

Emerging Technology Insights

Tech Translated: 4D Printing
4D プリンティング

2025 年 7 月

PwC コンサルティング合同会社
PwC Intelligence マネージャー 柳川 素子
Technology Laboratory ディレクター 近藤 芳朗



Tech Translated: 4D Printing

4D プリンティング

s+b a PwC publication

4D プリンティングとは何か？

4D プリンティングはその名のとおりに、3D プリンティングに「時間経過による変化」という追加の次元をもたらす。「4D プリンティングは積層造形における次世代技術であり、無生物に生物のような環境刺激への反応能力を与えることで、その柔軟性をさらに高める」と、PwC 米国法人 グローバルAI・イノベーションテクノロジーリーダーの [Scott Likens](#) は述べている。

4D プリンティングは、柔軟なポリマー（例えば、セルロースを含浸させたハイドロゲル）を、製造工程において本来は硬い構造物に埋め込むことで機能する。これらの柔軟な部分は、水に浸したドライフラワーが再び「開花」するのと同じように活性化される。

どのようなビジネス上の問題に対処できるか？

4D プリントされた物体は、プリンタから取り出した直後から、移動、変形、さらには自己組織化が可能となる。それには熱、光、水といった単純な外部刺激を与えるだけで十分で、モーターなどの追加部品は必要ない。開発中の4D プリンタの多くは既存の3D プリンタを利用しているが、メタマテリアル（自然界に存在する物質には通常見られない、特殊な特性を持つ合成材料）といった、より革新的な技術を活用したものもある。つまり、潜在的なユースケースが非常に豊富であるということが示唆される。

- ・ 4D プリンティングにより、インフラの耐久性が向上する。例えば、凍結すると拡張するパイプや、地震の際にたわんで亀裂を自己修復する橋などが挙げられる。
- ・ 消費者向け分野では、4D プリンティングにより個別にカスタマイズされた製品を大規模に生産できる可能性がある。例えば、肌に触れると自動的に体にフィットする衣服や、常に足裏を完璧にサポートするスニーカーなどが考えられる。アディダスはすでにこの技術を応用しており、4DFWDスニーカーⁱでは柔軟な格子状のソールが下方向への圧力を前方への推進力に変換できる。

ⁱ Carbon, Inc, “Introducing adidas 4DFWD”, 2025/5/30 アクセス: <https://www.carbon3d.com/resources/case-study/introducing-adidas-4dfwd-the-worlds-first-3d-printed-anisotropic-lattice-midsole-designed-to-move-you-forward>

- ・ 航空宇宙分野では、4Dの翼が飛行中に形状を動的に変化させ、空気力学的効率を向上させることが可能になるかもしれない。
- ・ ヘルスケア分野では、汎用的なタンパク質鎖を特定の形状に折り畳んで患者に投与することで、必要に応じて個別化された薬剤を投与できる可能性がある。さらに、病院では汎用的な設計を基に、オンデマンドでオーダーメイドの義肢を4Dプリントできるようになるかもしれない。研究者はすでに、4Dプリンティングを使用して人間の骨や組織の成長を促すスキャフォールドⁱⁱ,ⁱⁱⁱを作成し、個々の患者の体に適応するスマートインプラントを提供している。

どのように価値を創造するか？

4Dプリンティングは、革新的な新製品の開発を可能にするだけではない。この技術を効果的にスケールアップできれば、企業は3Dプリンティングによる製造・サプライチェーンの革新と、自己組立型の流通モデルによる経済効率を融合させることが可能になる。場合によっては、製品の自動的な組み立てを実現できる可能性もある。

「最も基本的な形態では、平らな板を消費者に配送し、ヘアドライヤーを当てるだけで複雑な家具に変身させることができるだろう。さらに、このコンセプトは、送電塔、タービンブレード^{iv}、緊急時のシェルターといった大型の物体にも応用できる可能性がある」とLikensは述べている。「これらのアプリケーションは、スマートシティやコグニティブビルディングと密接に連携する。4Dプリンティングによって形成された物体は、設計上の固有の特性として、自動的にその役割を果たす。電力供給を必要とせず、交換すべき可動部品がないため、メンテナンスコストが大幅に削減されることになる。これは新たな産業革命につながる重要な推進力となるだろう」。

誰が注意を払うべきか？

このテクノロジーは製造業のイノベーションの最前線にある。航空宇宙・防衛、都市・インフラ、重工業・エンジニアリング、建設、産業機械、運輸・物流などの業界の COO、CTO、CSO、CIO、CRO、主任エンジニア／研究開発リーダーなどのリーダーは、4Dプリンティング技術が自社のビジネスにどのような影響を与えるかを検討する必要がある。

企業はどのように準備すればよいのか？

4Dプリンティングが組織に応用できそうな場合、Likensは、ワーキンググループを設置してこのトピックを徹底的に調査し、4Dプリンティングが製品の設計、製造、流通の領域で自社のビジネスに与える影響を特定することを推奨している。「潜在的な応用がバリューチェーン全体に影響を及ぼす可能性に留意すべきだ。その影響を評価する際には、エコシステム全体を考慮することに価値がある」とLikensは述べている。社内で、あるいは他の組織と連携してR&Dに投資することで、先行者利益を獲得し、新たな収益源を開拓できる可能性が生まれる。

ⁱⁱ 4D smart scaffolds for tissue engineering, physicsworld,2018/5/21: <https://physicsworld.com/a/4d-smart-scaffolds-for-tissue-engineering/>

ⁱⁱⁱ 訳注: 再生医療や細胞培養の分野で用いられる、細胞を付着させて増殖や組織形成を促す「足場」となる構造物

^{iv} 訳注: 航空機エンジンや発電機に使用されるガス／蒸気タービンを構成する羽状の部品

日本版解説

■ 4Dプリンティングの応用分野と取り組み

3Dプリンティングに「時間による変化」の要素を加えた4Dプリンティングでは、形状記憶ポリマーやハイドロゲルなど軟性の素材を用いて成形された物体の形状や機能が、外部刺激によって変化する。この特性を生かし、これまでの常識を変える用途を生み出すことが期待されている。

まず、3Dプリンティングから4Dプリンティングへと技術が展開した経緯を簡単に見ておきたい。3Dプリンティングの実用化は1980年代に産業用として始まったのち、2009年に米国企業が保有していた「熱溶解積層法(FDM法)」¹特許の権利期間が満了になったことに伴い、複数の企業が廉価版の製品をリリースするようになり民生化が進んだ²。2012年には米国で科学技術評論家による書籍³が出版され、3Dプリンタなどのデジタル工作技術を活用して、誰でも製品の作り手になれるという「ものづくりの民主化」のコンセプトが注目される。さらに翌年の2013年に当時の米国オバマ大統領が一般教書演説で3Dプリンタの可能性に言及したことで、認知が一般層まで拡大した。

時を同じくして、2013年の大規模Webカンファレンスでのプレゼン⁴を機に、4Dプリンティングの概念が注目されるようになり、研究が拡大した。論文検索サービスでの4Dプリンティングに関する論文ヒット数は2013年の約38件から2020年には2,000件超に増加したとのデータがある⁵。さらに本稿執筆時点で2024年の論文ヒット数を確認すると、5,500件超とさらに急増しており⁶、4Dプリンティングが本格的な研究分野として世界的に拡大していることがわかる。

前段で翻訳した「[Tech Translated: 4D Printing](#)」では、インフラ、アパレル、航空宇宙、ヘルスケア分野での4Dプリンティング実用化のアイデアや応用事例が紹介されている。加えてその他の領域でも4Dプリンティングの自己変形・修復が可能な特性を生かした活用が想定され、日本でも一部先行的な取り組みが見られる(図表1)。

図表1 4Dプリンティングの主な応用分野と日本における取り組み事例

分野	具体内容
製造業・建築・インフラ	<ul style="list-style-type: none">破損後に自己修復する部品、自動組立式製品(家具など)による利便性向上環境や衝撃に応じて形状や硬度を変化させる部品や外装による機能向上慶應義塾大学で、自己修復素材などの研究が行われている⁷
航空・宇宙	<ul style="list-style-type: none">モーターなどが不要で自己展開するアンテナやソーラーパネル、衛星などを平らな板の形態でロケットに搭載し、打ち上げ時の体積や重量を削減東京大学大学院の研究グループが開発した、加熱により自動変形する印刷技術の将来展望として、宇宙空間での変形などが想定されている⁸
医療・バイオ	<ul style="list-style-type: none">組織や臓器の変化をシミュレーションし、再生医療に活用日本の研究者が、形状記憶高分子を使用した治療用デバイスを4Dプリンティングで作製し、細胞や組織に作用するパッチなどを開発⁹
ソフトロボティクス	<ul style="list-style-type: none">眼球など、生物に近い動作・質感を可能とするロボット部品の開発山形大学でゲル4Dプリンティングを一部利用した虫型、犬型ロボットなどを開発¹⁰
ファッション・デザイン	<ul style="list-style-type: none">平面でプリントされたシートやパーツが刺激によって変化する技術を服やアクセサリに利用イッセイミヤケは、「TYPE-X Inkjet 4D Print project」において、東京大学大学院の研究グループなどが開発した、加熱により自動変形する折紙を使ったアクセサリを発表¹¹

出所 各種公開情報を基に作成

■ 日本における研究開発動向

グローバルでみると、アカデミア・研究機関だけでなく、大手プリント機器メーカー、3Dプリント機器メーカー、設計・製造分野のデジタルソフトウェアメーカーといった産業分野の大手企業や、バイオ・医療分野の先進企業などが中心となり、4Dプリンティングの研究開発をリードしている。一方日本では、主に大学主導の産学官連携による研究開発やPoCを中心に、4Dプリンティングの実用化に向けた取り組みが行われている状況で、国内の大手メーカーやベンチャーなどがリードする形でのR&Dや商用化の事例は現状ではあまり見られない。現在日本において進められている4Dプリンティング関連の研究開発における連携動向を、図表2にまとめた。

図表2 日本における4Dプリンティング関連の主な研究開発・連携動向

「NEDO先導研究プログラム／マテリアル・バイオ革新技術先導研究プログラム」¹²

- ・ 山形大学、九州大学、立命館大学とベンチャーなどが参画する「革新的異種柔軟材料3D/4Dものづくり基盤の構築」がNEDO事業に採択(2023年4月～2026年3月)¹³
- ・ 「多くの材料研究者や機械工学研究者が利活用可能なソフト材料の3D/4Dプリンティングを推進できるプラットフォームの構築」を目指し、産学連携体制で研究活動を実施
- ・ 4Dプリント用途のインク開発、多方式融合型のキメラ4Dプリンタ、最終的な造形物から逆算して開発に着手するための4Dシミュレーター(計算ソフトウェア)、ナレッジ共有システムの研究開発に取り組む¹⁴

4DFF研究会¹⁵

- ・ 日本画像学会内に設置された研究グループ組織で、「これまでの3D造形・再現技術を超えていく新しい価値創造を目指した研究・開発」をスコープとしている。母体となる組織は慶應義塾大学が設立し、大学や機器メーカー、素材メーカーなどが協賛母体となり、コンファレンス実施、ジャーナル発行などを行う

やわらか3D共創コンソーシアム¹⁶

- ・ 3Dプリンタと多様な材料の組み合わせによるものづくり産業の活性化を目的に、山形大学を中心として技術関連の企業・団体や山形県地元企業が集まるプラットフォームづくりを目指す
- ・ 高強度ゲルなど多様な材料を使用した4Dプリンティングも議論の視野に入れている

日本AM協会

- ・ 3DAM(Additive Manufacturing:付加製造)技術を活用したものづくりの普及促進と製造業DXにつながる新しい価値創造を目指し、国内外の関連企業と政府、大学や関連研究機関を含む産学官連携での変革創出を目指す
- ・ 4Dに関する明記は現時点ではないが、3DAMの発展として4Dも視野に入ることが考えられる

出所 各種公開情報を基に作成

■ 4Dプリンティングの可能性と、発展において注目すべき観点

世界の4Dプリンティング市場は北米が牽引しており、その背景には主要企業による投資や、航空宇宙・ヘルスケアといった領域における先端技術の早期採用、軍事・防衛関連の政府支援がある。また学術論文数では、中国が米国を上回る規模となり存在感を示している¹⁷。

一方で、日本における4Dプリンティング研究は、医療や素材などの一部の分野で独自性のある取り組みが見られるものの、特定領域での実装や、積極的な政府支援などによる注力は現状では行われていない。国際的な論文数において海外と比較して後れを取っていることも指摘される¹⁸。上述のように、日本における4Dプリンティングの研究開発やPoCは大学などの研究機関を中心にアカデミア主導で行われているが、今後の本格的な実装や商用化を見据えた場合には、産業界との連携強化がカギとなるだろう。その際の具体的な施策としては、日本の製造業が持つ素材や加工の強みを生かした方策の検討・実行、関連プレイヤー間での連携プラットフォームの構築が重要になると考えられる。

素材や加工の強みを生かした方策の検討・実行

日本には素材や精密加工など、既存の製造業の強みがあり、すでにある技術や知見が4Dプリンティングに活用できる場合もあると考えられる。日本の製造業において素材・装置・部品メーカーとユーザー企業が一体となって「すり合わせ」型で細やかな製品調整や品質管理を行ってきた経験を生かすことで、4Dプリンティングに関しても用途に適した材料開発や設計手法が進化する可能性が高い。特に、4Dプリンティングでは刺激応答性が必要になるため、材料に求められる機能がカギとなる。その観点で機能性素材の果たす役割が大きくなると想定され、従来日本企業に強みがあるとされてきた高機能素材技術が役立つ場面が増えるだろう。また、その素材を4Dプリンティング用に加工する機械側では、光・熱・水などの刺激に対してどのタイミングでどの程度の変化を与えるか、という高度な加工技術が重視されることになり、ここでも既存の日本企業の強みを生かす場面が出てくることが考えられる。

今後は、AIを4Dプリンティングの研究開発に活用し、材料開発時の組み合わせや、時間経過による変化のシミュレーション精度向上、製造プロセスの最適化や欠陥検出・修復などに役立てることができると想定される。特に、4D変化の結果として目標とする形状変化を逆算し、特定の刺激に応答する材料組成や構造を設計する「逆問題設計」の高度化が、AIを活用することでさらに進む可能性もある。また中長期的には、4Dプリンティング用途に適した**メタマテリアル**の開発・利用がさらなる用途開発や実用化を後押しすることも考えられる。このようなテクノロジーの進展と「すり合わせ」の相互作用を生かす形で、日本ならではの研究開発と実用化が進展することが期待される。

連携プラットフォームの構築

さらに、個別の「すり合わせ」の事例を積み重ねるだけでなく、産業全体として規模を拡大させていくには、プレイヤーが連携可能なプラットフォームを構築することが重要となる。図表2に記載したように、日本でも大学や研究機関などを中心とした産学連携体制がいくつか動いているが、このような座組を起点として産業界との連携を強化することで、材料・装置開発、設計技術の高度化が進むことが期待される。すでにある取り組みとして、NEDOの「革新的異種柔軟材料3D/4Dものづくり基盤の構築」では「ナレッジ共有システムの開発」が研究開発項目の一つとして挙げられ、この分野を発展させる基盤となる知見が関係者間で共有され、研究開発環境を活性化することが目指されており、具体的な成果が注目される。

なお、エコシステム形成に当たっては、主要な研究機関や大企業だけでなく、中小企業の参画促進も視野に入れることで、より広範な用途の検討・実装と産業の拡大につながるといえる。素材開発や部品製造技術などで、4Dプリンティングに活用可能な素地を持つ中小企業は複数存在すると想定され、それらの企業の参入を促進するためには、初期投資などの用途を想定した公的な補助金制度や、共用の研究開発施設などの設置といった施策も有用かもしれない。

最も重要になるのは4Dプリンティングが実現しうる用途である。その観点で、ユーザー側のアイデアに基づく開発や関与が必須となる。グローバル版では「(4Dプリンティング技術の)潜在的な応用がバリューチェーン全体に影響を及ぼす可能性に留意すべき」との指摘がなされているが、ユーザーとなりうる企業などの主体が、自社ビジネスのバリューチェーンにおいて4Dプリンティングがもたらしうる変化点に気づき、その用途を起点に素材メーカーや機械メーカーに働きかけて共同開発を行うといった進め方が必要となるだろう。さらに、このような先進的な観点で4Dプリンティングがもたらしうる価値や脅威を広く産業界に伝え共有するためには、政策面から働きかけを行うなど、官による後押しも奏功すると考えられる。

またプラットフォームを構築してプレイヤー間の連携を進める中では、技術そのものに関する情報共有や共同開発にとどまらず、中長期的に4Dプリンティング分野の発展を支える人材育成や知財管理などへの関与も

必要になってくるだろう。4Dプリンティングの研究開発に資する分野横断的なカリキュラムの開発・設定とそれを活用した人材育成、市場での競争優位性を確保するための知財や技術のオープン・クローズ戦略を駆使したアプローチなどに主体的に関与し、議論をリードしうる体制構築が求められる。なお知財管理に関して、前述の3Dプリンティングの普及は特許の期限切れがもたらしたという事例からの示唆として、知財で縛りすぎると技術進化や普及が阻害される場合もあると考えられる。特に4Dプリンティングでは素材をカスタマイズに近い発想で使用することが想定され、その意味では特に素材に関しては知財で過度に縛ることなく、装置・機械技術に合わせて調整するノウハウや分析しても模倣困難な配合技術にフォーカスして開発することで、オープンなプラットフォームの利点を駆使した協力的な研究開発を行うことが重要かもしれない。一方で独自の装置や仕組みについては知財でクローズ的に保護するなど、使い分けが求められるだろう。

■ 幅広い関連プレイヤーが連携し、課題先進国の強みを生かすことがカギ

4Dプリンティングによって製品や部品のパーソナライズやカスタマイズが現状よりもさらに容易になり、自己組立型の製品や可変型の部品などを必要な分だけオンデマンドで生産するとともに、回収後の分解などにも対応できれば、サステナブルなものづくりにつながり、環境負荷を軽減できる可能性がある。また、医療分野や減災などに加え、宇宙や海洋といった特殊な環境での活用も想定され、これまでになかった形で用途を拡大し、革新的な製品やサービスを創出できるかもしれない。この点で、4Dプリンティングは製造業の未来を変え、社会課題解決にもつながる「次世代ものづくり技術」の中核のひとつになりうる技術だといえる。

高齢化や災害などをはじめとした“課題先進国”としての日本が、4Dプリンティングが社会課題解決に役立つ具体的な用途を実用化できれば、先端技術領域での強みをグローバル規模で発揮できる可能性がある。4Dプリンティング技術を生かした自己組立・自己修復・環境適応ができる製品が活用できる領域は幅広く多様にあるはずで、固定観念を越えた柔軟な発想に基づく適用分野の特定と研究開発が奏功するだろう。

また、医療や航空宇宙、自動車といったグローバルで成長が見込まれビジネス展開が期待される分野については、進出先の国・地域の特色や慣習なども考慮しつつ、現地企業や研究機関との提携や共同開発などを検討・実行する必要があると考えられる。研究機関や企業などを含めた幅広い関連プレイヤーが、学際・産学融合の両面で連携し、4Dプリンティングを活用できる領域や具体的な用途を見定めたくうえで実用化に向けた道筋を立て、具体的な方法で実現していくことが望まれる。

本コンテンツの翻訳版部分は、pwc.com に掲載された strategy+business マガジンの記事 [Tech Translated: 4D Printing](#) の英語テキストを PwC Consulting LLC が翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、英語版と解釈の相違がある場合は、英語版に依拠してください。

strategy+business に掲載された記事の転載は、必ずしも PwC ネットワークのメンバー ファームの見解を反映するものではありません。出版物、製品、またはサービスのレビューや言及は、購入の承認または推奨を意味するものではありません。strategy+business は、PwC ネットワークの特定のメンバー ファームによって発行されています。

- ¹ 3D プリンタの代表的な造形手法の一つで、加熱して溶かした樹脂をノズルから押し出し、一層ずつ積み重ねることで立体物を作る方式
- ² 桑村仁, 「構造工学から見た AM の世界」, 『日本建築学会 構造工学論文集』Vol.71B, 2025/4:
https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijse/71B/0/71B_120/_pdf/-char/ja
- ³ Anderson, Chris, Makers: The New Industrial Revolution, Crown Business, 2012/10/2; 日本語版 『MAKERS 21 世紀の産業革命が始まる』, NHK 出版, 2012/10/23
- ⁴ Skylar Tibbits, "The emergence of "4D printing", TED, 2013/2:
https://www.ted.com/talks/skylar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing
- ⁵ 古川 英光, 「3D プリンティングから 4D プリンティングへーデジタルファブリケーションの新たな展開ー」, 『STI Horizon, Vol.7, No.2』, 文部科学省科学技術・学術政策研究所 (NISTEP), 2021/6/25: <https://www.nistep.go.jp/activities/sti-horizon%E8%AA%8C/vol-07no-02/stih00258>
- ⁶ Google Scholar, 2025/5/30 アクセス: <https://scholar.google.com/>
- ⁷ 複雑な多面体を瞬時に作る技術を発明 電氣的に自己修復する素材も開発, JST News, 2024/8: <https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2024/202408/index.html>
- ⁸ 折紙シートが自動で望みの立体にーインクジェットプリンタでパターンを印刷、加熱により自動変形ー, 東京大学, 2023/7/24: <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-07-24-001>
- ⁹ NIMS NOW Vol. 22 <10-11 月号> からだマテリアル, 国立研究開発法人物質・材料研究機構, 2022/11/9:
https://www.nims.go.jp/nims/publicity/publication/nimsnow/vol22/vjbbbsg0000008ptp-att/NN_JP_2022_no6_1109_WEB.pdf;
006.高湿度でも髪型を維持するスタイリング材料, つくばサイエンスニュース, 2024/3/15: <https://www.tsukuba-sci.com/?column03=006-高湿度でも髪型を維持するスタイリング材料> (
- ¹⁰ 4D プリンティングとソフトマターロボティクスで目指す知的やわらかものづくりソリューションの構築, 日本ロボット学会誌 Vol.39,2021: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/39/4/39_39_302/_pdf
- ¹¹ TYPE-X Inkjet 4D Print project, 慶應義塾大学 鳴海研究室, 2025/5/30 アクセス: <https://pplab.jp/project/type-x/>
- ¹² NEDO 事業に採択 4D プリンター研究開発を加速, 山形大学 ソフト&ウェットマター工学研究室(SWEL), 2023/5/18: <https://swel.jp/2023/05/18/nedo事業に採択-4Dプリンター研究開発を加速/>
- ¹³ Projects in SWEL, 山形大学 ソフト&ウェットマター工学研究室(SWEL), 2025/5/30 アクセス: <https://swel.jp/project-2/>
- ¹⁴ NEDO, NEDO 先導研究プログラム 2024 年度,2024/9: <https://www.nedo.go.jp/content/100982034.pdf>
- ¹⁵ 4DFF 研究会, 2025/5/30 アクセス: <https://sig4dff.org/>
- ¹⁶ やわらか 3D 共創コンソーシアム, 2025/5/23 アクセス: <https://soft3d-c.jp/>
- ¹⁷ Wencai Zhang, Zhenghao Ge and Duanling Li, Evolution and emerging trends of 4D printing: a bibliometric analysis, Manufacturing Rev. 9, 30 (2022), 2022/9/17: https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/full_html/2022/01/mfreview220041/mfreview220041.html
「3D プリンティングから 4D プリンティングへーデジタルファブリケーションの新たな展開ー」, op.cit.
- ¹⁸ Ibid.

翻訳・執筆

柳川 素子 | Motoko Yanagawa

マネージャー
PwC Intelligence

近藤 芳朗 | Yoshiro Kondo

ディレクター
Technology Laboratory

監修

三治 信一郎 | Shinichiro Sanji

パートナー
Technology Laboratory

菅原 泰広 | Yasuhiro Sugawara

パートナー
Technology Laboratory