

## 講演1

関西における3Dプリンタ拠点構築と  
形状・材質制御による造形体の創製

特集2

大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授(荣誉教授)  
大阪大学工学研究科 異方性カスタム設計・AM(3Dプリンタ)研究開発センター 副センター長

中野 貴由氏

## 1 はじめに

平成26年10月より、内閣府主導の元、管理法人をNEDOとした、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)／革新的設計生産技術(佐々木直哉PD)／「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」の国家プロジェクトが、大阪大学を代表とし、パナソニック株式会社、大阪産業技術総合研究所、帝人ナカシマメディカル株式会社、川崎重工業株式会社、大阪府立大学、京都大学、東京大学、北須磨動物病院を主要機関としてスタートとした<sup>(1)</sup>。本拠点は、「革新的な技術研究開発をつなぐ異方性カスタム拠点を形成し、関西を中心とした新たなものづくりスタイルを構築すること」を目標に金属3Dプリンタ(Additive Manufacturing(以下、AMと呼ぶ))を中心とした最先端ものづくりのイノベーションを探索するための研究開発を行っている<sup>(2)</sup>。大阪大学には、拠点全体を統括するために平成26年12月1日から、後述の大阪大学工学研究科異方性カスタム設計・AM研究開発センターが設置され、関西を中心とする金属AMによるものづくり技術の研究開発のためのヘッドクォーターとしての役割を果たすことになった。

## 2 AM拠点形成の背景

関西をはじめとする日本の製造企業(ものづくり産業)は国際競争力を失い、シェア低下、業績の低迷を招き、もはや「日本はものづくり大国」であると考えするには程遠い状況が一部では生じ始めている。これは顧客の「平均的・画一的」なニーズにのみ対応する類似商品群の乱立が、コモディティ化を引き起こすことで、ものづくりを行うほどに赤字が増加するといった負のスパイラルを生み出しているためである。本拠点では、こうした現状を打破するため、関西エリアにて「平均化・画一化」から「カスタム化」へと、ものづくり概念を根底から覆す製品を生み出すためのイノベーションスタイルを構築するこ

とを目的としている。具体的には、高付加価値設計を上流概念とし、金属AMを用い、これまで困難とされていた材質・形状パラメータを同時制御することで、「高付加価値化にむけた異方性カスタム」を実現することを目指している。

当拠点は、関西地域の強みである難加工材を中心に据え、家電分野、生体医療福祉分野、航空・エネルギー分野の経済成長に向けた異方性カスタム製品(カスタム冷熱デバイス製品、カスタム個電、先端獣医療用カスタムデバイス、材質・形状制御型タービンブレード)を初期ターゲットに設定し、大阪大学工学研究科や大阪産業技術総合研究所が、牽引企業としてのパナソニック、帝人ナカシマメディカル、川崎重工業らとともに、関西ものづくり拠点化への先導的役割を担う。ただし、参画企業を固定することなく適時適材適所での柔軟なものづくりスタイルを地域実証していく。その中核として、三次元異方性カスタム設計・AM研究開発センターが大阪大学工学研究科に新設され、進化するプラットフォームとして機能させている。その間テストユースにより市場の満足度を絶えずフィードバックし、高付加価値



講師 中野 貴由氏

値化を図るとともに、例えば、カスタム個電や動物病院での先端獣医療用カスタム異方性デバイスの高付加価値の実証・追跡調査を行うことで、製品そのものものづくりシステムの両者を進化させていく。その際、Society 5.0でも掲げられている、サイバーフィジカル空間の融合のためのシステム化実証も行っている。図1には、自分設計したカスタム照明をサイバー空間でテストユースしている様子を示す。個人個人が設計したカスタムセードが仮想空間内でこういった照明効果を及ぼすかを検証することができる。

プロジェクト終了時には、参画する企業群が有機的にクラスタ化し、進化するイノベーションスタイルの好例となることで、出口を見据えた淀みないものづくりシステムが構築されることを目指している。



図1 サイバーフィジカル空間の融合によるカスタム照明の検証試験。自分設計したカスタムセードを仮想空間で照明テストをすることができる。

### 3 本拠点での取り組み

関西地区における金属をはじめとする難加工材ものづくりの地域資源を活用し、世界に先駆けた異方性カスタム市場の創成を目指し、関西発の新しいものづくり手法を日本、さらには世界へと発信するための取り組みを行っている。異方性は自然界のほとんどの創成物が持つ特性であり、超上流での最適化により等方性とともに適度な異方化が、高付加価値製品群の一つの出口として期待される。目標達成に向け、(A) 拠点形成目標としては、(A1) 大阪大学内に異方性カスタム設計・AM 研究開発センターを新設、(A2) 新ものづくりの思想に合致する企業の、事業規模の垣根を超えた参画の促進、(A3) 新たな異方性カスタム製品の創製・流通に向けたビジネスモデルの創成、(B) 技術目標としては、(B1) 材質・形状パラメータによる異方性を考慮した最適化設計、(B2) 金属AMを中心とした設計・製造リードタイムの短縮、(B3) 感性工学による高付加価値指標の探索と確立、(B4) テストユース結果を最適化設計にフィードバックするためのシステム構築、(C) アウトカム目標としては、(C1) 製品・事業分野の市場拡大、(C2) デライトアセスメントのデバイス普及を含めた数百億円規模以上（平成35年度）の経済効果創出（図2参照）を目指している。

### 4 イノベーションスタイル

高品質獲得のための異方性カスタム最適化設計を

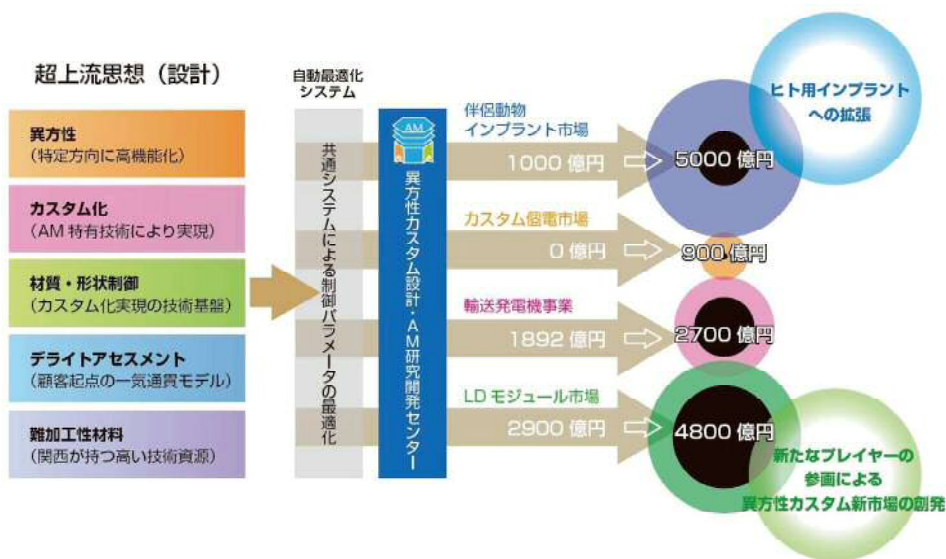


図2 超上流設計思想に基づく高付加価値化製品の創製と、異方性カスタム製品市場の創成・拡大予測。

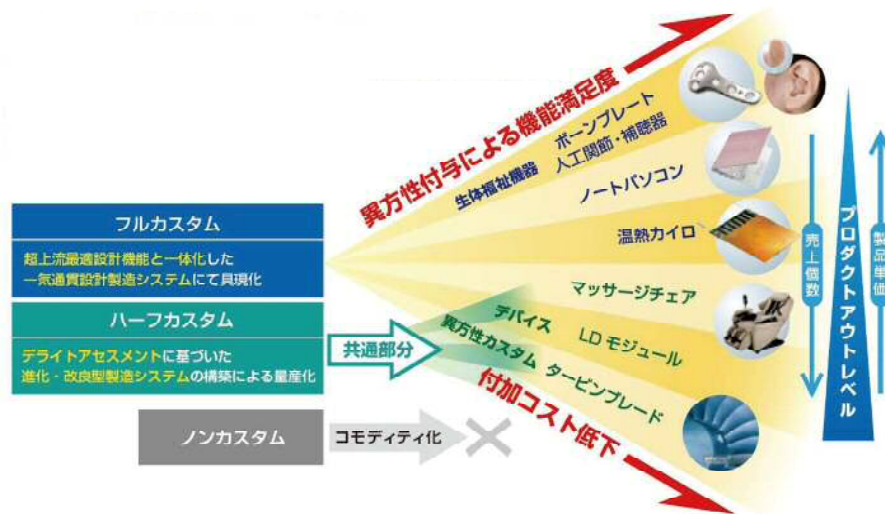


図3 製品の特性やニーズに応じた、フルカスタムからプロダクトアウトをも視野に入れたハーフカスタムまでのカスタム化レベルの最適化によるコモディティ化の回避と経済効果の創発。

超上流思想とし、「平均化・画一化」から「異方性カスタム化」へと、これまでのものづくり概念を根底から覆す高付加価値化製品創出に向けた進化するイノベーションスタイルの構築を目指している。

#### 4.1 顧客起点による高付加価値化のための異方性カスタム化

必要な方向に高機能性を発揮する「異方性」のカスタム化は、多種多様なニーズにこたえうるものづくりの実現につながる可能性を秘めている。この異方性カスタム化の超上流設計思想に基づいて、材質・形状パラメータを同時に超上流にて異方性／等方性最適化設計するとともに、材質・形状パラメータを革新的生産製造に落とし込むことで製品の最適制御を行う。

#### 4.2 新市場の創成ならびにその牽引を促す顧客起点の一気通貫モデル

プロダクトアウト商品を生み出すまでの、従来の商品企画から量産までのプロセスと比較して、顧客を起点とした製販一体のプロセスでリードタイムの短縮を目指す。顧客起点で最適化設計した製品イメージを、ソフト・ハード一体化システム（製販一体）や革新的生産製造技術との組み合わせにより具現化する。さらに「テストユース」<sup>(3)</sup>により顧客の満足度を評価し、結果を製品設計へとフィードバックする。

## 5 新しいものづくり

新しいものづくりのために、顧客起点の設計・生産過程の一気通貫モデルならびに新規高付加価値指標の妥当性を地域実証により検証する。超上流設計思想の啓蒙活動を通じて、大・中小企業の参入推進を図り、絶えず進化し続けるものづくり拠点の構築を行う。本拠点の出口戦略は、多彩な企業の独自技術をクラスタ化することにより、異分野の垣根を超えた有機的連携・結合により創発的な商品や事業を生み出すことにある。そのために製造リードタイムを短縮するだけでなく、情報や技術の流れを太くする「骨太・高速な一気通貫モデル」の実現を図る。IoT (Internet of Things) に代表される情報の流れ<sup>(4)</sup>、ノウハウ、アイデアをつなげることで、多様な最適解による異方性カスタム製品群の創成が期待される。その結果、フルカスタム製品開発からニーズに応じたハーフカスタムまで、カスタム化レベルの最適化により最大の経済効果の創発を追求する(図3参照)。そのためには、マスカスタマイゼーションに対応した未来情報システムを材料工学の中に取り入れる工夫も必要となる。

## 6 大阪大学工学研究科異方性カスタム設計・AM 研究開発センター

大阪大学に設置のAMセンター(図4)は、本SIP拠点のヘッドクォーターとしての役割を担うとともに、三次元異方性製品のカスタム製造、ソフト・ハ

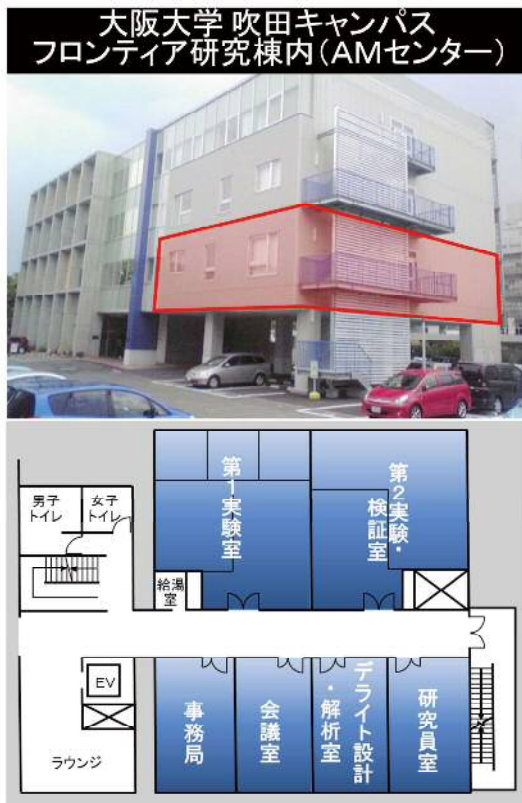


図4 フロンティア研究棟2号館(F2棟)の2階に設置の異方性カスタム設計・AM研究開発センター。

電産業、生体医療福祉産業)を活かし、この領域における「知の交流拠点」としての役割を果たしている。産官学連携による関西ものづくりの中核として、関西発の高付加価値ものづくり拠点形成を担う。

AMセンターは、田中敏宏(センター長、同教授、同工学研究科長)、中野貴由(副センター長、同教授)、寺西正俊(招聘研究員、パナソニック株式会社生産技術本部)、玉岡秀房(研究総括、特任研究員)、井手拓哉(副研究総括、特任研究員)、中本将嗣助教らが中心となり、招聘教員・研究員も含め総勢50名を超えるメンバーから構成されている。関西経済の活性化を目指すものとして、大阪大学大学院工学研究科からの全面的な支援を受けており、センターの敷地(延べ面積約270m<sup>2</sup>)は同研究科からの無償提供によるものである(図4参照)。超上流設計と最適化設計技術を即座に具現化できる粉末床溶融(powder bed fusion)法による最先端の金属積層造形装置2台を備えている。具体的には、電子ビームを熱源とした金属3Dプリンタ Q10(ARCAM社(現GE社))とレーザー金属3Dプリンタ EOSINT M290(EOS社)を設置している(図5)。金属積層造形装置以外にもインクジェット方式のAGILISTA-3100(KEYENCE社)、熱溶解方式のCreatr XL(Leapfrog社)の2種類の樹脂積層造形装置のほか、各種加工装置とともに、設計、応力・熱解析、三次元データ

ード一体化付加製造システム開発、人材交流、人材育成/教育を実践している。AMセンターは関西地域の産業的な強み(難加工材製造・加工産業、家



図5 金属3Dプリンタ (a) Q10 (ARCAM社(現GE社)), (b) EOSINT M290 (EOS社)と樹脂3Dプリンタ, (c) AGILISTA-3100 (KEYENCE社), (d) Creatr XL (Leapfrog社)。

処理等のソフトウェアを導入している。製造装置と同じ空間内に設計スペースを設けており、最適化設計・評価・製造の一体化ルームとして、顧客起点の一貫通貫モデルの具現化のための検証室としての役割を果たす場も提供している。カスタム製品の三次元品質管理手法も重要であり、造形物の三次元解析を可能とする集束イオンビーム・走査電子顕微鏡加工観察装置 (FIB-SEM) を設置している。以上のようにものづくりを構成する設計—解析—製造—品質管理を備えたAMセンターはハード・ソフト両面から技術プラットフォーム拠点として相応しいものとなっている (図5)。

### 7 異方性をキーワードとした最適化材料設計

産業基盤である金属材料を中心とした難加工材の開発はものづくり革命の起爆剤となりうる。金属材料での高機能性発現は、新素材の創製やその材質制御によって達成されてきた。

一般に、世の中に広く普及している材料は、多くの製品群ではできるだけ等方的な設計がなされている (図6 (a))。例えば、力学的観点からは、部材が任意の外力に対してマクロに均一な塑性変形を生じるには5個の独立なひずみテンソル成分を持つ必要があることから (von Mises の条件)、金属材料では、対称性が高く独立なすべり系が多い等方性の高い結晶構造を有する材料が、構造用部材をはじめとする種々の製品群において選択されてきた。しかし、高付加価値品質を生み出すための高機能化は、等方性材料において実現されるとは限らない。我々は、従

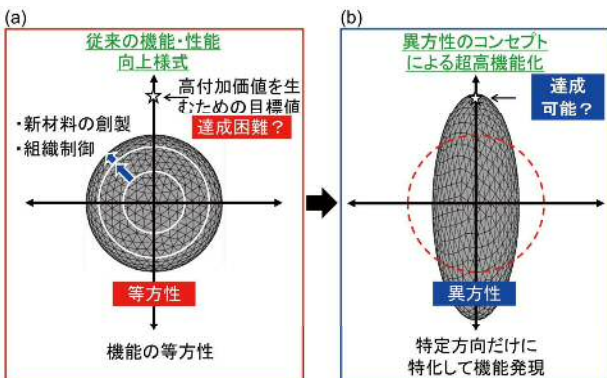


図6 (a) 従来型の等方性の機能発現に基づく製品機能向上様式と、(b) 異方性の概念を導入した場合に可能となる超高機能化様式。ユーザーのデライトを生み出すために超高機能化は、異方性の導入・最適化と相関する可能性を持つ。

来型の等方性ものづくりから脱却し、特定の方向に極めて優れた機能性を発現するような最適な「異方性/等方性」の追求 (図6 (b) 参照) が、超上流での材料設計の一つの解となる可能性を仮説・検証しようとしている。

### 8 異方性カスタム化のための材質・形状制御

ものづくりに重要なリードタイム短縮や顧客起点の一貫通貫モデルの実現には、材質パラメータと形状パラメータの同時制御、すなわち内外形状と金属特有の組織由来の材質を上流で最適化し、下流まで淀みなく生産・製造することが必要とされる。通常、材質制御と形状制御は独立したプロセスであるため、それらの同時制御の実現には、最先端の生産・製造技術と材料科学とを融合させた新たなものづくりテクノロジーが必要である。

図7に示すように、材質パラメータとしては、結晶構造、原子配列の規則性、結晶粒形状、結晶集合組織、結晶粒界の有無 (単結晶・柱状晶・多結晶)、溶質濃度勾配、析出相分布などが挙げられる。とりわけ本拠点では、初期ターゲットとして設定した4つの異方性カスタム化製品群 (カスタム冷熱デバイス製品、カスタム個電、最先端獣医療用カスタムデバイス、材質・形状制御型タービンプレード) への適用を視野に入れ、AMを中心とした革新的設計生産技術の基礎から応用展開までの研究開発を推進している。例えば、究極の材質制御ともいえる単結晶化は、固液界面を平滑に保ち組成的過冷等の定常状態からの乱れを回避するために、合金組成に依存して固液界面移動速度や温度勾配などの様々なパラメータを制御する。材質制御に関するビッグデータの利用やデータベースの蓄積は、材質パラメータを上流で自在に操るCAM (Computer Aided Manufacturing) の構築にもつながる。



- ◎ 可変パラメータ  
 ✓ 3次元造形システムならではの可能となる制御パラメータ
- 形状パラメータ
    - ・外形形状パラメータ
    - ・内部形状パラメータ (階層構造を含む)
    - セル形状
    - ソリッド体の配置など
  - 材質パラメータ
    - ・材料選択 (異なる物性値)
    - ・材料組織 (多結晶・方向制御材・単結晶)
    - ・結晶方位

図7 金属材料において異方性カスタム化を制御可能な材質パラメータと形状パラメータ。

加えてAM法や最先端の加工法は形状制御を可能とする。ここで、我々は高付加価値品質を突き詰めた際の究極の選択肢として、異方性のカスタム化に注目している。ペルチェ素子の熱電変換効率、カスタム個電における使い心地の良さ、ボーンプレートの応力遮蔽の抑制と再骨折防止、タービンブレードの耐熱性向上など、感性から性能におけるまでの最適化設計・生産では、異方性の最適化が一つのデライトを導く解になる可能性を有している。

例えば、FZ（浮遊帯域溶融）法により育成されたβ型Ti合金bcc単結晶は、弾性率の異方性が顕在化し、抜去不要な超低弾性伴侶動物用カスタムインプラントを実現する<sup>(5)</sup>。しかしながら、FZ法による材質制御では、同時の形状付与ができず、後加工が必要となる上、作製可能なサイズには限界がある。

一方、AM法による形状パラメータの最適設計は、外形状や内部構造の異方化（図7）を誘導できる。形状パラメータは基本的には、三次元CAD技術を用いることで任意のサイズ、形態、階層ごとに最適設計される。外形状の異方性カスタム化は、例えばボーンプレートでは、骨の三次元CT画像よりブーリアン演算を用いて、骨形状にジャストフィットするデバイスをPC上でデザイン可能とする。ただし、その設計がどこまで製品として具現化可能であるかは、最適化設計を製品に転写する製造技術の革新性に律速される。多軸マシニングセンタやAM技術により形状制御の自由度は飛躍的に向上し、とくに後者のAM技術は、これまで困難とされていた材質・

形状の同時制御を具現化できるようになっている。AM法の一つである粉末床溶融法は、形状パラメータの制御と同時に熱エネルギー投入の方向性や熱勾配、そして熱流束を制御することで、材質パラメータを形状パラメータとは独立に制御でき、さらにプロセスパラメータのデータ蓄積は異方性の任意付与をも可能とする。すなわち、ユーザのニーズ、使用環境に適合させてカスタム化された材質・形状は、究極には最適な異方性設計にもなる可能性を秘め、完全等方では得られない異方性カスタム新市場の創成を導きうる。

## 9 異方性機能化デザインのヒント

### ～自然界の創成物～

高付加価値品質を追求する超上流設計思想として異方性機能化デザインに注目するには理由が有る。既存製品（人工物）のほとんどが、等方的な機能を発揮するよう設計されてきたのに対し、自然界の創成物、例えば骨などの生体組織や植物などは極めて理にかなった異方性階層構造と、その結果としての異方性機能を発揮する場合がほとんどである（図8）。人工物ではせいぜい、曲げやねじりといった荷重負荷環境に合わせた、最終段階での形状付与により、軽量化、高比強度化を目的とした異方性の設計がなされる程度である。

一方、骨<sup>(6)</sup>や植物では、mm、μmスケールから、nmオーダーでの有機分子、無機結晶の原子配列に至るまで、緻密なマルチスケールでの階層的異方性構造が存在する。各スケールレベルでの異方性構造



図8 等方性を示す既存製品（人工物）と、極めて異方的な材質・形状とそれらに由来する卓越した機能性を示す自然界の創成物との対比。自然界の創成物の異方性は当拠点で目指す新たなものづくりスタイル構築のヒントになる。

の有機的連携は、過酷な荷重負荷環境に耐える極めて優れた力学的機能や生命維持のための水分や栄養素の運搬、排出といった多くの役割をもつ器官として機能する。加えて、荷重の方向性や大きさ、さらにはその変化に合わせて、材質・形状の異方性度合がカスタム化される<sup>(7,8)</sup>ことも重要な特徴である。

すなわち、等方性製品を上回る高付加価値品質を具備した高付加価値製品の創製には、自然界の創成物に学ぶべき生体模倣的な概念が重要になるものと期待され、ニーズに合わせてカスタム化された異方性度合の最適化がデライト品質獲得への鍵となりうる。実際の超上流設計における異方性エンジンの開発は、材質・形状パラメータの制御によって実現され、高付加価値品質へとつながる。

### 10 実際のボーンプレートへの金属AMの応用例

金属AMは形状制御のみならず、材質制御を行うための先端的手法であり、応力遮蔽を抑制する低弾性カスタム異方性ボーンプレートはその好例である。

図9には、医療承認を受けている $\beta$ 型Ti-15Mo-5Zr-3Al合金のscan strategyの違いによるx, y, z方位への優先原子配列方位の変化を示している<sup>(9)</sup>。赤いコントラストで示される方向は、低弾性を示す<001>方位を、緑のコントラストは比較的高弾性率を示す<011>方位を示す。ビームスキャン方向がXのみのXスキャンと、交互にXとYスキャンを繰り返すXYスキャンにおいて、原子配列制御が可能になり、特にXYスキャンでは、x, y, z方向に

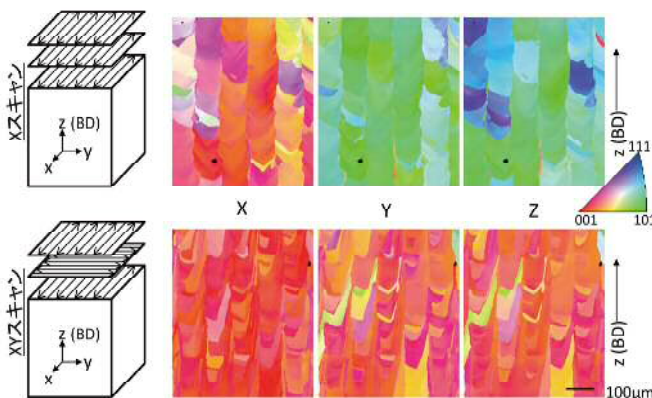


図9 レーザ金属3Dプリンタによる $\beta$ 型Ti合金の原子配列制御。Scan strategyにより優先原子配列を制御可能となり、弾性率を制御可能となる。文献(9)より改変引用。

全て低弾性の<001>が配列する。このことは、形状制御だけではなく材質制御においても異方性を利用した応力遮蔽の抑制が可能であることを示している。

こうしたscan strategyの制御は、構造体の各部位にて個々に制御が可能であり、図10に示すように、ボーンプレートを例にとった場合には、骨折部近くでは骨長軸方向に対し、低弾性の<001>に方位制御し、スクリューで固定する部位では、高強度・高弾性方位に原子を配列させることで、造形体部位に依存したカスタム化を行うことが可能となる。部位別の原子配列制御は弾性率を自由自在に制御可能となり、こうした機能の部位依存性は金属AMならではの技術として、これまでの一般的なプロセスにより製造された医療デバイスとは一線を画した設計・生産が可能となる。

### 11 おわりに

本拠点は、新たなものづくり新市場創出のため、「異方性カスタム」をテーマに関西に根差した産官学を中心にしたものづくりプラットフォームを形成し、関西発の持続的なイノベーションシステムを構築することを目指している。そのための超上流での高付加価値設計を実現するために、材質・形状最適化に基づき、金属AMを中心とした生産へとつなげる。本拠点の基本コンセプトに賛同し、ともに研究開発を目指す産官学からの新たな参画を広く募集している。

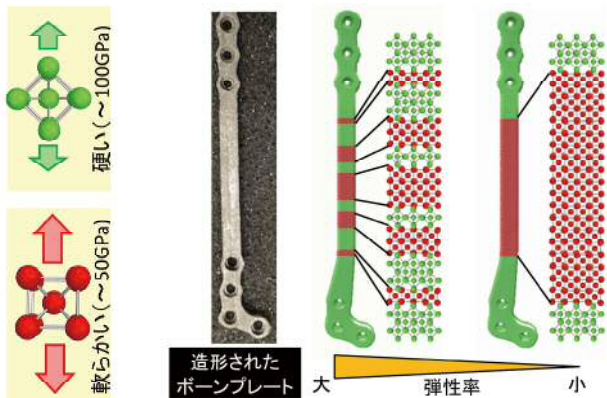


図10 低弾性異方性カスタムボーンプレート。金属3Dプリンタにより部位に依存した原子配列の制御と力学機能制御が可能になる。

### 参考文献や関連サイト

- [1] 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: エスアイピー), <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>.
- [2] SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) / 革新的設計生産技術「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」～異方性カスタム設計・AM 研究開発センター～, <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/sipk/>.
- [3] 掛下知行, 田中敏宏, 中野貴由ら, 「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) / 革新的設計生産技術「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」」, まてりあ 2015; 54 [10]: 491-520.
- [4] まるわかりインダストリー 4.0 第4次産業革命, 日経BP社, (2015).
- [5] S.-H. Lee, M. Todai, M. Tane, K. Hagihara, H. Nakajima and T. Nakano, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 14 (2012), 48-54.
- [6] T. Nakano, K. Kaibara, Y. Tabata, N. Nagata, S. Enomoto, E. Marukawa and Y. Umakoshi : Bone, 31 (2002), 479-487.
- [7] T. Nakano and T. Ishimoto : KONA Powder and Particle Journal, 32 (2015), 75-84.
- [8] N. Ikeo, T. Ishimoto and T. Nakano : J. Alloys Compd., 639 (2015), 336-340.
- [9] T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S.-H. Sun and T. Nakano. Scripta Mater, 132 (2017), 34-38.

