

4D プリンティング

～次元を超えた新しい価値の創出～

藤井 雅彦
慶應義塾大学 SFC 研究所
(2020年4月3日)

1. はじめに

1.1 4D プリンティングの定義とスコープ

「2D プリンティング (プリンター)」と「3D プリンティング(プリンター)」の研究・開発に35年以上携わってきたが、これらの言葉の意味についてはある程度の共通した認識が定まっていると考えられる。特に「3D プリンター」や「3D プリンティング」に対して抱く一般的なイメージや研究・開発対象は、ISO/ASTM で定義された「Additive Manufacturing」という用語や定義、分類りに記載された内容と大きなずれはない。一方、「4D」に関しては「時間軸」を4番目の次元として捉え、多くの場合、「4D プリンティング」は時間により形状の変化を起こす3D物体を造形することと説明されてきた。しかしまだ学術的にも一般的にも認識が一致するほど4D プリンティングが注目され、その事例が身近に広まっているわけではない。そのような状況において「4D プリンティング」の市場規模やその将来予測をするレポートも存在しているが、ここでも明確な「4D」、あるいは「4D プリンティング」に対する定義が定められているわけでもない。

2013年にMITのSkylar Tibbitsが「The Emergence of “4D printing”」というテーマでTED(Technology Entertainment Design)に登壇し、3次元形状の時間変化を意図してデザインするSelf-Assembly(自己構築)を提唱した²⁾。また、近年、学術的な領域として「4D」を扱う学会・コンファレンスがいくつか発足し、いよいよ本格的に「4D」への取り組みが始まったといえる。例えばアメリカ電気学会(ECS)の「International Conference on 4D Materials and Systems (4DMS)」やJakajimaによる「4D Printing & Meta Materials Conference」である。また2019年に欧州委員会(European Commission)が未来の破壊的ブレークスルー技術をまとめた報告書³⁾の中で、4D プリンティングを取り上げている。この報告書の中では4D プリンティングについて「3D プリンティングに時間の要素を加えたもので、エネルギー刺激により時間とともに形状が変化する、あるいは自己組織化する」という説明がある。このように「4D」や「4D プリンティング」の定義は必ずしも一致しているわけではないが、時間や物理・化学刺激(熱や、電磁力など)により、変化する3D形状を作り出すこと、あるいは新規な物性を実現

する3D形状を造形すること、そしてその変化や新規物性がデザイナーの意図に沿うように発現するよう、予め物体にプログラムしておくことが共通する内容として解釈できる。

さて、いかなる要因に拠ろうとも、3D形状を変化させる、あるいは新しい物性をデザイナーの意図により作り出すことは、それらによりなんらかの機能を実現することを目指していると考えられる。さらに機能の実現は、定まった形状が提供する(形としての)価値とは異なる新規な価値を創出することを狙っているはずである。そこでこの新しい価値創出こそが4番目の次元である「4D」とすべきと考え、著者は図1に示すように、従来の4D プリンティングとして捉えられていた②の象限だけでなく、形状以外の価値を創出する③や④の象限まで4D プリンティングの範囲を広げ、『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』をこの4D プリンティングのスコープ、すなわち「4D プリンティング」の定義と定めた⁴⁾。この定義に基づけば、プリンティングと表現しながらも価値創造を具現化する手段として3Dプリンターに限定していない。もちろん形の造形だけでなく異なる材料の配分や色付け等、データ(すなわちデザイナーの意図)に基づいた様々な仕掛けが可能になった3Dプリンターは最も有力な実現手段ではあるが、他にも様々なアプローチが提案され試行されている。

4番目のDimensionに大きさや数値で規定することができない「価値」を当てはめることに対しては、様々な意見があるかもしれない。また今後さらなる4D プリンティングの進展にともない4D、あるいは4D プリンティングの再定義についての議論が進むことも歓迎する。しかし黎明期の今においては価値の創出が特定のDimensionに捉われない方が、より社会での活用、すなわち価値実装への理解が共有されるだろう。また様々なアプローチで価値創出を目指す研究者のネットワーク形成に役立ち、クロスオーバー領域の研究・開発への取り組みがより活性化すると期待している。

「Dimension」は日本語に訳せば「次元」であり、物事を考える立場、着目している面という意味も持つ。まさに価値の創出という高い次元で4D プリンティングを捉えるのも、あながち間違いではないだろう。

そこで筆者らはこの領域の研究・開発推進、および発表・議論の場を提供する学術団体[4DFF 研究会](Special

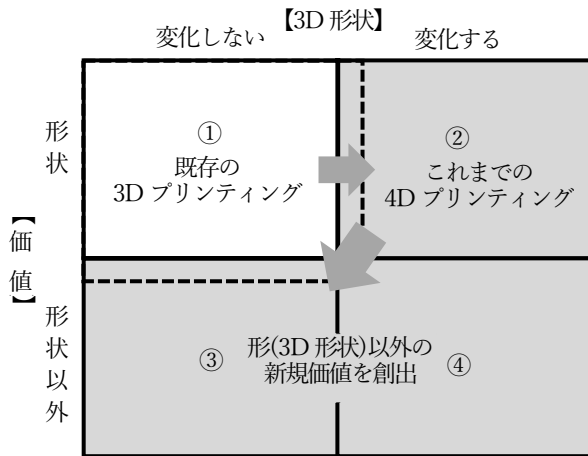


図1 4Dプリンティング領域⁴⁾

Interest Group on 4DFF)を2019年に設立し、発表の場としてコンファレンス[Conference on 4D and Functional Fabrication]の開催や、論文誌[The Journal of 4D and Functional Fabrication]の発行を行っている。

図1からもわかるように、この4Dプリンティングの範囲には破線範囲で示す既存の3Dプリンティングとして扱われている領域(具現化事例)も含んでおり、4Dプリンティングへの到達は全てが遠い未来の話ではない。しかし新たな価値創出のための意図したモデリングや価値の社会実装には、既存の3Dプリンティングとは異なるアプローチや発想が必要であり、これらの課題を解決しながら本格的に4Dプリンティングが社会に根付くのはまだ時間がかかる。これについては3章、4章で説明し、いくつかの新しいアプローチを提案する。

本稿では、筆者が提案する上記4Dプリンティングの定義・スコープに基づいて現状や課題、具現化事例、そして今後の見通しを述べる。

2. 4Dプリンティングの実現アプローチと具現化事例

2.1 価値創出のアプローチ

図1に示した4Dプリンティング領域を示すポートフォリオの横軸、すなわち物体の3D形状変化を起こすトリガーとなるものは、熱や光(可視、赤外、紫外)・電磁波(力)や電気エネルギーなどの物理刺激、また物理現象、化学反応を起こすような物質の付与が一般的である。もちろん物体が置かれた環境でこれらの刺激や物質が自然に与えられるものであるなら、この変化は単純な時間変化(経時)によるものと捉えられ、時間も形状変化を与える要因と考えられる。

また物体側の機能発揮(価値創出)のための仕掛け(アプローチ)として、表面の微細構造やジャイロイド、オクテット・トラスなど各種格子構造、あるいは井桁構造、多孔質構

造などの内部立体構造によるものや、機能性・反応性材料の配置(分布)や混合、色の分布(配色)が考えられる。機能性・反応性を持つ材料は「知能材料」と呼ばれることもある⁵⁾。

2.2 具現化事例

本節では4Dプリンティングとはどのようなものか、さらに私たちが生活する社会の中で具体的にどのように価値を発揮できるのかをイメージできるよう、ごく一部であるがこれまで提案、発表された具現化事例を図1の象限別に取り上げ紹介する。これらの事例はコンファレンスや論文として発表された研究内容が多く、製品やサービスとして実用化されているものは極めて少ない。

2.2.1 象限②(形の変化あり、形としての価値)

Skylar TibbitsがTEDで紹介した事例²⁾がまさに象限②に含まれるものである。本項で示す他の事例(②-2や②-3)は、物体が変形することで価値が目に見え、理解できるようになるものの、仕掛けの狙いとしては物体の物性や特性の制御であり、厳密には象限③に分類すべきものかもしれないが、本項で紹介する。

②-1 解像度の向上(体積の縮小)

現在の3Dプリンター方式(標準化で分類された7方式)で造形解像度を高めるには限界があり、また装置コストや造形時間にも大きく関係する。このため超分子ピラー構造を粗い解像度により大きなサイズで造形し、それを加熱することで1/1000の体積に縮小、すなわち解像度を10倍に高めた研究成果がある⁶⁾。この構造では縮小と膨張を可逆的に繰り返すことも可能だと言われている。

②-2 メタマテリアル

メタマテリアルとは自然界の物質には無い振る舞いをする人工物質であり、例えば負の屈折率や、半導体材料を用いずに光で電気伝導度を制御する構造の実現などが期待されている。

ここではメタマテリアルとして負のポアソン比を紹介する。ポアソン比とは荷重をかけた時に生じる縦と横方向の歪みの比であり、熱力学的には-1から0.5までの値が許容されることは知られているが、自然界では負のポアソン比をもつ物質は見つかっていない。圧縮方向の力を構造内部への回転に変える内部微細構造を考案し、それを3Dプリンターで造形することで縦方向に縮むと横方向にも縮む、すなわち負のポアソン比を持つ構造(多孔質体)が実現されている⁷⁾。

②-3 井桁構造による特性の制御

同じ材料、同じ大きさ(外形)、同じ材料使用量(重量)でありながら、機械特性である弾性率を所望の値に制御できる井桁構造が報告されている。井桁構造とは井の字の形に組んだはめ合い構造であり、各層の井の字の重なり位相をずらすだけで弾性率を変えることができる⁸⁾。位相のずらし量を構造

体内部で変えていくことで、一定方向からの応力による変形具合(方向)さえも制御することが可能になる。

2.2.2 象限③(形状変化なし、形以外の価値)

③-1 機能食品

ペーストや粉末状の食品材料を3Dプリンターで造形する、いわゆるフードプリンターと呼ばれるものが既に市場導入されている。これらフードプリンターによりもたらされる工程や時間短縮も重要な価値ではあるが、食品自体がこの価値を保持しているわけではない。4Dプリンティングでは摂食する人の特徴(咬合力、嚥下力)に応じて、また機械特性と味覚との関係から食品内部の構造を変え、摂食する人にあった食品を作り出す研究が行われている⁹⁾。

また、摂食する人(患者)の健康状態に合わせた食品成分や、投薬成分をカスタマイズするところまでフードプリンターを活用することが出来れば、これもフードプリンティングによる新たな価値創出といえるだろう。

③-2.3 次元分布する情報の可視化

3次元シミュレーション結果や気象に関する空間分布情報、あるいは複雑な分子構造モデルをディスプレイ上で3次元的に表現し、表示することは通常行われている。これらの情報を直接3次元空間に描画できれば、だれもがあらゆる方向から情報を容易に視認することができるため、古くからホログラフィー技術を始めた様々な方式の3Dディスプレイが考案されている。フルカラー化が可能な3Dプリンターが登場したことにより、空間となる透明(樹脂)材料の中にフルカラー材料を空間情報(分子構造や電子密度分布、あるいは気流データ)に基づいて分布させ可視化した例¹⁰⁾がある。さらに地形などの地理空間情報と気象シミュレーション結果を合わせて透明樹脂空間に展開すれば¹¹⁾、災害の影響が及ぶ範囲や大きさがすぐに確認でき、わかりやすい立体的なハザードマップとして活用することも可能になる。

③-3 非接合部材の接合機能

接着剤では接合できない材料同士を接合する機能を持った構造体が提案されている⁸⁾。材料Aと材料Bの中間部分に、それぞれの材料をはめ合い構造で一体化した領域を井桁構造で形成する。さらにそれぞれの材料比率を端部方向に向けて徐々に変えることで、両端ではそれぞれの単独材料のみが露出する(図2)。この露出した両端にそれぞれの単一材料を(熱や接着剤で)接合すれば、接着剤では接合できない材料Aと材料Bの接合を実現することができる。2種類の材料からなる接合部材は相互にはめ合わされているので、いずれかの構造が壊れない限り分離することができない。この構造はマルチノズルを有する材料押し出し法の3Dプリンターで造形可能である。この構造体の応用例の1つとして、誘電率が低いPP(ポリプロピレン)を機械強度が高いPC(ポリカーボネート)で囲む高周波数帯のアンテナ構造が提案されて

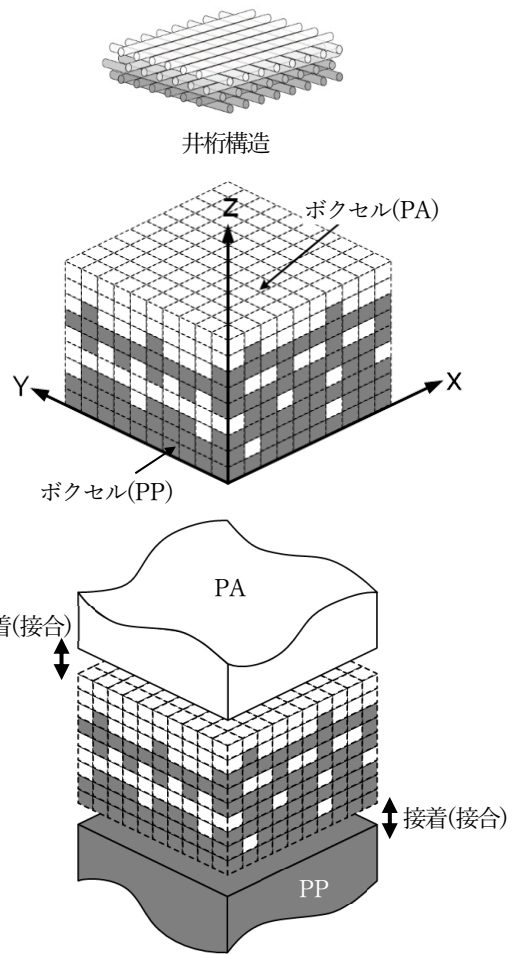


図2 井桁構造による接合機能の獲得⁸⁾

いる。PPとPCは接着剤などでは直接接合できないが、上述した接合部を3Dプリンターで造形し、PPとPCの接合部材として用いることができる。

③-4 構造色

構造色とは色材やカラー材料により発色するのではなく、表面や内部の波長程度の微細構造による干渉等で様々な色を発色させることである。波長程度に薄い膜厚を持ったシャボン玉表面での発色や、多層膜構造を持つタマムシ、鱗粉の立体微細構造によるモルフォチョウの羽根の発色で良く知られている。これを人工的に作り出す例として、インクジェット技術により両親媒性直鎖分子を含んだインクで成膜し、自己組織化により膜内部に微細構造を構成して発色させる技術が発表されている¹²⁾。

また厳密には構造色とは呼べないが、微細内部構造に着色し、角度によって異なる色が見える構造が提案されている。このような構造は解像度が向上し、内部のカラー化が容易になった3Dプリンターで造形可能になった。

③-5 階層構造

自然界の動植物に見られる階層構造を持つ高い物理特性を、3Dプリンターで実現する試みがある。例えば粉末材料

を用いる(粉末床溶融結合法の)3D プリンターによる造形プロセスにおいて、未溶解の粉末をあえて構造内に残し、適切な熱処理をすることで粉末間にネックを形成する。このようにしてヤング率が低く、高いエネルギー吸収性を兼ね備えた骨に類似した構造体を実現している¹³⁾。

2.2.3 象限④(形状変化あり, 形以外の価値)

④-1 温度調整通気口

建物内の環境(温湿度)を自動調整する Breathing Façade(呼吸するファサード)が提案されている。具現化アプローチの1つとして、形状記憶材料で形成された空隙を壁の一部に設置し、制御装置や動力がなくても環境温度や風により空隙の開き具合を変化させ、室内の温度を調整するものがある¹⁴⁾。

④-2 時間により形と機能が変化

形状記憶材料と水溶性材料、さらに魚類のえさとなる材料を混合し、外部壁の装飾品(例えば花の形)を造形する。季節(温度)により花が開花し、やがて雨風で一部が溶けて接着力を失って落下し、最後は池や川の中で魚のえさとなる¹⁵⁾。温度、雨(水)による刺激であるが、自然界で起こる事象のようにとらえられ、時間軸で形状や機能が変化しているようにも感じることができる。

④-3 無電源の物理的論理ゲート

ハエトリグサ(Venus Flytrap)の捕食動作(メカニズム)¹⁶⁾から、無電源のANDゲートを模倣したデザインの発表がある。造形主材料(シリコン、ゲル)にガラス、あるいはセルローズファイバを混ぜることで特定方向のみに伸びる構造を造形し、トルエンとシリコン、あるいは水とゲルの反応で双安定性を確保している。具体的には(虫となる)重りを梁に落下させ、圧縮させて構造内に弾性エネルギーを蓄え、水を加えることでロックをはずして内部エネルギーを放出し、形状を変える。このような[荷重]&[水の添加]の「AND」の他、「OR」「NAND」ゲートも作成されている。

④-4 再生医療(臓器再生)

1996年に米国のランガー教授とヴァカンティ教授が提案した「Tissue Engineering」以降、臓器再生は3Dプリンターだけでなく¹⁷⁾、細胞の塊を針に刺して成長させる方法や¹⁸⁾マイクロビーズ化するなど様々なアプローチにより研究が進められている。またiPS細胞が作り出せることができたようになったため、自分自身の細胞を使うことも現実的になった。臓器再生は4Dプリンティングの中でも最も実用化への期待が大きい領域の一つである。

3. 新規価値創出アプローチ実現の鍵

3.1 4Dプリンティング用データフォーマット

4Dプリンティングにおいても形としての実態が伴うため、当然立体形状(3D構造)を表現する情報は必要である。

しかし外形情報のみならず2章で示した新規価値創出のアプローチを実現するためには、内部の複雑な構造や、材料分布、さらにはそこで起こる反応に関する情報など、価値創出に係る様々な情報を立体形状情報と一緒に一元化してデータとして保持しておく必要がある。しかし4Dプリンティング用のために統一され使われているデータフォーマットはまだない。

現在3Dプリンティング用(3Dプリンター入力用)データのフォーマットとして、1988年に3D Systems社から主に3D CAD用に提案されたSTLがデファクトスタンダードとして用いられている。STLはポリゴンと呼ばれる三角形で立体物の外形を近似する、いわゆるメッシュベースのデータフォーマットである。このため複雑な内部構造を表現できないばかりか、材料情報や色情報を保持しておらず、他の情報を外形情報と一緒に持つこともできない。カラー化や異種材料の配置が可能な3Dプリンターも商品化されているが、STLデータに基づいて色や材料情報を付加してこれらの3Dプリンターで出力するためには、非常に煩雑な手間(データフロー)を必要とする。STLが提案された当時は設計された3Dデータ(STL)を最終加工用のデータとして用いたとしても、単色、単一材料、外形のみの加工しか行えない切削加工や射出成形では大きな問題が生じることはなかった。近年、3MFやAMFといった新しいデータフォーマットが提案され、3Dプリンター用データフォーマットとして使われ始めている。3MFやAMFでは内部の色や材料情報は、(外形の)表面情報からの演算により付与することができるものの、構造内部に自由に配分させるための情報を持つことはできない。またSTLと同様に外形をポリゴンで近似するメッシュベースであり、複雑な内部構造を表現することも難しく、他の情報の保持にも制限がある。色情報(外形上のテクスチャ)を持つデータフォーマットOBJがカラー化可能な3Dプリンターに使用されているがこれもメッシュベースであり、またこのデータフォーマットだけでは内部に自由に色付けすることはできない。

外形を簡易に表現することに重点が置かれていた既存のメッシュベースのデータフォーマットではなく、著者らは立体構成要素であるボクセル(voxel)を積み上げることで立体形状を表現し、さらにボクセルごとに材料情報、色情報、リンク情報(隣接ボクセルとの関係性)を保持できるボクセルベースのデータフォーマットFAV(Fabricatable Voxel)を2016年に初めて発表した¹⁹⁾(図3)。当初、FAVは3Dプリンター出力のためのデータフローの簡略化、および3Dプリンターの潜在能力を発揮させることを狙いとしていた。2019年に汎用3Dデータフォーマットに発展させるため、様々な空間分布情報を持つ様にするなど新たな仕様を追加し、最新仕様(1.1a)をJIS(日本産業規格)に登録した¹¹⁾。こ

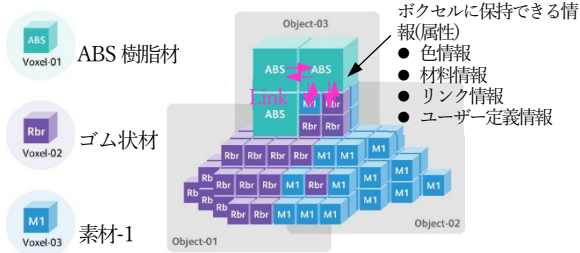


図3. FAV(ver.1.1a)による立体物の表現

のようにボクセルベースのFAVは複雑な内部形状や色、材料分布を表現できるだけでなく、ボクセルに様々な空間分布情報やテキストを保持できることから、例えばシミュレーションで予測された変形後の形状データや様々な物性値の温度依存性など、刺激に対する反応に係る情報も保持することもできる。外部FAVファイルで記述されたボクセル群を親FAVファイルの1つのボクセルとして引用できる特徴もあり、単純な材料分布のみならず、複雑な材料混合や合金の表現も可能である。

このように価値創出に係る様々な情報が必要な4Dプリンティング用のデータフォーマットとして、FAVを活用することができると考えている。統一されたデータフォーマットを使うようにすれば、異なる研究者・開発者間での情報共有も容易になり、より高いレベルでの編集も可能になる。また、4Dプリンティングの具現化において、他の4Dプリンティングで活用された仕掛け(データ)を異なる価値創出にも利用できるようになるだろう。

3.2 4D プリンティングにおけるデザイン思考とモデリング

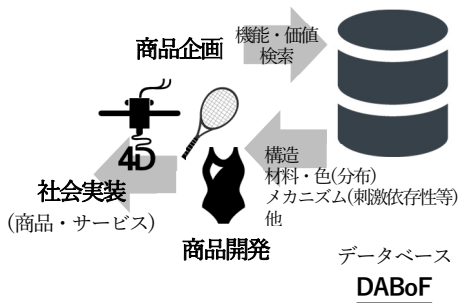
立体構造だけでなく、新規価値を創出するための所望の機能を実現させる内部構造、材料配分、そこで期待される物理・化学反応を体系的にまとめ、デザイナーの意図に基づいて効率的にモデリングを行なうことは、4Dプリンティングにおいて重要な研究領域であり、今後の4Dプリンティングの進展(価値の創出)に必要な不可欠なものである。様々な機能の一部、例えば2章で紹介したようにメタマテリアルとして負のポアソン比を実現する構造を自動的に計算する手法を見つけ出す研究例⁷⁾がある。また、複数の物性の軸によるAshby Mapと幾何学的構造を結びつけたデータベースにより、所望の物性を持った構造を抽出し、デザインに利用する提案²⁰⁾もある。しかし様々な要因、メカニズムが絡み合う複雑系の4Dデザインを体系化して誰もが使えるようになるには、これらのアプローチだけではまだ不十分であり、これから取り組まなければならない重要な課題である。

3Dプリンターの活用においてもモデリングの課題は存在している。現在多くの3Dデータは3D CADにより作成されているが、3D CADを使う設計者(デザイナー)は機能

を実現するための3D形状デザインを行なう際、最終的な製造手段(射出成形や切削加工)のデザインへの制約を当然考慮している(例えば成形型が抜けるか、切削の刃が届くかなど)。しかしこれらの制約を取り扱う3Dプリンター、すなわち複雑な内部構造が実現でき、異種材料の混合も可能になった製造手段が登場した今、長年従来製造手段の制約の下でデザインを行なってきたデザイナーが、これら3Dプリンターの性能をフルに活用したデザインを行なう(考え方を交換することは容易ではない。このためDfAM(Design for Additive Manufacturing)習得の必要性が広く認識され、初等教育から3D空間でのモデリングなどに触れるいわゆるSTEAM教育(Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics教育)の導入が必要とされている。3つの次元、すなわち3Dプリンティングでさえこのような状況であり、さらに多くの要因やメカニズムが加わる複雑系の4Dプリンティングのモデリングが効率よく進められる環境が整い、扱える人材が揃うのはさらに困難で時間がかかると予想される。

一方、自然界には材料組成と幾何学的構成を利用した比較的単純なメカニズムで、4Dプリンティングのモデリングに適用できる複雑な課題を解くヒントを持つものが多い、例えば2章で紹介したNAND回路や構造色、動植物の階層構造などである。このような自然界の巧みな仕組みに関する3D構造に関しては、データベース化して産業に応用しようとする提案は既にあり、国際標準にしようとする動向も見られる²¹⁾。3D構造のみならず、ユニークな機能とそれを実現する材料(分布)、メカニズム(物理・化学反応)を紐付け、自然界で見られる現象や仕掛けをデータベース化して4Dプリンティングのモデリングに活用することを筆者は提案している⁴⁾。自然界にヒントを求めるとは、機能実現だけでなく新しい運動メカニズムへのヒントをもたらし場合もあり、動作の新しいデザインとしてこのデータベースを活用することも可能になるはずである。

図4はこのデータベースの利用を想定した1例を示している。データベースには様々な研究成果や生体模倣メカニズムの解析結果により、機能を発現する微細構造や材料の配置、そこで発現する反応現象がFAV形式でデータ化され格納されている。データ化の際、特に微細構造は人工的に再現できるようにメカニズムに基づいて単純化されていることが重要である。機能を商品開発(社会への価値実装)に活用したい場合、このデータベースに登録されている各種機能を検索し、紐付けられた情報を利用することができる。4Dプリンティングの場合には、機能に紐付けられるのは造形可能な単純化された構造だけでなく、材料分布や物理・化学メカニズムなどが加わる。このデータベースをDABoF(Database of Function)と呼ぶ。多くの事例を集め4Dプリンティングに



FAV

<metadata>	作者, タイトル, ライセンス方針, 機能分類等
<palette>	ボクセル登録(形状, 材料情報)
<voxel>	ボクセル(id)への情報割り当て
<object>	情報の立体配置
<grid>	立体空間定義
<structure>	立体物表現
<voxel_map>	ボクセル分布(構造)
<color_map>	色分布
<link_map>	リンク情報分布
<user_defined_map>	各種情報の分布(複数可)

図4 モデリングに活用するデータベース DABoF⁴⁾

活用するために、様々な領域の研究者や開発者の参画によりこのデータベースをオープン化して構築していくべきだと考える。そのデータベースのデータ形式には、ボクセルに様々な情報が保持できる FAV が適している。黎明期にある 4D プリンティングではこのようなデータベースをモデリングに利用し、様々な応用を広げ社会における実績、認知を積んでいくべきである。

2.2 節でも述べたように、本稿で紹介した具現化事例の多くは研究成果であり、機能実証は行っているが具体的な応用事例の中で価値として提案するところまで至っていないものもある。4D プリンティングで発揮される機能を価値に昇華させてアプリケーション(市場)で活かし、さらに産業と結び付ける、あるいは産業を作り出すためには、企業側も早期にこのプロセスに加わっていく必要がある(図5)。

さらには複雑系のモデリングを AI によってサポートすることも現実的になるだろう。3D におけるモデリングに AI を関与させようとしている例として、手書きのスケッチ(2D 画像)から立体形状を提案するものや、立体形状(外形形状)から骨の形を推定し、内部構造を付加する手法が提案されてい

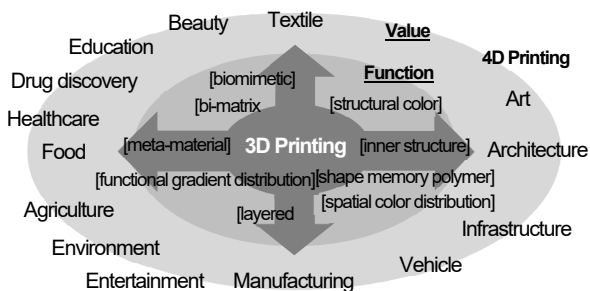


図5 4D プリンティングの応用(価値創出)

る²²⁾。4D プリンティングの事例が増え、また自然界の現象・仕掛けの分析が進んでデータベースが整備されてくれば、このような手法の発展として、機械学習により特定の機能やその範囲を獲得するメカニズム、構造を提案できるようになるだろう。

4. 価値の社会実装

4.1 新しいモデリングツールの構築

3章で提案したように、ボクセルベースの FAV を 4D プリンティングのデータフォーマットとして採用する利点は、単に新規価値創出のための仕掛けに関する情報を構造データと同時に保持し、活用できることに留まらない。個人が 4D プリンティングのためのモデリング、あるいは編集に参画するための必要条件を大幅に緩和できる可能性を持つことである。現在はまだ 3D のモデリングさえ 3D CAD の習得がほぼ必須であり、誰もが 3D モデリングを行うことはできない。3D スキャナーで立体構造をデータ化したとしても、3D プリンターに出力可能な STL への変換や、変換時に起こるエラー修復にはそれなりのスキルを必要とする。このため 3D プリンターを組み込んだサプライチェーンに誰もが参加することは難しい。しかしボクセルで立体物を表現し、組み変える(編集する)ことは、ブロックを積み上げて自分の想像物を具現化する積み木やレゴといった子供の頃に慣れ親しんだ遊びそのものであり、ボクセルで建造物や都市を自由に構築できるゲームも近年人気がある。それ故ボクセルをベースにしたモデリングツールが構築されれば、誰もが直感的に楽しくモデリングを行うことができるようになるはずである。さらには DABoF の活用や、有限要素であるボクセルのまま形状変更や特性変化を伴う各種シミュレーションが実行可能なため、新規価値を創出する 4D プリンティング用のモデリングを、高度なレベルで容易に実現できるようになる。既に強度や材料特性の異なるボクセルを積み上げることにより立体物を構成し、さらにその立体物に応力をかけた際の形状変形シミュレーションをモデリングと同じ環境で行えるツールも公開されている^{22,23)}。また、オープンソースのソフトウェア(シミュレーションツール)で、物性(膨張係数等)の温度依存情報をボクセルに保持させ、加熱・冷却の繰り返しの物体の変形や運動までも予測できるようになっている。

このように 4D プリンティングが一般的になった将来とは、個人、それも一般市民が自分のための価値創出を獲得できるチャンスが広がる、あるいはそのサプライチェーンへの参画が容易になる社会になっているはずである。自分のためのオプティマイゼーションともいえるロングテールマーケットの待望が叫ばれて久しいが、3D プリンターなどの具現化ツールが一般化し、活用できるようになった中で、ロング

テールマーケットを確立する際の本質的な課題は、個人個人のためのモデリングを誰が行うのかであった²⁴⁾。そういう意味でもボクセルベースのモデリングツールが普及することは、4D プリンティングによるロングテールマーケットが本格的に認知され、社会に広がる時代の到来のために極めて重要なことだと言える。そこではサイズやデザイン(形)のみならず、機能や特性までも個人に合わせたカスタマイゼーションを行うことができるかもしれない。

4.2 サプライチェーンの変革

このように 4D プリンティングへの一般市民の参画が容易になり、自分のための価値創出が行えるロングテールマーケットが存在する将来の社会では、ものづくりやサービス提供におけるサプライチェーンの変革も当然起こるべきである。現在、商品やサービスの提供においては大量生産を前提としたチェーン型サプライチェーンが主流であり、データやプラットフォームを中心としたネットワーク型サプライチェーンも登場し始めている。しかしこれらのサプライチェーンの中心は企業であり、企業の営利目的のためにサプライチェーンは最適化、固定化され、参画者も決まる。4.1 節でも述べたように最適化するターゲットの多様化、価値提供プロセスへの参画閾値の低下が起これば、当然、これに合わせたサプライチェーンが形成されるべきであり、筆者は図 6 に示すような新しいサプライチェーンを提案し²⁴⁾、プロジェクトタイプサプライチェーンと名付けた。

このプロジェクトタイプサプライチェーンの特徴は大きく 2 つある。1 つめはサプライチェーンにおける役割が、従来のサプライチェーンを構成している役割だけではない。例えば、商品を購入した消費者だけでなく、潜在顧客まで含めた意味でのユーザーまで引き込むことで、予め使い勝手など

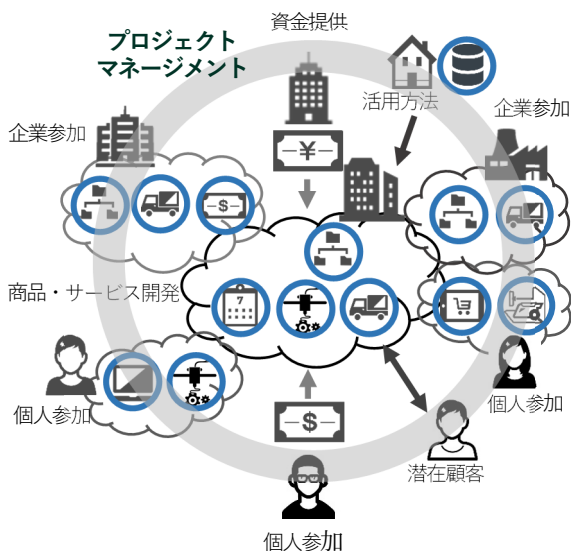


図 6 プロジェクトタイプサプライチェーン²⁴⁾
(役割や参加形態は一例)

を開発プロセスに反映させ最適化のスピードアップをはかるアジャイル開発やリスタートアップの開発形態も可能になる。また、資金提供をするファウンダー、さらには使用状況などの実績データ、アドバイスを提供するアドバイザーなど、幅広い役割とメンバーで構成されることであり、さらには個人単位でも様々な立場で(潜在顧客、デザイナーやデリバリーとしても)参加可能になることである。

2 つめの特徴は、いったん形成されたサプライチェーンや構成メンバーは固定されるのではなく、商品やサービス、つまり価値を届ける人ごとに組み替え可能にすることである。言い換えれば少量のプロジェクト・商品別に、究極的には個人別にサプライチェーンが形成されることも可能にすることである。もちろんこの新しいサプライチェーンが従来のサプライチェーンに完全に置き換わるものではない。4D プリンティングにより個人に向けた価値創出が行え、それが実際の社会で活かされる(社会実装される)ために、この新しいサプライチェーンに置き換わる機会が増えてくるはずである。そしてそれが定着するために 4D プリンティングが産業と結びつき、「買い手よし」、「社会よし」だけでなく、「売り手よし」という近江商人の唱える三方良しの経済原則が成立することを目指したのが、まさにこのプロジェクトタイプサプライチェーンである。

5. 終わりに

4D プリンティングが社会に広範囲に広がり、また一般的になるまでには多くの困難な課題解決、そして時間が必要である。しかし 4D プリンティングは個人に向けた価値創出までもが社会実装され、より豊かな社会実現のための重要なアプローチであることを理解していただけたと思う。

本レポートにより、4D プリンティングへの関心が高まり、大学・企業での研究開発がより一層活性化することを願っている。

参考文献

- 1) ASTM F2792-09, "Standard terminology for additive manufacturing technologies," ASTM International, p. 3.
- 2) Skylar Tibbits, "Self-Assembly Lab Experiments in Programming Matter", Taylor & Francis Group 2016, p.1-16.
- 3) European Commission, 100 Radical Innovation Breakthroughs for the future, 2019, ISBN 978-92-76-13045-1, p. 182-184.
- 4) 藤井 雅彦, 4D and Functional Printing - 次元を超えた新しい価値の創造 -, 日本画像学会誌, 2019, vol. 58, no. 4, p. 385-388.
- 5) 古川 英光, 蒲生 秀典, 3D プリンティングから 4D プ

- リソテックへ, STI Horizon 2021, vol.7, no.2, p. 35-40.
- 6) Longyu Li, et al. Hierarchical Co - Assembly Enhanced Direct Ink Writing, *Angew Chem Int Ed Engl*, 2018, Apr 23;57(18), p. 5105-5109.
 - 7) Desai Chen, Computational discovery of extremal microstructure families, *Science Advances*, 2018, vol.4, no. 1, p. 1-7.
 - 8) 當間 隆司, 4DP を支える材料技術, *日本画像学会誌*, 2019, vol. 58, no. 4, p. 406-414.
 - 9) M. Noort, 3D-Printed Cereal Foods, *CEREAL FOOD WORLD*, 2017, vol. 62, no.6, p. 272-277.
 - 10) 山崎 淳, 古宇田 光, 菊地 健一; インクジェット型 Additive Manufacturing における積層界面の光学的性質, *The Journal of 4D and Functional Fabrication*. 2021, no. 2, p. 1-12.
 - 11) JIS B 9442 解説書, 「3D モデル用 FAV フォーマットの仕様」, 日本規格協会, 2019
 - 12) 佐々田 美里他, 高意匠性を表現する構造色インクジェット技術, *Imaging Conference Japan 2022*, 2022, p. 35-36.
 - 13) 中野 貴由, 付加製造技術(3D プリンター)による金属系生体機能性材料の開発, *スマートプロセス学会誌*, 2014, vol. 3, no. 3, p. 167-174.
 - 14) 久保木 仁美, Auxetic Pattern を用いた環境呼応パネルの提案, *Conference on 4D and Functional Fabrication 2019*, 2019, p. 25-28.
 - 15) 田岡 菜, マルチマテリアルを用いた 4D プリンティングと有機的表現, 慶應義塾大学 2018 年卒業論文
 - 16) Yijie Jiang, Bifurcation-based embodied logic and autonomous actuation, *Nature Communications*, 2019, 10:128.
 - 17) Makoto Nakamura etc., Inkjet bioprinting as an effective tool for tissue fabrication, *Digital Fabrication 2006*, p. 89-92.
 - 18) 中山 功一, バイオ 3D プリンタによる臓器再生医療の現状とこれから, *Conference on 4D and Functional Printing 2018*, p. 63.
 - 19) T. Takahashi, M. Fujii, A. Tomonari, and H. Tanaka, “Intensive 3D structure modeling and seamless data flow to 3D printers using voxel-based data format FAV (Fabricatable Voxel)”, *Printing for Fabrication 2016*, pp. 124-128.
 - 20) 岡崎 太祐; 浅野 義弘; 櫻井 智子; 佐倉 玲; 島田 旭緒; 仲谷 正史; 田中 浩也, 3D プリントプロダクト価値創出設計のための Ashby Map に基づく Architected Material データベースの構築, *The Journal of 4D and Functional Fabrication*. 2021, no. 2, p. 13-22.
 - 21) 下村 政嗣, 人新世におけるバイオミメティクス~人と生物の界面がもたらす循環型経済~, *オレオサイエンス*, 2020, vol. 20, no. 6, p. 267-274.
 - 22) 田中 浩也, 3D プリンティングにまつわる情報学的研究課題, *情報管理*. 2017.9, vol.60, no.6, p. 402-411.
 - 23) Alexandra Ion, Metamaterial Mechanisms, *The 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 2016, p. 529-539.
 - 24) 藤井 雅彦, 3D プリンター, 社会で変わるのか, 社会が変わるのか - 問われているデジタルの本質の探究と実践 -, *日本画像学会誌*, 2021, vol. 60, no. 4, p. 379-389.
- ### プロフィール
- #### 藤井 雅彦 (ふじいまさひこ)
- 1985 年富士ゼロックス株式会社(現富士フイルムビジネスイノベーション株式会社)に入社。同年から連続噴射型インクジェット, サーマルインクジェットヘッド技術を始めとし, インクジェットシステム技術の研究, 3D プリンター含むインクジェット技術応用, 3D データハンドリングに関する研究に従事。2016 年に新しい 3D データフォーマット FAV を慶應義塾大学と共同で発表し, 2019 年に JIS に登録。現在, 4D プリンティングまで研究領域の次元を拡張している。
- 2019 年にインクジェット技術, および 3D 技術における実績と貢献によりヨハネス・グーテンベルグ賞, 2021 年に 4D への拡張に対して日本画像学会会長特賞を受賞。
- 日本画像学会副会長, インクジェット技術部会主査, 4DFF 研究会運営委員長, IS&T NIP31 General Chair(2015), IS&T Vice President(2019-2021).
- 慶應義塾大学 SFC 研究所上席所員, inkcube.org 代表。