

巻頭対談

デンソー

加藤良文

経営役員 CTO

×

NTTデータ

有馬 勲

常務執行役員

日経MOOK

# 製造業

# DX

監修 NTTデータ

## デジタルが切り開く ものづくりの新次元

製造業の最新トレンドとDX進展のポイント  
生産・品質管理／研究開発・設計のDX  
サプライチェーン(在庫管理・調達・物流)のDX  
製造業のエネルギー最適化／カーボンニュートラル

対談

企業の先進事例を紹介!

- May Mobility
- NTTデータ  
ザムテクノロジーズ
- 帝人ナカシマメディカル
- Anaplan
- 三菱商事

デジタル庁

村上敬亮

統括官

NTTデータ

濱野賢一郎

技術革新統括本部 技術開発本部  
プリンシパル・エンジニアリングマネージャ

JAFTAS

元杭康二

NTTデータ

篠田浩直

日本経済新聞出版

図表1 NTTデータ ザムテクノロジーズ・AMの5つのプロセス

材料開発	設計／製造プロセス	製造	後処理	試験／品質保証		
<b>Metallurgy</b> 顧客ニーズを実現するため、新たな合金材料の開発を行っている	<b>DfAM (Design for AM)</b> 従来実現できなかった形状をAMでは実現できるため、「AMならではの設計」を行うことで、より高い効果を得られる	<b>Process</b> 材料や部品形状に応じて3Dプリンタの挙動を最適化	<b>Additive Manufacturing</b> EOS社の3Dプリンタを多数有しており、国内最大級のキャパシティを誇る ▶ M 290 (主力機).....11台 ▶ M 100 (小型機).....1台 ▶ M 300/M 400 (大型機).....3台 機種ごとに造形可能サイズ、レーザーパワー出力やレーザー搭載数などの違いがある	<b>Post Processing</b> 急速冷却による内部応力を解消するための熱処理や研磨など、後処理が重要となる	<b>Testing</b> 結晶方位や金属組織といった微細構造の解析や、機械強度などを試験し、実用に耐えられるかを検証	<b>Quality Control</b> 顧客が求める品質を担保できているかをさまざまな角度から検査し、品質を保証する

出所：NTTデータ ザムテクノロジーズ



主力機であるEOS M 290

進化するコンピューショナルデザイン

# 製造業を根幹から革新する Additive Manufacturing

急速に多様化するニーズに大量生産の維持が難しくなっている今、注目されているのが「Additive Manufacturing」(AM)だ。AMによる受託製造および3Dプリンタ販売を行いDigital Manufacturing Centerを擁する、NTTデータ ザムテクノロジーズのCTO酒井仁史氏が解説する。

## 製

品として成立するものを、3Dモデルからそのまま金属や樹脂で造形できる「Additive Manufacturing」(AM)。製造方法の革新というDX効果はもろんだが、それだけではない。製造工程を一気通貫でデジタル化できるメリットは大きい。

## 金属加工技術としてのAMの特徴

AMとは、平たくいうと3Dプリンタを使った加工技術だ。金属AMで最も一般的であるLPBF(Laser Powder Bed Fusion)レーザー粉末床溶融結合)方式では、3D CADデータからスライスした2次元の層を1層ずつ出力し、積み重ねて3次元の造形物を作る。

台座となるプレートに金属の粉を撒き、レーザーを当てて溶かす。これが固まると1段プレートを下げて、また粉を撒き、レーザーを当てて溶かす。これを繰り返すことで目的の形に成形する。

やっていることは3D積層造形で、樹脂を使った3D出力と原理としては変わらないように思えるかもしれない。しかし、金属を材料とする点により、その特性を活かしたものと

づくりが可能となる。

詳しくは後述するが、AMの場合、1層1層レーザー照射で固めていくことで、従来の金型や鑄造による製法よりも緻密な金属体が得られる。逆にいえば、レーザー照射を柔軟にコントロールすることで、造形する製品に合わせた特性(密度や強度など)を持たせることができる。

樹脂AMは手軽に出力できる半面、プロトタイプなど、本製品の事前で使うものというイメージが強い。金属AMをそれと同等にとらえてしまうと、その本質を見誤ることになる。

## 必要なものを欲しいときに、必要なところへ出力する

前述のとおり、AMはこれまで難しかった複雑な形状の立体金属造形ができる。その具体的な利活用として、複数のパーツに分けて生成し組み立てていた部品を、一体化した部品に置き換えるという利用シーンが挙げられる。それにより何が起るかという点、つまり部品点数の削減だ。組み立ての工程も減らせるし、人的ミスの発生を低減することにもなる。それにより全体が最適化でき、コストダウンが期待できる。また、中空化による軽量化、表面積の最大

ド、パーソナライズドプロダクトの製造は、実際、すでにインプラントや人工関節などの医療分野で始まっている。医療の場で行われるMRIやCTスキャンといったさまざまな検査データから、患者各々に合わせて手術や治療用の器具を作ることが可能。医療分野でのAM応用については、42ページで帯人ナカシマメダイカルの事例を紹介するが、オーダーメイド、パーソナライズドプロダクトの製造はまさにAMの特性を活かせる領域といえる。

## AMの価値を最大限に活かすには

このように製造業に大きな効果を

もたらすことが期待できるAMだが、まだまだ日本では普及しきれていない。その理由の1つが、一連のプロセスの理解、およびその管理の難しさだ。金属3D積層造形の効果を十分に活かすためには、まず3Dプリンタ出力に適したものと適していないものの選り分けが必要だ。立体成形では、効果をより引き出すため設計を見直すことが多い。そのデータの作り方、3Dプリンタのパラメータ設定によって品質やコストが変わってくる。材料として用いる金属の種類、それに応じた3Dプリンタの制御といったノウハウが、AMでは非常に重要になってくる。

## AMにおける設計、Design for AMへの考え方

前述のとおり、AMの大きな特徴は複雑な形状の部品を作成できるところにあり、CADから直接的に自由形状を作成できることにより設計に大きな自由度がある。とはいえ、空間上に立体成形するわけで、当然のことながら物理的、技術的な制約がある。

また、材料による特性の違いを理解する必要があり。これはレーザーの照射と密接に関わってくる部分で、どのくらいの強度、速度でレーザーを当てるかによって溶け方、固まり方が違ってくる。それによって、金



酒井仁史氏  
Hitoshi SAKAI  
NTTデータ  
ザムテクノロジーズ  
CTO

属の組成が変化し、生成物の特性が決まるといことになる。これは金型や鑄造による生成にはないポイントで、レーザー照射で焼結する場合、焼結により作られた物体は、その密度や強度が元の金属とは大きく異なるという特性を持つ。逆にいうと、製品(部品)を作るとき、どういう材料を使って、どういう特性を出すかという素材の設計をする必要がある。

そのためNTTデータザムテクノロジーズでは、さまざまな製品・ニーズに対応できるように、材料(合金の種類や配合)と加工のパラメータおよび結果、生成される金属の組織の組成、特徴を調べ、データベース化している。

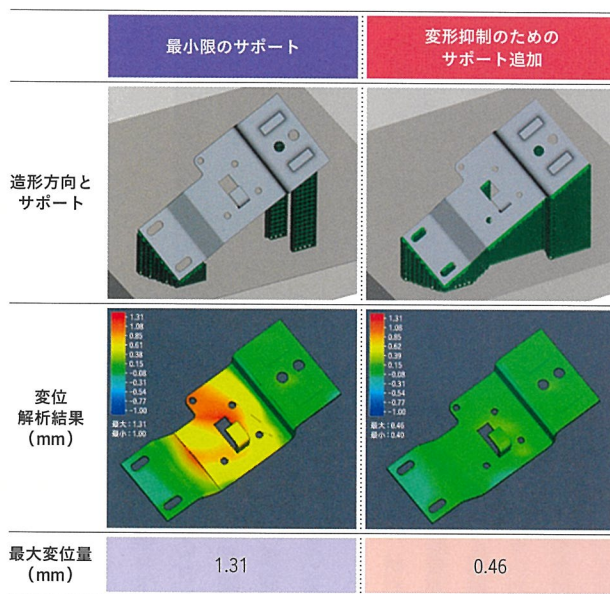
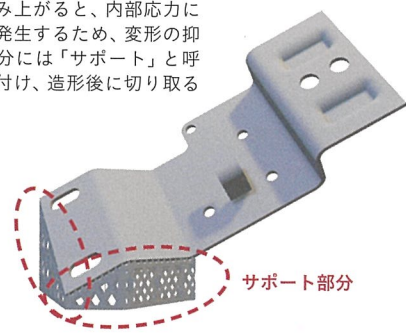
また、少量多品種の製造は、ニーズに最適化した生産が可能になる。必要な部品・製品を必要な数だけ供給できるということだ。例えば、修理用の部品を1つの単位から出力することもできる。通常、部品を作るとなればラインを組むことになり、部品の種類ごとにラインを変える必要がある。ニーズの少ない部品をわざわざラインに加えることは難しい。しかし壊れた部品を少量単位で造形できれば、修理してでも使い続けたいというユーザーのニーズに応えることができるし、何より製品の寿命を延ばすことができる。

そして、AMによるオーダーメー

## サポート部分の設計

図表2 サポート部分の設計  
— 材料の削減や後工程の効率化につながる

金属の層が積み上がると、内部応力によりひずみが発生するため、変形の抑制が必要な部分には「サポート」と呼ばれる足場を付け、造形後に切り取る作業を行う



造形する角度によってひずみに違いがありサポート設計によって変形量も変化する  
出所：NTTデータ ザムテクノロジーズ

の製造では「熱ひずみによる変形」が生じる。要は、金属を溶かして固めているので、その際に層全体に対し収縮が起こる。1層1層つながっていくため、それが最終的には大きな変形につながってしまうのだ。

例えば、40センチメートル程度のものを出力するとき、何もせずに出してしまうと、本来の寸法から5ミリ近くずれてしまう。そのため、変形してもいいようにモデルを調整する必要がある、つまり変形を見込んだモデルを作ることになる。また、積層で積み上げて造形する

ため空中に作ることはできない。必要に応じて、造形時に支える脚のよな部分をサポートとして配置する(図表2)。また、水平面(XY方向)と垂直面(Z方向)で造形の特徴が異なるため、どのような角度で造形するのが適しているか部品の傾きを決める必要がある。プレートに対して、どのような角度で造形するかにより後工程の切り離し作業の難易度も変わってくる。

こうしたAMの特徴や制約を踏まえ、AMのメリットを最大限に活かす、付加価値を最大化するための設

計が必要になってくる。

ただ最近では、前述のような熱による変形を見込んだ造形用モデルの作成、サポートの配置など、AM特有の設計をアシストしてくれるコンピュータシミュレーションソフトも充実してきており、導入への障壁はかなり下がってきたといえる。マウスで容易に形を変えたり、パラメータを設定したりすることができ、その設定で強度や特性がどうなるかをコンピュータ上で計算してくれる。一例を挙げると、Topologyのよ

ができています。それに対し3Dプリンタでは、溶接や熱処理などと同様

「特殊工程」と呼ばれ、結果としての製品検査だけでは品質保証が困難とされていることから、本当に品質は大丈夫なのかという懸念が払拭できていない。金属3D積層造形がなかなか拡大していかない理由の1つはそこにある。

NTTデータ ザムテクノロジーズでは、この品質保証の部分に大きな課題感をもって取り組んでいる。1つポイントになるのは、従来の部品メーカーとは立ち位置が異なるという点だ。機械加工のドメインで、例えば鋳造の場合、鋳溶かした液体は冷えて固体になるが、物性は変化しないので、材料の品質管理は材料・素材メーカーになる。

しかし、AMの場合は3Dプリンタの中で材料の特性が変わるので、それが狙い通りの品質を担保できているかどうかは我々が考えなければならぬ。これは、前述の材料に関する研究にもつながる話で、Digital Manufacturing Center内にラボを併

設し、研究開発を行っている。

NTTデータ ザムテクノロジーズでは、こうした一連のAMプロセスの工程を管理する製造管理システムを自社で構築し運用している。

設計から造形、後工程と、ここでは大きな括りで紹介したが、実際にはそれぞれ細かな工程に分かれているため、どの工程にどれくらい工数がかかるのかといったスケジューリングやそれらの進捗を一元管理するシステムは非常に重要だ。全体を通して、その部品の原料がどんなものだったか、各工程でどんな作業を行ったか、その結果がどんなものだったかをひも付けてトレーサビリティを担保する。関連ドキュメントも含めて一気通貫で見通せるよう、ソリューションを構築し運用している。

### デジタル化されたものづくりがもたらす未来

はつきりいつてしまえば、AMは従来の機械加工の工程をデジタルで置き換えるトランスフォーム(転

換)ではない。「デジタル化されたものづくり」がAMそのものであり、生産スタイルを大きく変えるトランスフォームだ。

例えば、ある部品をAMで造形するとする。材料、3Dモデルデータ、3Dプリンタのさまざまなパラメータ、それらを「レシピ」として設計図・設計データに付与すれば、基本的にはどこでも、誰でも同じ部品をAMで生成できる。実際、我々のレシピを使って海外の工場で部品をそのまま出力したいというニーズもある。

このように、AMで作ったプロセスとそこで発生するさまざまなデータを一元管理し、ノウハウという暗黙知をソフトウェアに落とし込み共有していく形だ。

AMの特性をどう引き出して活かすか。AMの導入には確かにまだ難しいところがある。本稿で見てきたように、材料の知識、金属3D積層造形の知識、品質保証の考え方、経験に培われた知見やノウハウが必要だからだ。我々はそうした部分を、AMに特化した製造管理システムとして提供したいと考えている。

AMの普及は生産システムだけでなく、消費スタイルをも変える可能性がある。現在、その特性がメリ

形状の設計をアシストしてくれるソフトウェアは、コンピュータシミュレーションをかなえる重要なツールだ。Topologyを使って解析することで、強度の役には立たない部分を削り出し、無駄なところを削っていく。またラティス構造(周期的に格子が並んだ立体形状)にすることで軽くするなど、CADモデルから3Dプリンタでの出力に最適化したモデルにしていく。こうした3Dモデルの作り方も、ノウハウとして積み上げていくことができるだろう。

### 品質保証につながる後工程の試験・検査

後工程として、製造後、サポート部分の除去や内部残留応力除去のための熱処理、表面粗度改善のための研磨を行う工程がある。そして、目論見通りに作れているか検査を行う。3Dスキャナや電子顕微鏡などの検査機器を使って外観や表面粗度、密度などを調べる。

試験・検査は、要求された品質を守っているということを担保する品質保証につながる重要な工程だ。

従来の金属加工では、この部分を守っていればこういう品質のものができるというある種のコンセン

ソットとして見えやすい航空宇宙、医療という分野で導入が進んでいるが、よりスマートにAMの制御ができるようになれば、自動車や家電といった産業に應用先が広がる。それによって、連鎖的に消費者の「ものを買う」「ものを使う」という世界観が変わっていくはずだ。必要なものを買って使う、古くなれば新しい機能を持つものに買い換えるという従来の大量消費という世界観から、消耗品である部品を交換しながら使い続ける、さらには新たな部品により機能を追加する。ソフトウェアのようにアップデータし続ける製品の在り方が可能になる。

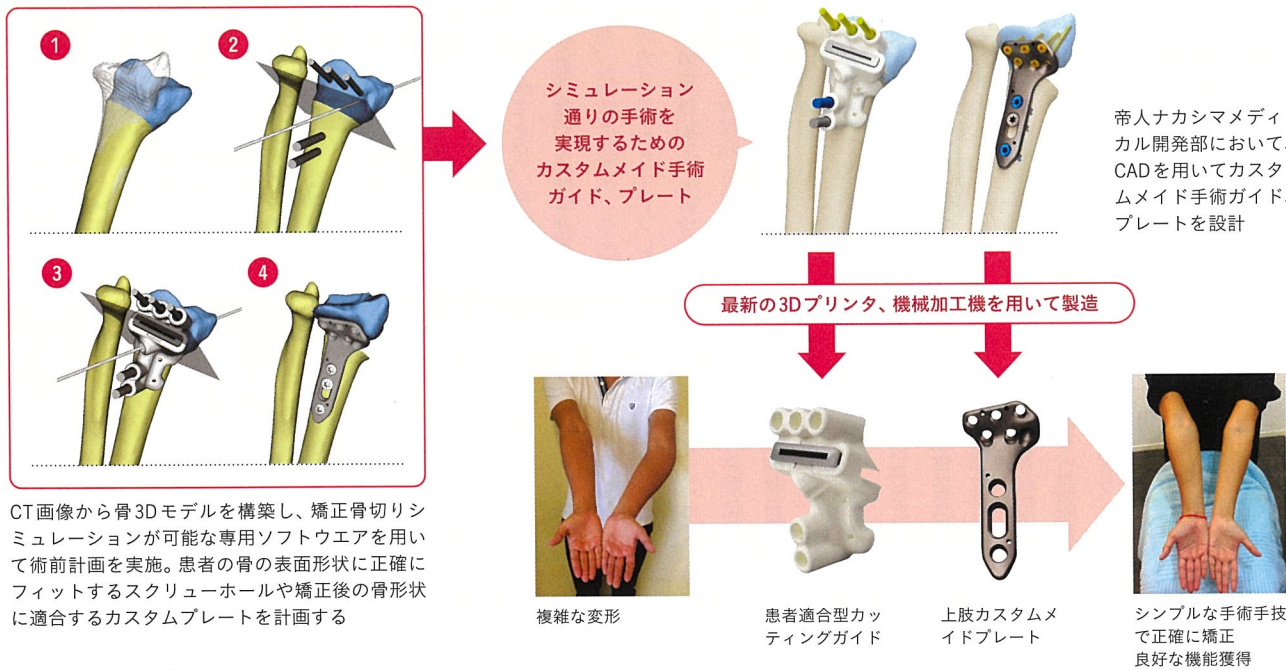
そうした未来につながる日本のAM市場をいかに立ち上げるか。日本のAM市場は海外と比べてはるかに小さく、世界のAM市場のうち、日本企業のシェアはわずか数%だ。

AMの価値を引き上げ、AMという技術のおもしろさ、可能性を伝えていくことが我々の目標であり、そのためプロセスの自動化や確立した方法論をソリューションとして提供したいと考えている。ノウハウを形式知化してプラットフォームにしていく——現在、特に造形プロセスと品質保証の部分にフォーカスして進めているところだ。

## プロセスを共有し、プラットフォーム構築を目指す

図表1 上肢変形矯正カスタムメイド治療法

患者適合型カッピングガイド、上肢カスタムメイドプレートを用いた新しい矯正手術



出所：帝人ナカシマメディカル



GSカップおよび人工股関節システム (写真提供：帝人ナカシマメディカル)

しもすべての患者に完璧に合致するわけではない(身長、体重、年齢など、個々の患者は一人ひとり異なるので)、もちろん経験豊富な医師が整形外科手術を行うが、多種多様な種類のサイズを取り扱うことから、医師、看護師など医療従事者に対して、相当な苦勞を強いているのが実情である。

そもそも、使わないサイズの人工関節を何十種類も大量に用意しなければならぬ非効率さや、人工物として金属の塊を骨の中に入れることで、剛性の異なる骨と金属の間で荷重伝達の不一致が起るという問題もある。こうした課題を解決し、人

工関節におけるカスタムメイド医療を実現できないかと考えたとき、着目したのがAMの技術だ。AMであれば、①個々の患者にとって最適な形状を求める、②骨と一体化しやすい特性を盛り込む、といった要件を満たせる。そこで帝人ナカシマメディカルは、日本国内では初めての試みとして2007年に電子ビーム方式の3Dプリンタを導入し、股関節用臼蓋カップ「GSカップ」の研究開発を始める。その後、15年に医療機器としての許認可を取得し、発売を開始した。

**目的の実現にこだわり 技術を活用**

ただ、ここでふれておきたいのが、樹脂造形用の3Dプリンタを活用した製品としては、その1年前の14年に「上肢カスタムメイドプレート」を先行して市場に投入している点だ。上肢カスタムメイドプレートとは、例えば骨折して適切な治療が受けられず自然治癒した場合など、骨が変形してしまった患者の整形外科手術時に適切な位置で骨を切るためのプレートを提供するものだ(図表1)。

# AM技術でカスタムメイド医療実現を目指す

医工連携で金属3D造形技術を整形外科インプラントに導入している帝人ナカシマメディカル。積層造形(AM)システムには従来の機械加工のパーツと置き換えるだけではない、新たな価値を生み出す可能性がある。目指すのは「一人ひとりに寄り添う治療だ」。

## 研究開発から製造販売まで一貫して手掛ける

整形外科に特化した医療機器を手掛ける帝人ナカシマメディカル。もとは船舶用の推進機器(大型プロペラなど)を製造しているナカシマプロペラの一事業部として始まった。大型プロペラを製造している会社

がなぜ医療機器に参入したのかというと、その始まりからして医工連携を前提とした創業だった。当時、プロペラ製造の見学にきた医療関係者から、複雑な3次元曲面の研磨技術や金属加工技術が人工関節という領域に応用できるのではないかとこの提案があったのだ。ただ、技術の親和性だけではなく、大型プロペラ製造という「一品受注生産」のものづくりの姿勢が医療分野に活かせるのではないかとという目論見もあったと、

人工関節創出の研究開発に携わってきた山本慶太郎氏は言う。

「大型プロペラは、船体の形状に対して最適な推進力を得るために1つずつCFDシミュレーションで翼の形をデザインします。この一品受注生産、カスタムメイドの概念を整形外科領域の人工関節の分野に取り入れたいというのが起業時の目標でした」(山本氏)

1987年に医療機器製造業許可を取得。その後、医工連携という言葉もまだなかった時代に、整形外科の医師と工学研究者とともに勉強会を立ち上げ、人工関節の研究開発をスタートした。以来、産学連携を積極的に進めてきた。

整形外科インプラント、いわゆる運動器の疾患のなかでも主に骨の治療に対して使われる医療機器だが、特に高齢者の健康寿命を延ばすためには欠かせない重要な役割を担う。

骨折や関節の病気といった運動器の疾患が「寝たきり」の原因となることはよく知られている。課題先進国として超高齢化社会に移行していくなか、より質の高い運動器治療への貢献を目指す。帝人ナカシマメディカルの強みは、研究開発から製造販売まで一貫して手掛けることだが、なかでも特筆すべきは、積層造形(AM)をこうした医療領域に活用していること、さらに積極的に応用しようとしている点だ。

## カスタムメイド医療にAM技術が必要な理由

帝人ナカシマメディカルが手掛ける整形外科インプラントは、大きく「人工関節」「脊椎固定システム」「骨接合材料」の3つに分けられる。例えば人工関節の役割は、破壊された骨、あるいは疾患のある関節な



石井力渡氏

Rikito ISHII  
帝人ナカシマメディカル  
製造部 生産技術・施設管理課  
主任



山本慶太郎氏

Keitaro YAMAMOTO  
帝人ナカシマメディカル  
開発部 担当副部長  
博士(医学)

どに埋植することで正常な機能を再建すること。人工関節の手術の場合、骨盤と大腿骨をつなぐ部材として20種類を超えるサイズのなかからその患者に適合するサイズを1つ選んで埋植するという形になる。画一的なサイズにつくられた製品は必ず

# デジタルツイン活用で技術を海外の患者にも届けたい

手順としてはこうだ。患者本人のCTスキャンのデータから3Dモデルを作成し、術前シミュレーションを行う。そして、シミュレーション通りの手術を実現するための手術ガイドとプレートをカスタムメイドで製造する。これにより、個々の患者の骨の形状に正確にフィットする手術ガイドとプレートを提供できるということになる。従来、2次元の画像をもとに医師の経験と勘だけで行われてきた部分に3Dシミュレーション技術を活用することで、医師はより最適な再建手術を行うことが可能になるという。

現在は、上肢カスタムメイドプレート自体は金属機械加工によって製造されているが、将来的には金属3Dプリンタでの製造を目指している。

これは、帝人ナカシマメディカルがまず解決したこと（IIカスタムメイド医療の実現）があり、そのために活用する技術として3Dプリンタ関連技術を見ているということ。非常に興味深い。つまり、金属3Dプリンタを使った開発研究を始めたとしても、それは金属3Dプリンタで製品をつくることにこだわらなくて、解決すべきことや何が目的なのかを重視する姿

勢が、彼らのものづくりの基本になっていることがわかる。

### デジタルツインで 入口から出口まで自動化

国民皆保険によって平等な医療が受けられる日本では対象症例が少ないものの、帝人ナカシマメディカルと大阪大学は研究開発に取り組み、14年9月から臨床応用を開始している。140症例を超える手術実績を経て、21年には新たな治療法として保険適用に至っている。その半面、まだまだ医療インフラが整っていない東南アジアなどでは術者の技量が不足していることで、骨折手術において正しい状態に骨を接合できず、日常生活に困難をきたしている患者が多いという。このような課題に対し、帝人ナカシマメディカルでは14年、タイにNakashima Medical Technical Center (Thailand) Limited を設立し、現地でカスタムメイド医療の実証実験に取り組んでいる。

「この技術の基礎研究は04年から始めて10年かかり、やっと今、実際の患者さんに使っていた形になっています。今後はさらにデジタルツインの概念を取り入れて自動化を図るとい、次の開発フェーズに進

また、3Dプリンタを用いることで実現できた製品は、骨に埋植する人工物に骨を呼び込みやすい独自の構造を実現した。現在、この技術は脊椎用の医療機器に用いられているが、将来的には人工関節にこのような骨と結びつきやすいような機能を持たせることで、術後の回復期間を短縮できる可能性がある。このような高機能な人工関節の製造時に重要になるのは、38ページで紹介したAM技術の確立だ。実際、製造プロセスで研究開発を支える石井力渡氏は課題としてこう指摘する。

「3Dプリンタを用いて医療機器の製造を行う際、狙った寸法通りの形状に再現する必要があります。特に骨を呼び込む構造設計部分は0.1ミリ単位での精度で形状再現が必要で、試行錯誤を重ねて条件出しを行っています。特にレーザー積層造形装置はレーザー条件（パワー、スピ

ード）など、非常に多くのパラメーターがあります。そういった点ではかなり苦労しました」（石井氏）

そうした最適な設計通りの形状を再現できる条件を見つけ出して、さらにその品質を維持しなければならぬ。製品として医師や患者に提供する上で、品質の維持は何より必要要素だ。製造プロセスのなかで医療機器QMS (Quality Management System) に基づいたバリデーションと呼ばれる、定期的な品質を確認することもしっかり行って、常に最適なものを製造できるフローの構築が求められる。そうしたとき「AMシステム」として、3D CADデータ、モデリングデータ、出力時の3Dプリンタの各種設定、品質維持まで一元管理するという考え方が必須になる。しかし、逆にいえば、AMシステムとして一連の工程を管理できるソリューションを構築できれば、品質維持やデジタルツインでの活用も十二分に可能だということだ。

この整形インプラントと呼ばれる医療機器の領域では、3Dプリンタ技術の拡張、応用性はまだまだある。「金属3Dプリンタが得意とするラティス構造などを使えば、剛性や弾性をコントロールすることができる

ようになります。最低限の強度を担保しつつ骨の弾性に近似した整形外科インプラントの造形も可能となり、骨と金属の間で荷重伝達の不一致が起これるという課題の解決も考えられます。併せて、骨の成長を促すことができれば、結果として耐久性も増します。もちろんラティス構造に限らず、3Dプリンタでなければ具現化できない形状が整形外科インプラントの可能性を広げてくれると考えています」（山本氏）

現状では機械加工を前提に人工関節の形状を決めているが、工具が入らないような形状も3Dプリンタを利活用すれば具現化できる。人工関節など整形外科インプラントの品質や機能をより向上させる要素として、次世代の（3Dプリンタであれば実現可能な）デザインが期待されている。こうした出力物の質や機能の開発を進めていくのはもちろん、ソリューションとしての入口から出口まで構築することが重要になる。

山本氏も、1社独自での研究開発には限りがあると言う。帝人ナカシマメディカルは今後も、目指す医療の形を実現するため、産学連携、医工連携を進め、集合体としてうまく出口に到達できるように研究開発を推進していくという。

「この技術の基礎研究は04年から始めて10年かかり、やっと今、実際の患者さんに使っていた形になっています。今後はさらにデジタルツインの概念を取り入れて自動化を図るとい、次の開発フェーズに進

「この技術の基礎研究は04年から始めて10年かかり、やっと今、実際の患者さんに使っていた形になっています。今後はさらにデジタルツインの概念を取り入れて自動化を図るとい、次の開発フェーズに進

図表2 デジタルツイン活用による上肢変形矯正カスタムメイド治療法の運用

現地医師とのシームレスな連携を目指して、遠隔画像診断（医師間の連携、コンサル）、手術法の提案がリアルタイムに可能なソフトウェアを開発（デジタルツインの活用）



出所：帝人ナカシマメディカル