STI Horizon 2021 Vol.7 No.2
https://doi.org/10.15108/stih.00258

ほらいずん

3D プリンティングから 4D プリンティングへ －デジタルファブリケーションの新たな展開－

科学技術予測・政策基盤調査研究センター 客員研究官 古川 英光*、特別研究員 蒲生 秀典

【概　要】

今、世界的に 4D プリンティング研究に注目が集まっている。4D プリンティング研究は、近年注目されるソフトロボット分野と結びつき、インフラ・医療・食などの多様な産業分野への広がりが期待される動きにつながっている。本稿では、4D プリンティングという概念から始まった学術研究動向、3D プリンティングと 4D プリンティングの違い、4D プリンティングを可能にする「4D マテリアル」の考え方、4D プリンティングの研究例を紹介する。3D プリンターが活用されたデジタルものづくり（デジタルファブリケーション）に、より柔軟で高次の機能（適応性や知能）をもたらすために 4D プリンティングが融合し、新しい価値（生物のような多様性や材料ベースの人工生命）が創成される未来が予想される。

キーワード：4D プリンティング，3D プリンター，知能材料（スマートマテリアル），逆問題，
物理リザバーコンピューティング

1. はじめに

一般的に 3D プリンティングとして知られるアディティブマニュファクチャリング（付加製造）が、工業製品や研究開発ツールあるいはパーソナルファブリケーションとして普及している。3D デジタルデータを基に 3D プリンターにより立体物を造形する付加製造技術を適用したデジタルファブリケーションは、デザインとプロセスの融合による新規構造・形態の創出、そして形状・プロセスデータをオープンソースとしてインターネット上で共有できるなど新たな価値創造が期待されている。また、デジタルファブリケーションでは原理的に最小限の材料量と工程数で作製でき、さらに、データ転送によるオンサイト・オンデマンド生産により、輸送や在庫のコストも含めた低コスト化並びに低環境負荷での製造・流通が期待できる[1)]。我が国では、マスカスタマイゼーションを実現する革新的生産技術として、工業製品部材の他、義肢や食品造形あるいは人工血管や人工臓器などのバイオファブリケーションへの応用に向けた研究開発が活発化している[2)]。

近年、このデジタルファブリケーションの新たな展開として、知能材料（スマートマテリアル）を用いて、3D プリンターによって造形することで作製後に外部刺激により自発的に形状を変化することができる 4D プリンティングが注目されている。欧州委員会では、将来に向けグローバルな価値創造に大きな影響を及ぼし、社会的ニーズに重要な解決策を示す可能性のある、100 のラジカル・イノベーション・ブレークスルー (RIB) を公開し、その中で不確実性は高いが大きな変革をもたらす可能性のある技術として 4D プリンティングを挙げている[3)]。

本稿では、4D プリンティングの概要と国内外の研究開発動向について記す。

2. 4D プリンティングの概要と学術研究動向

日本で 3D プリンターがブームになったのは 2012

* 山形大学大学院 理工学研究科 教授

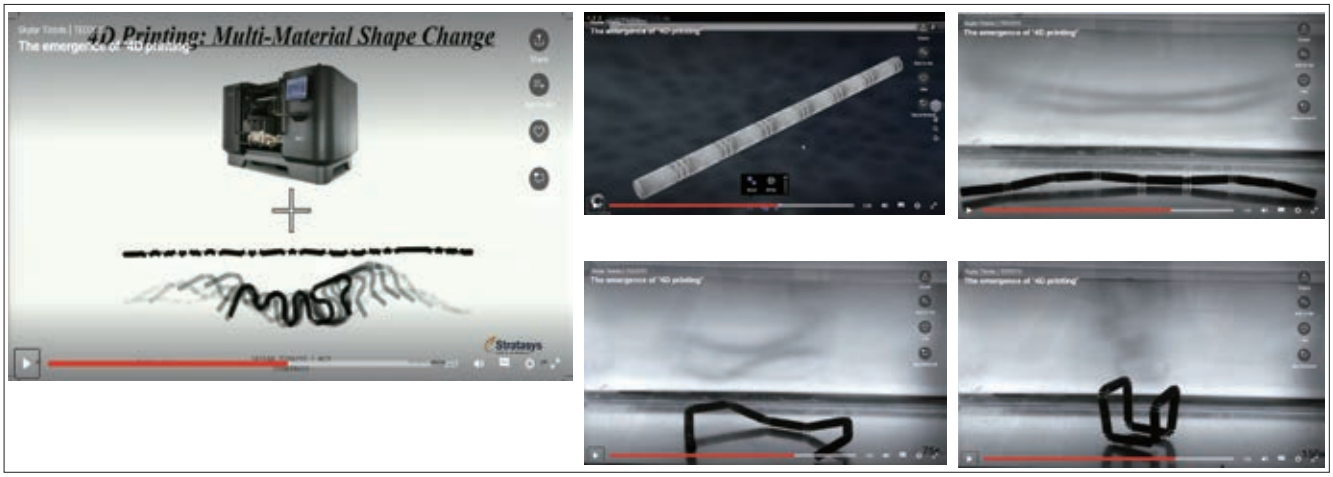
年頃であるが、その翌年の 2013 年にマサチューセッツ工科大学の Skylar Tibbits（スカイラー・ティビッツ）が「The emergence of “4D Printing”（「4D プリンティング」の誕生)」という TED（Technology Entertainment Design）トークを行い、4D プリンティングという概念が知られるようになった[4]。この講演では、3D プリントした棒状の造形物が、造形後に水中で人の手を介さずに自動的に立体的な形に時間変化する実験例が紹介された（図表 1)。そこから組み立てる必要がない建造物や流量に適応して太さが変わるパイプなど、インフラへの適用例のアイデアなどが次々に披露された。

この実験例は、DNA 折り紙やタンパク質の折り畳み（フォールディング）問題に類似している。そういった概念が 3D プリンターで作られる造形物にも適用できることがティビッツによって示唆された。ナノテクノロジーの概念が、分子スケールに比べれば途方もなく大きな、人間サイズの造形物の構造制御や機能発現に適用できる可能性を示したと言える。この TED トークの後、2013 年に米国陸軍研究所が、ハーバード大学・ピッツバーグ大学・イリノイ大学の 3 大学からなる 4D プリンティング研究チームに 85.5 万ドル（約 1 億円）を投資したことが報道されて話題になった[5]。

「4D プリンティング (4D Printing)」に関連する文献数の増加数を、Google 社の提供する文献検索サービス（Google Scholar）を使って年別に調べた（図表 2)。2013 年以後に 4D プリンティングのヒット数は年々 1.5 倍以上のペースで増加し、猛烈な勢いで広がりを見せている。また 2013 年から 2019 年の間の 4D プリンティングに関する研究論文の国別の文献数が調べられている[6] (図表 3)。この調査によれば、米国が 1 位、中国が 2 位で、その後に、シンガポール、英国、韓国、フランス、オーストラリア、インド、カナダと続き、日本は 10 位に位置している。

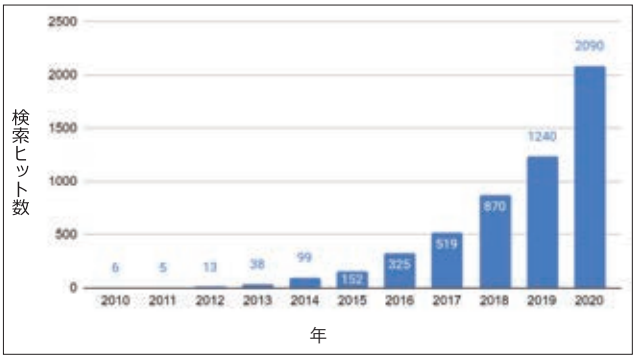
もっとも早い段階で 4D プリンティングをテーマに開催された学会は、2015 年にアムステルダムで開催された「4D Printing & Meta Material Conference（4D プリンティングとメタ材料会議)」である。日本では、2018 年に慶應義塾大学の田中浩也代表が日本画像学会との連携で設立した「4D and Functional Printing; 4DFP（4D と機能性プリ

図表 1　Skylar Tibbits の TED トークで発表された 4D プリンティング

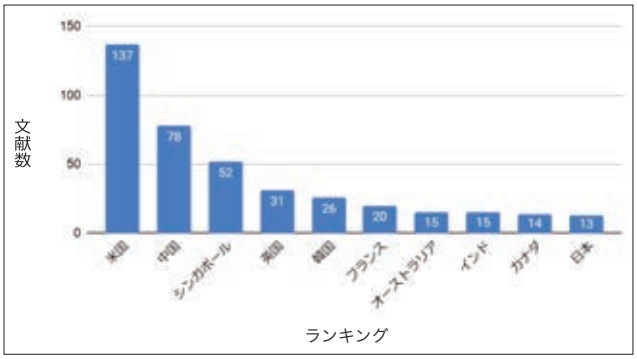


出典：参考文献 4)

図表 2　「4D プリンティング」の Google Scholar による検索結果



図表 3　「4D プリンティング」に関する論文数の国別ランキング



参考文献 6）を基に
科学技術予測・政策基盤調査研究センターにて作成

ンティング)」（その後、4DFF に改名）と、山形大学の古川英光（筆者）が米国電気化学会との連携で設立した「4D Materials and Systems; 4DMS（4D マテリアルとシステム)」国際会議がほぼ同時期に最初に日本で開催され、4D プリンティングが国内でも議論され始めるようになっている。

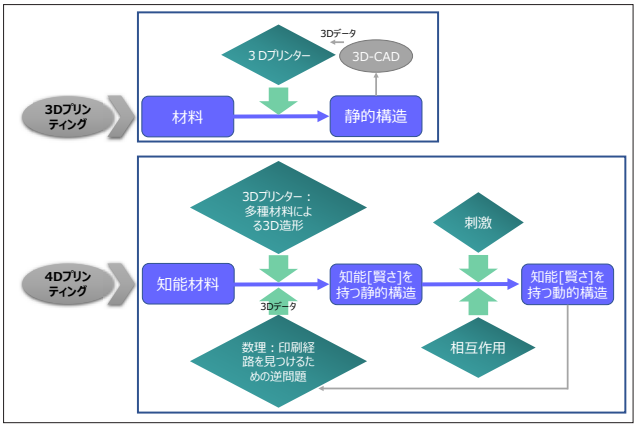
3. 3D プリンティングと 4D プリンティングの違い

4D プリンティングが、それまでの 3D プリンターによる造形（3D プリンティング）とどのように違うのかを図表 4 に示す[7)]。

3D プリンティングでは、造形物の 3D データを 3D-CAD を用いて準備する。3D プリンターは、この 3D データに従って単一あるいは複数の材料を造形し、3D の静的な構造物を作り出す。一方、4D プリンティングでは、知能材料（スマートマテリアル）を使うところが特徴的である。知能材料とは、外部環境に応答して、変形などの動作（アクチュエーション）を起こす材料である。例えば、ハイドロゲルと呼ばれる、水を吸って膨らむ（膨潤する）知能材料は、3D プリンターで造形した後に水中に入れると、水を吸って更に膨潤して体積が増加したり、反対に塩水に入れると収縮して体積が減少したりする性質がある。他にも、液晶や形状記憶ポリマーなどの知能材料も温度で動作する性質がある。

3D プリンターで造形した知能材料は、その時点では安定な静的構造を取っているが、水中に入れたり、熱を加えたりすると、変形して、最終的な「動的構造」に至る。3D プリンターで造形した直後は一旦、静的構造をとっているがその静的構造は知能、すなわち賢さを内包しており、刺激によって知能（賢さ）が発現し、動作が起こり、動的構造に至る。この知能が発現した動的構造から、逆算してどのような静的構造に 3D 造形すれば良いかを求めるのは、数理の問題となり、結果から原因を、時間を反対方向に進めて解こうとする「逆問題」に相当する。4D プリンティングが従来の 3D プリンティングと大きく違う点は、①知能材料を用いること、②逆問題を扱うこと、の二点である。

図表 4　3D プリンティングと 4D プリンティングの違い



参考文献 7）を基に
科学技術予測・政策基盤調査研究センターにて作成

知能材料についての 4D プリンティングがもたらす興味深い現象を例示した研究例を紹介する[8)]。知能材料として、セルロース繊維を内包したハイドロゲルを用いると、例えば平面状の造形物が自発的に変形して、ランの花びらの形にできることが示されている。最終的な動的構造に至るようにするには、どのような設計をすれば良いかという逆問題を解く、4D プリンティングの在り方が、この研究によって示された。

さらに、4D プリンティングにおける基礎研究として、変形と複数安定構造（Bi-Stable）構造を扱う、折り紙の幾何学にも注目が集まっている。コンピュータを用いて逆問題を解き、折り紙の新たな原理を探求するもので、その一般的な入門書も 2020 年 4 月に出版された[9)]。折り紙の分野では、「三浦折り」など、日本から画期的な成果が発信されてきており、今後、日本独自の 4D プリンティングの新しい可能性が広がることが期待される。

ここで述べたように、当初、「4D プリンティング =3D プリンティング + 時間」、というような単純な発想で研究が始まった感もあるが、知能材料や逆問題にどのようなアプローチで取り組むかという段階にシフトしていると考えて良いだろう。

4. 4D マテリアル

4D プリンティングでは上述したように知能材料（スマートマテリアル）を用いることが前提になっている。ここでは、4D プリンティングに用いられる材料“4D マテリアル”について考える（図表 5）。

4D プリンティングは、知能材料を 3D プリンター

図表 5　4D マテリアルの特徴

“4Dマテリアル” = 3Dプリンタブルな知能材料		
求められる性質	知能性（自己制御機能）（スマートネス）	3D印刷可能性（3Dプリンタビリティ）
主に考慮すべき点	単純応答／重複応答／複雑応答	粘弾性調節剤・増粘剤
	応答条件（刺激の種類や強度）	反応開始剤
	応答速度	硬化剤・架橋剤
	動作性能	犠牲材料（サポート材）
その他	自己修復機能、形状記憶機能、など	界面活性剤、フィラー、など

参考文献 7）を基に
科学技術予測・政策基盤調査研究センターにて作成

で 3D 造形することによって初めて可能になるので、「4D マテリアルとは、3D プリンタブルな知能材料」ということができるだろう。そのため、4D マテリアルに求められる性質は、知能性あるいは自己制御機能（スマートネス）と 3D 印刷可能性（3D プリンタビリティ）ということになる。

知能性（自己制御機能）で考慮すべきパラメーターは、刺激への応答が単純か複雑かという応答の数、それらの応答を起こす条件（刺激の種類や強度）、応答の速度、応答に対する動作性能（動作の大きさ、発生力）などがある。またもう一つの性質である 3D 印刷可能性で考慮すべきパラメーターは 3D プリンティングの際に問題になる材料の粘弾性（ねんだん）や粘性を調節する成分、また硬化反応を開始する反応開始剤、さらに、サポート材として用いられる犠牲材料などが重要になる。

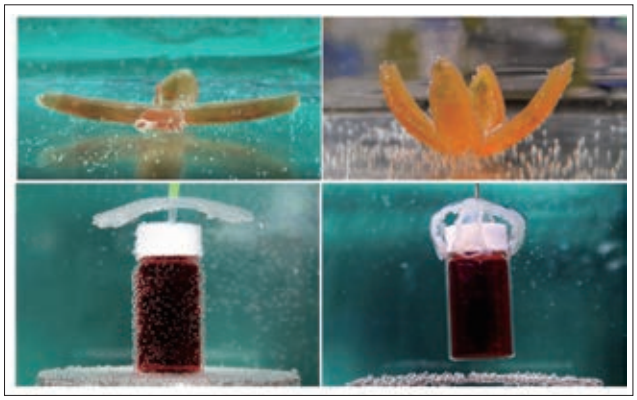
5. 4D プリンティングの研究例

○元の形に戻る 4D プリンティング

4D プリンティングの一つの例として応答温度の異なる 2 種類の形状記憶ゲルを用いた 4D プリンティングの実例について紹介する[10]（図表 6）。

温度依存性が異なる 2 種類の材料を 3D プリンターで複合して造形することにより、その温度応答性の差を利用して造形物の変形を自己動作させることが可能になる。この例では単純な形状でありながら花びらが開閉するような動きを起こしたり、ロボットアームの先に取り付けるグリッパーのような働きを可逆的に起こしたりすることに成功している。4D プリンティングでは、このように元の形に戻ることも含めた「知能（賢さ）を持った動的構造」を発現させることができる。この挙動は計算機シミュレーションを活用してモデル化したり予測したりすることが可能であり、今後、計算科学との融合が大いに発展すると予想される。

図表 6　応答温度の異なる 2 種類の形状記憶ゲルの 4D プリンティングによって作られた花びら構造（上）と知能グリッパー（下）



出典：参考文献 10）

○ 4D プリンティングにおける多様性

ここまでは、刺激応答性のゲル材料における 4D プリンティング研究の事例を取り上げて解説してきたが、4D プリンティングには多様性がある[11]（図表 7）。

まず一つは材料の選び方に多様性がある。やわらかいハイドロゲル[12、13]のほかにも、液晶や形状記憶ポリマーなどがある他、形状記憶金属や機能性ゴムなども知能材料の対象になりうる。最近では食品の 4D プリンティングもレビューされている[14]。また、応答の在り方にも多様性がある。湿気や水、pH などが応答を起こす刺激になる他、光や熱、温度差によって様々な応答を起こす機能性材料が多く開発されており、これらが 3D プリンタブルになれば 4D プリンティングに用いられる 4D マテリアルになる可能性は大いにある。

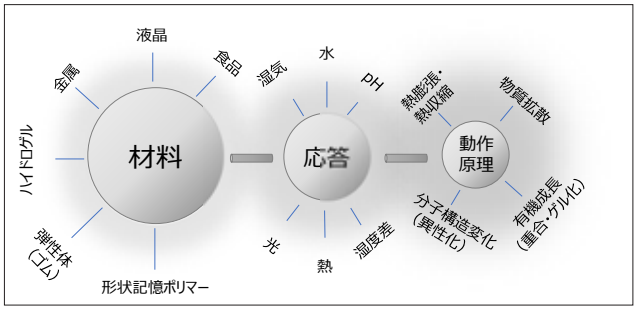
機能性材料の研究は日本のお家芸でもあるが、それが 4D マテリアルとなって、4D プリンティングに多様性を生み出すという新しい価値をもたらせば、日本がこの分野で一気にプレゼンスを高めることが期待される。

○高次の知能実現が可能な広義の 4D プリンティング

4D プリンティングに 3D プリンタブルなセンサーを組み合わせようという概念も提唱されている[15]。そういう総体を 4D プリンティングとして広義に捉え、知能（賢さ）を持つ動的構造の設計（逆問題）に AI を積極的に活用し、機械学習による設計の繰り返しにより、造形物の知能を高めるアプローチをとろうとする考え方もある。

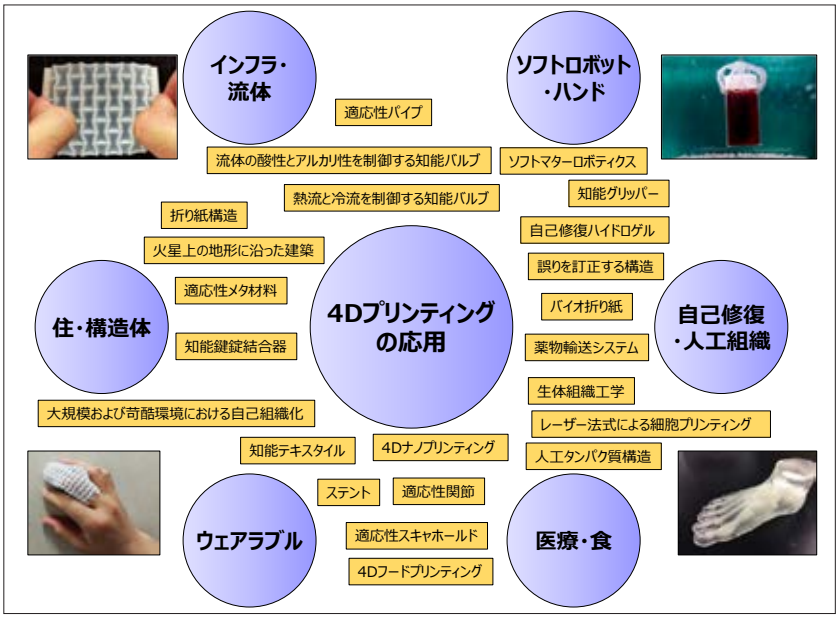
例えば、人工的にアメフラシに類似したような、外部刺激に応じて幾つかの異なる挙動が見られるような原始的な生命体のような動きを 4D プリンティン

図表 7　4D プリンティングの多様性



参考文献 11）を基に科学技術予測・政策基盤調査研究センターにて作成

図表 8　4D プリンティングの応用研究



参考文献 7）を基に科学技術予測・政策基盤調査研究センターにて作成

グで実現できれば、造形物に神経回路に相当する AI を組み込まなくても、造形物の外部刺激に対する応答によって、あたかも神経を持ったような生物に似たソフトロボットの振る舞いを人工生命風に材料ベースで実現できる可能性がある。このような研究は、流体や軟体を計算に用いるような物理リザバーコンピューティングの研究と融合することで、4D プリンティングにおける高次機能、高次の知能実現につながる可能性がある。

○ 4D プリンティングの応用研究

4D プリンティングの研究には多くの応用研究が見られる（図表 8）。

特に近年注目されるソフトロボット分野への応用では、より適応性の高いスマートグリッパーや損傷を受けたロボットのボディが 4D プリンティングの動的構造として自己修復する機構、また造形時の誤りが自動的に訂正されるような事後修理などの提案もなされている。

6. 今後の展開

本稿では 4D プリンティングが、大きく発展し始めていることを紹介した。さらに、3D プリンターの装置そのものをスマート化する動きも活発化しており、3D プリンターの上でプラモデルのようなパーツと組立て用の道具を同時に造形した後に、3D プリンターが道具を使いながらパーツを自動的に組み立てて、走る小さな模型の車が完成するという研究発表もある[16]。この研究は国内の 4D プリンティング会議である 4DFF で 2020 年に発表された。ごく最近では、3D プリンターを融合したレーザーカッターの内部で、ドローンのボディが部品をマウントしながら造形され、導電性銀インクで配線が印刷され、人の手を一切使わずに、ドローンが組み上がりそのまま飛び去る「レーザーファクトリー」の動画がマサチューセッツ工科大学と米マイクロソフトのコラボで発表され注目されている[17]。今後、10 年以内に 3D プリンターによるデジタルものづくりに計算科学・AI が融合した 4D プリンティング・4D マテリアルの科学技術が実現し、2033 年頃には社会実装される未来が予想されている[18]。

第 6 期科学技術・イノベーション基本計画（令和 3 年 3 月 26 日閣議決定）[19] では、Society5.0 の実現に向けた政策として、サイバー空間とフィジカル空間の融合による新たな価値の創出を挙げている。また、官民連携による分野別戦略の推進の一つとして「マテリアル革新力強化戦略」[20] を取りまとめている。この戦略では、研究開発から社会実装を加速し、国際競争力向上のためにデータ駆動型研究開発を推進するために、特にマテリアルデータとプロセスインフォマティクスの融合強化を挙げている。材料・製造分野のデジタルトランスフォーメーション (DX) を加速する高いポテンシャルを有するデジタルファブリケーション・4D プリンティングは、マテリアルと製造技術のデジタル統合、さらに、従来の材料・製造技術を凌駕（りょうが）する可能性のある基幹科学技術であり、それを担う新世代人材の育成と併せて、積極的な研究開発・人材施策が望まれる。

謝辞

本稿作成に当たり、山形大学 小川純 准教授、貝沼友紀 研究支援者に図表等の作成でお世話になった。ここに感謝の意を表する。

参考文献・資料

1) 蒲生秀典、「デジタルファブリケーションの最近の動向―3D プリンタを利用した新しいものづくりの可能性―」、科学技術動向、No.137、P.19-26、(2013 年 8 月) : http://hdl.handle.net/11035/2416
2) 蒲生秀典、「デジタルファブリケーション・医療応用の Horizon ～ 3D デジタルデータの活用とバイオファブリケーションの進展～」、STI-Horizon、Vol.2, No.1、P24-31、(2016 年 3 月) : https://doi.org/10.15108/stih.00016
3) 欧州委員会 HP : https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/knowledge_publications_tools_and_data/documents/ec_rtd_radical-innovation-breakthrough_052019.pdf
4) 「スカイラー・ティビッツ：世界を変える 4D プリンティング」、TED（2013 年 2 月）: https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing?language=ja#t-23959
5) 「4D Printing May Bolster Arsenal of US Army」、LIVE SCIENCE（2013 年 11 月 1 日）: https://www.livescience.com/40888-army-4d-printing-grant.html
6) S. Joshi, K. Rawat, Karunakaran C, V. Rajamohan, A. T. Mathew, K. Koziol, V.K. Thakur, Balan A. S. S., 4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges, Appl. Mater. Today 18, 100490 (2020)
7) F. Momeni, S. M. M. Hassani. N, X. Liu, J. Ni, A review of 4D printing, Materials and Design 122, 42 (2017)
8) A. S. Gladman, E. A. Matsumoto, R. G. Nuzzo, L. Mahadevan, J. A. Lewis, Biomimetic 4D printing, Nat. Mater. 15, 413 (2016)
9) 田中浩也、舘知宏、「コンピュテーショナル・ファブリケーション　～折る・詰むのデザインとサイエンス～」、彰国社 (2020 年 4 月)
10) MD N. I. Shiblee, K. Ahmed, M. Kawakami, H. Furukawa, 4D Printing of Shape - Memory Hydrogels for Soft - Robotic Functions, Adv. Mater. Technol., 4, 1900071 (2019)
11) F. Momeni, J. Ni, Laws of 4D Printing, Engineering, 6 1035 (2020)
12) M. Champeau, D. A. Heinze, T. N. Viana, E. R. de Souza, A. C. Chinellato, S. TItotto, 4D Printing of Hydrogels: A Review, Adv. Funct. Mater. 30, 191606 (2020)
13) K. Ahmed, MD N. I. Shiblee, A. Khosla, L. Nagahara, T. Thundat, H. Furukawa, Review—Recent Progresses in 4D Printing of Gel Materials, J. Electrochem. Soc. 167, 037563 (2020)
14) Z. Teng, M. Zhang, A. S. Mujumdar, 4D printing: Recent advances and proposals in the food sector, Trends in Food Science & Technology 110, 349 (2021)
15) A. Zolfagharian, A. Kaynak, M. Bodagni, A. Kouzani, S. Gharaie, S. Nahavandi, Control-based 4D Printing: Adaptive 4DpPrinted Systems, Appl. Sci. 10, 3020 (2020)
16) 黒木優人、渡邊恵太、「Functgraph の応用と機能生成の研究」、YouTube（2021 年 3 月）: https://www.youtube.com/watch?v=FZnTdPuAecs
17) 「ドローンを家庭で自動製造できる工作機　MIT と Microsoft の「LaserFactory」」、iTmedia NEWS（2021 年 3 月 12 日）: https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2103/12/news102.html
18) 科学技術・学術政策研究所、調査資料 -292「第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査」、(2020 年 6 月) : http://doi.org/10.15108/rm292
19) 内閣府、第 6 期科学技術・イノベーション基本計画（令和 3 年（2021 年）3 月 26 日閣議決定）: https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf
20) 内閣官房、マテリアル革新力強化戦略（2021 年 4 月 27 日統合イノベーション戦略推進会議決定）: https://www8.cao.go.jp/cstp/material/honbun_gaiyo.pdf