形の3Dプリンター製の部材を調達できるような体制を目指す（図1）。

同社はこの仕組みを交通分野で話題の「MaaS（モビリティ・アズ・ア・サービス）」になぞらえ、「PaaS（プリント・アズ・ア・サービス）」と呼ぶ。実現すれば、顧客が設計者や資材メーカーと個別に受発注のやり取りをする必要がなくなり、手続きを簡略化できる。顧客が部材を選びやすいように、設計データのライブラリーも整備する計画だ。

産業構造を変えるのは容易ではない。しかし、エクストリーは実現に向け、製造拠点の開拓を進めている。25年までに世界各地に66の協力会社を得る目標を打ち出している。

実は、日本企業との協業は既に始まっている。エクストリーは17年秋、日本の大手繊維会社クラボウと協業を開始している。クラボウは建設用3Dプリンターの事業化を検討中で、19年度内にもエクストリーの機材を国内の工場に導入する見通しだ（写真3）。建物の外装材や景観材料など付加価値の高いセメント系製品の領域で市場展開を狙う。

国内では新設住宅の着工戸数は落

図1 欲しい時に欲しいデザインの部材を調達する基盤を構築

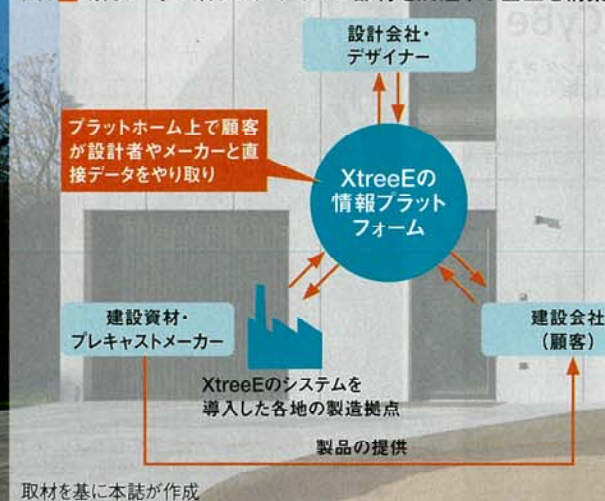


写真2 フランス南部の都市エクス・アン・プロバンスに位置する中学校の運動場に設けた屋根を支える高さ約4mの構造物。エクストリーの3Dプリンターで築造した（写真：下もXTreeE）

ち込む可能性が高く、建材需要の低下が見込まれる。一方で、住宅取得者のニーズや好みの多様化が進み、多品種少量生産への切り替えが進むとみられる。クラボウ化成産品事業部技術統括部の平山貴之部長は、建材分野における3Dプリンター活用の市場が数年のうちに「5億円規模に成長する」と読む。

## CyBe Construction

### 現地製造による合理化で先行

「コンクリート3Dプリンターで建設業を再定義する」。2013年に創業したCyBe Construction（サイビー・コンストラクション）は、同社のホームページでこんな目標を掲げる。コンクリート製品を従来よりも早く、安く提供する技術として

写真3 エクストリーが開発したロボットアーム型の3Dプリンター。モルタルに加える添加材の量をコンピューターで制御し、先端付近の青いボックスの中で混ぜ合わせる



3Dプリンターに着目し、創業からわずか3年で機材と専用のモルタルを販売できるまでに技術を磨き上げた（写真4）。

創業者であり、最高経営責任者（CEO）を務めるベリー・ヘンドリックス氏は、父親が営む建設会社で施工管理をしていた経験を持つ。「1つの建物を造るのに膨大な時間と人手を費やす仕事の進め方に疑問を抱いていた」とヘンドリックス氏は当時

を振り返る。ちょうど、米国で話題になり始めた建設用3Dプリンターに可能性を感じ、独立を決めた。

技術の核となる材料の開発には2年を要した。ヘンドリックス氏が特に重視したのは、モルタルが固まって強度を発揮するまでの時間だ。高速で積層しても自重で崩れないよう、数分以内に硬化を始めることを最低限の条件に据えた。

手当たり次第に世界中の材料メー

XtreeE  
The large-scale 3D  
所在地:フランス ランジス  
創業:2015年

写真1 エクストリーのジャン・ダニエル・クン氏。180cm近い氏の身長を軽く超える高さまでモルタルの積層に成功している（写真:本誌）



## 世界で標準化や標準化の動き

世界中のスタートアップや研究機関で建設用3Dプリンター技術の開発競争が加速している。モルタルを積層する手法が主流ではあるものの、粉末状の材料をバインダーと呼ぶ接着剤で固める方式や、吹き付けコンクリートを応用した方式など、多様な手法が登場している。

新技術が乱立する一方で、セメント系材料の3Dプリンター技術の標準づくりや標準化に向けた動きが出てきた。建設材料に関する国際的な組織、国際材料構造試験研究機関・専門家連合(RILEM)

はセメント系材料を使ったデジタル製造技術に関する専門委員会を立ち上げ、現状の3Dプリンターの分類やその評価方法に関する取りまとめを始めている。

専門委員会の委員を務める英ラフバラ大学のリチャード・バスウェル教授は、「手法や性能を議論するうえで、研究者同士の共通言語を整える必要がある」と説明する。3Dプリンターで造ったセメント系製品の要求性能に関する国際的な指針が出るまでには「最低でも5年かかる」(バスウェル教授)見通した。



写真5 ラフバラ大学のバスウェル教授。「使用する材料の信頼性が現場導入の鍵になる」と語る(写真:本誌)



写真5 サウジアラビアの住宅の壁をプリントの様子。風じんを防ぐために施工現場に仮囲いを設けている(写真: CyBe Construction)

## MX3D

### 金属プリンターで大型構造物

製造業で急速な技術開発が進む金属3Dプリンター。オランダの首都アムステルダムの倉庫街で創業したスタートアップMX3Dは、その技術の大型化にいち早く着目した。

同社の3Dプリンターは、簡単に言えば巨大な「溶接ロボット」だ。高さ約2mのロボットアームの先端には、溶接トーチを備える。市販されている溶接用の金属ワイヤをトーチの先端に供給し、少しずつ継ぎ足して造形していく。既存の産業用機械を組み合わせたので、3Dプリンターロボット単体の価格は4万ユーロ(約490万円)を切るという。

2018年3月には、この3Dプリンターで長さ12.5mの鋼橋を工場内で完成させ、世界中のメディアに報じられた。アムステルダムの運河に架

ける予定の人道橋で、3Dプリンターならではの曲線を多く取り入れたデザインが特徴だ。総重量約4.5tの鋼材を、4台のロボットでおよそ6カ月かけてプリントした(写真6)。

3Dプリンターで前例がない規模の鋼橋を造るうえでは、安全性の確保が課題となった。そこでMX3Dは、橋を造る際に欠かせない構造設計や材料に関する専門知識を取り込むため、社外の協力者を募った。

新技術への期待の大きさを物語るかのように、協力者には著名な企業が名を連ねた。世界有数の産業用ロボットメーカー ABBや世界最大の鉄鋼メーカーであるアルセロール・ミッタル(ルクセンブルク)、オートデスク(米国)、ARUP(英国)などはその代表だ。

巨大企業の関心を得られた結果、資金集めも難なく進んだ。「最終的には資金の約70%を、協力会社やオランダ政府を含むスポンサーから



写真6 完成した橋桁とハイス・ヴァン・デル・ヴェルデンCEO。橋は30人以上が乗っても耐えられる強度があるという(写真:本誌)

調達できた」と、MX3D最高経営責任者(CEO)のハイス・ヴァン・デル・ヴェルデン氏は明かす。

金属3Dプリンターで大型構造物を造る技術は、他産業からの注目も集める。MX3Dが架橋プロジェクトの先に見据えるのは、産業機械や造船などで使う大型の金属部品市場だ。

「同じ部品を大量生産するならば、鋳造の方が効率的だ。だが、特殊な形状の部品をオーダーメイドで造るとなれば、3Dプリンターの方が圧倒的に早い」(ヴァン・デル・ヴェルデン氏)。建設関連でも、既に建築や橋梁のジョイント部の製造などで引き合いがあるという。

写真4 ベリー・ヘンドリックスCEO。3Dプリンターを施工現場に持ち込むうえで、「建設会社で働いた経験が生きていることが多い」と話す(写真:本誌)

カーに問い合わせ、今のモルタルの原型を見つけた。ある会社が小規模な補修工事向けに開発したものの、引き合いが少なく、お蔵入りになりかけていた製品だった。

そこから改良を重ねた現在のモルタルは、積層して3分以内に硬化を始め、およそ24時間で20N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を発揮する。価格は一般的なモルタルの3倍近くと割高だが、「工期を半分以上にすれば、コスト面でのメリットは確保できる」(ヘンドリックス氏)。

16年以降、サイビー・コンストラクションは開発した3Dプリンターとモルタルを大型の建設プロジェクトで活用してきた。18年の秋には、サウジアラビア初の3Dプリンター住宅の建設を担当した。施工現場に3Dプリンターの機材を持ち込み、1

週間で48個の部材のプリント作業を完了。3Dプリンターロボットをクローラーに載せ、設置場所を変えながら住宅の壁面を築いた(写真5)。

3Dプリンターを現場に導入してその場で部材を製作すれば、資材の調達などにかかる時間を大幅に省略できる。しかし、気温や湿度の変化に応じた品質管理が難しいといった理由で、実践している会社はまだ少ない。サイビー・コンストラクションは各国のパートナー企業を通じて技術を世界に広げる展望を描く。

「いずれは同じ機材と材料があれば、世界中のどこでも設計データを共有して同じ構造物を再現できるようになる。我々はロボットを売るのではなく、全く新しい建設プロセスを売っていく」。こう語るヘンドリックス氏の鼻息は荒い。



## WinSun

### 5年で150万棟の住宅を建設

2003年に中国・上海で創業したWinSun（ウインスン）。15年以降、中国・蘇州の5階建て集合住宅やアラブ首長国連邦・ドバイのオフィス棟など、3Dプリンターによる大型建設プロジェクトを立て続けに発表している。その技術の詳細は明らかになっていないものの、世界中から注目を集める（写真7）。

17年3月、サウジアラビア政府は5年間で150万棟の低価格住宅を造る事業での技術協力をウインスンに求め、約1.5億ドル（約160億円）の契約を交わした。同年5月には建設エンジニアリング会社AECOM（エイコム、米国）と建設用3Dプリンターに関する協力を約束。両社は中東を起点に、アフリカやアジアの市場も開拓する展望を描く。

図2 ■ 火星にある資材で住居を造る

**AI SPACEFACTORY**  
所在地:米国 ニューヨーク  
創業:2017年



写真7 ■ 左上のように曲線的な壁を持った建物の施工実績も多い。下はドバイのオフィス棟（写真:WinSun）

## AI SpaceFactory

### 火星に家を建てる

米航空宇宙局（NASA）は2019年5月、3Dプリンターによる火星用の住居建設コンペの優勝者を発表した。60超の他作品を抑えて賞金50万ドル（約5400万円）を勝ち取ったのが、米ニューヨークの設計事務所

AI SpaceFactory（AIスペースファクトリー）の「MARSHA（マーシャ）」だ（図2）。

火星で建設する以上、火星で調達できる材料や再生可能材を使う方が好ましい。AIスペースファクトリーは玄武岩から造った複合材料と植物由来のバイオプラスチックを使用。高さ4.5mで卵型のプロトタイプを、人手をほとんど介さずに約30時間で構築してみせた。

縦長の構造には、ロボットが火星の地表を動き回る範囲を狭くして転倒のリスクを軽減し、施工速度を上げる狙いがあるという。審査中の圧縮試験では、上からの20t以上の荷重に耐えられることを確かめた。同社は火星向けに開発した技術を応用し、地球上でも再生可能材を使った建物の建設に乗り出すと発表している。

「MARSHA」の建設イメージ。人手を介さず、火星で調達できる材料を使って建設することを想定した。窓もロボットではめ込む（資料:AI SpaceFactory）

# 総覧!建設3Dプリンター業界地図

建設会社	建設資材メーカー	スタートアップ	建設エンジニアリング・コンサルタント会社	ロボット・機械メーカー	ソフトウェア会社	大学・研究機関	その他
<b>heijmans</b> ヘイマンス (オランダ)	<b>AccorMittal</b> アルセロール・ミッタル (ルクセンブルク)	<b>MX3D</b> MX3D (オランダ)	<b>ARUP</b> アラップ (英国)	<b>Lenovo</b> レノボ (中国)	<b>AUTODESK</b> オートデスク (米国)	アムステルダム先進 メトロポリタン ソリューション研 究所 (オランダ)	エア・リキード (フランス)  プリモベント (オランダ)
MX3Dが主導する鋼橋架設プロジェクト							
<b>SKANSKA</b> スカンスカ (スウェーデン)	<b>TARMAC</b> タルマック (英国)		<b>Foster + Partners</b> フォスター・アン ド・パートナーズ (英国)	<b>ABB</b> ABB (スイス)		ラフバラー大学 (英国)  製造技術 センター (英国)	
<b>シーカ</b> (スイス)	世界三大建機展の1つ、「インターマッ パリ」で高速プリント技術が2018年のイ ノベーションアワードを受賞		<b>BURKHARDT ENGINEERING</b> ビューロ・ハッポ ルド・エンジニア リング (英国)			ラフバラー大学率いる研究開発パートナー	
<b>VINCI</b> バンシ (フランス)	<b>POINT.P</b> ポント・ピー (フランス)	<b>XtreeE</b> エクストリー (フランス)		<b>ABB</b> ABB (スイス)	<b>ダッソー・シス テムズ</b> (フランス)	国立土木学校 (フランス)  建築化学技術 センター (フランス)	
	<b>ラファージュ ホルシム</b> (スイス)					エクストリーのパートナー	
<b>ブイグ</b> (フランス)	フランス・ナント市内での住宅建設プロジェクト					建築化学技術セ ンター (フランス)	ナント市住宅公 社 (フランス)
<b>カーター・マイ ヤー</b> (フランス)	<b>ラファージュ ホルシム</b> (スイス)	2018年3月にフランス 初の3Dプリンター製 住宅「Yhova」を建設		<b>BA</b> BAシステムズ (フランス)		ナント大学 (フランス)	ウェスト・ヴァ ロリゼーション (フランス)
						国立科学研究セ ンター (フランス)	預金供託金庫 (フランス)
<b>VIAS</b> ビアス・イ・コン ストラクシオネス (スペイン)	<b>ラファージュ ホルシム</b> (スイス)	建設会社を中心 とする「3dcons」 コンソーシアム	<b>ATA</b> アタナ (スペイン)	<b>PROINGESA</b> プロインゲサ (スペイン)	<b>サイブ・ソフト ウェア</b> (スペイン)	<b>チューリッヒ工 科大学</b> (スイス)	2014年に建設の デジタル化に関する 専門の国立研究セ ンター「dlab」を設立
<b>GEOCISA</b> ジオチサ (スペイン)	<b>プラコ・サンゴバ ン</b> (スペイン)		<b>ウィッティーン・ ボス</b> (オランダ)	オランダ・アイトホーフェン市の 住宅建設プロジェクト		アイトホーフェ ン工科大学 (オランダ)	
				一般の人に賃貸す る住宅5棟を3Dプリ ンターで建設する計画			
<b>VAN WILNEN</b> バン・ビーネン (オランダ)	<b>サンゴバン・ウィ バー・ビーミックス</b> (オランダ)		<b>ウインスン</b> (中国)	<b>AECOM</b> エイコム (米国)			佳源国際 (中国)
<b>bam</b> バム (オランダ)	<b>BEKAERT</b> ベカルト (ベルギー)			<b>BIAD</b> 北京市建築設 計研究院 (中国)		ウインスンのパートナ	
<b>bam</b> バム (オランダ)	<b>MCバウヘ ーミ</b> (ドイツ)			<b>プツマイスター</b> (ドイツ)		ドレスデン工科 大学 (ドイツ)	連邦環境・自然 保護・原子力安 全省 (ドイツ)
	<b>OPTERRA</b> オプトラ (ドイツ)					連邦都市研 究所 (ドイツ)	
ドレスデン工科大学率いる「CONPrint3D」コンソーシアム							
日本国内							
<b>大成建設</b>	<b>太平洋セメント</b>		<b>CyBe</b> サイビーコン ストラクション (オランダ)			米陸軍技術者 研究開発セン ター (米国)	
<b>大林組</b>	<b>Denka</b> デンカ						
<b>前田建設</b>	<b>ATZAWA</b> 会澤高圧コン クリート						
			機材・材料販売				
2019年6月時点で入手可能だった報道発表資料や取材を基に作成。青線は研究開発の主な提 関係、オレンジの線は特定のプロジェクトにおける主な協業関係を表す。プロジェクトに参加してい 組織のうち、それぞれの建設場所となる自治体名称は省いた							

2019年6月時点で入手可能な報道発表資料や取材を基に作成。青線は研究開発の主な提携関係、オレンジの線は特定のプロジェクトにおける主な協業関係を表す。プロジェクトに参加している組織のうち、それぞれの建設場所となる自治体名称は省いた





## 自動化や新構造を見据えて始動

海外で3Dプリンティング技術を活用した実構造物の建設が進むなか、日本国内の動きはまだ鈍い。法規制をはじめとする壁が立ちはだかるからだ。それでも、将来を見越して建設用の3Dプリンターの研究開発を進めているプレーヤーは存在する。国内の動きを追った。

## 大林組

## 試験施工でミニ・アーチ橋を製作

大林組は、セメント系材料用の3Dプリンター技術を開発。このプリンターで幅50cm、奥行き25cm、高さ50cmの円弧型ブロック部材を製作し、これを合計6つ組み上げて、2017年にアーチ橋を試作した(写真1)。アーチ橋を選んだのは、セメント系材料が弱点とする引張力の負担を考慮せずに済むからだ。

開発したプリンターでは、安川電機製のロボットアームを用いた。汎用性の高いロボットアームを使えば、3Dプリンティング以外の作業

にも転用しやすくなる。

技術の原理は、熱可塑性樹脂を押し出して積層・造形する3Dプリンターと変わらない。造形物の3次元データを積層ピッチごとの断面にスライスし、各断面データを下から1層ずつ積み上げた。冒頭のプロック部材1個は、1層を約20秒、約15分で完成させている(写真2)。

「当初は材料の硬化速度が遅く、すぐに崩れて10cmも積層できなかった。逆に、速過ぎると材料がノズル内で固まり、閉塞した」。大林組技術本部技術研究所生産技術研究部の金子智弥主席技師は、開発着手当時の状況をこう打ち明ける。

こうした課題に、同社は材料設計

の最適化と吐出機構の調整で対応した。材料設計では、化学メーカーのデンカと組んだ。両社は、圧送時の流動性と吐出後の形状保持性を両立させた性質を持つ材料として、道路上面の増し厚工事などで利用されている急硬コンクリートに着目。これに似た性質のモルタル材料を開発した。開発した材料の圧縮強度は、材齢28日で60.6N/mm<sup>2</sup>だった。

一方、吐出機構は吐出する材料の量や幅、厚さなどが不均一にならないように、吐出速度やノズルの移動速度が一定になるように調整した。この他、ノズルの移動経路は「一筆書き」のルートとした。吐出した材料同士が交差すると厚みが変わり、



写真1 ■ 大林組技術研究所のピオトープに設置されたモルタルのアーチ橋。3Dプリンターで打ち出して製作した。長さ約1.8m、幅約1m、高さ約50cm。圧縮強度は材齢28日で60.6N/mm<sup>2</sup>、曲げ強度は同3.6N/mm<sup>2</sup>。上面に見える橋軸方向の筋は、モルタルを積層する際にできた積層痕だ(写真:奥野 慶四郎)



写真2 ■ 3Dプリンターによるブロック部材の積層造形。一筆書きで層厚10mmの部材断面を下層から上層に向かってプリントしていく。1層のプリントに要する時間は約20秒、合計50層を15分程度で打ち出す(写真:大林組)

A yellow robotic arm is enclosed within a yellow safety cage. A black and white striped barrier is positioned in front of the cage, and a yellow cone is placed on the floor in front of the cage. A sign is visible on the right side of the cage.

写真3 ■ 室内用プリンターでの研究成果をベースに製作した実施工用コンクリート3Dプリンター。現場への導入を想定してロボットアーム型を採用した。造形範囲は幅2m×長さ2m×高さ3m  
(写真:奥野 慶四郎)

出来形の精度が低下するからだ。

大手建設会社のなかでも、先んじて3Dプリンターで構造物を造った同社では、現在も3Dプリンティングの研究を続けている。同社が建設用3Dプリンターで目指す有力な技術の1つは、バイオミメティクスなど形態は最適化されていても、型枠製作が困難な構造との融合だ。

前田建設工業

## 完全自動施工を担うツールに

前田建設工業もセメント系材料用の3Dプリンターとそのための専用材料を開発。19年1月にその内容を発表した。同社が建設用3Dプリンターの開発を本格化させたのは16年ごろだ。将来の労働力不足を踏まえ、省力化や無人化を実現するキーテクノロジーとして着目した。

同社はまず、小型の3Dプリン



写真4 ■ 造形範囲を拡大させた実施工用の3Dプリンターによる造形例。前田建設工業のICI総合センターの開閉式で、高さ約2.8mの喫煙所を製作するデモンストレーションを行った。写真はその一部。中空構造の内部には補強用の鉄筋を挿入した。断面形状はイニシャルの「ICI」をイメージした(写真:前田建設工業)

ターを開発。造形試験を繰り返して、圧送時の流動性及印刷後の速乾性を併せ持つモルタル系材料を生み出した。開発した材料では、壁状や円錐状、幾何学模様など、様々な形を造形できることを確認済みだ。

その後、18年12月に実施工用のロボットアームを使った3Dプリンターを開発し、造形範囲を幅2m×長さ2m×高さ3mに広げた(写真3)。ファナック製のロボットアームをベースにしたシステムだ。19年2月に同社が開いたICI総合センター ICIラボの開所式で、高さ2.8mの喫煙所のハウジングを造形した(写真4)。1時間に1mの高さを積層できるスピードだった。

同社ICI総合センター ICIラボの  
梶田秀幸スペシャリストは、次のよ  
うに指摘する。「引張強度や曲げ強  
度を出すのが難しい。鉄筋に代わる  
材料を使った技術が必要になる」。  
建築基準法に適合させた壁や柱とし

て使うには、この課題の解決が必要だ。この点は、他に国内で開発が進むセメント系材料用の3Dプリンターが抱える共通の課題といえる。

同社は、3次元データを読み込んだ複数の3Dプリンターが、それぞれ自動で構造物を構築する施工現場を将来像として描く。AI(人工知能)や資材搬送ロボットなどと組み合わせ、現場全体を完全に自動化させる未来も念頭に置いている。

## 大成建設

## 特殊ノズルで不連続な造形を実現

大成建設は、アクティオ(東京都中央区)、太平洋セメント、有明工業高等専門学校の3者と共同で、門型の建設用3Dプリンター「T-3DP」を開発した(写真5)。18年12月に発表している。

最速毎秒50cmのスピードでモル



タルを押し出して積層する。最大で幅1.7m、長さ2m、高さ1.5mまでの建設部材を製作できる。

搭載された技術の最大の特徴は、形状や機構、制御システムなどを工夫した特殊なノズルだ。材料の供給方法に依存せず、吐出量を一定に保てるようにした。その結果、圧送時に「脈動」が伴うスクイズポンプとの組み合わせも可能になった。

開発を担当した大成建設技術センター材工研究室の木ノ村幸士プロジェクトチームリーダーは、「現場での展開を想定して開発を進めた成果だ」と強調する。

ノズル先端の機構を工夫して、吐出を止めた際に材料が垂れないようにもしている。これによって、不連続区間でもノズルを自由に移動できるようになった。一筆書き以外の形状や、形状が異なる複数の部材の同時平行製作が可能になる(図1)。

この技術によって、トポロジー最適化などで設計した複雑な形状を採用しやすくしている。

### 会澤高圧コンクリート 3Dプリンターでインドにトイレ

会澤高圧コンクリート(北海道苫小牧市)は、オランダのCyBe Construction(サイビー・コンストラクション)との技術交流を基に、3Dプリンターの活用に取り出す。

同社は18年9月、ABB(スイス)の大型ロボットアームとサイビー・コンストラクションのコントローラーを組み合わせた、セメント系材料用の大型3Dプリンターを導入(写真6)。これまで、様々な造形テストを行い、性能の見極めや課題の洗い出しを進めてきた。今後は、実現場への適用段階に移るとい

同社の会澤祥弘社長によれば、計画しているのは、インドを舞台としたバイオトイレの普及事業への活用だ。同国はトイレ事情が悪く、衛生問題が深刻化している。そこで、NGO(非政府組織)に協力する形で、下水施設が不要なバイオトイレの設置を提案した。3Dプリンターはハウジングの建設を担う。

「社会貢献を通じて、3Dプリンターの有用性を発信していきたい」と、会澤社長は抱負を語る。

### 竹中工務店 意匠性を追求した型枠を製造

竹中工務店は、3Dプリンターを主に樹脂型枠の製作に利用してきた。端緒は、2014年に慶応義塾大学環境情報学部の中田浩也教授と共同で開発した「ArchiFAB」だ。

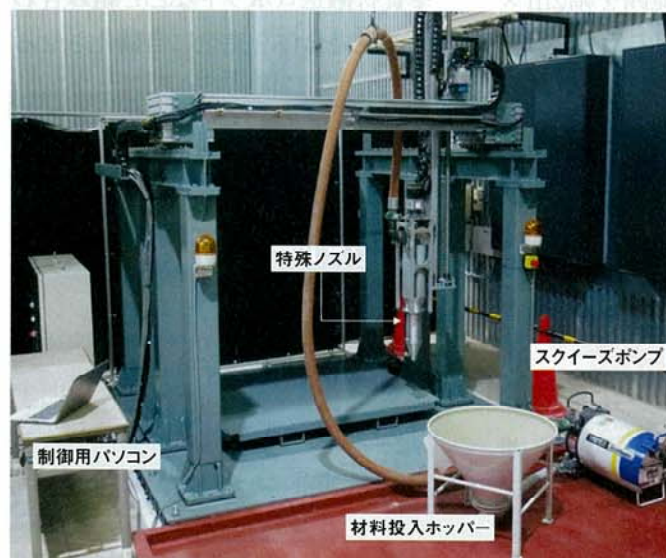
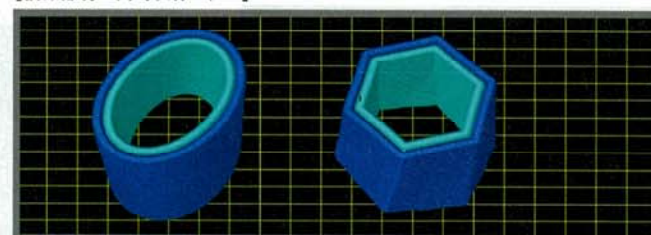


写真5 大成建設が開発した建設用3Dプリンター「T-3DP」。モルタルの吐出量を常に一定に保つ特殊ノズルの開発によって、「脈動」を伴う圧送ポンプとの組み合わせも可能だ。製作可能な最大寸法は、幅1.7m×長さ2.0m×高さ1.5m(写真:大成建設)

図1 複数の部材の同時製作が可能

【複数の部材の同時製作モデル】



【不連続区間の移動】



モルタルがノズル先端から垂れないような機構面の工夫を取り入れたので、不連続区間の移動が可能だ。形状が異なる複数の部材を同時に製作できる(写真・資料:大成建設)

ArchiFABは樹脂を押し出して積層造形する3Dプリンターだ。同社はこれを用いて、鉄筋コンクリート型枠を製作している。樹脂型枠が細かな凹凸や曲面など複雑な形状に対応できる強みを生かし、コンクリート打設後も型枠を外装材として利用するアイデアも示した。

同社でArchiFABによる型枠製作が劇的に広がったわけではないが、高い意匠性を求められる用途への適用例は存在する。

例えば、富岡製糸場の改修工事。同工事では、象徴的な赤レンガの表面の模様を3次元計測してデータ化し、そのデータを基にArchiFABでレンガ模様の型枠を製作した(図2)。その後、型枠にコンクリートを流し込み、館内の椅子の表面にレンガ模様を転写、装飾を施している。

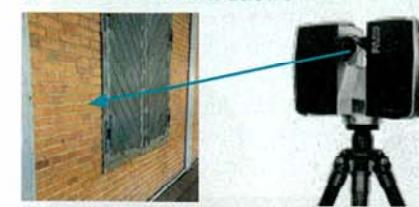


写真6 会澤高圧コンクリートが導入した3Dプリンター。ロボットアームはABB製のサイビー・コンストラクション製のコントローラーで制御されている。造形テストを繰り返して、3Dプリンターの可能性や課題を探っている。履帯付きで自走できる。横2.5m×奥行き1.5m×高さ3mまでの造形が可能だ(写真:奥野 慶四郎)

図2 外壁レンガの風合いを展示品に転写

#### (1) データ作成

##### 3次元計測



##### レーザー計測



##### 3Dプリンター用ソリッドデータ

精緻な形状データ(点群データ)から3Dプリンター用データを作成

#### (2) 型枠出力

##### ArchiFABでプリント



##### 3Dプリント



ArchiFABを用いてレンガ模様の型枠を製作

#### (3) 椅子の作成

##### コンクリート打設、仕上げ



##### 型枠にコンクリートを打設



コンクリートを打設し、レンガ模様の椅子として復元

富岡製糸場の保存改修工事で、外壁の赤レンガの形状をArchiFABで再現し、館内の椅子にあしらった(資料:竹中工務店、協力:富岡市・富岡製糸場)



# 設計思想を抜本的に変え現状打開

建設用3Dプリンターの実践的な活用で日本が遅れた理由は、制度面の障壁だけではなさそうだ。慣習にとらわれない柔軟な姿勢が、技術の可能性を押し広げる。

3Dプリンターの活用で先行する製造業で、日本企業の技術力は高い評価を得ている。にもかかわらず、建設用3Dプリンターの開発で海外に遅れを取ったのはなぜか。

その理由を、国内の建設業関係者の多くは、「耐震性能の要求水準が高いから」と話す。海外で事例の多い簡易住宅の製造に挑戦しようにも、

日本では建築基準法の厳しい制限を受ける。土木でも、適切な補強方法や性能照査の手法が確立しない限りは展開が難しいとの見方が大半だ。

さらに、「生産性の向上にそれほど寄与しないのではないか」と懐疑的な声も上がる。現状の3Dプリンター技術では、鉄筋を挿入したり、乾燥防止の薬剤を表面に塗ったりするのに人手を要する。完全に自動化するには細々とした周辺作業の機械化も不可欠になるため、開発のロードマップを描きにくい実情もある。

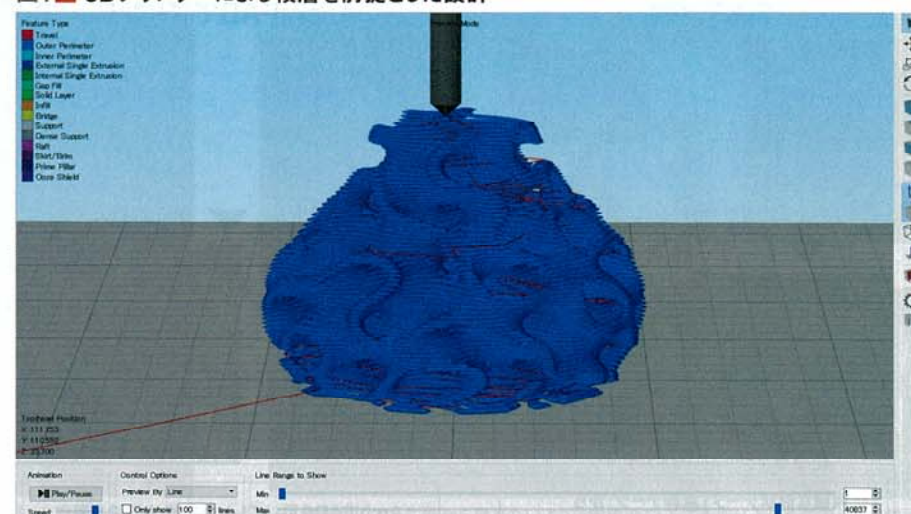
だが、東京大学大学院工学系研究科の石田哲也教授は、「3Dプリンターは人の作業を代替するだけの技

術ではない」と指摘する。

3Dプリンターを使えば、「維持管理しやすい桁断面」や「周辺の生態系を邪魔しない橋梁」といった新しい機能を持った構造物を実現できるかもしれない。さらに、ジオポリマーや複合材料など、新材料の活用に着目した技術開発も一部で始まっている。

従来の慣習を突き破らなければ、新しい価値は生み出せない。デジタル生産技術を専門とする慶応義塾大学環境情報学部の田中浩也教授は、「3Dプリンターを使いこなすには、設計思想から抜本的に変える必要がある」と強調する(図1)。

図1 ■ 3Dプリンターによる積層を前提とした設計



慶応義塾大学の田中教授は材料を点や線の形状で積み重ねて設計する専用のソフトウェアプラグインを開発し、公開している(資料:慶応義塾大学田中浩也研究室)

## 省人化だけで終わらせるな

3Dプリンターの技術はロボティクスや材料、建設など、複数の分野にまたがる。海外では異分野の研究者や企業が連携して先進的な技術に取り組み、それに政府が出資するケースが多い。一方、日本は研究予算の規模や政府からの支援が圧倒的に少ない。厳しい環境だが、国内でも3Dプリンターに関して分野横断で議論を進める必要性を感じている。

3Dプリンティングが生産性向上やデジタル化に貢献する技術であるのは間違いない。人手を介さなくても、一定の品質のものを高い再現度で手に入れられるようになることへの期待は大きい。

しかし、国内で技術開発に取り組む建設会社の動向を見ていると、今後5～10年の目標設定に難航している状況だ。建築基準法の縛りが強く、求められ

る品質の水準も高いので、ニーズを見極めにくいのだろう。

だが、革新的な技術が生まれる時は、必ずしもニーズが先行するわけではない。例えば、米アップルの「iPhone」は消費者のニーズに応じてできたものではなく、ニーズを新たに生み出して大ヒット商品になったと言われる。建設用3Dプリンターも、今までにない構造の可能性を切り開くなど、新たな価値を提供するポテンシャルがある。人による作業の置き換えだけではもったいない。

まずは、課題解決型の技術開発に切り替える必要があるだろう。「できそうだから」という理由で技術開発を進め、後から応用先を探すのでは発展しない。世の中にある課題を先に見つけ、技術の難題を打破していく姿勢が重要だ。(談)



東京大学大学院工学系研究科教授  
石田 哲也氏

いしだ・てつや。1999年に東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻で博士課程を修了。2013年から現職。19年より日本コンクリート工学会で3Dプリンティングの活用に関する委員会の委員長を務める

## 設計思想を抜本的に変え、自然との融合を

慶応義塾大学環境情報学部教授

田中 浩也氏

たなか・ひろや。2003年に東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻で博士課程を修了。12年に慶応義塾大学SFC研究所「ソーシャルファブリケーションラボ」を設立し、代表に就任。16年から現職



3Dプリンター技術を発展させるには、設計の発想を根本から変える必要がある。特に、今まで触れられなかった内部構造をどのように設計していくかがポイントになるだろう。

建築事務所などが一般的に使っている従来のCADソフトは、基本的にはサーフェス(面)の組み合わせで構造物を形作る。一方、3Dプリンターは材料を「点」や「線」の形で重ねて造形していくという点で大きく異なる。そのため、従来のCADで描いた設計では、思うように造形できないケースがある。

3Dプリンターで造れるデザインの幅を広げるには、積層で造ることを前提に設計を組み立てる必要がある。こうしたデザインの手法はDfAM(Design for Additive Manufacturingの略)と呼ば

れる。DfAMに対応した設計や構造計算のソフトウェアを整備していくと同時に、新しい発想で設計できる人材の育成も進めていかなければならない。

現在、研究室では3Dプリンターで造れるデザインの体系化を進めている。内部構造を含むデザインの最適化を極めると、自然界の造形に近づく傾向があると分かってきた。土木や建築においても、周囲の環境や生態系と親和性の高いデザインなどが、構造物の新たな価値として認められる可能性があるのではないかと。

さらに、3Dプリンターは建設業における複合材料の可能性も広げるだろう。繊維とコンクリートなど、既に実用化されている材料の組み合わせでも、それぞれの最適な配置を設計段階で考えられるようになったら面白い。(談)