

## レポート

# デジタルファブリケーション・医療応用のHorizon ～3Dデジタルデータの活用と バイオフabrikケーションの進展～

科学技術動向研究センター 特別研究員 蒲生 秀典

## 概要

デジタルファブリケーションの医療応用が進展している。CT（コンピューター断層撮影装置）等によって計測された人体の3Dデータを基に、3Dプリンタで造形した患者の臓器モデルの臨床や教育の現場での活用が広がっている。また、iPS細胞を利用しバイオ3Dプリンタ等を用いて立体臓器を作製する、バイオフabrikケーションの基盤研究も開始されている。これらは、動物を用いた化粧品、薬などの実験・評価や医療機器の認証等が禁止される潮流の中、動物実験を代替するテクノロジーとしても期待されている。第10回科学技術予測調査のシナリオプランニングで示された、少子高齢化社会における健康・医療に関する課題解決に、ものづくり産業が支える国際競争力ある医療産業技術としてのデジタルファブリケーションが貢献する将来社会を見据え、医工・産学連携に寄与する人材育成とともに、バイオフabrikケーション研究への持続的支援が望まれる。

キーワード：デジタルファブリケーション, 3Dプリンタ, 臓器モデル, バイオ人工臓器,  
バイオフabrikケーション, 科学技術予測調査, シナリオプランニング, ものづくり

## 1. はじめに

当研究所が実施した第10回科学技術予測調査<sup>1)</sup>のシナリオプランニング<sup>2)</sup>では、我が国の産業の国際競争力を強化し、将来に向け持続的な発展を実現していくための「ものづくり」の重要な方向性として、個人や社会の多様なニーズへの対応による個人のQOL（生活の質）向上と、国内外で顕在化し得る社会課題解決への貢献を取り上げた。テクノロジーの高度化のみでは個人や社会の多様なニーズに十分対応できなくなった「ものづくり」は、ICTを活用しサービスを融合することで日本の強みを生かしたプラットフォームを構築することにより、今後の国際競争力を維持、強化していくことが不可欠となっている。

2016年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画<sup>3)</sup>では、未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組として、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した「超スマート社会」の実現を掲げ、ネットワークやIoT（モノのインター

ネット）をものづくり分野だけでなく様々な分野に広げ、経済成長や健康長寿社会の形成、さらには社会変革につなげていくという目標を掲げている。さらに、経済・社会的課題への対応のための重要政策課題の一つとして「世界最先端の医療技術の実現による健康長寿社会の形成」が示されている。

このような「超スマート社会」を実現するための新しいものづくりプラットフォームとして、先進のICTシステムをベースとして、ものづくりとデザイン・サービスを融合するデジタルファブリケーション<sup>4,5)</sup>が注目されている。さらに医療分野への応用では、医療モデルや機器などがオーダーメイド医療として社会実装され始め、また再生医療を目指したバイオ人工組織・臓器製造（バイオフabrikケーション）の研究開発が活発化している。

本稿では、第10回科学技術予測調査結果からデジタルファブリケーションの将来を展望するとともに、特に医療分野への応用の動向とオーダーメイド医療サービスへの展開の方向性について記す。

## 2. 科学技術予測調査結果に見るデジタルファブリケーションの将来展望

第 10 回科学技術予測調査の「分野別科学技術予測」<sup>6)</sup>では、デジタルファブリケーションに関連する科学技術トピックとして、分野横断的に 12 トピックが取り上げられた。全般的に、重要度は高く国際競争力は比較的低いと評価された。このうち 10 トピックは 2021 年までに技術的実現を果たし、「バイオプリンティングによる再生臓器の製造」以外のトピックは 2030 年までに社会実装されると予測されている（図表 1）。

各分野の科学技術トピックの実現時期を参照し実施した「国際的視点からのシナリオプランニング」<sup>2)</sup>では、図表 2 に示すように、テーマ別シナリオ「ものづくり」の三つのシナリオにおいて、2030 年の社会を支える新しいものづくりとしてデジタルファブリケーションを取り上げている。2030 年には IoT の普及とビッグデータの解析技術の進展などにより、個人や社会のニーズの定量化が可能となる。ものづくりは ICT やサービスと融合し、個人や社会の多様なニーズに対応することで、高付加価値化を実現している。製造システムでは、Industrie 4.0 などの概念に基づいた広義のデジタルファブリケーションが、従来型の大量生産品に普及している。一方、3D プリンティングを基幹技術とするデジタルファブリケーションは、3D デジタルデータ、マテリアル/プロセス・インフォマティクス、オープンソースプラットフォームなど ICT と融合した先進性を生かし、マスカスタマイゼーション（変種大量生産）や、デザイン・サービスとの一体化によるオンサイト・

オンデマンドサービスを展開し、多様化した個々人のニーズに対応することで、QOL の向上に大きく貢献している〔シナリオ①〕。

また、少子高齢化、労働力不足、エネルギー、健康・医療、食料などの社会課題の解決にも、デジタルファブリケーションが貢献している。例えば、オンデマンド・オンサイトによる環境エネルギーデバイスの地方や発展途上国での製造・供給〔シナリオ②〕、身体にフィットしたウェアラブル機器製造や、食料生産に利用される機器の現地製造などを提供している〔シナリオ③〕。

## 3. デジタルファブリケーションの医療応用の動向

デジタルファブリケーションの適用は、人体に直接装着するウェアラブル機器や義肢などの外装品、インプラント、あるいは骨・臓器などの生体部位などの模型や実装物の作製にも広がっている。第 10 回科学技術予測調査においても、「三次元形状制御を可能にする、生体組織機能を有する再生医療用足場素材」や「バイオプリンティングによる再生臓器の製造」など、医療分野のデジタルファブリケーション関連トピックの重要度が特に高く、国際競争力も比較的高いとの評価を得ている。

一般の工業製品では、製品の内部構造を含む 3D デジタルデータの作成が必要となるが、医療分野では CT（コンピューター断層撮影装置）や MRI（磁気共鳴撮影装置）などの医療診断機器により、人体の内部構造を表す 3D 化可能なデジタルデータが既に存在するため、リバースエンジニアリングの手順

図表 1 第 10 回科学技術予測調査「分野別科学技術予測」結果～デジタルファブリケーション関連トピック

社会実装年	技術的実現年	科学技術トピック	重要度	国際競争力	分野
2023		目的に応じてネットからハード・ソフトの設計をダウンロードし、3Dプリンタ等で製造することにより、誰でも企画から1時間以内に製作・展開可能な低価格センサーノード	3.1	2.6	ICT・アナリティクス
		情報技術を用いたデザイン支援ツールの拡充と3Dプリンター等の普及に伴い、ユーザ自身での製品・サービスのカスタマイズやリデザインが一般化する	3.1	2.7	サービス化社会
2024		患者の三次元画像に基づく、質感などの生体物性が忠実に再現された、手術シミュレーションのための人体モデル	3.1	2.8	健康・医療・生命科学
2025	2020	三次元形状制御を可能にする、生体組織機能を有する再生医療用足場素材	3.5	3.1	
		細胞プリンティング技術による臓器様構造体（臓器モックアップ）の作製技術	3.1	2.9	
		パーソナルファブリケーションが普及し、ハイアマチュアや複数人の共同によって作成される製品が増え、製造物責任の法制度改正や新しい損害保険サービスなど制度面での対応が必要となる	3.3	2.6	サービス化社会
		コンシューマープロダクトにおける保守部品のオンデマンド生産	3.1	2.8	
		大量生産品と同等の精度・品質を持った部品・製品のパーソナル生産	3.1	2.9	
2026	2021	形の異なる部品のマスカスタマイゼーション生産（変種大量生産/10万個規模）	3.2	3.0	マテリアル・デバイス・プロセス
		付加製造（アディティブ・マニュファクチャリング）によるメタマテリアルのコンシューマープロダクトへの適用	3.1	2.8	
2028	2025	マテリアルズ・インフォマティクスを活用し、3次元造形による構造および機能性材料が開発される	3.2	2.8	
2035		バイオプリンティングによる再生臓器の製造	3.4	2.9	

（産学官の専門家約 4,300 人に対する Web アンケート結果、重要度・国際競争力は最低 1～最高 4 の平均値）

図表2 第10回科学技術予測調査「国際的視点からのシナリオプランニング」 テーマ別シナリオ「ものづくり」概要<sup>2)</sup>





で比較的容易に 3D 造形が可能である。

デジタルファブリケーションの医療応用は、材料や用途から図表 3 の 4 タイプに分類できる<sup>7)</sup>。このうち、分類①の医療モデル、補聴器、歯科矯正用マウスピースなどは既に実用化されている。また、分類④の生体材料で立体的な組織や人工臓器を作製する研究は「バイオフィブリケーション」と呼ばれ、近年国際的な学会が組織され、国際会議も開催されるなど、世界的に研究開発が活発化している。

#### 4. 医療現場における 3D データの活用と生体質感臓器モデルの開発<sup>11,12)</sup>

3D デジタルデータを活用した臓器などの可視化・可触化技術が進展し、臨床や人材育成など医療現場での利用が広がっている。

CT や MRI などから得られる医用画像情報として、DICOM<sup>注</sup> データを基にオープンソース医用画像ビューワ OsiriX (オサイリクス)<sup>13,14)</sup> などを用いてパソコン上で画像処理を行うことにより、臓器の形状データを抽出し、標準フォーマットである STL (Stereolithography) に出力することで造形用 3D データが作成される。これらの臓器等の 3D 画像は、手術現場でモニター上やモバイル端末で表示させたり、あるいはプロジェクション・マッピングで患者本人の身体に投影して位置の確認をすることで、医療現場の医師や看護師のサポートに活用されている。欧米では既に薬事承認されているこのような画像処理ソフトウェアが、最近日本でも医療機器として認証されるようになった。また、使用目的により保険適用も可能となった。

さらに最近では、このような可視化だけでなく、臓器モデルの利用による「可触化」も進展している。STL フォーマットの 3D データを用い、多噴射イン

クジェット式 3D プリンタで複数の紫外線硬化性樹脂材料からなるパーツやアセンブリを造形し、実際の臓器が有する複雑な解剖構造と質感を体感できる臓器モデルが実現している。現状で既に、CT の解像度を超える 0.016 mm の精度 (誤差 0.2-0.3 mm) での造形が可能となっている。また透明素材で作製した立体モデルは、臓器の内部構造を概観する際に有効である (図表 4(a))。

一方、手術のシミュレーション用には、実際の臓器と同じ触感が求められる。その場合には、3D プリンタで外形の型を作製し、そこにポリビニルアルコール (PVA) などの水分を含むゲル素材を注入し造形することで、実際の臓器と同じ触感・重量感の臓器モデルが作製できる<sup>15)</sup> (図表 4(b))。この臓器モデルでは、メスを入れる感触や出血すら再現できる。医師の術前シミュレーションによる手術の安全性向上のほか、実際の手術室にこれらの質感臓器モデルと体幹モデルを持ち込み、執刀中の医師たちの手技を画面で確認しながら、その患者データから作成した質感臓器モデルを使い、同時に医学生や研修医、専門医が同じ動作を実習するシンクロ手術シミュレーションも実際に行われている。このように、臓器モデルを活用した医学生や若手の医療従事者への教育利用の効果が期待できる。現状では、まだこのような柔らかい臓器のモデルによる手術支援加算の保険適用はなされていないが、今後腎臓などから順次適用が見込まれている。また、これまでは医療機器認証や評価には動物の臓器が用いられていたが、コストや個体差、倫理などの問題もあり、これを代替するものとして、今後生体と同じ質感を持つ臓器モデルが利用される可能性が高い。

現状の 3D 臓器モデルの課題として、コストの低減が挙げられるが、今後日本製の 3D プリンタや材料の開発が進めば、より低価格での利用が可能とな

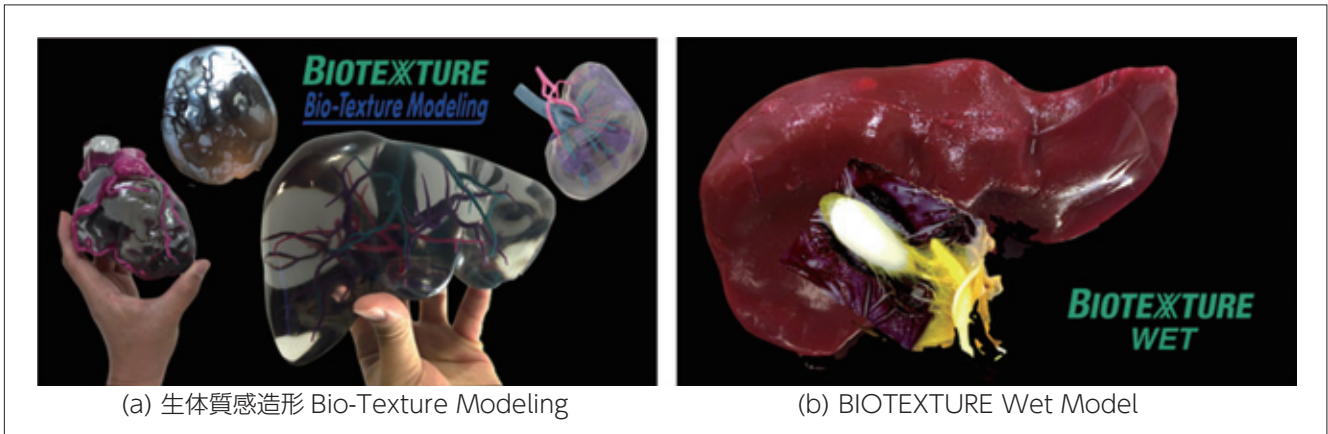
図表 3 デジタルファブリケーションの医療応用の分類

分類	材料	主な用途
①	非生体適合材料	医療モデル、人工補綴物〔義足 <sup>8)</sup> 等〕、 医用機器部品〔補聴器、歯科矯正用マウスピース〕など
②	生体適合材料	ステント、創傷治癒シート、埋め込み型人工骨・臓器〔カスタムメイド人工骨 (CT-Bone) <sup>9)</sup> 、バイオバルブ心臓弁 <sup>10)</sup> 〕など
③	生体適合材料	再生医療用足場 (スキャホールド) など
④	生体材料	3D 組織モデル、細胞組織チップ、 移植用組織、バイオ人工臓器 など

出典：参考文献 7 を基に科学技術動向研究センターにて作成

注 医用画像のフォーマットとそれらの画像を扱う医用画像機器間の通信プロトコルを定義した標準規格

図表 4 臓器モデルの開発例



出典：神戸大学 杉本真樹特務准教授御提供資料

る。また、現状一晩程度かかる造形速度が高速化され、さらにゲルを一体造形できる 3D ゲルプリンタ<sup>5,16)</sup>が商用化されれば、各病院にてオンデマンドで臓器モデルが作製できるようになり、医療サービスが大きく変革される可能性もある。

## 5. バイオフィブリケーションの進展

### (1) バイオ人工臓器製造の研究動向<sup>7,17)</sup>

移植用臓器は慢性的かつ絶対的に不足しており、一方、機械式人工臓器は、生物学的代謝機能を持たない。そのため、細胞の力を応用したバイオ人工臓器の利用が不可欠になる。また、化粧品開発や食品評価、さらには創薬にも及ぶと予測される、動物実験を代替する手法を取り入れるという世界の潮流がある。これに対応するために、培養皮膚をはじめとする細胞・組織・臓器モデルの開発と利用が急がれている。また *in vitro* (生体外) で細胞から人工的に構築したヒト 3D 臓器モデルを用いた難治疾患の病因解明や、新しい治療法の開発が今後重要となっている。

細胞から組織を創成する研究は、組織工学あるいは再生医工学として進展してきた。現在では培養皮膚、培養軟骨などが実用化しているが、移植に必要な複雑な臓器の作製は、従来法だけでは限界があった。そこで、3D プリント手法をはじめとする種々の工学技術を導入して、細胞から三次元の組織や臓器を作製するバイオフィブリケーション<sup>18)</sup> (図表 5) の研究が進められてきた。また最近では、どんな細胞にも分化が可能なヒト人工多能性幹細胞 (iPS 細胞) の発見によって、自身の細胞で臓器が作れる可能性が示されたこと、さらに、近年新しいものづくりとして 3D プリンタが注目される中、3D プリンタの医療への応用、またその発展形として、バイオフィ

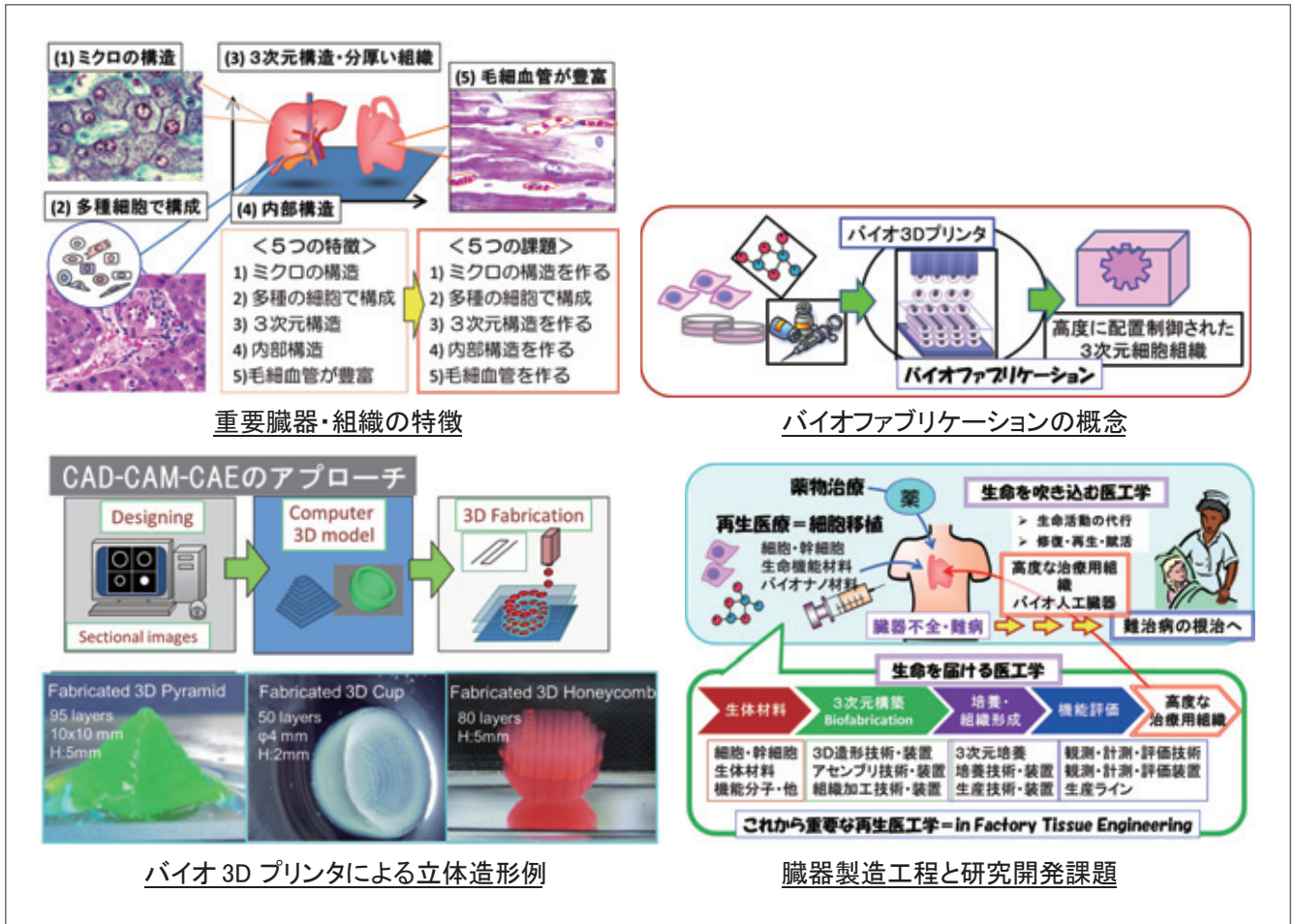
ブリケーションの研究が活発化している。

細胞の足場(スキャホールド)を 3D プリンタで造形し、その上に細胞をまき培養して生体組織を作製する方法では、単一か数種程度の細胞しか培養できず、しかも細胞の形状や組成を精密に制御することができない。複雑な臓器を作製するには、異なる細胞を必要な場所に適材適所で直接塗り分け、立体構造をつくる必要がある。そこで注目されているのが 3D プリント技術である。インクジェット方式では 2 pℓ (ピコリットル) のヘッドを用いれば、細胞に匹敵する 25 μm 程度のドットサイズを得ることができ、1 秒間に何十万個ものカラーのインクドットを適材適所に並べられる。ただし、細胞など生物学的材料は液体中での操作が必要であるため、生きた細胞の塗布・積層、さらに細胞同士を接着させるなど、その実現は容易ではなく、高度な技術開発が必要となっている。日本では、細胞シートの積層やインクジェット式 3D プリンタによる細胞の積層研究を世界に先駆けて開始し、現状でもバイオフィブリケーション研究ではトップレベルであるとされる。しかし近年、3D プリンタのバイオ応用が世界で注目され、米国では、バイオプリントベンチャーである Organovo 社が市場から約 41 億円を調達し、実用化が加速されている。

細胞を用いたバイオ人工臓器の製造には、医薬品と同様の生産工程が必要となる。医薬品の製造は、高品質を第一とし、クリーンな工場で一貫したマスカスタマイゼーション生産のもと、多工程の作業を経てライン生産が行われている。細胞を用いた作業では、より高い無菌環境が不可欠であり、医薬品の生産以上に厳密な管理・製造の品質確保が要求される。*in factory tissue engineering* の構想の下、工場生産を目指した高度な製造技術の開発、細胞の培養・育成・組織形成・機能発現のプロセスを管理・



図表5 バイオファブリケーションの概要と研究開発課題



出典：富山大学 中村真人教授御提供資料

制御する技術など、医工連携による研究開発が必要となる。

(2) 国による重点研究開発の動向

バイオファブリケーションによる人工臓器の製造の基盤となる研究が、国のプロジェクトとして進められている。2014年11月、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）〔2015年度から国立研究開発法人日本医療研究開発機構（AMED）に移管〕は、バイオ3Dプリンタや細胞シート積層技術などの立体造形技術を用いて、iPS細胞などから骨や血管、心臓などの立体組織・臓器を製造する技術開発プロジェクト（2014年度から5年間、事業総額約25億円）を開始した（図表6）<sup>19)</sup>。このプロジェクトでは現在5テーマについて計29機関の提案が採択され、いずれも3Dプリンタ又はシート積層により、生体の立体構造を複製することを目指している。これらプロジェクトのターゲットは、臓器そのものではなく、主に骨、血管、心筋である。

6. まとめと今後の方向性

医療現場への普及と人材育成への活用

3D デジタルデータの可視化、可触化による臓器モデルの臨床・人材育成現場での活用では、既に実際の事例として効果が実証されてきており、地方を含めたより広い医療現場への普及が望まれる。また、特に人材育成の観点から、中・高校生段階からの教育に利用することで、医工系への関心を高め、人材の確保に向けた効果も期待できる。

医工・産学連携による医療サービスへの展開

3D 画像上の臓器の正確な位置や形状の確定には医師の診断が不可欠であり、一方高品質・低コストで3D造形するためにはエンジニアリングの寄与が必要となるため、今後医療サービスとして普及するためには、実効的な医工・産学連携が重要となる。また、製造では、即時性や量に応じて、病院に製造システムを導入しオンデマンド生産するか、あるいは集約された工場でのマスカスタマイゼーション生産システムを構築することで、高効率化、低コスト

図表 6 iPS 細胞等を用いた立体組織・臓器の開発事業の概要



プロジェクトテーマ	内容	委託先
高機能足場素材とバイオ3Dプリンタを用いた再生組織・臓器の製造技術の開発	バイオ3Dプリンタを用いて細胞が住みつくための足場を構築し、そこに細胞を注入することにより、骨、軟骨・半月板、膝関節、皮膚を作製	東京大学、大阪大学、大阪保健医療大学、産業技術総合研究所、富士フィルム(株)、シーメット(株)、(株)JMC、オリンパステルモバイオマテリアル(株)
バイオ3Dプリンタで造形した小口径 Scaffold free 細胞人工血管の臨床開発	バイオ3Dプリンタを用いた細胞塊の積層技術により、小口径の血管を開発	佐賀大学、京都府立医科大学、(株)サイフューズ
革新的な三次元精密細胞配置法による立体造形と小口径血管を有するバイオハートの研究開発	特定の複数タンパク質で細胞表面を覆う高分子技術とヒトiPS細胞由来の心筋細胞等を精密に配置する3Dプリント技術により、マイクロなレベルから構造及び形状が制御された機能的な立体心筋を開発	大阪大学、東レ(株)、(株)リコー、横浜市立大学、弘前大学、名古屋大学、協和発酵バイオ(株)
組織工学を用いたヒト心臓壁立体造形技術の開発	ヒトiPS由来細胞シートにゼラチンハイドロゲル等の生体吸収性物質などをはさみ込み、酸素や栄養分を供給する仕組みを作ること、細胞の生存と機能を維持した従来にはない厚みのある立体心筋を作製	京都大学、旭硝子(株)、iHeart Japan(株)
細胞シート工学を基盤とした革新的立体臓器製造技術の開発	生体由来の血管網の上にiPS細胞由来の心筋シートを段階的に積層することで心筋中心部まで栄養分が供給される構造を作製	東京女子医科大学、早稲田大学、慶應義塾大学、東北大学、(株)東海ヒット、コージンバイオ(株)、(株)セルシード、パナソニックヘルスケア(株)

出典：参考文献 19

化が図れると期待できる。さらに、医療機関でのオンデマンド生産が実現すれば、地域医療の高度化や遠隔医療の適用・普及にも貢献できる。

日本はCTが世界で最も多く普及する国であり、したがって症例・活用例も多数存在するため、国際競争力のある技術分野といえ、日本の医療関連産業のけん引役としても注目される。

#### 日本の強みを生かしたバイオファブリケーション研究の推進

移植医療などの根本的な課題解決には、重要臓器の工学的手法によるバイオファブリケーションの推進が一つの方向性であり、第10回科学技術予測調査結果によると2035年には社会実装される。その

実現には多種多様な医学的・工学的研究開発課題に取り組む必要があるが、その基幹技術の一つは、多種の細胞を1細胞レベルで塗り分け積層する技術である。これに対応するバイオ3Dプリンタは現在一般の市場には存在しないため、日本が強みを持つインクジェットプリント技術を活用し、世界に先駆けソフトウェアを含む装置システムとプロセスを開発することで、国際競争をリードできる可能性がある。このような微細な塗り分け積層技術は、工学用途でも3Dプリンタによる半導体素子や三次元基板などの機能デバイスの作製等に応用・展開できる可能性がある。

デジタルファブリケーションによる臓器製造の課題は多いが、日本の「強み」を生かした科学技術イ

ノベーション政策として、医工・産学連携体制の構築も含め、将来を見据えて世界に先駆け持続的な研究を推進していくことが望まれる。

## 謝辞

本稿の執筆に当たり、神戸大学大学院医学研究科

消化器内科 杉本真樹特務准教授、(株)ファソテック取締役・メディカルエンジニアリングセンター長 渡辺欣一氏、富山大学大学院理工学研究部 (工学) 中村真人教授、山形大学理工学研究科機械システム工学専攻 古川英光教授、同・川上勝准教授に貴重な御意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 「第 10 回科学技術予測調査の公表について」、科学技術・学術政策研究所 HP : <http://www.nistep.go.jp/archives/22697>
- 2) NISTEP REPORT No.164, 「第 10 回科学技術予測調査 国際的視点からのシナリオプランニング」、2015 年 9 月、科学技術・学術政策研究所 HP : <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-NR164-FullJ.pdf>
- 3) 「第 5 期科学技術基本計画」、平成 28 年 1 月 22 日閣議決定、内閣府 HP : <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- 4) 蒲生秀典、「デジタルファブ리케이션の最近の動向—3D プリンタを利用した新しいものづくりの可能性—」、科学技術動向、No.137、P.19-26、2013 年 8 月 : <http://data.nistep.go.jp/dspace/bitstream/11035/2416/1/NISTEP-STT137-19.pdf>
- 5) 蒲生秀典、「デジタルファブ리케이션の進展—ファブ拠点の地域展開と国際標準化の動向—」、科学技術動向、No.149、P.30-37、2015 年 3・4 月 : <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-STT149J-30.pdf>
- 6) 調査資料 -240, 「第 10 回科学技術予測調査 分野別科学技術予測」、2015 年 9 月、科学技術・学術政策研究所 HP : <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-RM240-FullJ1.pdf>
- 7) 中村真人、「バイオフィブ리케이션の意義、必要性、国内外の技術開発動向と実用化のポイント」、BIO INDUSTRY、31、1、4 (2014)
- 8) 新野俊樹、「MIAMI プロジェクトの説明 III 製造力の向上」、(「Additive Manufacturing を核とした新しいものづくり創出 (MIAMI)」プロジェクト公開シンポジウム、2016.1.21 東京)
- 9) 高戸毅、「カスタムメイド型人工骨の開発と顎顔面領域への臨床応用」、人工臓器、44、1、41 (2015)
- 10) 中山康秀、「医療への応用事例：再生する自己組織心臓弁「バイオバルブ」の開発」、O plus E、36、1、37 (2014)
- 11) 杉本真樹、渡辺欣一、「3D プリンティングとバーチャルリアリティの医療活用最前線～医療産学連携におけるデジタルファブ리케이션～」、NISTEP 講演会 (2016.1.7、NISTEP)
- 12) 杉本真樹、医用画像情報の可触化による生体質感造形 Bio-Texture Modeling と BIOTEXTURE Wet Model の開発、人工臓器、44、1、53 (2015)
- 13) 杉本真樹、OsiriX 画像処理パーフェクトガイド最新版 (Ver.5.9/6.0 対応)、エクスナレッジ、東京 (2015)
- 14) 杉本真樹、医用画像 3D モデリング・3D プリンター活用実践ガイド、技術評論社、東京 (2016)
- 15) 杉本真樹、東健、渡辺欣一、嶋田周吉、特許第 5239037 号 (WO2012/132463)、3 次元造形モデル作製方法および医療・医学・研究・教育用支援ツール
- 16) 山形大学 HP、「世界初 3D プリンターとゲルを用いた柔らかな臓器モデルの作製」 : [http://www.yamagata-u.ac.jp/jpn/university/press/press20150305\\_04.pdf](http://www.yamagata-u.ac.jp/jpn/university/press/press20150305_04.pdf)
- 17) 中村真人、「バイオフィブ리케이션研究の動向と今後の展望」、科学技術政策研究所 講演録 -271、2010 年 11 月
- 18) M. Nakamura et. al., "Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field", Biofabrication, 8, 013001 (2016); doi:10.1088/1758-5090/8/1/013001
- 19) 未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業「立体造形による機能的な生体組織製造技術の開発」、2015 年 6 月 19 日、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) HP : [http://www.amed.go.jp/program/list/02/01/029\\_06.html](http://www.amed.go.jp/program/list/02/01/029_06.html)