

Data Format FAV Unified Management of 3D Data  
3D データを一元管理できるデータ基盤 FAV

〈世界最高水準の表現力を持つ 3D データ基盤. その仕様と活用について〉

富士ゼロックス株式会社 藤井 雅彦

JIS に制定されたボクセルベースの 3D データフォーマット FAV の概要と応用事例を説明する。ボクセルに色、材料、リンク情報だけでなく、ユーザーが定義した情報も保持可能である。これにより 3D プリンタへのデータフローが簡略化されるだけでなく、ものづくりに必要な様々な 3D データを保持して流通させ、効率的に一元管理することが可能になる。

1. はじめに

3D プリンタ、すなわち材料を付加することで立体物を造形する技術は Additive Manufacturing と呼ばれ、現在 7 つの方式が ISO/ASTM による標準化の中で分類されている<sup>1)</sup>。これら 7 方式に属さない新しい方式も提案され実用化されているが、ほとんどの方式は、一定の厚みを持った層を順次積み重ねることにより立体物を造形する。このため、立体物の外形だけでなく、射出成形や切削加工では困難であった複雑な内部構造を実現することが可能になっている。また、材料の混ぜ合わせにより部分的に物理特性(例えば硬さ)を制御可能な 3D プリンタや、造形物の表面のみならず内部までフルカラー化が可能な 3D プリンタも導入され、活用されている。

一方、3D プリンタに入力されるデータのフォーマットとして現在標準的に使用されている STL<sup>1)</sup>は、1988 年に 3D Systems から 3D CAD 用に提案されたものである。STL はポリゴンと呼ばれる三角形で立体物の外形のみを近似するものであり、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いない。STL が提案された当時は設計された 3D データ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なえない切削加工や射出成形では問題なかった。しかし、複雑な内部

構造の実現やフルカラー色再現など、性能が進化した現在の 3D プリンタの能力をそのまま活かすデータ形式になっておらず、3D プリンタの能力を活かす出力(造形物)を得るためのプロセス(データフロー)は煩雑になっていた。

このため近年、3MF<sup>2)</sup>や AMF<sup>3)</sup>といった新しいデータフォーマットが提案されている。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、構造内部に独自に情報を持たせることはできない。また STL と同様に外形をポリゴンで近似するものであり、複雑な内部構造を表現することも難しい。表 1 にこれまで使われてきた代表的なポリゴンベースの 3D データフォーマットの特徴をまとめる<sup>2)</sup>。

本稿では、これら従来のポリゴンベースの 3D データフォーマットが持つ課題を解決するため 2016 年に提案され<sup>3)</sup>、2019 年に JIS に制定された<sup>2)</sup>ボクセルベースの新しい 3D データフォーマット FAV<sup>4)</sup>を解説するとともに、FAV の適用事例としてものづくり 3D データを一元管理して活用する事例を説明し、さらに FAV の標準化の現状と今後の見通しについて述べる。

2. FAV の概要と仕様

2.1 FAV 仕様(1.1a)

表 1. 3D データフォーマットの特徴比較<sup>2)</sup>(Voxel)

		ポリゴンベース				ボクセルベース	
		STL	AMF	3MF	OBJ	DCM	FAV
3D 形状(外形)		○	○	○	○	○	○
表面情報	色情報	×	○	○	○	○	○
	材料情報	×	○	○	△	×	○
	複数材料	×	○	○	△	×	○
	微細構造	×	×	×	×	×	○
内部情報	色構造	×	△	△	×	○	○
	材料情報	×	△	△	×	×	○
	複数材料	×	△	△	×	×	○
	微細構造	×	×	×	×	×	○
リンク情報		×	×	×	×	×	○
ユーザー定義情報		×	△	△	×	×	○

○:データの損失無く管理可能、または管理データの活用が容易  
△:データの読み替えが必要、または管理データの活用時に計算処理などが必要  
×:データの取り扱いが不可能

ボクセル(Voxel)とは立体物(3次元モデル)を構成する基本要素であり(図1)、デジタル2次元画像を構成するピクセル(Pixel)とVolumeを併せた造語である。

図2にSTLとボクセルにより表現された立体物(うさぎ)を示す。STLでは三角形のポリゴンにより外形のみを近似表現するのに対し、ボクセルでは外形のみならず内部構造も容易に表現可能となる。各ボクセルに色情報や材料情報を保持すれば、3Dプリンタで直接これらの情報を参照し、造形することが可能になる。

3DデータフォーマットFAVは上述したボクセルベースのデータフォーマットであり、個々のボクセルに様々な情報が保持でき、立体物を表現する高い能力を備えている(図3)表1)。2016年に発表した最初の仕様1.0では、ボクセルが保持できる情報(属性)は色、材料、ボクセル間の関係性の強さ(リンク)だけであったが、最新の仕様1.1aでは、ユーザー独自の情報も複数保持できるようになった。また、1つのボクセルとして、外部FAVファイルで定義したボクセルの集合体を参照することもできるようになった。

FAVでは立体物情報が図4に示すようにXML構造によって管理される<sup>2,4)</sup>。以下、FAVにおける立体物表現情報、およびXML構造の各要素を結びつけて説明する。

<fav>は、FAVフォーマットのルート要素を示しており、FAVフォーマットに従って定義した3Dモデルデータは<fav>という要素から開始する。

<metadata>にはタイトルやデータの作成者情報などを記載する。データの使用方法に関するライセンス方針などを、クリエイティブ・コ

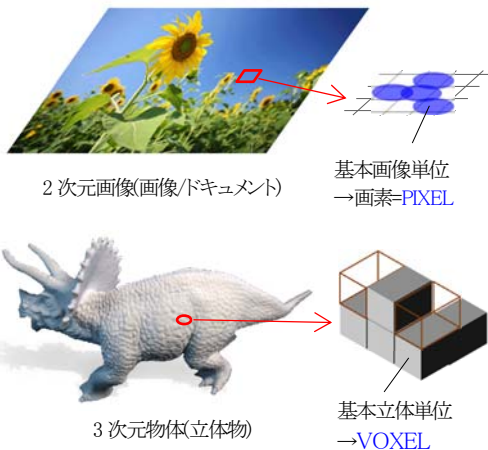


図1. ピクセル(Pixel)とボクセル(Voxel)

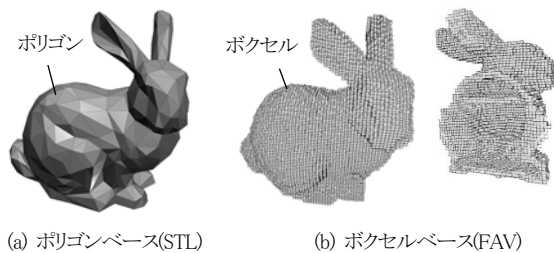


図2. ポリゴンとボクセルによる立体物の表現

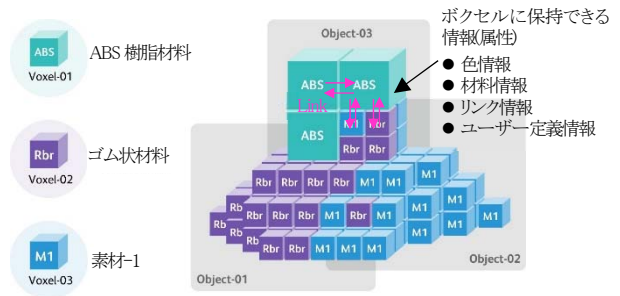


図3. FAVによる立体物の表現

ンズ・ライセンスに基づいてここに記載することもできる。

<palette>には3DモデルデータをFAVフォーマットに基づいて構成するための準備として、使用する各ボクセルの形状や材料などの基本情報を登録する。<geometry>ではボクセルの形状や大きさ(<unit>に対する倍率)を定義するが、ボクセルとして図1, 2, 3に示

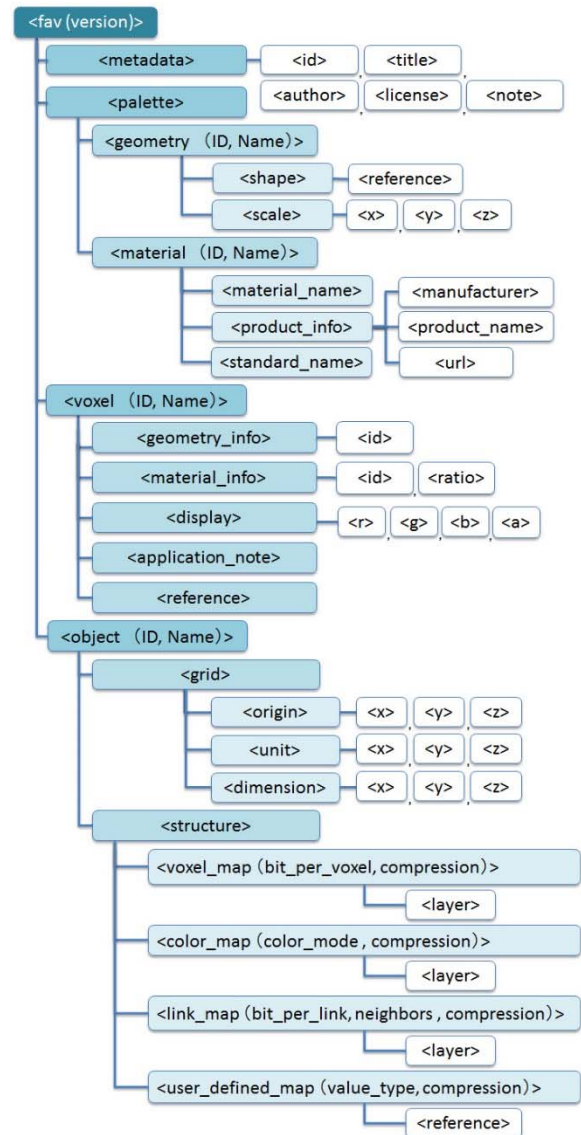


図4. XML構造によって管理されるFAVフォーマット(ver.1.1a)2, 4) (Voxel)

した立方体のみならず、円柱や球など様々な形、大きさを使用することが出来る(表 2)<sup>2,4)</sup>。さらにユーザーが 3D プリント方式や用途に合わせて独自にボクセル形状やサイズを外部ファイルで定義し、<shape>以下の<reference>から参照することも可能である。ボクセルの材料情報は<material>で管理するが、一般的な材料名の他、製品名や各種標準に登録された名前を記載することができる。

<voxel>では、実際に立体構造を表現するためのボクセルに、<palette>に登録されたボクセルの形状や縮尺、あるいは材料情報(混合比率)を割り当てて定義し、管理する。<display>はボクセルを(例えばディスプレイで)可視化する際の色情報であり、造形する際の色は以下に示す<color\_map>で記述される。また、外部の FAV ファイルを<reference>で指定することで、任意のボクセル集合を 1 ボクセルとして使用することもできる。例えば、外部の FAV ファイルに硬さの異なる材料(ボクセル)で構成される複合材を構成し、これを 1 ボクセルとして用いることも可能になる。<voxel>の(id)に”0”を指定することで空いたセルを予約(定義)することもできる。ボクセル配置を定義する<voxel\_map>で 0 を指定することでボクセルが存在しないセルを表現することもできるが、この場合は編集によりこのセルに新たなボクセルを形成することが可能になる。しかし、例えば立体物の造形後にこのセルに何かを充填するために’空’にしておく必要がある場合、この予約による空いたセルを利用することができる。

<object>は、ボクセルや様々な情報の立体配置を記述する要素である(図 5)<sup>2,4)</sup>。<grid>でボクセルを配置する空間を定義し、<unit>は 1 つのボクセルを置ける格子(セル)1 つのサイズであり、<dimension>はこのセルを並べる数である。すなわち<unit>\*<dimension>でボクセルを配置する空間全体の大きさを示すことになる。定義されたボクセルの立体配置を<structure>下の<voxel\_map>で記述することで立体構造が表現される。<color\_map>ではボクセルに割り当てる色分布を記述する。また、近傍(6 近傍/18 近傍/26 近傍)ボクセル同士の関係性の強さを示すリンク情報も保持することができ、その配置を<link\_map>で記述する。リンクの活用として、例えば造形の順序(ツールパス)や材料物性の異方性などを情報として持たせることが考えられる。積層して造形する 3D プリントによって作られた立体物は強度の異方性を持つものが多い。例えばリンクにボクセル同士の接合強度を保持すれば、造形物の物理強度の予測(シミュレーション)にも有効となる。

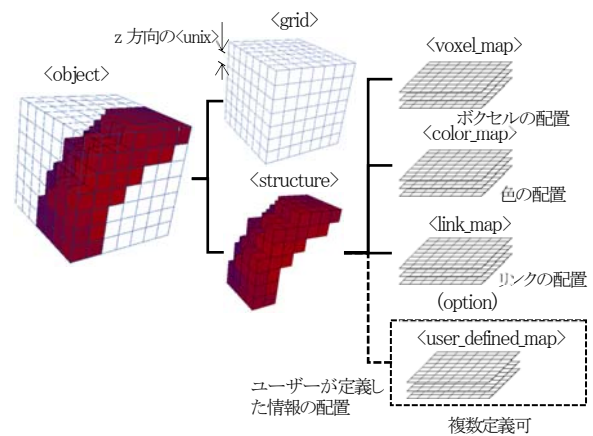


図 5. 立体モデルにおける各種情報の表現<sup>4)</sup>

ユーザーが独自に定義した(複数の)特性(属性)を<user\_defined\_map>で各ボクセルに割り当てることも出来る。例えばシミュレーションによる解析結果などの割り当て(表示)が考えられる。

なお FAV における座標単位は mm を用い、1mm 当りに配置可能なボクセルの数<unit>で記述されるセルの数、すなわち解像度を  $vpm(\text{voxel}/\text{mm})$  で表す。

## 2.2 FAV の効用

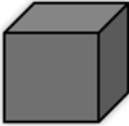





ボクセルベースの 3D フォーマットを立体物の表現に用いることで、上述したように進化した 3D プリントの能力を直接活かして立体物を造形できるだけでなく、次のような効果も期待できる<sup>5)</sup>。

### (a) 3D データフローの整理化

現在、多くの 3D データは 3D CAD で作成されている。CAD で作成された 3D データを STL に変換する際に、ポリゴンの抜けや重複などのエラーが発生することあり、3D プリントで造形する前にこのエラーを修復する必要がある。これらのエラーを自動で修復するソフトウェアもあるが、細かいエラーは手作業で修復することもあり手間がかかっている。CAD からの出力を直接ボクセルに変換すれば、3D 表現としてのデータエラーは起きにくい。

また、一旦 STL に変換すると、STL 形式のままでは形状の変更や、他の 3D データと合わせることなどの編集が非常に難しくなる。データがボクセルで表現されていれば、ボクセルの足し算、引き算、あるいは掛け算などのいわゆるブーリアン演算が可能であり、編集作業を容易に行なうことができる。これは 3D プリントが得意とする少

表 2. ボクセル形状(<geometry>パターン)例<sup>2,4)</sup>

イメージ						
(id)	01	02	03	04	05	06
(name)	Cube01	Cube02	Plate	BigSphere	SmallSphere	Cylinder
<shape>	cube	cube	cube	sphere	sphere	user_defined
<scale>	2×2×2	1×1×1	1×1×0.3	1.5×1.5×1.5	0.25×0.25×0.25	3×1×1

量多品種対応に必要となる 3D データのカスタマイズを行い易くすることにつながる。

#### (b) シミュレーションとデザインの境界排除

CAD でデザインした形状が 3D プリンタで造形され、それが使用条件下でどのような変形や破壊が生じるかをシミュレーションで確認できれば、3D プリンタで造形する前に最適なデザインを得ることができる。STL に変換されたデータは、シミュレーションソフトに合わせて再メッシングが必要であり、シミュレーション結果をデザインに反映させるためには、再度 CAD まで戻る必要がある。立体形状がボクセルで表現されていれば、(ボクセルは有限要素であり)再メッシングせずにシミュレーションへの適用が可能であり、ボクセルのままシミュレーション可能なツールも開発されている<sup>6)</sup>。またボクセルであれば上述したようにブーリアン演算が出来るため、容易にシミュレーション結果をデザイン変更で反映することができる。このようにシミュレーションとデザインがシームレスに実現可能な新しいデザイン環境を構築することが出来る。

#### (c) 他の 3D データフォーマットとの連携

3D プリンタ以外にも、医療用の 3D データ(DICOM<sup>®</sup>)や 3D スキャナーの点群データなど、様々な 3D データ形式が存在する。CAD で作成した 3D データや、DICOM データ、点群データを合わせて(編集して)新しいデザインをすることは、それぞれのデータ互換性が十分でないため、現在では困難である。全ての 3D データをボクセルに変換(ボクセルサイズ)すれば、ボクセルでの編集は容易であり、様々な形式の 3D データを活用して新しい価値を提供するデザインを行うことができる。

#### (d) モデリング(3D デザイン)の容易化

図 3 からわかるようにボクセルで立体物を表現することは、ブロックを積み上げて遊ぶ[積み木]であり、同様の手法を用いて建物を作るゲームソフトもある。3D CAD を習得して自分で立体物をデザインすることは多くの人にとって難易度が高いが、積み木のように立体物を設計できる簡単なデザインツールがあれば、誰でも 3D デザインが可能になるはずである。新しいビジネスチャンスとして少量多品種の販売であるロングテールが注目されており、自分の欲しい(自分に合った)カスタマイズされたものを手に入れることも、豊かな生活実現のために望まれている。しかし、これらを実現する上で、このマスカスタマイズデザインを誰が行うのかという課題がある。ボクセルデータの編集容易性ととも、ボクセルによる容易なデザインツールの登場は、ユーザー自らのカスタマイズデザイン(3D データ作成)を実現可能にするだろう。

### 2.3 FAV の課題と取り組み

ボクセルベースのデータフォーマットでは、きめ細かな表現をするためにボクセルサイズを小さくすると(解像度を上げれば)データサイズが大きくなる。また、FAV では材料情報、色情報、リンク情報、ユーザー定義情報などこれまでの 3D データより多くの情報を保持するため、さらにデータサイズが大きくなる要因を持つ。

ボクセルで立体物を表現することは、2次元画像をピクセルで表

現する考え方の拡張であり、2次元画像におけるデータ圧縮技術を、ボクセルベースのデータの圧縮に適用することが期待できる。FAV では異なる大きさや形のボクセルを使用することができるため、複雑な形状ではない領域には大きなボクセルを、きめ細かな表現が必要なところには小さなボクセルを用いてデータサイズを抑えることも出来る。また 2 章で述べたように、小さなボクセルにより細かな形状を表現する FAV ファイルを外部に作成し参照することで、本体 FAV ファイルのサイズを小さくすることも可能である。滑らかな外形を得るためにボクセルサイズを小さくしなくても、マーチングキューブや SDF(Signed Distance Field)といった手法により、ボクセルで表現された外形から曲面を形成(再現)する方法も古くから提案されている<sup>7)</sup>。

現在、ボクセルデータを直接サポートしている 3D プリンタは無い(2020 年 3 月現在)。ボクセルベースのデータに、材料や色などのリッチな情報を保持し、複雑な内部構造が表現できたとしても、3D プリンタで出力するために 3D プリンタが対応しているフォーマット(例えば STL)に変換すると、多くの情報が欠落する可能性がある。近年、3D プリンタによる造形において、ボクセル表現の有用性をアピールする発表も増えてきている<sup>8,9)</sup>。また、30 万点を超えるボクセルベース(FAV)の 3D データの蓄積や公開も進んでおり<sup>10,11)</sup>、近い将来、ボクセルベースの 3D データの流通が増え、リッチな情報を持ったボクセルデータを直接出力できる 3D プリンタが登場し、3D データ、および 3D プリンタが豊かな社会生活の実現に貢献することを期待する。

### 3. FAV によるものづくりデータの一元管理

3D プリンタを出力先とした製造工程はもちろん、CAD による部品設計から金型作成、金型による部品の量産といった 3D プリンタを使用しない従来の製造工程においても、3D データの一元管理を行う上で FAV を活用することができる。

1 章で説明したように、FAV では<user\_defined\_map>によってユーザー独自に定義した属性を、ボクセルに割り当てることができる。製造の各工程で発生する様々な 3D データ、例えば CAD で作成した「部品形状データ」だけでなく、シミュレーションによる部品の強度解析結果である「構造解析データ」、金型による樹脂部品製造時の熔融樹脂の流れを可視化した「熱流動解析データ」、あるいは製造された部品の「3D 計測データ」などを FAV の仕様に基づいて変換し、それぞれ属性として 1 つの FAV ファイルに保持することができる(図 6)。これにより、例えば新しい部品を製造する際、過去の類似部品を製造した際の FAV データを参照し、金型に樹脂を流入するゲート位置や流路形状を変更した際の樹脂流動の解析結果など、過去の試行錯誤やノウハウなどを参考にすることが可能になる。

従来からも PLM(Product Lifecycle Management)や PDM(Product Data Management)と呼ばれる管理システムによって、CAD の部品形状データにもものづくりの各プロセスから派生する様々なデータを紐付けて管理することは可能であった。しかしながらこのような管理



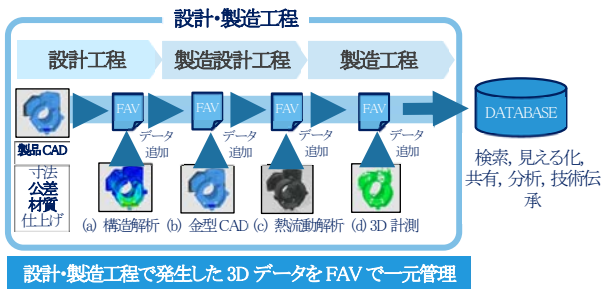


図 6. FAV による 3D データの一元管理プロセス例<sup>12)</sup>

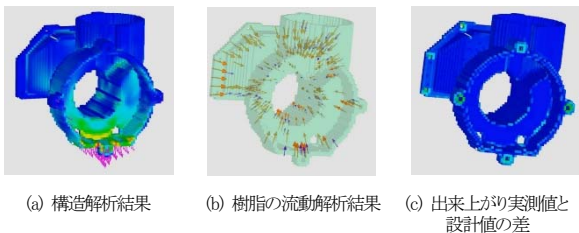


図 7. FAV に統合された各種 3D データ例<sup>12)</sup>

においては、形状データと他の派生データの形式は様々な仕様、すなわち異なるファイルであることが多く、また管理(データ保管)もそれぞれのデータが発生するプロセスに存在するサーバーで別々に管理されていることが多かった。このため、あるプロセスから他のプロセスの 3D データ(情報)を参照するためには、そのプロセスのサーバーにアクセスし、その情報(形式)が読み取れるためのツール(ソフトウェア)が必要であった。また、そもそも他のプロセスにどのような情報が蓄積されているかが共有できていなければ、あるいは検索しなければ参照すること自体が不可能であった。これに対し FAV によるデータの一元化では、情報が FAV 形式に変換され 1 つのファイルに統合されており、FAV を参照できるツールさえあれば、どのプロセスからもものづくりに関わる様々な情報を手にすることが可能になる。

図 7 はものづくりの各プロセスで発生(必要となった)3D データを形状データに重畳させたものである。ここでは形状と 1 つの情報のみを一度に可視化しているが、複数の情報を併せて可視化することや、異なる情報間の演算結果を可視化することも可能である。

このように従来は各工程に分散していて他の工程から見えなかった 3D データや技術者のノウハウを 1 つの FAV ファイルに統合・共有し、効率的に一元管理することが可能になるため、生産性の向上や技術伝承が見込める。

#### 4. FAV の標準化の現状と今後

2016 年に富士ゼロックスと慶應義塾大学により策定、提案された FAV は、当初、3D プリンタの能力を直接活かし、利用を促進することを目的としており、仕様は公開し、FAV の使用(FAV 仕様に基づく機器開発やソフトウェア開発)は無償で可能とした。さらには仕様を標準化し、だれもが将来にわたり安心して使えることを目指す必要があった。3D データフォーマットを国際標準にするには、

Additive Manufacturing(AM)の標準化を担っている ISO/TC261 や ASTM/F42 に提案することが 1 つのアプローチである。両者は 2011 年に共同して標準化に取り組むことを宣言しており、2016 年の FAV 仕様(ver.1.0)公開直後に日本で開催された ISO/ASTM 合同国際会議や、その後の国際会議で FAV 仕様とその有用性を紹介してきた。その中で、たとえば ISO/ASTM の標準化で現在議論されている材料分布の傾斜モデルの好ましい記述(表現)方法として FAV が取り上げられるなど、FAV の有用性、将来性は認識されてきている。しかし、現状はメッシュベースに基づく AM プロセス、検査方法、装置や材料の標準化に力を入れており、国際的な標準化のための枠組みを作るのは当面難しい状況であった。そこでまず FAV を発信したこの日本国内で標準化を行い、世界に先駆けて FAV と 3D プリンタの活用を高めた上で様々な使用実績を積み、国際標準に提案することにした。

2017 年に慶應義塾大学が拠点となっている COI(Center of Innovation)「ファブ地球社会コンソーシアム」に「ボクセル利活用分科会」を設立し、3D データに関わる様々な業種の方をメンバーとして 3D プリンタ用データだけでなく様々な FAV の活用方法について議論した。その結果、FAV の活用を広げるために仕様 1.0 に付加すべき新たな仕様を盛り込んだ仕様 1.1a を策定し、この仕様の FAV を JIS(Japanese Industrial Standard)に制定する委員会を 2018 年に結成した。2019 年 3 月に JIS に提案し、2019 年 11 月に JIS に制定された(JIS 規格番号:B9442、「3D モデル用 FAV フォーマットの仕様」)。仕様 1.1a(JIS B9442)で新たに付加された主な仕様は、ボクセルを外部の FAV ファイルで定義できるようにしたこと、ユーザー独自に定義した属性を持てるようにしたこと、何も存在しないボクセルを予約可能にしたことなどである。特にユーザー独自の属性を保持できるようにしたこと、3 章でも説明したような 3D プリンタ用データ以外への活用が広がった。

3D プリンタによる造形をボクセルベースで制御する有用性については、例えば HP の 3D プリンタ Multi Jet Fusion でもしきりに訴求されている<sup>89)</sup>。HP は先に述べたデータフォーマット 3MF に関するコンソーシアムの中心的なメンバーであり、現在はメッシュベースである 3MF に、将来ボクセルベースの仕様を追加してくる可能性も排除できない。このため、いち早く国内での FAV の活用実績を積み重ね、これを背景に日本発の FAV をボクセルベースの最初の国際標準として提案し、制定したいと考える。

注)

- \*1 STL: Stereolithography の略。
- \*2 AMF: Additive Manufacturing File Format の略。2011 に ver.1.0 が策定された。
- \*3 3MF: 3D Manufacturing Format の略。2015 年に ver.1.0 が策定された。
- \*4 FAV: Fabricatable Voxel の略。ver.1.1a が以下より公開されている。2019 年に JIS に制定された。

<https://www.fujixerox.co.jp/company/technical/communication/3d/fav.html>

\*5 DICOM: Digital Imaging and Communications in Medicine の略. CT や MRI などで撮影された医療用画像用のフォーマット.

#### 参考文献

- 1) ASTM International, 「Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (F2792-12a)」。West Conshohocken, PA, (2012)
- 2) JIS B 9442, 「3D モデル用 FAV フォーマットの仕様」
- 3) 高橋 智也, 升森 敦士, 藤井 雅彦, 田中 浩也, 「ボクセルベース 3D データフォーマット FAV (Fab-able Voxel) による内部構造と属性の表現」, Proceeding of Imaging Conference Japan 2016, 33 (2016).
- 4) Tomonari Takahashi, Atsushi Masumori, Masahiko Fujii and Hiroya Tanaka, 「FAV File Format Specification Version 1.1a」(2019)  
(<https://www.fujixerox.co.jp/company/technical/communication/3d/fav.html>)
- 5) 藤井 雅彦, 「3D プリンタ活用の鍵となるボクセルベースのデータフォーマット「FAV」」, プラスチックエージ Vol. 65 (2019)
- 6) 田中 浩也, 齋藤 和行, 守矢 拓海, 「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, 60(6), 403 (2017)
- 7) William E. Lorensen, Harvey E. Cline, 「Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm」, Computer Graphics, 21(4) (1987)
- 8) Tim Weber, 「HP's Jet Fusion 3D Printing Technology—Enabling the Next Industrial Revolution」, Proceeding of Printing for Fabrication 2017, 2 (2016)
- 9) E.L. Doubrovski, E.Y. Tsai, D. Dikovsky, J.M.P. Geraedts, H. Herr, N. Oxman, 「Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing」, Computer-Aided Design 60 (March), 3 (2015)
- 10) 田中浩也, Fabbing Our City, 2019 Tanaka Lab Project Book.
- 11) <https://fab3d.cc/>
- 12) 富士ゼロックスプレスリリース(2019年11月21日)  
<https://www.fujixerox.co.jp/company/news/release/2019/67655>