

特別企画 3D プリント, 材料と装置の最新技術

3D プリント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」

富士ゼロックス(株) 研究技術開発本部 藤井 雅彦

1. はじめに

3D プリント, 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 による標準の中で分類されている¹⁾. 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, ほとんどの方式は層を順次積層することにより立体物を造形するプロセスを採用している. このため, 立体物の外形形状のみならず, 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硬さをコントロール可能な 3D プリントや, 造形物の表面や内部のカラー化が可能な製品も導入されてきている.

一方, 3D プリント用のデータフォーマットとして標準的に使用されている STL^{*1} 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など, 性能が進化した現在の 3D プリントの能力をそのまま活かすデータ形式になっておらず, 3D プリント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^{*2} や AMF^{*3} 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, 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は難しい.

本稿では, 富士ゼロックスと慶應義塾大学が共同で開発し, 2016 年に提案した²⁾新しいボクセルベースの 3D データフォーマット FAV^{*4} を解説するとともに, FAV による 3D データワークフロー上の課題解決や, 新たな可能性を紹介する.

2. ボクセルによる 3D 表現と FAV フォーマット

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), 2次元画像で使われるピクセル(Pixel)と Volume を併せた造語である.

図 2 にこれまでの 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 プリント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, 個々のボクセルに材料や色以外の情報も保持でき, 立体物の高い表現力を持っている(図 3). 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³⁾. 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.

<metadata>にはタイトルやデータの作成者情報などを記載する.

<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倍率を定義するが, ボクセルとして図 1, 2, 3 に示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. 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, 製品名や各種標準に登録された名前のみならず, 物理特性を記述することもできる.

<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)可視化の際の色情報であり, 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. <voxel>(の id)に"0"を指定することで空いたセルを

●用語解説

- *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 に制定される予定.
<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.

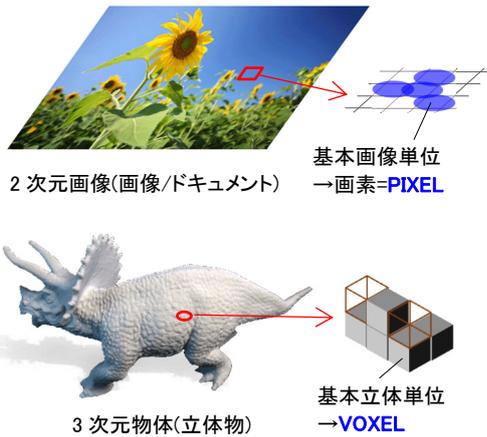


図 1 ピクセル(Pixel)とボクセル(Voxel)

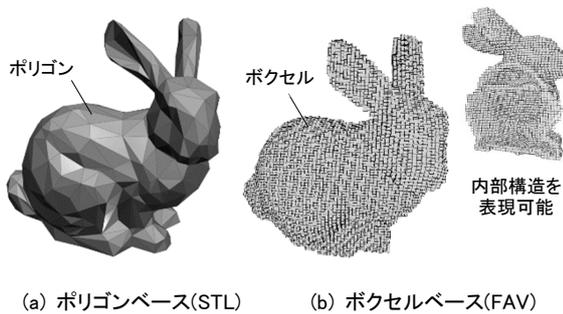


図 2 ポリゴンとボクセルによる立体物の表現

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ができるが、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)³⁾。定義されたボクセルの立体配置を<voxel_map>で記述することで立体構造が表現され、<color_map>で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 プリンタによって作られた立体物は、強

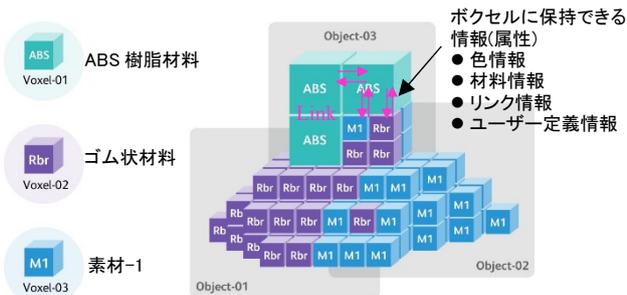


図 3 FAV による立体物の表現²⁾

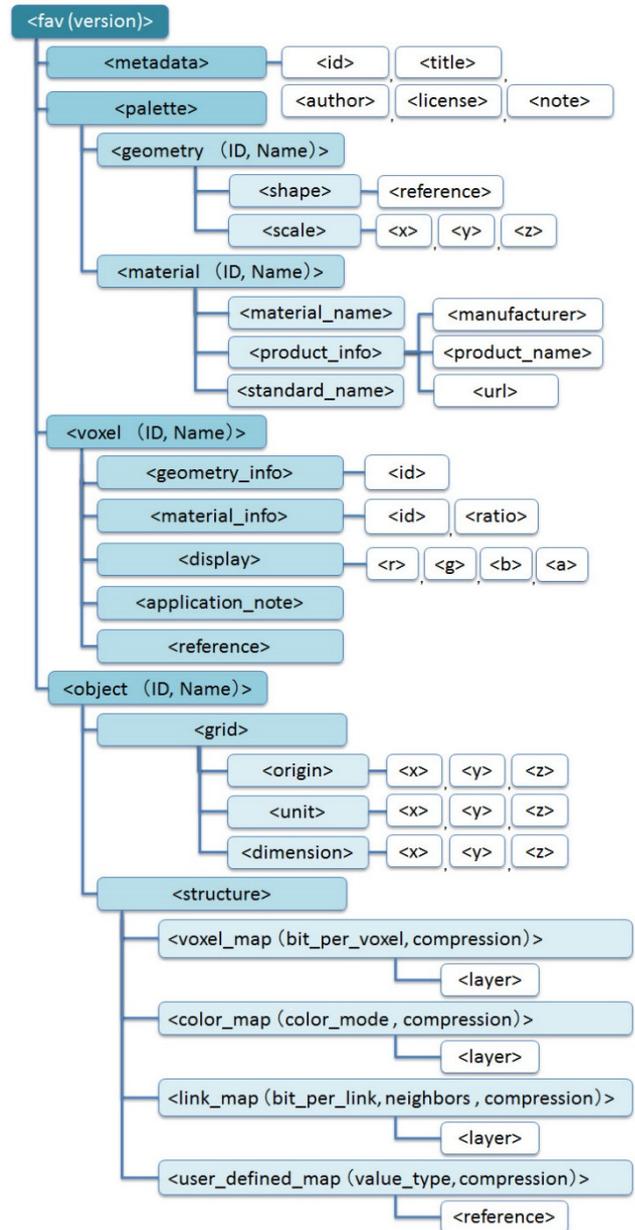


図 4 FAV ファイル構成³⁾

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。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。

なお FAV における座標単位は mm を用い、1mm 当りのボクセルの数(解像度)を vpm(voxel/mm)で表す。

3. ボクセルベースデータの効用と活用

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 プリンタ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。

3.1 3D データフローの整流化

現在、多くの 3D データは 3D CAD で作成されている。

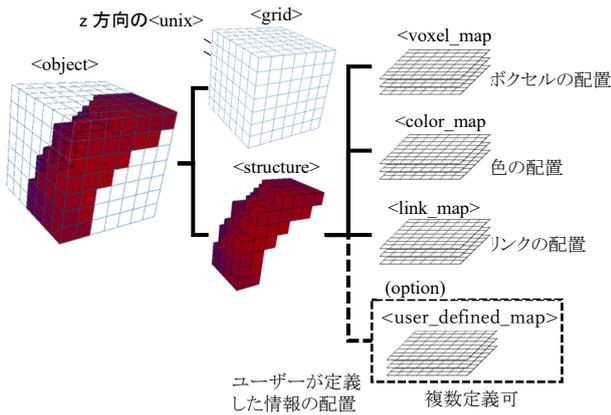


図5 立体モデルにおける各種情報の表現³⁾

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 形式のままでは形を変更することや、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。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量多品種に必要な 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。

3.2 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 プリントで造形され、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 プリント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る。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⁴⁾。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。

3.3 他の 3D データフォーマットとの連携

3D プリント以外にも、医療用の 3D データ(DICOM[®])や 3D スキャナーの点群データなど、様々な 3D データ形式がある。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(ボクセル化)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。

3.4 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する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。

4. ボクセルデータの課題と対応

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と同じであり、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。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が出来る。

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により、ボクセルで表現された外形から曲面を形成する方法が古くから提案されている⁵⁾。

現在、ボクセルデータを直接入力できる 3D プリントは無い(2019 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 プリントで出力するために、3D プリントが対応しているフォーマットに変換すると、多くの情報が欠落する可能性がある。近年、3D プリント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^{6,7)}。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 プリントが登場し、3D データ、および 3D プリントが豊かな社会生活の実現に貢献することを期待する。

参考文献

- 1) ASTM International, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (F2792-12a)". West Conshohocken, PA, (2012)
- 2) 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).

- 3) 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>)
- 4) 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)
- 5) William E. Lorensen, Harvey E. Cline, ” Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm”, Computer Graphics, 21(4) (1987)
- 6) Tim Weber, ”HP’s Jet Fusion 3D Printing Technology—Enabling the Next Industrial Revolution”, Proceeding of Printing for Fabrication 2017, 2 (2016)
- 7) 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)