

# 3Dプリンタの基本的な原理とその応用

～3Dプリンタの仕組みと機能、長所短所、今後の応用分野～

ソフトウェア情報学部

教授 土井 章男

## 1 はじめに

3Dプリンタは、付加製造技術（Additive Manufacturing Technology (AMT)）を利用した装置のことである。この付加製造技術とは、3次元の設計データから材料を付加させて3D形状を造形する工法の総称であり、商用の3Dプリンタは個人用から産業用までの多くの機種が販売されている。これらの機種は、利用目的、造形物の大きさ、造形精度、使用材料、造形時間、適用場所等の用途によって使い分けることができる。従来の製造方法である鋳造や切削に比べて、少量生産や複雑構造の造形に向いている。付加製造技術の造形方法には、紫外線硬化型方式（光造形、1980～）、熱溶解積層方式（FDM (Fused Deposition Modeling) 造形、1990～）、粉末焼結方式（EBM (Electron Beam Melting)、1990～）、粉末積層方式（粉末固着、2000～）、インクジェット方式（紫外線硬化樹脂の塗布、2000～）が提案されており、各方式には長所・短所が存在するため、使用目的に合った3Dプリンタを使用する必要がある。

紫外線硬化型方式は、紫外線レーザーによる造形を行うために、大量の紫外線硬化樹脂を用いるが、その設備は大規模となるため、非常に高価な機材であった。最近では、小型・低価格な装置も製品化されている。

熱溶解積層方式は、ABS樹脂やPLA樹脂を溶かしながら積層する方式である。その機構はシンプルで、かつ低価格である。ABS樹脂は粘着性があり、強度があるため、日用品などの造形に適している。PLA樹脂は植物由来の樹脂で、低い温度で溶けるため、歪が生じにくい利点があるが、弾力がなく、強固なため、研磨などの加工処理が困難である。

粉末焼結方式は、不純物のない造形が可能な反面、電子ビームやレーザー等の機材が高価となる。そのため、従来は、高精度な装置・武器を製造する防衛産業、人工関節などの医療分野、航空機製造分野、等で使用されていたが、最近では一般の製造業でも利用されている。

粉末積層方式は、石膏材料を接着剤で硬化させながら造形を行う。使用した石膏材料の再利用や、インクジェットプリンターによるフルカラー表示が可能となっている。石膏を固めるために、壊れやすい短所を有する。

インクジェット方式は、液状の紫外線硬化樹脂を塗布しながら、UVランプにより硬化させる。従来方式に比べて、非常に高精細な造形が可能であるが、機材は高価となる。

3Dプリンタを用いて造形する場合、その造形物をサポートするためのサポート材が自動的に付加されるが、造形後にはそのサポート材を除去する必要がある。特に複雑な造形物の場合、そのサポート材は造形物と複雑に絡み合っており、サポート材除去は非常に骨の折れる

作業となる。そのような場合、水や強アルカリ溶液で溶けるサポート材が利用可能な3Dプリンタが有効である。

医療分野においても、3Dプリンタが多用されており、医療用具（人工関節、手術用補助工具）、術前・術中計画支援モデル、歯科用具（入れ歯、クラウン）、福祉装具（義肢）、再生医療などに用いられている。

本稿では、術前・術中計画手術支援、テイラーメイド手術用補助工具、3D画像処理ソフトウェアでの3Dプリンタ活用例について紹介する。

## 2 医療分野における3Dプリンタ利用方法の概要

医療分野における術前・術中計画支援に関しては、外科手術を行う前に、CT（Computed Tomography）装置やMRI（Magnetic Resonance Imaging）装置等から取得された人体内部の3次元画像を利用して、骨、筋肉、内臓等の対象領域（画素領域）を抽出する。CT装置やMRI装置で計測された画像情報は、DICOM（Digital Image COmmunication of Medicine）画像形式で保管され、各画素の位置は、計測時の正確な座標空間情報を持っており、実物と同サイズのモデルを正確に造形可能である。

これらの領域は3次元画像の体積を持った画素領域（ボクセルと呼ばれる）であり、3Dプリンタで造形するためには、その表面部分を3角形モデルに近似する必要がある。さらに近似された3角形モデルは不要な部分を除去・削減して、3Dプリンタへの入力フォーマットであるSTL（Standard Triangulated Language）形式で出力する。

一般に3次元画像から立体形状を抽出する作業は画像処理の専門的知識が必要であり、時間を要する作業である。さらに、3Dプリンタで造形するためには、整合性の取れた多角形（ポリゴン情報）に変換

する必要がある。従来、これらの作業を行うには、画像処理（IP:Image Processing）とポリゴン処理（CG:Computer Graphics）を行う複数のソフトウェアを組み合わせるか、非常に高価な統合ソフトウェアを使用する必要があった。

このような問題を解決するために研究開発されたのがVolume Extractor（VE）である。VEは、DICOM、BMP（Microsoft Windows Bitmap Image）、JPEG（Joint Photographics Experts Group）、TIFF（Tagged Image File Format）などの画像フォーマットのスライス画像の読み込み、3次元画像の生成・編集・領域抽出、3次元画像の可視化・画像処理・計測、3Dプリンタ用のポリゴン形状への変換や変換されたポリゴン形状の編集処理を、すべて、統一されたメニューのワークスペース（作業領域）で行える。VEの基盤技術は岩手県立大学で研究開発されており、大学発ベンチャーである（株）アイプランツ・システムズから、製品名「Volume Extractor 3.0」で販売されている<sup>1)</sup>。

### 3 3次元画像情報を利用した3Dプリンタ活用事例

骨表面だけではなく、骨内部の状況や壊死状態を把握するために、断面形状を含んだ骨モデルを作成して、実物大の造形物を3Dプリンタで作成することは、術前計画・術中支援に有効である。レントゲン画像表示やCTのスライス画像表示のみでは分かりにくい斜め方向のスクリー挿入や骨切りに対して、何度も試行錯誤が行えることは手術の安全度を高め、医師の術前や術中の心理的負担を軽減させるのに有効である。図1は、大腿骨頭に巨大な骨嚢胞を伴った寛骨臼蓋形成不全症例に対し、搔爬・人工骨移植を併用した寛骨臼移動術を行った事例である。両股関節の寛骨臼蓋形成不全に加え、左大腿骨頭外側に

は骨頭の1/3以上の巨大な多胞性の嚢胞性病変を認め、荷重部では一部皮質骨の連続性が途絶していた。そのため、軟骨面への侵襲の少ない大転子側から人工骨移植を行うことにしたが、大転子側から正確に病変部位へアプローチするため、断面形状を含んだ3Dモデルの造形物が非常に参考になった<sup>2)</sup>。

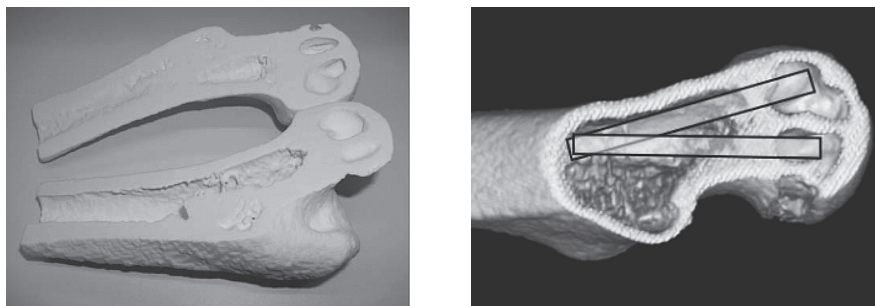


図1 断面形状を含んだ3Dモデルを用いた手術支援

人工膝関節置換術や人工股関節置換術では、人体における個人の差を吸収するために、あらかじめ多くのサイズの人工関節を用意しておく、一番患者の体型に合った人工関節を使用するのが主流である。この方式では、多くのサイズの人工関節部品が在庫に必要であり、同時に医師は多くの種類の中から、適切なサイズの人工関節を選択する必要がある。さらに、患者の骨形状に完全に合った人工関節ではないため、その人工関節に合わせて、骨領域の切断や削ることが必要となる。しかしながら、このような作業は、医師に対して大きな負担を強いている。さらに適切な位置で骨切りを行うためには、骨切り用の手術補助工具の取り付けにも注意が必要となり、数ミリのズレが大きな誤差を発生させる。

このような問題に対して、個人の骨形状に合った手術用補助工具を

商業ベースで設計・製作・提供する企業<sup>3,4)</sup>が現れている。これらのサービスでは医師があらかじめ患者のCT画像を送付して、その患者の骨形状に合った手術補助工具が医師の元に配送される。医師はその手術用補助工具を患者に取り付けて、手術補助工具に与えられた骨切り面で骨を切除すれば、正しい位置での人工関節が取り付けられる。また、テイラーメイド人工関節やテイラーメイド手術用補助工具の確認作業では、3Dプリンタで造形した患者の骨モデルと位置合わせすることで、術前に確認することも可能である。図2は人工膝関節置換術のための手術ガイドであり、3Dプリンタで造形され、病院に配送される。

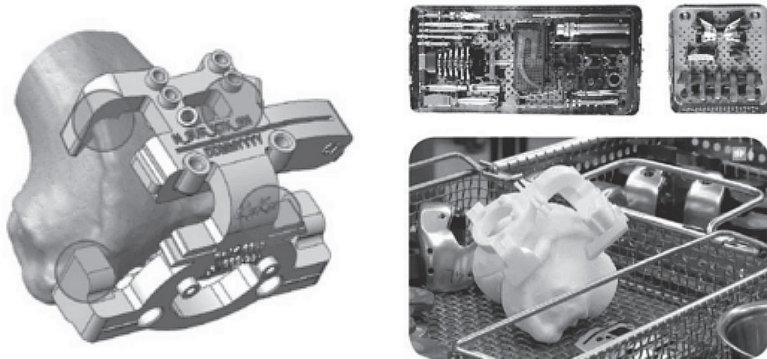


図2 MyKnee：人工膝関節置換術のためのテイラーメイド手術ガイド

高強度の3Dプリンタ材料で作成された造形物を滅菌処理することで、手術時に人体に装着することが可能である。図3は、脊椎固定のためのスクリュー挿入用に手術用ガイドをアイプランツ・システムズ株式会社のVolume Extractor 3.0と3Dシステム社のGeomagic Freeformを用いて制作した事例である。3Dプリンタで造形されたスクリューガイドは術中で使用され、安全なスクリュー挿入を可能にした。

さらに医療認可樹脂である生体適合材料を用いれば、人体内部での装着も可能になりつつある。例えば、3Dシステム社のObjet 30 Primeは、日本国内の薬事は未認可であるが、米国薬局協議会のClass 6を取得した生体適合材料MED610（医療認可樹脂）が使用できる。

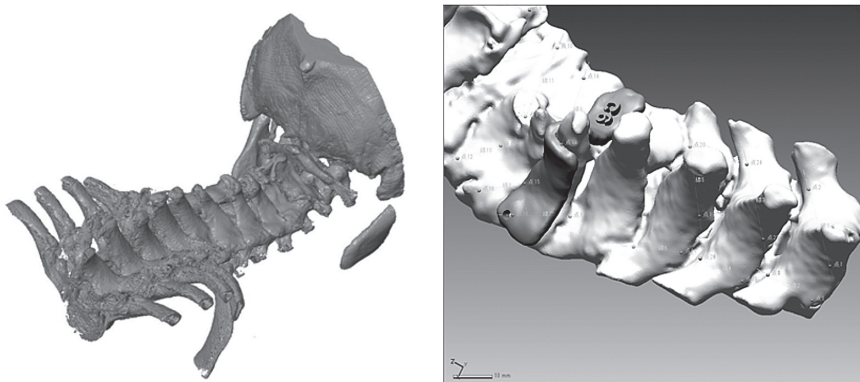


図3 脊椎固定のための手術用ガイドの制作と脊椎への装着

変形性脊椎症や脊椎損傷などの手術をより安全に行うために、各患者の脊椎の椎弓の凹凸形状と完全に密着する形状からなる鋳型状椎弓カバーと、鋳型状椎弓カバー同士を連結する人工関節から構成される脊椎制動具を金属用3Dプリンタで造形する研究が進められている<sup>5)</sup>。このような脊椎制動具は、スクリューを使用しないため、血管・神経損傷を起こす可能性が低く、脊椎を固定せずに制動するため、隣接する脊椎に新たな病変が生じることを予防できる画期的な手術支援である。鋳型状椎弓カバーは各患者の脊椎形状に合わせて設計されるため、術前での確認や手術、安全性向上、術中の作業効率化、術後のQOL (Quality Of Life) の向上に有効である。

#### 4 医師による3Dプリンタでの造形事例

本章では、医師が実際に3Dプリンタで造形した事例を紹介する。これらの造形モデルは、VEと3Dプリンタに付属しているソフトウェアを用いて、臨床の場で、医師によって作成された造形物である。

図4（左）は、Stratasys社のMojoを用いた造形直後の、歯および下顎を造形した際のサポート材が付いたままの造形物である。図4（右）と図5（左、右）は、図4（左）からサポート材を除去したものである。図6はStratasys社のuPrintにより、胸部CT画像から心臓部分を造形した事例である。左冠動脈と左回旋枝が明確に示されており、大動脈弁3尖がきれいに再現されている。

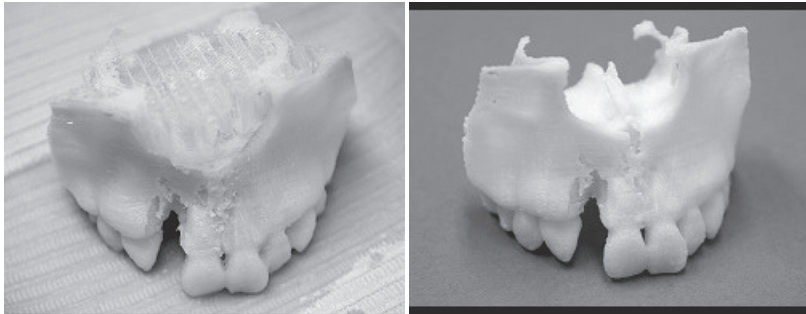


図4 Mojoによる造形例（1）（提供：中川歯科クリニック中川孝男先生）

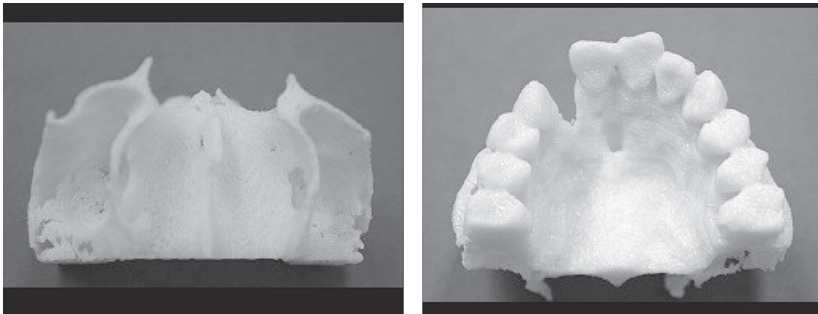


図5 Mojoによる造形例（2）（提供：中川歯科クリニック中川孝男先生）



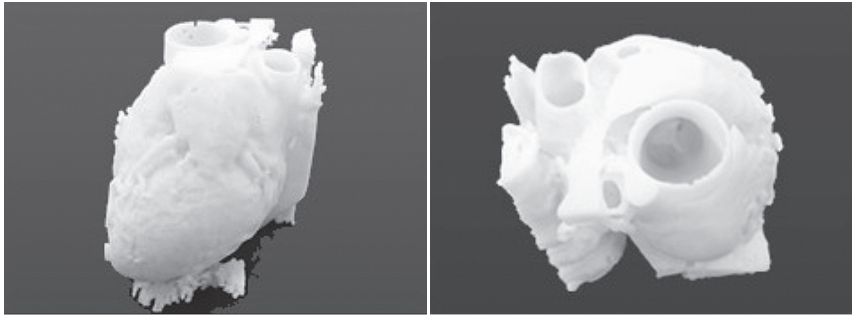


図6 CT画像から心臓領域の造形（提供：大阪医科大学宗宮浩一先生）

## 5 おわりに

本稿では、3Dプリンタの造形方式と各方式の長所・短所、医療分野における3Dプリンタ応用（術前・術中計画手術支援、テーラーメイド手術用補助工具、3D画像処理ソフトウェア）、そして3Dプリンタによる造形事例について紹介した。3Dプリンタは多品種少量生産に向けた装置であるため、カスタム医療の実現に適しており、今後、医師と患者の双方にとって大きなメリットが生まれてくるであろう。特に患者に合わせてカスタマイズされた治療用工具や手術用ガイドは、医師とCADシステムのエンジニアが共同で設計するため、その応用範囲は非常に広く、同時に、患者ごとの適切でQOLの高い対応が可能となる<sup>6)</sup>。

今後、高精細なCT画像から作成した精密な骨モデルを使って、テーラーメイドな治療用工具を3DCADシステム（Three Dimensional Computer Aided Design System）で設計し、3Dプリンタによって造形された造形物を手術に活用するアプローチは、今後、益々増加して行くことが予想される。さらに人体への手術は失敗が許されないため、医療器具、手術支援、手術用ガイド等に特化した機械設計を扱える人

材の育成が重要となってくると思われる。

参考文献：

- 1) 株式会社アイプランツ・システムズ、“Volume Extractor 3.0”、<http://www.i-plants.jp/hp/products/ve3/>、2016
- 2) 馬渡太郎、池村聡、松井元、井口貴裕、光安浩章、川原慎也、土井章男、高橋弘毅、“大腿骨頭回転骨切り術における骨切り面設定一意図の内反位と前捻角についての検討一”、日本整形外科学会雑誌、Vol. 88、No. 3、3-Po-374、p. S829、2014/5.
- 3) Tornier Inc.、“Blueprint 3D planning software”、<http://www.tornierblueprint.com/>、2015.
- 4) Medacta Companies、“MyKnee – Patient Matched Technology in Knee Replacement”、<https://www.medacta.com/en/europe/medical-professionals/products/knee/myknee/myknee-0>、2015.
- 5) 菅原卓、“カスタムメイド椎弓カバーと人工関節を用いた脊椎制動具”、国立研究開発法人科学技術振興機構、[http://www.jst.go.jp/tt/fair/ij2012/list/exhibitor\\_detail/ed10186.html](http://www.jst.go.jp/tt/fair/ij2012/list/exhibitor_detail/ed10186.html)、2012.
- 6) A. Doi, H. Takahashi, B. Syuto, M. Katayama, H. Nagashima, M. Okumura : Tailor-Made Plate Design and Manufacturing System for Treating Bone Fractures in Small Animals、Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics、17 (4)、2013 .