

研究委員会 3D 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

石田 哲也*1・木ノ村 幸士*2・石関 嘉一*3小川 洋二*4・齋藤 賢*5・国枝 稔*6

要旨：本研究委員会は、近年発展が著しい建設用 3D プリンティング技術に着目し、国内における技術発展と実用化に向けた技術基盤を整備すること、また、次世代コンクリート技術として情報発信や動機付けを提供することを目的に、幅広く活動を展開してきた。具体的には、国内外の最新技術情報や活用事例の収集、要求性能や研究課題の明確化、各機関による 3D プリンタを用いた共通試験の実施、関連用語の統一に向けた検討、ワークショップの開催と意見交換、詳細な技術開発ロードマップの作成等に取り組んだ。本報ではこれらの活動成果の概要について報告するとともに、最後に本技術の可能性について今後の展望を述べる。

キーワード：3D プリンティング、生産性向上、活用事例、要求性能、共通試験、ロードマップ

1. はじめに

3D プリンティング技術を建設分野に応用し、コンクリート構造物の建設生産システムに革新をもたらす技術開発が海外で精力的に進められている。本技術は型枠不要で様々な形状を直接製作できることから、省力化や工期短縮等の生産性向上のみならず、構造最適化による設計の合理化や軽量化、多様なニーズに応える高付加価値な技術やサービスの提供に発展する可能性を秘める。

海外では RILEM, ACI などを中心に研究開発が進められており、すでに実構造物に一部適用した事例も登場している。しかしながら、施工可能な材料物性の明確化や要求性能実現のための材料開発、耐久性や構造安全性確保のための方法など、本格的な実用化に向けて技術的な課題は数多く残されている。

このような状況に対し、我が国の取組みは出遅れが懸念されてきた。そこで、建築、土木、材料分野の知見を統合し、効率のかつ体系的な技術発展と水平展開を図ることを目的に、2018 年度に本研究委員会の前身となる「3D 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（委員長：丸屋剛）」が設置された¹⁾。同 FS 委員会では、海外の技術動向を調査し、国際会議にも出席するなど幅広く情報収集を行った。また、3D プリンティング技術がもたらす未来像についてワークショップを開催し、社会ニーズの変化と本技術のポテンシャルに基づき概略の技術開発ロードマップを作成した。

本研究委員会では、これらの FS 委員会での成果を踏まえ、より発展的に活動を展開した。委員構成を表-1 に、活動概要を図-1 に示す。多様な委員構成と分野横断的な活動が本研究委員会の特徴であり、各 WG 活動を中心として実用化の足掛かりとなる技術基盤の整備を進めた。

また、従来のコンクリート工学の枠にとらわれない新たな可能性を創造し、次世代コンクリート技術としての情報発信や動機付けを提供することを目的に、外部有識者による講演会やワークショップを積極的に開催して活動を展開した。無料オンライン開催した「建設用 3D プリンティング技術最前線と将来展望に関するワークショップ」(2021.3.2 開催)では、実に約 150 名の参加があった。

以下に、活動成果の概要を示すが、その詳細については今秋発刊予定の委員会報告書を参照いただきたい。

表-1 委員構成

委員長	石田 哲也 (東京大学)	幹事長	木ノ村 幸士 (大成建設)
顧問	丸屋 剛 (大成建設)		
【他産業WG】 ○ WG幹事			
	石関 嘉一 (大林組)	兼松 学 (東京理科大学)	
	寺本 篤史 (広島大学)	高林 弘樹 (アットロボティクス)	
	網村 剛士 (前田建設工業)	田原 和人 (デンカ)	
	菱宮 芳和 (ホリスソリューションズ)	田中 浩也 (慶応義塾大学)	
【材料WG】			
	小川 洋二 (太平洋セメント)	齋藤 賢 (日本シーカ)	
	古賀 裕久 (土木研究所)	寺西 浩司 (名城大学)	
	桐山 宏和 (宇部興産)	小林 聖 (鹿島建設)	
【構造WG】			
	国枝 稔 (岐阜大学)	大野 元寛 (東京大学)	
	小倉 大季 (清水建設)	田邊 裕介 (竹中工務店)	
	東 大智 (會澤高圧コンクリート)	松沢 晃一 (建築研究所)	

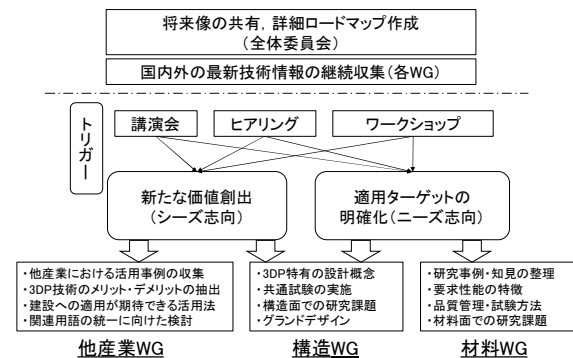


図-1 活動概要 (活動期間：2019.4～2021.6)

*1 東京大学大学院 博士 (工学) (正会員)
 *2 (株)大林組 博士 (工学) (正会員)
 *3 日本シーカ(株) 博士 (工学) (正会員)

*4 大成建設(株) 博士 (工学) (正会員)
 *5 太平洋セメント(株) 博士 (工学) (正会員)
 *6 岐阜大学 博士 (工学) (正会員)

2. 3D プリンティング技術の概要

2.1 Digital Fabrication 技術の分類

Digital Fabrication 技術とは、CAD に代表される 3D モデラーにより作成されたデジタルデータ上の形状を、Subtractive (切削) や Forming (型), Additive (付加) といった製造プロセスにより具現化する技術であり、主要なプロセスはこの 3 つの方法に大きく分類される²⁾。

Subtractive manufacturing (切削製造) は、素材に機械的な除去加工を施して、所定の寸法・形状に加工する製造方法である。生産性、精度、加工コストなどの点で優れ、あらゆる素材から必要な形状と特性を有する部品を作ることが可能なため幅広く利用されている。

Forming manufacturing (型製造) とは、金属部品や物体を機械的変形によって成形する、あるいは鋳造によって所定の形状を製造する方法である。

Additive manufacturing (付加製造) は、材料を付加することで所定の形状を製造する方法であり、本研究委員会のテーマであるセメント系材料を用いた 3D プリンティング (以下、「3DCP (3D Concrete Printing)」) というのはここに含まれる。次節では、建設用途で開発が進む付加製造について方式ごとにその概要を紹介する。

2.2 セメント系材料を用いた付加製造技術

(1) 材料押出方式 (Material extrusion)

材料を押出しながらノズル位置や移動速度を正確にデジタル制御し、一層ずつ積層を繰り返して造形する方式で、建設用途ではほとんどがこの方式を採用している (例えば 3),4),5)。材料には、積層に適したレオロジーが得られるよう粉体量の多い調配合を設定している場合が多い。積層中や積層後に作用する上部自重に対し速やかに抵抗しなければならないが、積層間がコールドジョイントとならないよう水和の進行を制御する必要がある。そのため、調配合設計において、構成材料や混和剤の組合せ、各比率を調整することで、レオロジー変化や凝結時間をコントロールしている。本方式は、比較的速い速度で自由な形状を作ることができ、工法的にもオンサイトへ適用しやすい。一方で、積層しながら鉄筋補強を行うことが難しく、従来の鉄筋補強に代わる引張補強技術を組み合わせる必要がある。

(2) 粉末床結合方式 (Particle-bed binding)

薄層状にセメント系材料を敷き詰め上部から水もしくは結合剤を噴射 (注入) し、選択的に固化させる方式、あるいは、薄層状に砂等の骨材を敷き詰めセメントペーストを注入する方式などがある⁶⁾。他の方式に比べ、解像度が高くより微細な造形が可能であること、また、未固結の粉末 (対象物を製作する上で選択的に固化させない部分) が上層のサポート材の役割を果たすことで、中空形状や狭隙で複雑な形状を製作することができる。一

方で、プリントに多大な時間を要すること、プリント後には未固結の粉体を取り除く手間が必要となることから、規模が大きくなるほど経済性の観点から不利となる。また、補強材の併用や、湿気を帯びた除去後の未固結粉体の再利用が難しいことも普及の障壁となっている。

(3) 吹付方式 (Material jetting)

ロボットアームの先端に吹付システムを搭載した 3DCP の開発も進んでいる。利点としては、製作スピードが速く、様々な形状や用途に対応できること、また、加圧して吹き付けるため、材料押出方式の積層に比べ、かさ密度が高く、圧縮強度や曲げ強度が向上すること、積層方向と載荷方向の関係による曲げ強度の異方性が小さく実用的であることが挙げられる⁷⁾。一方で、品質を確保するには、吹付の移動速度、対象物との距離や角度、吹付流量等のプロセス管理に加え、材料のレオロジーコントロールを状況に応じて細かく適切に行う必要があり、これらの制御管理が非常に難しい⁸⁾。

2.3 期待される効果と課題

(1) 期待される効果

3DCP の導入が建設業にもたらすと期待される主な効果を図-2 に示す⁹⁾。

型枠が不要となることから、様々な形状の製作を容易に実現できる。そのため、デザインの自由度が向上し、空洞や曲線を含むより合理的な構造を具現化することが可能となる。このことは部材の軽量化や使用材料の削減にもつながる。また、型枠等の建設廃棄物やセメント系材料の使用量が削減でき、建設プロセスにおける CO₂ 排出量の抑制など環境面でも効果が期待できる。

他方、機械化による生産性向上や工期短縮、省力化・省人化による安全性の向上も期待できる。様々な形状に柔軟に対応できるため、複雑形状を含む施工では、従来の型枠工法に比べ大幅なコスト削減効果を期待できる。

(2) 課題

しかしながら、技術的な課題も数多い。材料面では、温度変化等の環境条件に応じてレオロジーや強度発現を制御する技術が必要となる。型枠不要のため材齢初期から乾燥を受けて収縮が増大しやすく、高結合材量に起因



図-2 期待される導入効果 (文献[9]より転載)

し自己収縮も大きい。また、締固めや養生が困難であり、従来に比べて強度や耐久性が低下する恐れがある。

構造面の研究は、材料面に比べて非常に限られるのが現状である。今後、引張補強方法や設計法の確立が不可欠である。層間付着の問題や、耐力や構造挙動に関する異方性および形状・寸法依存性などが懸念される。

施工面では、連続的な材料供給や施工計画、構造安定性の確保、装置故障を想定したトラブル回避策や緊急時対応等も、前例のない全く新しい施工法ゆえに慎重に議論する必要がある。また、社会実装に向けて、建築基準法等の関連法規制の見直しや各種試験法、規準類の整備を進める必要があると考えられる。

3. 他産業における3Dプリンティングの活用と状況分析

他産業において3Dプリンタの活用事例が拡大してきており、メディアで取り上げられる機会が多くなってきている。その適用範囲は消費材、工業、医療から食品まで多岐にわたり、これらを実現する材料も多様である。例えば自動車用途では、当初、ベンチャー企業での適用事例が紹介される程度であったが、昨今では、大手メーカーでの取り組みや適用事例が拡大してきている。本章では多くの産業において3Dプリンタがどのように適用されているか活用事例をもとに適用方法について記述する。

3.1 活用事例

(1) 自動車

某トラックメーカーが3Dプリンタを使って製造した¹⁰⁾のは、製造業ではお馴染みの治具やクランプ、支柱といった工具治具である。工具治具は製造ラインには必須の道具で、製造するものや組立ラインに合わせた様々な形状がある。例えばあるパーツとパーツを組み立てるためには、それぞれのパーツを固定しなければならない。しかし、パーツの形状や設置する場所などはさまざまで、それ専用の固定具が必要になる。治具はこうしたもので、1個1個設計し、カスタマイズして作るのが当たり前である。そこで、3Dプリンタに切り替えることで、従来36日かかっていた設計・製造日数をたった2日に短縮することに成功している。

次に希少なクラシックカーの希少なパーツについては、3Dプリンタを使って製造¹¹⁾するという方法である。例えばあるスーパースポーツカーは、わずか292台しか生産されなかったため、部品のストックがない。検討した結果、レーザー溶融法の3Dプリンタで製造することを考えた。こうしてプリントされた部品は圧力試験と内部欠陥の検査に合格した。最後に、テスト車両に取り付けられ実地試験と徹底的な走行試験により、コンポーネントの完璧な品質と機能が確認された。

(2) 鉄鋼

鉄鋼業界では、古くからロストワックス（インベスト）鑄造技術により製品を製造している。ロストワックス鑄造には複数の工程があり、まず製品の金型を準備しワックスパターンを製作する。その後、ワックスパターンを耐火材などで覆い、高温で内部のワックスを溶かし出し、高温で焼き固めることにより鑄型となる。この鑄型に溶解した金属を流し込み製品を成型する。3Dプリントを活用することにより、ワックスパターンを製作するための金型とワックスパターンの製作を省略することが可能となる。これにより、コストの削減およびリードタイムの短縮が実現できる。手作業で製作されていたワックスパターンでは、3Dプリンタにより寸法精度の向上が図られ、従来製作困難であった複雑な形状についても実現可能となった。

(3) 電力エネルギー

ガスタービンの燃焼温度は非常に高く、燃焼温度が高いほど効率よく発電ができるため、高い燃焼温度に耐える燃焼器が必要とされる。金属積層造形（AM）を用いることにより、従来の加工方法では製造不可能だった新しい設計が可能となり、性能の向上と部品数の削減に効果を上げている。また、ガスタービンの開発過程においてはプレスや金属加工で製作していた試作品を3Dプリンタで製作することにより、開発期間の大幅短縮に効果を上げている。

(4) 航空・軍事

新型航空機エンジンの燃料ノズルの開発に、金属3Dプリンタの特徴が活かされている。レーザー式の金属3Dプリンタによる製造に着手したところ、20個のパーツを1個にすることができた。一体型かつ同一材料で構成されることから耐久性が従来と比べて大幅に向上した。燃料ノズルの製造への3Dプリンタの導入効果として、部品点数の大幅な減少等による価格の3割削減¹²⁾、軽量化と燃料効率向上による1機あたりの年間の燃料費160万ドルの削減を達成した¹³⁾。

予算削減を迫られる米軍において、戦闘機などの特殊な部品を調達する際、従来の製造方法による調達は非常に高コストであり、生産が終了したF-22の部品交換や修理に関しても、幾つかの難題を抱えている。この問題に対応するため米軍は、3Dプリント技術の活用に注力しており、F-22戦闘機への適用もその一例となる¹⁴⁾。米空軍は、チタン用3Dプリンタにより航空機の損傷部品交換を迅速化することで、戦闘機の修理に必要な活動停止時間を短縮させることを目指している¹⁵⁾。米国防軍用ヘリコプター「Apache（アパッチ）」と「Black Hawk（ブラックホーク）」に搭載する改良型タービンエンジンプログラム（ITEP）に準拠した最新3Dプリンティングエン

ジンのテストに成功し、実戦配備に向けて次のステップへと移行している。

(5) 造船

船体そのものを 3D プリンティングした事例が報告されている¹⁶⁾。長さ 30 フィートのカーボンファイバー素材の 3D プリント潜水艇は、米軍採用の特殊作戦用潜水艇「Mark 8 Mod 1 SDV (SEAL Delivery Vehicle)」をベースに設計されている。潜水艇を製造するため、大型 3D プリンタを使用し、4 週間弱で船体を完成させた。従来の製造方法では、一艇当たり 3~5 ヶ月程度の期間と 60~80 万 USD のコストを要していたが、3D プリンタによる生産により、90%程度のコスト削減を実現した。3D プリンティングの船体データは 6 つのユニットに分割し約 7 日間掛けて造形される。

(6) 医療

3D プリントは極少量の多品種製品を比較的低いコストで造形できるため、医療分野での活用に適している。しかし、製品が直接人間の肌に触れるため、工業製品に多用される金属やプラスチックなどの材料をそのまま適用できない。よって、成形性に加えて触感や生体適合性などの要件が必要となる¹⁷⁾。3D プリンティングの医療分野への応用事例としては、体内に埋め込まれる眼内レンズや人工骨、個人の体格に適した義手・義足、手術計画の合理化を図るために血管や腫瘍の位置を正確に再現した臓器モデル等があげられる¹⁸⁾。

(7) 衣料・スポーツ用品

衣料・スポーツ用品の分野では、シューズの製造に 3D プリンティング技術を用いる事例が多く、既に一般消費者向けに市販化されている^{19),20)}。

大手スポーツメーカーは、3D プリンティングメーカーと提携し、ミッドソールの製造に 3D プリンティングを活用したランニングシューズの量産を行っている²¹⁾。製品には従来のミッドソールとは全く異なる格子構造を用いており過去数年に渡り収集してきたランニングデータを元にデザインされている。単一の素材でありながらも、立体格子の密度や太さを変化させることで、足の各部位に対する多様なクッション性を生み出している。形状、性能ともにこれまでの技術では製作困難であり、3D プリンティングならではの製品である。また、3D プリンティングを軸としたデジタル設計プロセスによって、製造期間を削減していると報告されている。材料は光硬化ポリアウレタンであり、高精度かつ高速にプリンティング可能な造形方式を採用している。

(8) 宇宙

宇宙船開発のためにロッキードマーチンとストラタシスが 3D プリンティング部品を共同開発した。部品には、高剛性、難燃性、帯電防止機能を持つ PEKK (ポリ

エーテルケトンケトン) 材料である、ストラタシスの Antero™800NA ESD を採用した²²⁾。

米国で運用されている商用ロケット「アトラス V」や NASA が開発中の火星探査用の探査車 (ローバー) の部品等において、適用事例が見られる²³⁾。

3.2 3DP 技術の活用によるメリット・デメリット

3D プリンタが可能とするのは、既存製法の制約を受けないデザインや開発プロセスの革新といった、現行のモノづくりの技術だけにとどまっていない²²⁾。過去には機械化が進むことによって多くの人にとってものが簡単に入手可能となった。それにより、人々に余暇をもたらし、人類は行動ではなく知を基盤とする生物への進化を遂げることとなった。現在はインターネットが多様な情報を一般化し、人類が本来有していた多様性がビジネスモデルに影響を与えつつある状況にある。製造プロセスが民主化するその先には何が起こるのであるか。一極集中型の製造プロセスとは異なり、民主化された通信インフラに接続することによって非製造業含めたすべての小規模事業者がモノづくりに参画する機会が拡大する。パーソナライゼーションに対応したプロダクトを入手可能とするために、製造業以外の、これまでモノを運ぶ側あるいは使用する側にいた人々が 3D プリンタによってモノづくりに参画するようになると既存のものづくりのバリューチェーンを超えた生態系全体が変わっていく。業界を超えたバリューチェーンのデジタル化が促進されてすべてのデータが繋がり、そこに新たなビジネスチャンスが生まれる。変革の流れを機会ととらえ、未来の世代に繋げていく良い機会と考える。

4. セメント系プリント材料に関する文献調査と知見の整理

4.1 主な研究事例

3D プリンティングによるコンクリートで求められる特有の性能とそれに必要な材料、調配合、評価方法、基準等の情報を、既往の文献より、収集・整理し、現状と課題をまとめて、将来の設計指針の基礎資料にすべく取りまとめた。文献調査は、データベース JDREAM-III を用いて、直近の 10 年 (2010 年~2019 年) を対象とした。

3D プリンティング材料に求められる特有な性能をキーワードとして、タイトル、抄録を検索し、さらに論文を選別した。用いた特有なキーワードは、FS 委員会での知見を基にして、ビルダビリティ (Buildability)、レオロジー (Rheology)、チキソトロピー (Thixotropy)、圧送性 (Extrusion)、積層性、流動性、速硬性、強度、収縮、クリープ、耐久性、品質管理、試験方法とした。ヒットしたキーワードでは、強度 (49 件) が最も多く、次いで、レオロジー (35 件)、Extrusion (32 件)、Buildability (27

件), と続いた。フレッシュ性状に関する項目では, レオロジー, Extrusion, チキソトロピー, 流動性の順にヒット数が多かった。3D プリンティング特有の性質として重要と考えられた Buildability は, 積層性ととも一定の報告数が検出された。

強度では, 圧縮, 曲げのほか, 層間付着強度の報告例も見られた。品質管理や試験方法でヒットした文献は 8 例ずつ検出された。一例を示すと, モルタルフロー, ロバストネス (頑強性), 回転粘度計, 降伏強度, せん断試験 (ベーン, 直接), 押出し試験 (圧力測定), 形状安定性試験法 (Layer Settlement, Cylinder stability test), 界面 (層間) 接着強度, 凝結, カロリーメータ, 3D スキャナ (幾何学的特性), 超音波伝播速度, 破壊エネルギー試験, などが報告されている。

強度以外の硬化特性として耐久性ではヒットが少なく, 凍結融解抵抗性では 1 件のヒットであった。内容はバインダージェット方式による石こう系の材料を用いた硬化体の CT スキャンによる内部構造評価の事例である。

収縮, クリープもごく少数のヒットにとどまり, 論文中に参考となる測定データは示されていなかった。強度以外の硬化後の物性に関してはきわめて報告例が少なく, 今後の検討課題として挙げられる。

材料・調配合の特徴については, セメントペースト, モルタルの報告例がほとんどで, 粗骨材を混入したコンクリートの報告例は見当たらなかった。また, セメント材料のほかに, 高炉スラグ, フライアッシュ, アルカリ刺激剤 (ケイ酸ナトリウムなど) を結合材として用いるジオポリマーを使用した報告例も多数検出された。骨材は, 細骨材が用いられ, 川砂, 天然砂のほか, 石灰砂, シリカ砂などが用いられていた。最大寸法は 3mm 以下が多い。混和材には, フライアッシュ, シリカフェーム, 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, ベントナイト, カルシウムアルミネート系の鉱物や膨張材などが用いられている。混和剤は, 減水剤, レオロジー調整剤, 増粘剤, 硬化調整剤 (促進剤, 遅延剤), ポリマーなどが見られる。また, 補強材, 保形材として繊維材料も用いられている。種類は, 炭素, ガラス, 玄武岩, 鋼のほか, 有機繊維として PVA (ポリビニールアルコール), PP (ポリプロピレン), PBO (ポリパラフェニレンベンズオキサゾール) などが用いられている。

調配合のうち水結合材比 (W/B) は 0.30~0.55, 特に 0.35~0.45 が多い。細骨材結合材比 (S/B) は 1.25~3.4 程度までであるが, 特に 1.4~1.7 が多い傾向があった。

4.2 特定項目に関する知見の整理

(1) フレッシュ性状と Buildability

3D プリンティングによるコンクリートのフレッシュ性状と Buildability とは密接な関係がある。また, 積層材

料のフレッシュ性状が 3D プリンティングに適しているか否か, フレッシュ性状と Buildability との経時的な関係を把握することは, 構造体を構築する上で重要である。

3D プリンティング材料に対する要求性能として, フレッシュ性状を配送段階 (delivery phase) と積層段階 (deposition phase) で分けて, 報告書では系統図的に整理している。また, フレッシュ性状と積層性の関係を文献より整理している。

(2) 材料・調配合の特徴と, 強度等の要求性能との関係

報告書では, 文献調査より得られた情報をもとに材料・調配合を整理した一覧表を作成している。

強度に関する物性値

圧縮強度, 曲げ強度および引張強度は, プリンティングにより作製された供試体と打込みにより作製された供試体を用いて行われており, 積層することが強度に及ぼす影響と, 積層方向に対して載荷方向を変化させて強度の異方性を確認している。

配合や使用しているセメントおよび混和材 (剤) により強度は異なる。圧縮強度は低いものでは 25MPa, 高強度のものは 100MPa 程度である。曲げ強度および引張強度は検討されている例が少ないが, 曲げ強度は 9MPa 程度, 引張強度は 5MPa 程度という報告がある。層間付着は打重ね時間に左右され, 一般的に打重ね時間が長くなれば層間付着強度が低下する。層間付着を確保するために, 層間にペーストを塗布する検討も行われている。さらに特殊な検討としては, プリントパスが強度に及ぼす影響を把握している例があり, プリントを渦巻き状にした場合と格子状にした場合の違いを評価している。

強度試験の条件

強度試験の条件として, まず試験規格としては, 各国が準拠している試験規格に準じて試験が行われている。しかし, ノズル形状や材料の性質上, 規格に準拠した寸法の供試体を作製できない場合は, 可能な寸法で試験が行われているのが現状である。基本的にはプリンティングにより少し大きめの試験体を作製し, 切出しにより供試体を採取している。打込み供試体はミキサで練混ぜ後に直接採取されており, 圧送による性状変化等は含まれていない。打込み供試体による試験はあくまでもプリンティングにより作製した試験体との比較であり, 品質管理用といった観点ではない。

材料・調配合と要求性能の関係

いずれの検討もジオポリマーを除けば類似する材料を使用しているが, 粘性の付与方法や自立性の付与方法が増粘剤や繊維, 早強性のセメントや早強剤と多岐に渡り, 研究者が独自のコンセプトに応じて選択している。また, 使用するミキサやポンプ, 3D プリンタ, ノズル形状等が異なるため, その装置に合わせた配合にする必

要があり、さらには研究者の配合コンセプトにより、使用する材料は似ていても配合が異なると考えられる。

配合が異なることで強度も異なるが、基本的には一般的なコンクリートの設計基準強度程度が確保されていれば大きな問題は無い。3Dプリンティングによる製作物に高い曲げ強度や引張強度、さらに高い耐久性などといった付加価値を付与するのであれば高強度化も必要であると考えられる。

いずれにせよ、現状は強度の要求性能があり、そこから配合が決まっているのではなく、各自の3Dプリンタにより製造できるフレッシュ性状の要求性能があり、そこに合わせるために配合が決まっており、結果として必要な強度が得られているという流れである。

(3) 品質管理・試験方法と評価基準の関係

3DCPにおける品質の特性値については、要求される品質や性能が不明確な現時点では、明確に定められているものはほとんどない。文献調査では、実験室レベルでの材料開発においてレオロジー試験によりプリント時の積層体の品質を評価するものがほとんどであった。しかし、レオロジー試験を施工現場に適用することは困難であると考えられる。その一方でモルタルのフロー試験時におけるスランプ値を簡易的な Pumpability や Buildability の指標として検討した例はあるが、材料の品質試験方法として確立されているとは言えない。

報告書では、3Dプリンティングにおける品質管理の検査項目について、JSCE吹付けコンクリート指針(案)の考え方を参考にして、どのような項目が必要となりそうか対比表で整理している。

4.3 セメント系プリント材料に関する研究課題

技術的課題は、現在上記内容を踏まえ整理している状況である。フレッシュ性状を評価する試験方法として、レオメーター、回転粘度計、ベーン試験、フロー試験などが多く試されているが、要求性能との関係をより明確にする必要がある。

3Dプリンティングならではの課題として、強度の異方性がある。設計上どのように考慮すべきかを含めたデータの蓄積が必要である。また、収縮特性やクリープ特性も同様の観点でデータの蓄積が課題である。

さらに、型枠無しで部材を製造する上で出来形の精度を確保するため、コンクリートの品質と経時による積層性の関係や、ノズル先端のコンクリートの状態だけでなく、不連続部である層間の品質も今後の課題として挙げられる。

5. 構造設計に関する文献調査と概念検討

5.1 主な研究事例

3DCPより造形された構造体およびその設計方法につ

いて、既往の研究事例を取りまとめた。文献調査には主に Google Scholar を用いた。まず 3D printing, additive manufacturing, concrete, cement, application, review というキーワードで検索し、約 18800 編の検索結果から、引用数の多い論文を中心として 17 編のレビュー論文を選定した。出版後、年平均 10 件以上の引用を受けていることを主な選定基準としたが、特に構造・設計・適用例に焦点を当てたレビュー論文や、他とは異なる着眼点をまとめた特徴的なレビュー論文も対象に含めた。次に、各レビュー論文の中で構造・設計・適用例に関して引用された個別の論文に調査を広げた。

調査の結果から、材料押出方式のほか、スリップフォーム工法、Mesh Mould、粉末床結合方式等の様々な 3DCP を用いて、多様な構造体が造形されていることが分かった。これまでにパピリオンやモニュメントのほか、橋梁やオフィス等の建築物まで適用事例が広がっている。報告書では、これらの事例をリスト化して表にまとめた。

また、引張力に対する補強方法が 3DCP による構造物構築へ向けた主たる技術的課題のひとつであり、多くの研究事例が報告されていることが分かった。短繊維、鋼線、鉄筋、外ケーブル、ボルト、プレストレス等を用いた種々の補強方法がこれまでに試行されている。

さらに、3Dプリンティングがもたらす造形自由度の向上という利点から、3DCPに位相最適化手法(トポロジー最適化)を適用する研究事例も多く見られた。単一材料を線形弾性体と見なして位相最適化を行う初等的な手法を発展させ、弾塑性複合材料であるコンクリートへ適用する取り組みである。これまでに、コンクリートと鉄筋の配置を同時に最適化させる手法や、異方性材料の位相最適化手法の開発が進められている。また、材料押出積層方式における造形可能角度などの施工上の制約を考慮した最適化手法も提案された。その他、構造性能と断熱性能を同時に向上させる研究事例もみられ、位相最適化手法の適用はより高度な多目的最適化へと広がりを見せている。

5.2 3D プリンティングならではの設計・評価概念

(1) 設計概念

3D プリンティングを採用した構造物を設計するにあたって、使用するプリンティングの方式に関わらず、Design for Additive Manufacturing (DfAM) は不可欠な存在といえる。DfAM は、3D プリンティングのメリットを最大限に活かすための、3D プリンティングの特性に合わせた設計概念のことを指す。なかでも、3D プリンティングの製造技術要件から生じる製造上の制約を構造物の形状に盛り込み、従来工法では製作が難しい形状の実現による性能向上、3D プリンティングの製造上の制約に合わせた生産性向上が DfAM における重要な要素である。

たとえば、構造計画で施工する構造物の形状を決め、それを3Dプリンティングする際は、3Dプリンティング（積層造形）できる形状かどうかの検討が必ず必要である。3DCPを使えば、自由な形状をなんでも作れるわけではなく、一筆書きやオーバーハング（張出し）角度という制約などを考慮して形を決めていき、積層造形に最適化された形を設計していく必要がある。すなわち、構造計画とDfAMを繰り返して、構造物・部材の形を決めていく必要がある。

また、3Dプリンティングで作製した構造物は、通常のコンクリート構造物と異なり、各プリント層の界面（積層面）が存在し、この積層面の付着強度が母材より低下することがあるので、力学的異方性の考慮が必要となる。この積層面が十分に一体化していない場合は、耐久性にも影響を与える可能性もある。さらに、積層方向によって表面テクスチャが変化するため、意匠性に対しても影響を与える。よって、積層パスは安全性・耐久性の要求性能において、また意匠設計において考慮すべき項目といえ、あらかじめこれらを踏まえて計画・設計を行う必要がある。なお、この積層面を補強するために、後から積層面に直交する方向にPC鋼材などを使用してプレストレスを導入するという設計事例もあるが、このような補強方法も必要に応じて検討する。

材料押出方式や材料噴射方式の3Dプリンティングの場合、作製する形状の外輪郭を1本あるいは複数の線だけで作ることができ、通常のコンクリート構造物よりも複雑な形状、最適化を取り入れた形状、内部に中空構造を有する形状を製造することができる。これらを積極的に取り込んだ設計をする場合は、部材厚が薄くなる傾向があり、収縮やクリープの影響が大きくなる可能性もあるため、注意が必要である。また、トポロジー最適化などの手法を取り入れた形状の場合、プリンティングの精度にも注意が必要である。プリンティングの結果、実際の形状と設計図とのあいだに寸法誤差が生じたときに、すなわち当初想定していたトポロジー最適化した形状と乖離してしまった場合に、実際の設計のときには想定してなかった力学的挙動を示す可能性がある。プリンティングの精度、形状寸法のばらつきをあらかじめ考慮して、最適化設計することが望ましい。

(2) 構造性能予測

3Dプリンティングを用いた構造物の性能照査は、通常のコンクリートと同様に、耐久性、安全性、使用性、および耐震性に対して限界状態を設定し、構造物あるいは構造部材が限界状態に至らないことを確認することは同様であるが、3Dプリンティングならではの特徴を考慮しなければならない部分も多い。

たとえば、安全性における照査においては、プリント

構造物の構造性能を予測するために、積層パスや異方性に対して留意が必要である。先に述べたように、積層面の特性が母材とは異なるため、同一形状でも積層パスが異なれば構造性能が変化する可能性がある。それらをどのように考慮するかなどが重要である。照査にあたっては、あらかじめ積層面の付着強度を測定し、異方性をモデルに組み込むなどの方法が考えられるが、具体的なモデル化の方法は今後の課題である。

複雑な形状、最適化を取り込んだ形状の構造部材の場合、構造性能予測には3次元の数値解析手法（FEM解析など）の適用が前提になる。予測の高度化のためには、収縮やクリープ特性などのデータがあると良い。また、照査段階のモデル化においては、プリンティングの精度を考慮して、形状のばらつきをあらかじめ考慮することも重要である。なお、検査にあたっては、プリンティング構造物・部材が設計図どおり製造できているかを調べて、形状初期不整を定量化することも重要である。形状誤差を含めたモデリングでFEM解析などを行えば、構造性能を事後評価することもできる。3Dプリンティングで作製する自由曲面形状の場合は、定規などによる形状計測が難しいが、3Dスキャナなどで形状の点群データを取得する方法などもある。

5.3 共通試験の概要

3DCPの普及を目指すにあたり、設計に用いる設計用値を材料側から設計へ引き渡す必要がある。3DCPで構築した部材の各種強度を測定する場合の、例えば、供試体の作製方法、コア抜き方法などについての考え方を整理するにあたっての共通試験を実施した。対象とする強度は、圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度および層間付着強度とし、積層した構造体からコア抜きした円柱供試体から求めた強度と、モールドに材料を打ち込んだ供試体の強度とを比較した。参加機関としては、7機関であり、いずれも材料押出方式によりプリントする方式である。表-2に、モールドに詰めた材料の圧縮強度の平均値と、積層硬化体からコア抜きした供試体の圧縮強度の平均値をそれぞれ示す。強度レベルとしては46~107N/mm²と幅が広く、また一般的なコンクリート構造物に用いられるコンクリートの強度に比べれば大きいことが分かる。また、モールド供試体の強度に対するコア供試体の強度の比は、いずれの機関も90%以上を確保できているといえる。今後は、ばらつき的大小なども含めて、引き続き検討が必要である。

5.4 構造設計に関する研究課題

建物を実際に構築するためには、自重、地震、風、火災等に関して安全であることが求められ、それらに対し性能を満たすように構造設計を行う必要がある。これは3Dプリンティングにより構築する建物についても同

様である。ただし、3Dプリンティングによる構造物は、通常のコンクリート構造物と材料的・構造的・施工的に異なることから、設計時においても、これらに留意する必要がある。

(1) 設計値・設計クライテリアに関する研究課題

構造物を設計するには、設計値・設計クライテリアを設定する必要があり、そのためのデータの充実が必要である。表-3に課題の一例を示す。

現状 3D プリンタ構造物に使われる材料は、装置ごとに最適化されていることも多く、材料ごとに検討している。粗骨材を使用しない場合が多いことや、強度発現が早いことに特徴があることが多い。特に積層方向によって、各項目がどのようになるかを把握し、異方性を設計的にどう取り扱うかに課題がある。ひび割れ面における骨材のかみ合わせ等は、積層間では小さくなる可能性があり、従来のコンクリートと異なることも予想される。また、3Dプリンティングによる施工に起因する品質のばらつきも従来のコンクリートの場合と異なると考えられ、設計に見込む安全余裕度についても、工学的な判断が必要になる。

(2) 3D プリンティングによる構造物の構造上の特徴と研究課題

3Dプリンティングによる構造物には、その造形法により従来の構造物とは異なる特徴があり、その特徴に対応した設計的な研究課題がある。

表-4に課題の一例を示す。3Dプリンティングによる構造物では、3Dプリンタを使って打ち込み型枠を製作し、内部にコンクリートを充填する工法がある。メソソニーやハーフPCaなど従来の工法の延長と考えられる部分と、拡張して考える必要がある部分とがある。現状では、内部のコンクリートのみを構造物として要求を満たすように設計していることも多いと思われるが、将来的には複合材として合理的に評価、設計されることが望まれる。

現時点で補強材を設置することが難しい 3D プリンティングに対する効果的な補強方法および、その評価法が課題として挙げられる。また 3D プリンティングによる複雑な形状や、最適化を取り入れた形状では、3次元FEM解析を積極的に取り入れた設計が必須となる。弾性領域でのFEM解析だけでなく、複合材としての評価、非線形領域も考慮した設計法の高度化が望まれる。

3Dプリンティングにおいて一筆書きで作れない場所、硬化後の打ち継ぎ施工、造形した部材同士の接合など、接合部に関しても課題がある。

最後に、建築分野においては建築基準法（建築指定材料、配筋の仕様規定など）など、法的な取り扱いに関しても検討する必要がある。

表-2 積層した構造物から得られた圧縮強度の例

機関	モールド供試体	コア供試体	コア/モールド
A	67.0 (n=3)	67.6 (n=3)	1.00
B	107 (n=5)	95.6 (n=5)	0.89
C	42.1 (n=6)	40.8 (n=6)	0.97
D	72.5 (n=5)	68.1 (n=5)	0.94
E	46.3 (n=3)	43.4 (n=3)	0.94
F	68.0 (n=4)	72.0 (n=4)	1.06
G	52.9 (n=3)	48.5 (n=3)	0.92

※カッコ内は供試体本数

表-3 設計値・設計クライテリア

設計諸元	検討必要事項
剛性	ヤング係数、ポアソン比、ひび割れ後剛性
強度	圧縮強度、引張強度、せん断強度、付着強度、層間強度、ねじれ強度
耐久性	収縮量、クリープ、中性化水密性
耐火性	熱容量、線膨張係数
安全率	施工・品質のばらつき

表-4 3D プリンタ構造物に特徴的な設計的課題

特徴	設計的検討項目
型枠打ち込み	組積造、ハーフPCa等価剛性、一体性
複雑形状、最適化	FEM解析
補強	繊維補強、プレストレス
接合部	打ち継ぎ、部材接合
材料、配筋	法的取り扱い

6. 技術開発ロードマップの概要

前身であるFS委員会において、3DCPがもたらす未来像についてワークショップを開催し、社会ニーズの変化と本技術のポテンシャルに基づき、図-3に示す概略の技術開発ロードマップを作成した¹⁾。本ロードマップは以下の3段階のブレーンストーミング(①3DCPのメリット、②社会の変化をイメージした建設産業の課題、③3DCPで何ができるか)を経て、委員の総意を反映し作成したものである。

この作成から2年が経過し、社会を取り巻く環境やニーズも多少変化が見られ、急激なデジタル技術の進歩により新たに利用可能な技術も登場している。そこで、本研究委員会では、こうした新たな情勢やニーズ、技術を取り込んでロードマップの見直し作業を進めている。加えて、3DCPの適用ターゲットと適用する目標時期を明確化してロードマップに落とし込み、社会実装に向けて共有できる指標を提示したいと考えている。見直し時に

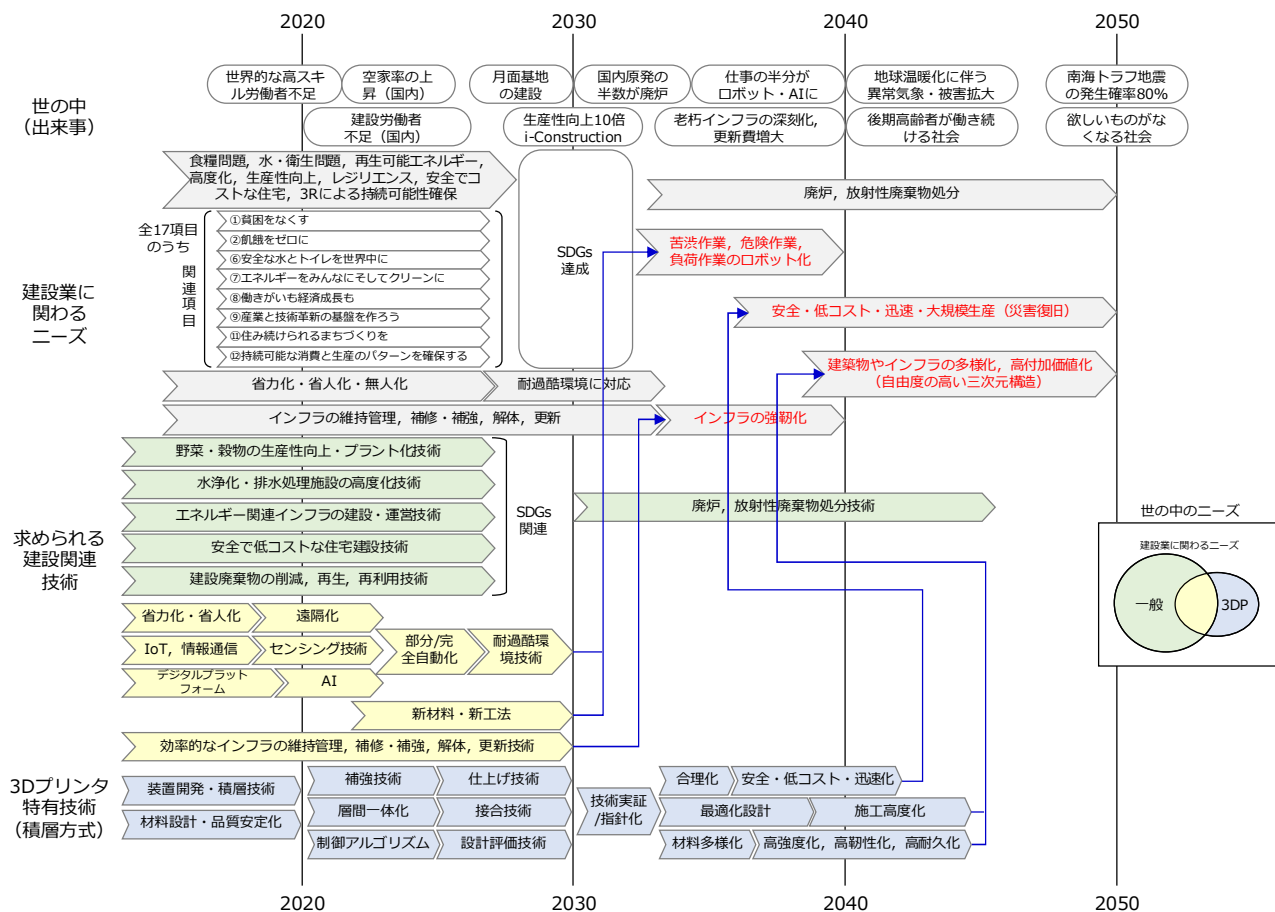


図-3 3D プリンティングの概略技術開発ロードマップ (FS 委員会作成, 2019) ¹⁾

考慮する新たなキーワードとしては、カーボンニュートラル規制、建設材料や建設行為におけるカーボンリサイクル、深刻化する気候変動対策(国土強靭化、災害復旧)、DXの推進と本格実施、コンパクトシティ化、インフラへの機能付与(センシング・モニタリング、自動運転支援等)、フェーズフリー、感染症対策などが挙げられる。

7. おわりに

本研究委員会では、以上のように、国内外における最新の技術情報や活用事例を収集しながら、3Dプリンティング技術を適用した際に新たに考えるべき概念や性能、用語統一に向けた情報の整理、さらに3Dプリンタを用いた具体的な共通試験を実施することで、今後の取り組みが必要となる研究項目の洗い出しや、将来に向けた技術開発ロードマップの作成に取り組んだ。調査研究を進める中で、3Dプリンティング技術に関する研究の多くは、未だ手探り状態にあることを認識した。従来型の設計施工技術と比べて、大きな利点や可能性が指摘されているものの、現時点ではデファクトスタンダードとなり得る有望な技術や手法が絞り切れていない。逆に言えば、画期的かつ革新的な3Dプリンティング技術が、これか

ら新たに生まれる可能性がある。

建設分野における3Dプリンティング技術の開発においては、コンクリート工学の領域に留まらず、ロボティクスや情報技術など、他分野と連携が必要不可欠である。今後は、具体的なプロジェクトへの適用を通じた技術開発の推進や、スモールスタートやアジャイル開発といったように、まずはリスクを減らしつつ、試行錯誤を繰り返しながら、技術開発に果敢にチャレンジしていくことが求められる。また、これまでに無いものを生み出そうとする姿勢や、人をあっと驚かせる気持ち、さらに面白いものを実現しようとする遊び心を大事にすることも重要であろう。

3Dプリンティング技術を適用することによって、コンクリート構造物の作り方がどのように変わるのか、またどういったものが作れるようになるのかといった議論を重ねてきた。これらに加えて、今後、コンクリート構造物を誰が作るのか、あるいは誰が作れるようになるのか、という点についても、大きな変化が起こる可能性がある。誰もが気軽に投稿できるSNSや動画共有サイトを通じて、自分自身の考えや特技を広く発信し、世界から注目を集めることが出来るようになったように、3Dプリンテ

ィング技術によって、コンクリート工学に携わる専門家以外から、全く新しい概念が生み出されるようになるかもしれない。デジタル技術の進歩によって、このようなコンクリート工学の「民主化」が進む先を、チャンスと捉えるか、脅威と捉えるか、コンクリート工学にかかわる研究者や技術者が、真摯に考えるべきタイミングが来ているように思える。

参考文献

- 1) 丸屋 剛, 石田哲也 : 3D プリンティングの技術開発の現状と展望, コンクリート工学, Vol.59, No.2, pp.173-180, 2021.2
- 2) R.A.Buswell, W.R. Leal da Silva, F.P.Bos et al.: A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete, Cement and Concrete Research, 134(2020)106068
- 3) T.Wangler, E.Lloret, L.Reiter et al.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges, RILEM Technical Letters, (2016)1, 67-75
- 4) V.N.Nerella, M.Krause, M.Nather, and V.Mechtcherine : Studying printability of fresh concrete for formwork free concrete on-site 3D printing technology (CONPrint3D), 25th Conference on Rheology of Building Materials, 2016, 236-246
- 5) C.Gosselin, R.Duballet, Ph.Roux et al.: Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders, Materials and Design, (2016)100, 102-109
- 6) D.Lowke, E.Dini, A.Perrot et al.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges, Cement and Concrete Research, (2018)112, 50-65
- 7) H.Kloft, H.Krauss, N.Hack et al.: Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D printing (SC3DP), Cement and Concrete Research, 134(2020) 106078
- 8) I.Dressler, N.Freund, and D.Lowke : Control of strand properties produced with Shotcrete 3D printing by accelerator dosage and process parameters, DC2020, RILEM Bookseries 28, pp.42-52, 2020
- 9) 日経 BP : 特集 “設計・施工を刷新する建設 3D プリンター”, 日経コンストラクション 2019 年 7 月 8 日号, 28-47
- 10) ボルボトラックスはストラタシスの 3D プリンターで生産コストを 94%カット, <https://i-maker.jp/blog/volvo-3d-print-7259.html#3D>, 2019
- 11) 入手困難な部品を 3D プリンターで、ポルシェがクラシックモデルに供給へ, <https://response.jp/article/2018/02/14/306051.html>, 2019,8
- 12) 米 GE の実践にみる 3D プリンターの実力, <https://it.impress.co.jp/articles/-/13829>, 2016
- 13) 巨人が動き出した！金属 3D プリンターがもたらす革新 (前編), <https://minsaku.com/category02/post254/>, 2019
- 14) 米空軍が戦闘機「F-22 Raptor」にチタン製 3D プリント部品をインストール, <https://idarts.co.jp/3dp/f-22-raptor-3d-printed-titanium-part/>, 2019
- 15) GE Aviation はメタル 3D プリント技術を活用した最新の軍用ヘリコプターエンジンを開発, <https://idarts.co.jp/3dp/ge-t901-turboshift-engine/>, 2017
- 16) 米海軍と ORNL 主催の研究チームは大型 3D プリンター BAAM を使った潜水艇を開発, https://idarts.co.jp/3dp/us_navy_ornl-3d-printed-submarine/, 2017
- 17) I. Mitra et al.: 3D Printing in alloy design to improve biocompatibility in metallic implants, Materials Today, (in Press)
- 18) 佐々木寛之, 川上勝, 吉川英光 : 3D ゲルプリンターが開拓する医療・福祉のためのデザインナブル材料科学, まてりあ, Vol.57, No.4, pp159-163, 2018
- 19) Nike, Nike Flyprint is the First Performance 3D Printed Textile Upper, <https://news.nike.com/news/nike-flyprint-3d-printed-textile>, 2021.3.20 アクセス
- 20) New Balance, NEW BALANCE LAUNCHES A PREMIUM 3D PRINTING PLATFORM, <https://newbalance.newsmarket.com/product-news/performance/new-balance-launches-a-premium-3d-printing-platform/s/5c2b466a-13b7-4218-a18a-61d2889e6adc>, 2021.3.20 アクセス
- 21) adidas, 4D, <https://news.adidas.com/4d>, 2021.3.20 アクセス
- 22) 技術情報協会, 3D プリンター用材料開発と造形物の高精度化, 2020,6
- 23) NASA の研究所, 火星探査機「Perseverance」に 11 個の金属 3D プリント部品を採用, <https://idarts.co.jp/3dp/nasa-mars-rover-perseverance/>, 2020