

工学技術で臓器不全の治療の道を！： 臓器を作る機械の開発と先端精密工学 技術による医療支援への提言*

Engineers Create the Effective Therapeutic Ways for Intractable Organ Failure! : Development of Organ Manufacturing Machines and What Can Advanced Precision Engineering Do for the Medical Developments?

中村真人**

Makoto NAKAMURA

Key words

biofabrication, bioprinting, computer aided tissue engineering, 3D-bioprinter, in factory tissue engineering, CAD-CAM-CAE, regenerative medicine

1. はじめに

筆者は、小児科・小児循環器の臨床医から巡り巡って工学部の教授となった。現在、研究室を構え、「機械で臓器が作れるか」を研究テーマとして臓器を作る研究に取り組んでいる。本稿では、『工学技術で臓器不全の治療の道を！』という筆者のモチベーションをタイトルとして、僭越ながらこれまで歩んできた道、これまでの研究経緯から学んできたこと、現在取り組んでいる研究とともに、医学と工学への私の思いと理想や夢を綴らせていただきたい。

2. 研究の原点

2.1 臨床医時代に学んだこと (1) : 医学・医療技術の進歩への願い

臨床医の使命は、病気を抱えて受診してきた患者さんの病気を的確に診断し、最善の治療を行い、患者さんを健康な生活へと導くことにある。筆者は医学部で基礎医学から臨床医学の基礎を学び、そして臨床現場で患者さんを診ながら、臨床医として臨床医学を学んで育ってきた。その間、所属教室の教授をはじめ、指導に当たってくださった多くの先生方、先輩医師から叱咤激励を受けながら、また背中を見ながら理想の医師像を学んできた。臨床こそが医師の務め、を信条とし、臨床を駆け回ることを誇りとしてきた。しかし、臨床経験を積むにつれ、重症で手術適応がない患者さん、通常の治療では効果がなくどんどん悪化していく患者さん、治療法すらない難治病の患者さんに遭遇すると、「医学がもっと進歩してくれたら……」と、医学の進歩を祈るばかりで、医学の無力さを痛切に知らされた。しかし、祈っていたら医学は進むのか？ 医学を進歩させるには、誰かが病気を克服する治療法を開発することに取り組まねばならない。医学研究の意義と重さを知らされた。

2.2 臨床医時代に学んだこと (2) : 心臓は待つのではなく作れ！

小児循環器の臨床では、小児の心臓や肺や血管系のさまざまな疾患を担当する。先天性心疾患（生まれつきの心臓疾患）もあれば、後天的疾患（生まれた後にかかる病気や合併症で心臓や肺が傷害される病態）、原因不明の疾患もある。重症例や難病の場合、教科書に書かれてある最終治療手段は、心移植、心肺同時移植、であった。しかし当時の日本では、心移植は実施不可能な時代で、募金で大金を準備し患者さんを海外へ送るしかなかった。心移植には健康な心臓が、心肺同時移植では心臓と肺の両方が必要である。そしてそれら臓器は誰かが死なねば手に入らない。臓器を待つということは誰かの死を待つことになる。海外でも同じだ。しかも、治療を極限まで尽くした心臓は移植には使えないので、ドナーとなる提供者（多くは事故の被害者）の治療は可能性があってもある程度であきらめる必要がある。筆者が循環器を専攻した大きな理由は、最後心臓が止まるまでの蘇生救命治療の技術が身につくと考えたからであった。最後の可能性まで救命治療をするのが務めと信じていた。移植希望患者を助けるのか、臓器提供候補者を助けるのか、生命倫理・医療倫理的な葛藤ゆえ、心臓移植には心底縦に首を振れなかった。「心臓が必要ならば、科学の力で心臓を作るしかない。心臓が作れば、移植医療の倫理的、心情的な問題はすべて解決できる」この思いが心臓を作る研究へと駆り立てた。

また、将来、どんなに効力がある薬や治療法が開発されても、必ず効かない臓器不全の患者は存在する。しかし、薬が効かない、治療が効かない重症の場合でも、新しい臓器があれば臓器を取り替えて助ける道が作れる。しかも、健康な臓器が移植されると、ほぼ通常に近い生活レベルまでも復帰することができる。他の臓器不全治療ではありえない効果が期待できる。「心臓を作らねばならない」理由でもある。

3. 人工心臓の研究から学んだこと

10年間の臨床経験を経て人工心臓の研究開発の道に進

*原稿受付 平成 25 年 12 月 24 日

**富山大学大学院理工学研究部（工学）（富山県富山市五福 3190）

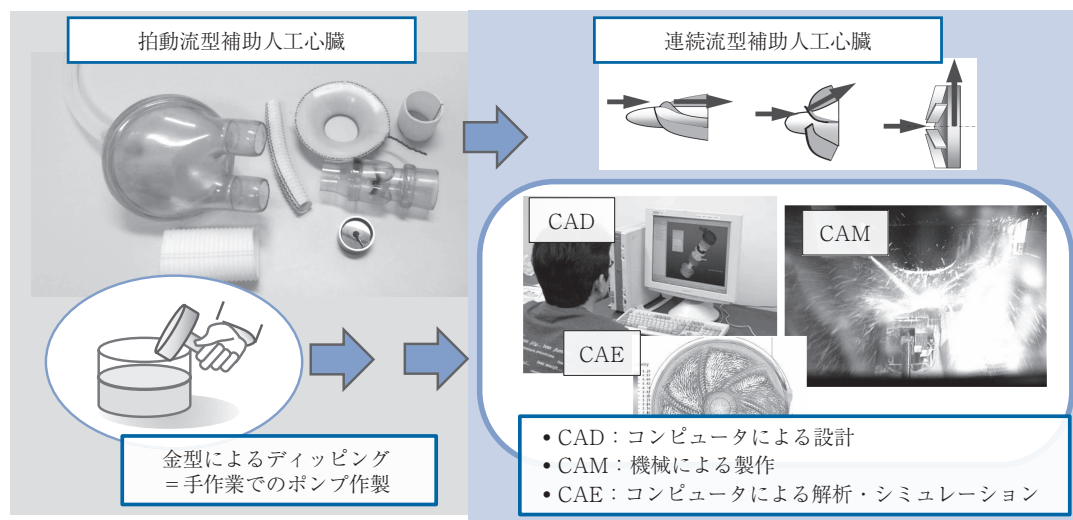


図1 人工心臓の開発手法の変遷

んだ。異分野融合の中への突入で、心臓外科医とエンジニアから成る医工連携チームの一員となって人工心臓の研究開発に携わった。その中で、数多くのことを学んできたが、ここではそのうちのいくつかを述べる。また、人工心臓の抱える問題を通して、筆者の思いも加えたい。

3.1 手作業からコンピュータと機械でのもの作りへ：CAD-CAM-CAEの応用

筆者が研究を始めたころは、人工心臓の研究開発は、拍動流型の人工心臓（ダイヤフラム型の血液ポンプで駆出・充満を行う方式）から連続流型（ロータリー式とも呼ばれ、スクリューのような羽根車が回ることで血液を駆出する方式）へ、空気駆動式（空気圧の変化で血液ポンプの駆出・充満を行う方式）から電気駆動式（電気力でモーターを回して血液駆出を行う方式）へと移行する時期であった¹⁾。機械式人工心臓で動物も人も生きられることを目の当たりにし、また、心臓は脈打つものという医学の常識は工学によって単なる固定概念であることが知らされた。

デバイスのタイプが変わり、開発手法にも工学的手法が導入された（図1）。ダイヤフラム式血液ポンプを作る際には、金型にポリウレタン樹脂をディッピングしてヒーターを当てて回しながら乾燥させるという手作業を繰り返して作製していた。連続流型ポンプでは、エンジニアがコンピュータ上で血液ポンプのデザインを行い、そのデータにのっとって加工機械が部品を加工し、それを組み立てて作る手法が導入された。すなわち、CAD-CAM-CAE（Computer-aided Designing, Manufacturing, Engineering）の導入が進んだ。ポンプの設計には理論式やコンピュータシミュレーションが使われ、コンピュータの高度な計算能力と理論解析に基づいた科学的設計が行われ、試作前に数多くのモデルを検証しながら開発ができるようになった。そして、CAMマシンによる高度な加工技術で部品が作られ、生産加工機械の性能次第でどこまでも製品の性能を高めることができるということを学んだ。

3.2 実用化への問題

3.2.1 日本の人工心臓臨床の遅れ：デバイス・ラグ

人工心臓の臨床では、体外設置型の空気駆動式補助人工心臓が使われていた。補助人工心臓とは、弱った心臓はそのままにして体内または体外に設置した血液ポンプで血液を送る働きを補助するタイプの人工心臓をいう。日本の臨床で用いられていた補助人工心臓は、1970年代に開発され1980年代に製品認定された空気駆動で駆動される血液ポンプである。しかし、患者さんはベッドサイドに置いた重厚な空気駆動装置につながれ入院を余儀なくされていた。血液ポンプは製品化後、ほとんどバージョンアップなく使われていた。バージョンアップなくというのは、一部でも改良を行うと日本では1からデータと書類を作って治験を繰り返さねばならない規制があったからである。一方、海外では、電気駆動で体外にはバッテリーと制御コントローラを置くのみの最新装置が臨床で用いられていた。そしてどんどんバージョンアップし、最新装置を装着した患者さんは自宅で日常生活をしながら移植を待機しているのが学会で次々と報告されていた。入院してベッドにはり付けになり血栓症におびえながら待機するのと自宅で日常生活を送りながら待機するのでは歴然たる差がある。臨床医は当然のことながら、最先端装置を一刻も早く日本の臨床に導入することを強く望んだ。最新装置が臨床に導入される欧米の臨床と、最新装置が使えず旧式装置しか使えない日本の臨床医療のギャップはデバイス・ラグと呼ばれ、大きく問題視された（詳細は朝日新聞 GLOBE 参照²⁾）。

3.2.2 企業の製品開発の障壁：研究と臨床の解離

デバイス・ラグの問題は、患者と臨床医にとっては深刻な問題である。では日本には最先端がなかったのかというと、そうではない。実は、人工心臓の研究では日米独の3強が世界を牽引しており、ずっと世界最先端を競ってきていた。特に日本の研究者たちは、日本人の体格でも使える小型装置の研究開発に注力し、実用化を目指してきた。海

外で製品化されていた装置は日本人の体格には大きすぎて実質日本人には使えなかったからである。しかし、3強といわれる日本の研究は一向に臨床に届かず、研究と臨床の間には大きな解離があったのもまた事実であった。

解離の原因はいろいろ指摘され、改善が行われてきている。しかし、今なお、日本の医療機器の研究開発と臨床応用との解離が問題視されている。たぶんどれも当たっているのは間違いないが、筆者なりの考えを述べさせていただくと、「製品開発」の観点と「必要なものを開発し社会に提供することの社会的意義」からの観点の両者が必要で、「必要なものを開発して製品化すること、そしてそれがちゃんと必要なものとして社会に安定して供給されるしくみ」を作っていくことが重要であると思われる。どんなに高い研究があっても、企業が「製品開発」を行い、製品を作って臨床に提供・供給しなければ、臨床では使いようがない。「製品開発」には相手、市場ニーズやコストや収益や納期など事業として成り立つかの経済的な要素が重要になる。せっかく「製品開発」しても、事業性がなければ、開発企業は赤字損失を被り、それを社会に供給することができなくなる。しかし、それが社会に必要なものであれば、安定して供給し続けねばならない。その両者を両立させなければならないのである。

2010年に、日本の技術で製品化された最新の補助人工心臓2種が認可された³⁾。日本での実用化を目指して開発し製品化まで漕ぎつけてきた企業の尊い志と社会的使命感、そして血のにじむ努力に心から賛辞を送りたい。営利だけで「製品開発」に動いていたのでは実現は不可能だったであろう。現在、日本の臨床では海外製も加わり、4種類の最新装置が臨床で使えるようになってきている。世界最高峰の装置が認定されたことで、人工心臓のデバイス・ラグは一気に解消された。臨床医は新しいデバイスで一段上の臨床を実感していることであろう。ところが、一方ではまだまだゆゆしき問題がある。作れば作るだけ事業赤字になるのでは必要なデバイスであっても企業は撤退するしかなくなる。撤退は装置が臨床に届かなくなるということである。市場原理だけで済まされる問題ではないことを強く認識し、必要なものをまじめに開発し医療に提供することの事業が無理せずとも事業として成立することが必要である。大変難しいことだが、ここの両立問題に対して抜本的な対策を練らなければ、日本の医療産業全般においても今後大きくのしかかる問題でもある。制度改革をはじめ、医療経済的、社会的仕組みを作っていかなければならない。

3.2.3 医療費削減論の横行

人工心臓を用いた診療は高度先端医療として取り扱われる。一方、2000年を過ぎてから、医療費の増加は財政を圧迫するという医療費削減論の報道が盛んに行われるようになった。これは、財政問題をおおって、医療費を削減しようという財務省主導の厚労省叩きの政策キャンペーンではなかろうかとも思われるが、ところがこのあおりを受けて、何と、「高額医療は悪、医療機器も医療自体も旧式の

安い医療に戻れ」、という、医療の進歩とは相反した極論まで専門家集団の人工臓器学会で出てくるようになった。医療費削減論は、確実に日本の医療を劣化させる。そして日本の医療産業力もダメにする。このもとでは、人工心臓の開発者やメーカーをはじめ、医療機器の開発に参入しようとする企業にとっては収益の見通しが立たなくなる。能力のある企業の参入をも確実に阻んでいる。

なお、参考まで申し上げておくと、医療費削減論の論評では決して語られることはないが、実は日本はOECD参加国の中でも現在、最低に近い医療費で、世界で最も国民が安心して受けられる医療を実現してきている国なのである。そして、その少ない医療費の中、欧米の何と3分の1から5分の1の医療スタッフ数で現場は必死で医療の質を高めてしのいできているのである。アメリカ並みの医療スタッフをそろえるなら、今の倍ぐらゐの医療費をかけてもいいのである。その事実を隠して国民をあおる医療費削減の政策キャンペーンの危うさについては、ぜひ文献4)の書籍をご参照いただいて、正しい認識をもっていただけると幸いである。

3.3 人工心臓を作る機械を開発する

さて、そんな状況から、人工心臓を製造し市場導入する企業の立場になって、実用化への方策を考えた。政治経済的な対策、臨床医療からの対策、どれも大切だが、開発者の立場でできることを考えると、いかに性能よく、しかも、効率的にコストをかけずに安く作るか？ が重要ポイントであると考えた。そして、たどり着いた発想は、「人工心臓を作る機械」の開発、である。高品質な人工心臓を生産する高度な機械を開発すれば、生産コストが削減できる。また、機械の手であれば、人の手で作るより、ずっと正確で精密な組み立て操作、再現性の高い高品質な製品の生産が期待できる。他の人工心臓研究者からは一笑に付されてしまったが、われながら高品質と低コストを両立するGood ideaだと考える。生産機器の開発は、実用化、事業化には必須のテーマである。

4. 「臓器を作る機械」で Tissue Engineering を革新する

4.1 Tissue Engineering の手法と課題

1990年代後半から2000年初期、クローン羊や遺伝子解読などバイオテクノロジーが日進月歩の進歩を遂げ、世間をにぎわした。細胞から組織や臓器作りを目指すTissue Engineering（組織工学または再生医工学と邦訳されている）や再生医療の研究も世界的に注目を浴び、日本にも研究ブームが押し寄せた。細胞から本物の心臓が作れば、科学の力で臓器を提供できることになるので、筆者の望むところでもあり、できるだけ情報収集も心がけてきた。

Tissue Engineeringでは、細胞から組織を作るために、培養皿で細胞を培養する方法、スキャホールドと呼ばれる足場材に細胞を播いて培養する方法が行われていた(図2)。スキャホールドは生体に埋め込むと分解吸収される

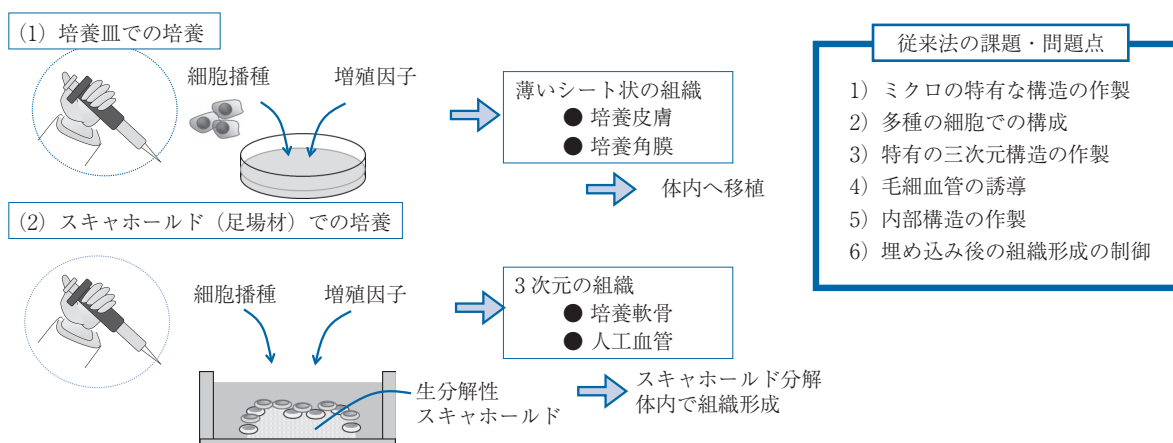


図2 従来の組織工学の手法と課題・問題点

材料で作られ、3次元の整形されたスキャホールドに細胞を播いて、細胞が接着し増殖した時点で体内に埋め込み、体内で組織や臓器を再生させるという手法である。埋め込まれた細胞付きスキャホールドは生体内で分解吸収され、最終的に細胞組織だけが残るという戦略である。現在もなおこれらの手法が主流である。しかし、これらの方法で実現した組織は、まだ培養皮膚、培養角膜、培養軟骨だけで、それ以上の組織、特に心臓や腎臓など移植医療が必要としている重要な組織や臓器に関しては、まだまだ手も足も出ないという段階であった。課題、問題点として、図2右にあげた項目があり、それらを克服する必要がある⁵⁾。

4.2 細胞から生きた人工心臓を作る機械の開発の発想

従来手法の限界を克服するには、その限界を克服するための科学技術を開発するしか道はない。前述のように人工心臓開発の経験から、「手作業からコンピュータと機械の手へ」、そして「人工心臓を作る機械を開発する」という発想を抱いていた筆者が考えたのは、ならば、いっそのこと、「生きた細胞で生きた人工心臓を作る機械」を開発してはどうか、というアイデアであった。

従来の Tissue Engineering の手法では、培養皿でもスキャホールド法であっても、細胞を播くのは研究者もしくは技師が手作業で播く。顕微鏡レベルの精度で細胞操作を行うことはありえない作業であった。しかし、コンピュータと機械の手を使ってならば、生きた細胞を適材適所並べることができるのではないかと。さらに開発装置の能力次第で、立体的に積み上げて、場合によっては、臓器を構成するたんぱく質や細胞の増殖や分化をコントロールする増殖因子等も合わせて積み上げて、3次元の複雑な構造をもつ組織や臓器を作ることができるのではないかと。それならば、そのための装置を開発すればよいと考えた。こうして、「生きた人工心臓を作る機械の開発」という研究目標ができた。しかも、生きた細胞から心臓が作れれば、機械式人工心臓では全く解決できていない電源の問題（体内でエネルギー産生ができない）や血栓症の問題（血液が固ま

り脳血栓症などの合併症がおこること。その防止に抗凝固療法の併用が必要）も解決でき、しかも、成長したり、感染しても白血球が退治してくれる、など細胞ならではの生物学的機能を有する新しい人工心臓が実現する。特に筆者が目指していた小児の人工心臓には理想的で最適な人工心臓となる。

4.3 Computer Aided Tissue Engineering

装置開発の基本コンセプトは、細胞から生きた人工心臓を作るための CAD-CAM-CAE を導入した Tissue Engineering 専用装置である。細胞を並べる設計図は、3D-CAD により3次元での細胞配置まで設計する。そのデータを用いて、CAM 装置は、高精細画像を印刷するかのように細胞やたんぱく質を実装し、それを1層1層次々積層していった3次元組織を構築する、というコンセプトとした。自分なりに Tissue-CAD-CAM 法と勝手に命名していたが、2003年の国際学会で、Computer-aided Tissue Engineering のコンセプトを発表した米国 Drexel 大学の Sun 博士と初めて知り合い、意気投合した⁶⁾。Computer-aided Tissue Engineering のスマートな表現に、以来、筆者も Computer-aided Tissue Engineering と呼ぶことにした。機械工学出身の彼との微妙な違いは、彼はスキャホールドを機械で作ろうという発想から出発していたが、筆者らは直接細胞を配置する装置開発が発想の原点であった。現在、Sun 博士とは協力し合って国際 Biofabrication 学会⁷⁾を立ち上げ活動しているが、バイオファブリケーション (Biofabrication) にこのコンセプトはそのまま引き継がれている。バイオファブリケーションの詳細はぜひ、別著をご参照いただきたい^{8)~10)}。

4.4 印刷技術の応用から 3D-Bioprinter の開発へ

筆者らは、細胞を適材適所並べる手法として、マイクロマニピュレータと印刷技術に着目した。マイクロマニピュレータについては、ゲームのコントローラで操作できる2本指の両手のマイクロマニピュレータを産学連携の共同研究で開発したが、細胞1個1個をつまんで並べるには時間がかかりすぎ、現在別の用途への利用を目指している。

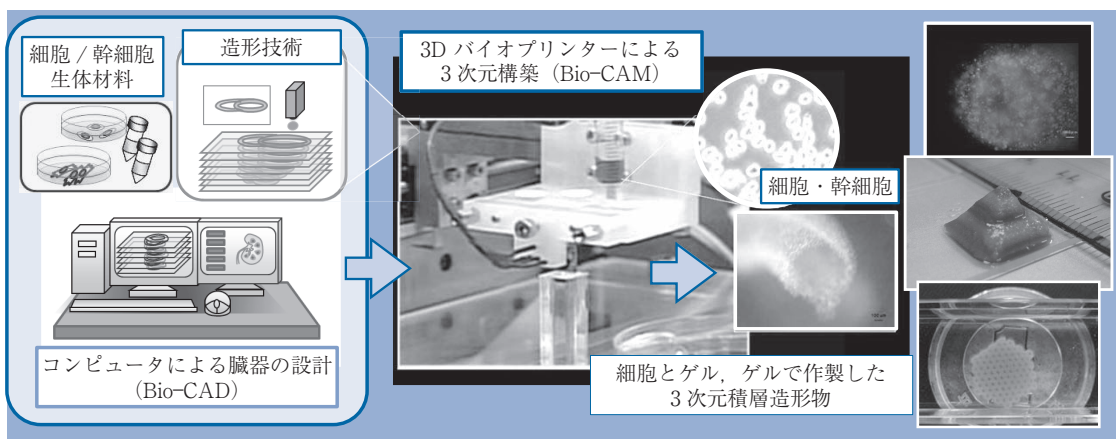


図3 3D-Bioprinterの開発

印刷技術に関しては、インクジェット印刷に着目した。そもそも印刷技術とはインクという材料を適材適所配置する技術である。写真画質の印刷を可能にしたインクジェット・プリンタでは、CMYB（シアン、マゼンタ、イエロー、ブラック）を基本とする何種類かのカラーインクの微細なインク滴を適材適所配置してドットで写真画像を印刷する。初期のころのインクジェット・プリンタではドットの粒子が感じられたが、今やインクドットは目に見えないほど小さくなった。顕微鏡で調べてみると、2ピコリットルのインクドットのサイズは直径 $25\mu\text{m}$ でほぼ個々の細胞に匹敵するサイズであった。多色カラー印刷、高速印刷、さらにはコンピュータ制御でデジタル画像出力として印刷を行うという特徴は、多種の細胞配置、多数の細胞の高速配置、さらにCAD-CAM-CAEの導入にも適した方法である。この考えからインクジェットの応用実験を始めた。

市販プリンタではすぐに詰まってしまっていて実現できなかったが、いろいろ苦勞してついに特別な実験用セットを組んで細胞の打ち出し実験を行えた。すると、生きた細胞を生きたまま打ち出すことができた。また、ゲル化する材料を用いることで、生きた細胞を打ち出して、液体中にゲルで3次元積層が可能になった。(財)神奈川科学技術アカデミーの公募プロジェクトに応募し、採択され、インクジェットによる3次元積層装置の開発プロジェクトを実施した(2005～2007年度)¹¹⁾。プロジェクトはバイオプリンティング・プロジェクトと名付けられ、以降、バイオプリンティングという言葉が筆者の研究テーマとして認知されるようになった。ただし、作製する組織の対象は2次元から3次元へと進化しているので、筆者はもっぱらバイオフィabrication (Biofabrication) と称することにしている^{8)～10)}。3年間のプロジェクトが終了し、現在、富山大学で引き続き研究を進めている。開発した装置は、3D-Bioprinter と名付けているが、現在バージョンアップした2号機となり造形能力は向上している¹²⁾ (図3)。さらに次のバージョンアップを目指してさまざまな改良に取り組ん

でいる。

5. in factory Tissue Engineering の提案

ここまで、臓器を作る装置開発のコンセプトとその必要性、そして生きた細胞を操作配置する『機械の手』の開発例として、インクジェット技術を応用した3D-Bioprinterの開発を中心に述べてきた。確かにわれわれの3D-Bioprinterは細胞を直接配置するという技術の先駆けの装置であるが、実際に、臓器作製を現実化・本格化することを考えると、3D-Bioprinterでできることは、細胞を3次元でゲルで固めながら並べる、積み上げるという作業だけである。この工程の『機械の手』のプロトタイプができただけで、臓器が作れるというのは、あまりに早計である。筆者の仕事は、ありがたいことに、「Science」誌に紹介されてから¹³⁾、いろいろな雑誌やメディア、報道に取り上げられてきた。血管内皮細胞と平滑筋細胞の2種類の細胞を並べて3次元の2重チューブを作ったが、撮影や取材のたびに、「血管が作れた」、と言ってくださいとマイクを向けられた。そんな簡単に本物の血管が作れたら人工血管の研究開発者から袋叩きものである。これまでできなかった多種の生きた細胞を配置して3次元構造物がインクジェットの技術で作れたという3D-Bioprinterの技術の進歩を示しただけである。すなわち、ちゃんとした本物の組織や臓器になるには、配置した細胞同士が接着し増殖して臓器特有な構造を形成して機能するようになってこそである。したがって、この後に続く培養・育成の工程を経てしっかりと組織化させることが必要である。

そこで、本稿では、『Computer aided Tissue Engineering』『Biofabrication』をさらに一歩進めた『in factory Tissue Engineering』¹⁴⁾のコンセプトを紹介したい。

臓器の構造をもっと厳密に観察すると、実際には、細胞、タンパク質を最小単位としながら、毛細血管や筋線維、上皮組織、さらに大きな器官を形成し、最終的に臓器が形成されている。すなわち臓器は、さまざまなパーツが階層的に構築・構成された構造物とみなせる。そこで、ち

ちゃんとした臓器を作るためには、細胞を並べただけではなく、毛細血管や筋線維などさまざまなパーツを作る特殊な作業工程も必要と考えられる。しかも、それぞれの工程で特殊な作業を担当するさまざまな「機械の手」や「ツール」が必要である。つまり、複雑な構造をもつ臓器を作製するには、原材料がいくつもの製造加工の工程を通して初めて一つの最終製品ができて梱包されるという「工場生産ライン」的な発想が必要ということである。それが『in factory Tissue Engineering』のコンセプトである。高度な臓器になればなるだけ、多くの工程が必要になる。もしかすると、一つの工場にとどまらず、いくつもの工場群、コンビナートが必要かもしれない。そして、必要なそれぞれの工程で「新しい機械の手」が必要である。

われわれの3D-Bioprinterは細胞を並べるという工程の技術のある意味先駆けの装置であるが、高度な組織作製のためには並べる、積み上げるだけではなく、もっと複雑な組み立て方や組み合わせ方、例えば、重ねる、接着する、つなぐ、束ねる、巻く、編む、包む、折りたたむ、さらには、引っ張る、圧する、削る、注入する、膨らませる、整形する、矯正する、など、ありとあらゆる方法で組織、臓器の構築を目指す必要がある⁹⁾¹⁰⁾。加えて、組織化、器官形成の過程においても必要な工程はまだたくさんあると考えられ、しかもそれらの工程を実現する機械の手や装置はまだ世界的にも皆無に等しい。そしてそれらの技術は、臓器を作るのにはこれから間違いなく必要となるツールである。日本にはこれまでの製造業を築き上げてきた高い生産技術開発力がある。『in factory Tissue Engineering』のコンセプトで日本の技術で世界を先導すればよいのではないかと提案したい。臓器の構造はいたるところがミクロの構造である。そこに日本の高い精密工学技術が貢献する場は決して少なくない。インターネットのニュースでは、「工場で飛行機を作るように心臓を作りたい」とアメリカの研究者が述べているらしい¹⁵⁾。飛行機でさえ工場が要る。心臓や肝臓、腎臓等、工場レベルで作れたらしめたものであるが、臓器を生産する工場開発のスケールで取り組むべきである。このニュースから、一部のFuturistは確実に工場生産の必要性に気付き始めていることがうかがわれる。ぜひ、どこより先に日本が臓器工場を立ち上げたいものである。

6. ドナー不足の根本解決の鍵は、科学技術の発展

6.1 エンジニアの時代

世界一、ドナー臓器不足が深刻な日本は、世界一その解決に力を入れて取り組む必要がある。その根本的な解決の道は、その解決のための科学技術を発展させること以外にはない。航空学者のTheodor von Carman博士は、「科学者はあるがままの世界を探索するが、エンジニアはいまだない世界を創り出す」と述べている¹⁶⁾。世にない装置を創り出し、世にない手法を産み出し、世にない作り方で、これまでできなかったことを実現するというエンジニア精神

を述べているが、心から賛同する。メカニカルであろうが、バイオであろうが、解決不能なさまざまな問題を解決する道を作るのは、エンジニアにかかっている。1965年朝永振一郎博士とともにノーベル物理学賞を受賞したRichard Feynman博士は、原子を1個1個操作して積み上げて思い通りの物質を作れるようになるだろう、とナノテクノロジーのコンセプトを予言し、その後、IBMの研究者たちが原子1個1個を並べて「IBM」の文字を書くということをやったのけた。原子での文字が実現したのは、「装置の開発」が実現の鍵であったと筆者は考える。原子を操作する装置の開発に取り組み、STM（走査型トンネル顕微鏡）という装置が開発されたからこそである。されば、細胞から臓器を作るために必要なさまざまな工程、それぞれを実現する技術を研究開発し、それを実現する装置を開発すれば、きっと臓器作りは実現する。Tissue Engineeringはエンジニアが切り開く時代であると考え

6.2 生命を守る使命のプロジェクトの必要性を考える

研究者は研究に参入しやすい。誰もやったことがないことにチャレンジすれば論文が書ける。しかし、論文ではものができないし、臨床でも使えない。しかも多くの工程の技術をそろえて、臓器を作る工場を作ろうとすれば、1研究者の研究費ではとてもできない。また、臨床に使えるようになるには、製品開発を担当する企業が必要で、研究開発費は二桁か三桁上の大金が要る。しかし、企業はすぐにお金になることであれば飛びつくが、時間がかかることや事業利益が大きくなければ、また、リスクが大きければ背を向けがちである。株式会社も株主投資家も営利が目的だから仕方がない。では製品価格を釣り上げればいいのかの考えも確かにある。しかし、臓器不全の患者から大金を得るのははたして薦められることなのか？ 漫画ブラックジャックで、大金を患者に要求するという手塚治虫が投げかけた問題が漫画では終わらず現実の問題となる。海外渡航移植の相場は、20年前は数千万円であったが、今は1億円とも2億円ともいわれる。生命を人質にしての言い値での事業はどうなのか？ 生命倫理的、医療経済的にも深い問題が潜む難しいところでもある。しかし、一方で、臓器があれば助かる患者さんが、毎年、何百万、何千万人と亡くなっている現実も間違いない。売れるものが必要なものだ、という考えがあるが、売れなくても必要なものがある。人の生命を守り、医学を進歩させ、病苦の患者を助けられる時代にするという医学、医療技術の研究開発は、いつの世においてもどこの場所においても必要なものである。「必要なものを研究開発する」、ここに研究開発費がちゃんと集まり、ちゃんと研究開発が進む、そして社会に滞ることなく供給される、そんな世の中になってほしいと願う。医療は営利ではなく、必要なものである。

また、世界一ものづくり技術が高いと自負する日本には、確かにそれだけの実力があるのもきっと間違いないが、高いものづくり技術の多くは企業にある。したがっ

て、そんな企業が参画することこそが日本の強みにもなる。営利抜きに高い技術力をもつ企業が存分に参入できる仕組みが欲しい。

毎年、日本はODAと称して途上国に援助を行っている。尊いことである。ならば、医療技術で世界貢献する、という日本の世界貢献の考え方はどうだろうか？「臓器工場を開発する」という大型プロジェクトを計画し、世界一高い技術で臓器を作って、世界に貢献する。臓器が作れば、移植で助かる人が助かる世の中になる。最高の医療が国民にも、全世界の人々にも提供される。臓器を作って世界の医療に貢献する、その尊い使命を日本が担う。世界への貢献が使命ならば、必要以上に臓器で儲ける必要はない。医療費削減、と叫ばれているが、もはやこれは医療費ではない。国際貢献費である。多国籍軍で軍事費を負担するのより、よっぽど世界に確実に貢献する。このような生命を守るプロジェクトはどうだろうか？

米国はアポロ計画で人を月に送った。軍事目的、ソ連との競争、科学の挑戦、さまざまな理由があるだろうが、そのおかげで、コンピュータ技術、通信技術、画像解析技術が一気に進んだ。同様に臓器を作るプロジェクトを進めれば、付随して、さまざまな生命科学の技術が進むのも間違いない。生命科学は必ず医学全体にプラスの進歩を与えてくれる。ぜひそこに、日本の高い工学技術が貢献できるようなことを心より願いたい。

7. 最 後 に

元臨床医という立場から、そして現研究者の両面から、「科学の力で臓器を作って医療の進歩に貢献する」「日本の高い工学技術をいかにしたら組織工学の進歩に貢献できるようにするか」をテーマに、筆者の学んできたこと、問題点としてのしかかってきたこと、そして考えることを述べさせていただいた。筆者の「思い」や「夢」、その実現に向かってどうすべきか、存分に書かせていただく機会をいただき、心より感謝する。十分まとめる時間がなく、乱筆、乱文をお許しいただきたい。

最後に、医療は人の生命を守るという使命があるが、工

学には「必要なものを研究開発し、創り出して世に供して、世に貢献する」という使命がある、と工学の重要さをますます重く感ずる今日この頃である。

参 考 文 献

- 1) 中村真人：無拍動流補助人工心臓 世界の開発動向，先端医療シリーズ 37 人工臓器・再生医療の最先端，許 俊鋭，齊藤 明，赤池敏宏 編，寺田国際事務所/先端医療技術研究所 pp. 35-39, 2005 年 11 月。
- 2) http://globe.asahi.com/feature/100322/side/01_10.html
- 3) 2010 年 11 月 20 日朝日新聞。
- 4) 大村昭人：医療立国論，日刊工業新聞社，(2007)。
- 5) <http://www.tissueeng.net/> (2002) より。
- 6) W. Sun and P. Lal: Recent Development on Computer Aided Tissue Engineering, Comput. Methods Programs Biomed., **67**, 2 (2002) 85-103.
- 7) <http://www.biofabricationsociety.org/>
- 8) 現代化学，512 (2013) 30-34.
- 9) 中村真人，瀧浦晃基：バイオプリンティング～バイオフィブリケーション技術の基本コンセプト，日本機械学会誌，**117**, 1142 (2014) 41-44.
- 10) BIO INDUSTRY 31 (1) 特集『バイオフィブリケーション～機械で臓器を作る～』（監修 中村真人），シーエムシー出版，(2014)。
- 11) 中村真人：中村「バイオプリンティングプロジェクト」研究概要集，(財)神奈川科学技術アカデミー，2008.3.4.
- 12) K. Arai, S. Iwanaga, H. Toda, C. Genci, Y. Nishiyama and M. Nakamura: Three-dimensional Inkjet Biofabrication Based on Designed Images, Biofabrication, **3**, 3 (2011) 034113.
- 13) P. Calvert: Printing Cells, Science, **318**, 5848 (2007) 208-209.
- 14) <http://kaken.nii.ac.jp/d/p/22300152/2010/3/ja.html>
- 15) <http://www.livescience.com/41280-3d-printing-heart.html>
- 16) <http://www.nmspacemuseum.org/halloffame/detail.php?id=31>



中村真人

1986 年神戸大学医学部卒業，博士（医学）。現在，富山大学大学院理工学研究部（工学）教授。研究内容は再生医工学，人工臓器，バイオプリンティング・バイオフィブリケーション。著書等：Cell and Organ Printing, Springer, (2010), Inkjet Technology for Digital Fabrication (Wiley 2013), 再生医療叢書 2「組織工学」，朝倉書店，(2013)，BIO INDUSTRY, **31**, 1, 特集号監修，シーエムシー出版，(2014) 他。