

建設3Dプリンティング

3D construction printing

寺西 浩司*1

1. はじめに

近年、建設3Dプリンティング技術は急速な発展を遂げており、海外では、既に、戸建て住宅をはじめとして、多くの建築物にこの技術が供されている。我が国においても、昨今、この技術に対する関心が急激に高まり、技術開発と実用化のための検討が一気に進みつつある。

建設3Dプリンティングは、型枠を用いた従来のコンクリート工事とは一線を画する卓越した長所を潜在的に有している。すなわち、①自由曲面を含む複雑な形状を、一品生産で比較的簡単に製作できるため、建築物のデザイン・造作の自由度が飛躍的に向上する。②建設技能者の大幅な減少が見込まれる中、省人化のための有効な手段となる。また、24時間連続稼働が可能であり、短期間での建築物の施工を実現できる。③BIMで設計された建築物のデジタルデータを直接3Dプリンターに引き渡して施工できるため、DXを推進するためのコアテクノロジーとなり得る。

本稿では、日本建築学会「デジタルファブリケーションによるRC工事研究小委員会」の調査結果なども交えながら、建設3Dプリンティングの現状と今後の展望について概説する。

2. 建設3Dプリンティングの概要

3Dプリンティングは、CNCやレーザーカッターなどと同様に、「デジタルデータをもとに創造物を制作する技術」と定義されるデジタルファブリケーション技術の一つに位置付けられる。また、製品の製造方法は、一般に、図-1に示す3種類に分類され、3Dプリンティングは、その中の付加製造 (Additive manufacturing、

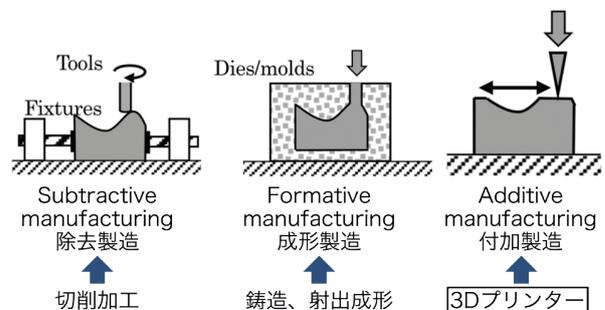


図-1 製造方法の種類¹⁾に追記

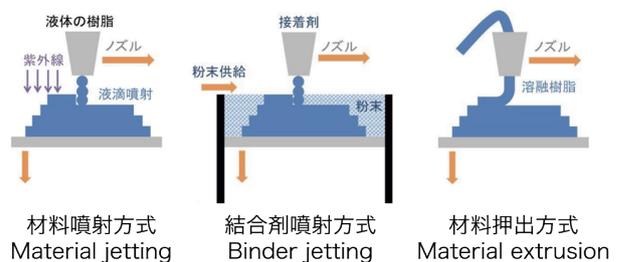


図-2 建設用3Dプリンターの造形方式²⁾に追記

AM)に該当する。付加製造では、製造物の内側を含む全ての部分を精細に加工可能であり、この点が他の製造方法にはない大きな利点といえる。

3Dプリンターに関しては、ASTM F2792に7種類の造形方式が規定されているが、建設用の場合は、図-2に示すような、材料噴射方式 (Material jetting)、結合剤噴射方式 (Binder jetting)、材料押出方式 (Material extrusion)の3種類が主に採用されている。ただし、現在主流となっている方式は、圧倒的に、ノズルからモルタルを押し出して積層する材料押出方式である。

なお、建設用3Dプリンターには、図-3に示すような、

*1 TERANISHI Kohji : 名城大学 理工学部建築学科 教授 博士 (工学)

ロボットアームとガントリーの2種類の方式があり、どちらも広く用いられている。一般に、ロボットアームの方式の方が造形の自由度が大きく、造形物のサイズの制約が少ない。また、移動や設置に手間がかからない。ただし、コスト面ではガントリー方式の方が有利とされている。

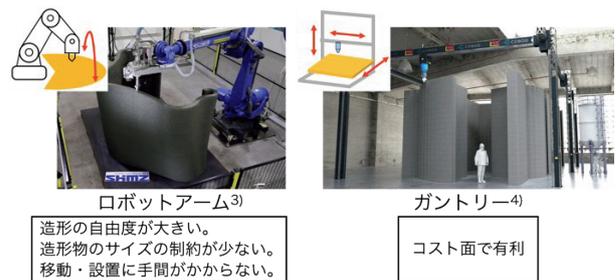


図-3 建設用3Dプリンターの方式

3. 建設3Dプリンティングの現状

3.1 研究開発の動向

図-4に、Web of Scienceデータベースから取得したコンクリート3Dプリンティング関連の論文発表数の推移を示す⁵⁾。論文発表数は2016年頃を境に加速的に増加しており、このことから、建設3Dプリンティングは、注目されてからまだ10年足らずの新しい技術であることがわかる。しかし、その後、研究開発は我が国も含めて本格化し、裾野が広がり続けている。

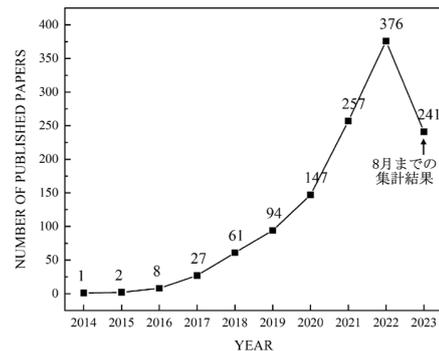


図-4 コンクリート3Dプリンティング関連の論文発表数⁵⁾

3.2 研究委員会

2018年に、Digital Concreteという建設3Dプリンティングをテーマとした国際会議がはじめて開催された。我が国においても、この頃から、図-5に示すように、建設3Dプリンティングを対象とした研究委員会が各学会で組織され始めた。3Dプリンティングの研究委員会は、まず、日本コンクリート工学会において、FS委員会を経て、2019年度にはじめて組織された。



- ①3Dプリンティングのコンクリート構造物への適用に関するFS委員会
- ②3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会
- ③デジタルファブリケーションによるRC工事研究小委員会 (3DプリンターWG)
- ④建設3Dプリンティング建築物の生産・施工研究小委員会
- ⑤3Dプリント 建築特別研究委員会
- ⑥3Dプリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会
- ⑦建設用3Dプリンターによる埋設型枠設計・施工に関する研究小委員会

図-5 建設3Dプリンティング関連の研究委員会

その後、2021年度に、日本建築学会に「デジタルファブリケーションによるRC工事研究小委員会」が設置され、その傘下の3DプリンターWGが4年間にわたって建設3Dプリンティングの調査研究を行った。この活動は、2025年度から、ガイドライン等の作成を検討する後継の委員会に引き継がれた。日本建築学会には、このほかに、2024年度から、材料、構造、建築計画、情報システムなどの分野横断的な委員会である「3Dプリント建築特別研究委員会」が設置されている。



図-6 市庁舎管理棟 (ドバイ)⁶⁾

土木学会においても、2021年度に「3Dプリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会」が設置され、2024年8月からは、設計・施工指針(案)の刊行を目的とした「建設用3Dプリンターによる埋設型枠設計・施工に関する研究小委員会」が活動している。

のである。建設にあたっては、3Dプリンターをクレーンで移動させながら、オンサイトで1階および2階の壁を造形している。

3.3 施工実績

3.3.1 海外における実績

海外では、既に多数の3Dプリント建築物が建設されている。一例として、2019年にドバイに建設された市庁舎管理棟⁶⁾を図-6に示す。これは、3Dプリンティングで建設された建築物としては、現時点で世界最大のも

このような中規模の建築物が3Dプリンティングで建設された実績もあるが、建築分野における3Dプリンティングの主な用途は圧倒的に戸建て住宅である。例えば、スタートアップ企業のICONは、アメリカのテキサス州に100棟規模の3Dプリント戸建て住宅を建設し、様々

図-7 ICONによる戸建て分譲住宅(アメリカ)⁷⁾図-8 Project Milestone(オランダ)⁸⁾図-9 シェル型ベンチ⁹⁾図-10 3Dプリンター実証棟「3dpod」¹⁰⁾

なタイプやグレードの本格的な住宅を分譲している⁷⁾。なお、建設にあたっては、図-7に示すように、ガントリー式の3Dプリンターを用いて現場施工している。

また、オランダでは、アイントホーフェン市やアイントホーフェン工科大学を中心とした6者によるProject Milestone⁸⁾が進行中である、図-8に示すような、1棟ごとに異なる有機的なデザインを有する戸建て住宅の建設が計画され、一部の住宅は既に完成している。なお、このプロジェクトでは、プレキャスト工法が採用されている。建設3Dプリンティングにあたって現場施工とプレキャストのいずれの工法を選択するかは各企業の考え方によるところが大きい。

3.3.2 国内における実績

大林組は2019年に、図-9に示すような、曲面のみで構成されたシェル型ベンチを3Dプリンティングで製作した⁹⁾(既に解体済み)。このベンチは、奥行方向に12分割したピースを3Dプリンティングで製作し、プレス

図-11 広場状デッキの大型柱³⁾図-12 壁状柱³⁾図-13 駐車場屋根構造物³⁾図-14 グランピング施設¹¹⁾

トレスにより一体化させたものである。また、同社は2022年に、図-10に示す3Dプリンター実証棟「3dpod」を建築物として建設している。

清水建設は2021年に、図-11に示すような、「豊洲MiChiの駅」の広場状デッキを支える自由曲面をもつ大型柱を3Dプリンティングで製作した³⁾。また、図-12に示すようなガントリー型の大型3Dプリンターを開発し、2022年には、自社研修施設のための長さ20mの壁状柱を製作した³⁾。さらに、2023年には、図-13に示す駐車場の屋根構造物の一部を3Dプリンティングで製作している³⁾。

ゼネコン以外では、例えば、會澤高圧コンクリートが、図-14に示すグランピング施設などを3Dプリンティングで製作している¹¹⁾。

3.4 3Dプリンティング企業

国内では、主に大手ゼネコンが3Dプリンティングの普及を牽引しているが、海外では、ここ10年ほどの間に次々と設立された建設3Dプリンティング専門のスタートアップ企業がその任を担っている。具体的には、図-15に示すように、デンマークのCOBOD International、フランスのXtreeE、オランダのCyBe ConstructionやVertico、アメリカのICONやApis Corなどがその代表的な企業といえる。一方、我が国には、Polyuseやセレ

ンデックスなどといったスタートアップ企業が存在している。

4. 建設3Dプリンティングに関する今後の展望

4.1 3Dプリンティングの周辺技術

建設3Dプリンティングは、今後の建築そのものの在り方にパラダイムシフトをもたらす可能性を秘めた技術として期待されている。しかし、3Dプリンター装置などのハードささえあれば、今後、この技術が順調に普及していくとも考えにくい。図-16に示すような、周辺のソフト・ハード技術が全体的に底上げされ、それらが3Dプリンティングと一体になることで、はじめて3Dプリンティングが建築工事に広く浸透していくものと考えられる。以下に、図-16中に示すそれぞれの項目について詳述する。

4.2 3Dプリンティング技術

4.2.1 プリンティング材料

3Dプリンティング用モルタルには、図-17に示すように、押し出し性と積層性という本来トレードオフの関係にある2つの性能が同時に要求される。そのため、現状では、これらの両立を目的とし、チクソトロピー性を付与した低水粉体比のモルタルが使用されることが多い。また、急結剤をノズル部分でモルタルに添加して積層性をさらに向上させる方法が採用されるケースもある。

なお、モルタルは、使用する3Dプリンターの仕様に合わせて調整される必要があるため、現在は、3Dプリンターメーカーが専用のプレミックスモルタルを供給するケースが多く、その成分や調合などは公開されていない。今後は、3Dプリンティング用モルタルの調合設計法が体系的に整備されることが期待される。

4.2.2 引張補強

図-10~12に示した3Dプリンティングの適用例では、いずれの場合も、打込み型枠の部分のみを3Dプリンティングで製作し、その後、型枠内部に鉄筋をセットし、コンクリートを充填して部材として完成させている。3Dプリンティングでモルタルの積層と同時に鉄筋を配置する実用的な手段はまだ見出されていない。そのため、現時点では、3Dプリンティングの構造体への現実的な適用方法はこのような形態に留まらざるを得ない。3.2に上述した土木学会の指針(案)も打込み型枠(埋設型枠)への適用を想定したものとなっている。フル3Dプリンティングで構造体を製作する場合はこの点が最大の障壁となるため、今後、効果的な引張補強方法の実現が待たれるところである。

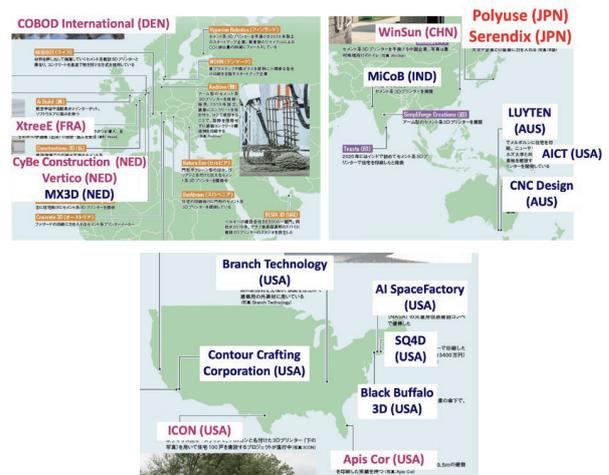


図-15 国内外の3Dプリンティング企業¹²⁾に追記



図-16 3Dプリンティングの普及に必要な周辺技術・環境¹³⁾

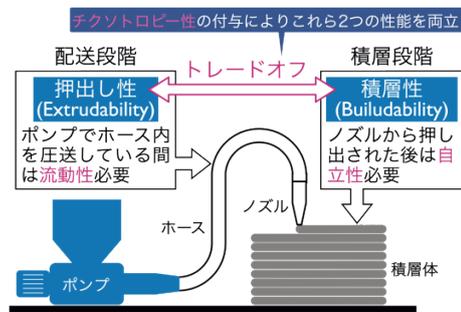


図-17 3Dプリンティングモルタルに要求される性能

4.3 設計技術

4.3.1 意匠設計

近年の建築物は、できるだけ安価かつ手軽に建設するために、マスプロダクションの手法を導入し、本質的に画一化の方向に進化してきた。また、設計もその制約に縛られてきた。その点、3Dプリンティングは、マスカスタマイゼーションのための手段であり、設計者や発注者が求める形状の建築物を、必要な時に必要な分だけ生産できる。

図-18に、スイスで3Dプリンティングにより建設中のTOR ALVA (白い塔)¹⁴⁾を示す。3Dプリンティングを前提とすることで、建築デザインの自由度が飛躍的に

拡大し、このような自由曲面のみで構成される建築物の構築も可能になる。このことは、特に作品建築と呼ばれる分野において、建築家に新たな可能性を提供することになるものと期待される。

なお、建築物は、図-19に示すように、これまで面を組み合わせる空間を構成するアプローチで設計されてきた。それに対し、3Dプリンティングを前提とした設計では、線を重ね合わせて自由曲面を含む空間を形成することで、そのメリットを活かすことができる。したがって、3Dプリント建築に対しては、従来と異なる設計思想が設計者に求められることになる。

4.3.2 構造設計

(1) 3Dプリンティングのための構造設計法

フル3Dプリント建築物の場合、引張補強に課題があることを踏まえると、少なくとも現時点では、鉄筋コンクリート造に準じた構造設計は困難と考えられる。また、3Dプリンティングの特徴を活かした自由な形状のデザインとした場合、無駄のない設計とするためにはFEM解析が欠かせない。これらの点を踏まえると、3Dプリンティングの普及に際しては、その長所・短所を考慮した構造設計法が必要になるものと考えられる。

(2) コンピュータショナルデザイン

指定された設計条件に基づいて形状を一から自動生成する「ジェネレーティブデザイン」や、基になる3D形状から不要な部分を削ぎ落とし、強度と軽量化を両立しながら自動で形状を生成する「トポロジー最適化」などの設計技術が開発されている。これらのコンピュータショナルデザインの手法を活用し、複雑で有機的な形状の建築物を設計する試みが以前からなされてきた。しかし、その建設は、従来の施工方法では多大な費用と労力を要するため、現実的ではなかった。しかし、3Dプリンティングを活用することで、コンピュータショナルデザインによる建築物の建設が可能となる。なお、図-9に示したシェル型ベンチにおいても、トポロジー最適化を適用し、断面を最適な形状で中空にすることで、軽量化が図られている⁹⁾。

4.4 関連デジタル技術との連携

現在、BIMの普及が着実に進んでおり、図-20に示す建築プロセスにおいて、設計から施工計画の段階まではデジタル化の目処が立ちつつある。しかし、現状では、工事の段階はマンパワーに依存しているため、この時点で、デジタルの設計情報をアナログに変換する必要が生じる。3DプリンティングをBIMに接続できれば、建築プロセス全体がシームレスにデジタル化され、そのメ



図-18 TOR ALVA (スイス)¹⁴⁾



図-19 3Dプリンティングに適した設計



図-20 BIMへの3Dプリンティングの接続

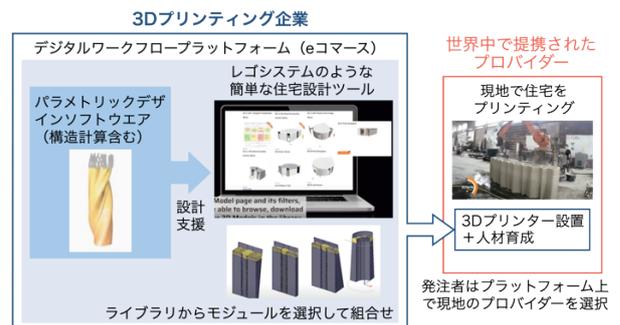


図-21 3Dプリント住宅販売のビジネスモデル

リットを最大限に活用することが可能となる。

4.5 ビジネスモデル

図-21は、CyBe ConstructionのCEOであるHendriksが紹介した自社の3Dプリント住宅販売のビジネスモデルを筆者が取りまとめたものである。販売はeコマースを基本とし、発注者は、インターネット上のプラットフォームで住宅を注文する。設計は、レゴブロックを積み重ねる感覚で簡単に操作できるツールを用いて行う。その際、ライブラリから基本形状のモジュールを選択し、寸法やプロポーシオンを適宜調整して組み合わせる。また、この設計ツールはパラメトリックデザインにも対応している。このようにして3Dプリンティングの長所を最大限活かして住宅を設計し、その後、世界各地の提携プロバイダーに設置された自社の3Dプリンターによ

り、設計した住宅を建設する。なお、類似のプランのビジネスを構想するスタートアップ企業は他にも多く存在するものと推察される。

4.6 コスト

図-22に、Robert が提示した工事単価と形状の複雑さの関係を示す¹⁵⁾。型枠を用いた従来の工法の場合は、建築物や部材の形状が複雑になるほど工事単価が飛躍的に増大していく。それに対し、3Dプリンティングの場合は、形状が単純であれば相対的に高価となるものの、形状が複雑になっても工事単価はほとんど変わらない。ここで、図中の2つの曲線の交点が損益分岐点にあたり、これより右側の領域では、3Dプリンティングの方がコスト面で有利となる。将来的に、研究開発が進んで3Dプリンティングの工事単価が下がれば、例えば自由曲面をもつシェル構造物のような複雑な形状の建築物を建設する場合に、3Dプリンティングの方がコスト面で優位となる可能性がある。

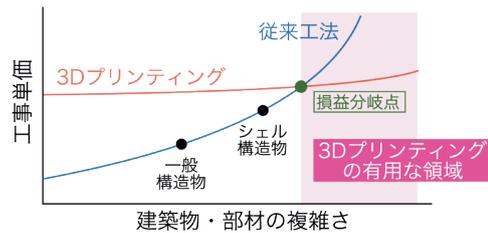


図-22 工事単価と複雑さの関係¹⁵⁾をもとに作成

【対応方針(案)】

- ① 小規模建築物を対象とした仕様基準を新設。
【R6年度:検証実験、基準検討等 R7年度:基準化】 ← 200m²以下の平屋は仕様規定で審査省略
- ② 3Dプリンターや材料毎に、設計方法、施工方法、検査方法等のマニュアル等を策定した上で、大臣による特殊な材料の強度指定を行い、構造計算を可能化。
【R7年度:構造・強度指定に関する基準化】 ← 中・大規模建築は、マニュアル+特殊な材料の強度指定
- ③ 建築物の一部を3Dプリンターで造形する場合の法第20条認定の合理化。(通常部分は確認申請手続きによる)
【R6年度:部分的な評価の考え方等について整理・検討】 ← 20条認定の柔軟な運用
- ④ 材料等の長期的な性状が全て明らかでない場合でも、モニタリング等の措置を条件に法第20条認定を可能化。
【R6年度:モニタリング等の条件設定等について整理・検討】

図-23 3Dプリント建築物の法規制に関する対応方針(案)¹⁷⁾に追記

4.7 法規

4.7.1 現状における対応方法¹⁶⁾

上述のシェル型ベンチ(図-9)のケースのように、屋根や壁がないものは建築物と見なされないため、建築基準法の適用外となる。また、大型柱(図-11)やグランピング施設(図-14)のケースのような打込み型枠、もしくは帳壁などの非構造体の部分に対しても、建築基準法の方法や構造関係の規定が適用されない。したがって、これらのケースでは、建築確認に配慮せずに3Dプリンティングを適用できる。

しかし、建築物の構造体に3Dプリンティングを適用する場合は建築確認を取得する必要がある。そのため、駐車場屋根構造物(図-13)のケースでは、コンクリートの取り扱いで建築基準法第37条の大臣認定を受け、3Dプリンター用材料を構造体に適用している。また、3dpod(図-10)のケースでは、建築基準法第20条に基づく構造評定の制度を活用し、特殊な建築構造としての認定を受けている。この場合、3Dプリンティング用モルタルは構造に付属する材料として取り扱われるため、使用上の問題は生じない。このように、現行の法制度のもとでも、3Dプリンティングを構造体に適用することは可能であるが、現状ではそのハードルは高い。

4.7.2 国土交通省の取組み

上記の状況下において、国土交通省は、建設3Dプリンティングに関する法規制の在り方について迅速な検討を進めている。2023年6月に政府は「建設DX新市場創出に向けた建設用3Dプリンターの社会実装に資する環

境整備」を規制改革事項の一つとして閣議決定した。これを受けて、国土交通省は、2023年度に「3Dプリンター対応検討委員会」を設置し、1年間かけて「建設用3Dプリンターを利用した建築物に関する規制の在り方について」¹⁷⁾を取りまとめた。この報告書では、3Dプリント建築物の建築確認の対応策として、当面は打込み型枠(残存型枠)を対象としつつ、図-23に示すような、第20条認定の柔軟な運用などの事項を提言している。近い将来に、法規制の面でのハードルが下がることが期待される。

5. おわりに

これまでの伝統的でアナログな建築工事は、長年の経験やノウハウの蓄積を基に、新技術を少しずつ取り入れながら連続的に発展してきた。その点、建設3Dプリンティング技術の登場は、これまでとは明らかに異なった様相を呈している。世界中で研究開発を競い合い、技術の進歩はかつてない速さで進行している。また、スタートアップ企業がその担い手となり、3Dプリンターを核として異業種から建築分野に参入し、新たな建築の形態を模索している。このような動向を踏まえると、建設3Dプリンティングは、今後、現在の延長にはない新たな姿の建築工事を切り開く可能性を秘めている。

本稿が、3Dプリンティング技術の理解と普及の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 館野寿文：アディティブマニュファクチャリングによる複雑部品の製作と設計製造の分散化, システム／制御／情報, Vol.61, No.3, pp.95-100, 2017.
- 2) 小原照記：いまさら聞けない3Dプリンタの選定基準：<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2007/28/news007.html> (2025年2月20日閲覧)
- 3) 清水建設：建設用3Dプリンティング技術：<https://www.shimz.co.jp/company/about/sit/topics/topics08/> (2025年2月20日閲覧)
- 4) PERI: 3D Construction Printing : <https://www.peri.com/en/competences/3d-betondruck1.html> (2025年2月20日閲覧)
- 5) Wang J., Liu Z., Hou J. and Ge M.: Research Progress and Trend Analysis of Concrete 3D Printing Technology Based on CiteSpace, buildings, Vol.4, No.4, 2024.
- 6) Apis Cor: <https://apis-cor.com> (2025年2月20日閲覧)
- 7) AMP: <https://ampmedia.jp/2024/10/23/3d-printer-texas/> (2025年2月20日閲覧)
- 8) Project Milestone: <https://www.3dprintedhouse.nl/en/> (2025年2月20日閲覧)
- 9) 石関嘉一, 金子智弥, 坂上肇, 中村允哉, 武田篤史：3Dプリンタを用いたコンクリート構造物の自動化施工の取組み, 大林組技術研究所報, No.85, pp.1-6, 2021.
- 10) TECTURE MAG: <https://mag.tecture.jp/business/20230605-89733/> (2025年2月20日閲覧)
- 11) 會澤高圧コンクリート：GLAMPING VILLAGE：<https://www.aizawa-c3dp.com/glamping-village> (2025年2月20日閲覧)
- 12) 木村駿, 石戸拓朗：ここまで来た 建設3Dプリンター, 日経アーキテクチュア, pp. 30-33, 2022.3.10
- 13) 西脇智哉, 梶田秀幸：建設3Dプリンティング技術とその普及状況, デジタルファブリケーションが切り開くRC工事の未来 (2022年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料), pp.14-24, 2022.
- 14) Tor Alva: <https://www.tor-alva.ch/en/> (2025年2月20日閲覧)
- 15) Robert J. F.: Digital concrete: Dream or reality? New green or ecological monster? : <https://www.youtube.com/watch?v=5nD30pS7T0Q> (2025年2月20日閲覧)
- 16) 濱崎仁：デジタルファブリケーションを取り巻く法体系, デジタルファブリケーションが切り開くRC工事の未来 (2022年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料), pp.3-7, 2022.
- 17) 国土交通省：建設用3Dプリンターを利用した建築物に関する規制の在り方について (案) (3Dプリンター対応検討委員会報告書 (案) 概要), 2024.3

【執筆者】



*1 寺西 浩司
(TERANISHI Kohji)