

特集

レーザを用いたものづくり革新～継ぐ, 切る, 改良する, 創る, 見る～

第11部 レーザ技術の国家プロジェクト

SIP第1期・SIP第2期・ 経産省地域新成長産業創出促進事業： レーザ金属 Additive Manufacturing による材料組織ならびに原子配列制御*



中野 貴由**

Control of Microstructure and Atomic Arrangement by Laser-type Metal Additive Manufacturing; SIP (1st Stage, 2nd Stage) Projects and METI Regional New Growth Industry Creation Promotion Subsidy Project*

by NAKANO Takayoshi**

キーワード

戦略的イノベーション創造プログラム, SIP, 金属3Dプリンター, 大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター, レーザビーム, 金属積層造形法, 材料組織制御, 原子配列制御, 熔融池, 計算機シミュレーション

1. はじめに

大阪大学大学院工学研究科では、研究科独自の Techno-Research Arenaとして学科や専攻、さらには部局や大学を越えた境界領域の研究融合や学理構築の探究を図っており、重点12分野の1つとして、デジタル造形工学がある。そのコンセプトは、『日本の製造業を牽引してきたモノづくり力は、世界経済に大きな影響を与え続けている。しかしながら、少品種・大量生産はコモディティ化し、多品種・少量生産、さらにはマスカスタマイゼーションへとモノづくりシステムの高付加価値化が進み、世界のモノづくりの地図は変遷期を迎えている。そこで、ドイツ「Industry 4.0」、日本「Society 5.0」などの第4次産業革命に向け、IoT (Internet of Things)、人工知能 (AI: Artificial Intelligence)、ビッグデータ解析、サイバー・フィジカル空間融合などを活用し、3Dプリンター (Additive Manufacturing) を代表とする新プロセスをはじめ、計算機設計シミュレーション、3D/4D設計、マテリアル開発、マテリアル製造プロセス、加工・接合、品質管理システムまでを包含する、「デジタル造形工学」ともいえる、モノづくりの最先端研究を科学するための挑戦を進める』

というものである。

このデジタル造形工学の中核を成すのが、“大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター (以下、阪大金属AMセンターとする)”であり、工学研究科マテリアル生産科学専攻マテリアル科学コースを中心にオールジャパンでの金属AM (Additive Manufacturing: 付加製造 (3Dプリンティング)) によるモノづくりシステムの展開を目指している。阪大金属AMセンターでは、これまでに代表的には3つの国家プロジェクトを実施終了、もしくは実施中である。実施終了したプロジェクトとしては、内閣府・SIP (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program: 戦略的イノベーション創造プログラム) 第1期/革新的設計生産技術 (佐々木直哉プログラムディレクター) (2014年度～2018年度)「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」、さらに現在実施中のプロジェクトとしては、内閣府・SIP第2期/統合型材料開発システムによるマテリアル革命 (三島良直プログラムディレクター) (2018年度～2022年度 (予定))「プロセスデザイン・Ni基合金の3D積層造形プロセスの開発・高性能TiAl基合金動翼の粉末製造プロセス開発と基盤技術構築」に加えて、経済産業省・地域新成長産業創出促進事業費補助金 (地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業) (2019年度)「金属3D造形による機械・医療分野等の高付加価値製品の実用化開発支援事業」がある。

SIP第1期・SIP第2期・経産省地域新成長産業創出促進事業は、直接経費として、それぞれ6億6千万円、2億

*原稿受付 2019年11月12日

** 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻マテリアル科学コース Course of Materials Science & Engineering, Division of Materials & Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University

2千万円、9千万円であり、金属AMによる新規学問分野の構築から地域実証、さらには応用展開に対し中央省庁から多額の資金援助を受けている。さらに、Kansai-3D実用化プロジェクト（経産省近畿経済産業局主催）に基づき、経産省地域新成長産業創出促進事業は、その一環として展開している。

本稿では、阪大金属AMセンターを中核とした、SIP第1期、SIP第2期、経産省地域新成長産業創出促進事業、さらにはKansai-3D実用化プロジェクトを紹介するとともに、阪大金属AMセンターのコンセプトと研究開発方針について説明する。

2. 3つの国家プロジェクトとKansai-3D実用化プロジェクトについて

2.1 SIP第1期／革新的設計生産技術

SIP第1期の革新的設計生産技術¹⁾は、デライトなモノづくりを実現する技術や仕組みを開発することで、わが国の産業を活性化し、競争力のある高付加価値な製品や新市場を創出することを目標とした。我々の研究グループは、そのうちの最大規模の国家プロジェクトとして、大阪大学大学院工学研究科を中心に初期にはパナソニック、川崎重工業、帝人ナカシマメディカルなどの各分野を牽引する企業や大学の全9機関で構成され（図1参照）、最終年度での参画機関は40を超えた。

その主たる概要を以下に説明する。関西エリアを中心とした難加工性材事業・家電事業、生体・医療福祉事業、ならびにそれらの裾野の進化・経済成長のためには、製造業が長年抱えている狭い視野に立ったモノづくりを打破しなければならない。そのためにはデライト設計の実現を中心に、設計リードタイムと製造リードタイムの同時短縮を実現可能とする顧客起点に立った設計・生産製

造の一気通貫モデルの構築・実証を行う必要があり、企業規模の大小に関わらず、可能な部分は相互に連携するためのプラットフォームを構築することが必須となる。その実現に向けて、カスタム新市場をターゲットに「異方性」をキーワードに必要とする機能を最大限発揮できる高付加価値製品の事業化を行った。その手法としてデライト設計のリードタイム短縮では異方性カスタム最適化設計、製造のリードタイムの短縮には、付加製造法を中心とした「材質・形状制御」を行いつつ機能設計を少ない工程で転写し、デライトアセスメント指標の探索・地域実証を通して、進化するデライト設計・製造のためのプラットフォームの実現を目指した。地域資源活用に基づくデライト異方性カスタム最適化設計は、必要とするパラメーターに重み付けをし、リードタイム短縮のための共通基盤化を図った。高付加価値なモノづくり新市場（生体・医療・福祉、個電、航空エネルギー部品など）は、牽引企業により具体的テーマで先導・実証するだけでなく、企業規模の区別なく、新規参画企業とも有機的に連携し、顧客起点の一気通貫モデルの関西での実証と普及、その結果としての高付加価値カスタム新市場の創成といったイノベーションスタイルを現実のものとした。大阪大学を中心とした三次元設計・付加製造拠点の構築は中核技術プラットフォームとして機能し、時短や最終在庫品レスのためのカスタム新市場の創発の場として活用される。最終的には地域実証、大中小企業を適時適材適所に配置し、顧客起点に立った産官学連携による設計から生産製造、さらにはサービスまでをシームレスにつなぐイノベーションスタイルを実践した。最終的には、関西の地域性を利活用したカスタム新市場を構築するとともに、モノづくりにかかわる産官学からユーザに至るまでの多彩なプレーヤーによる拠点を形成し、持続的にイノベーションを生み出し、グローバルトップを獲得する

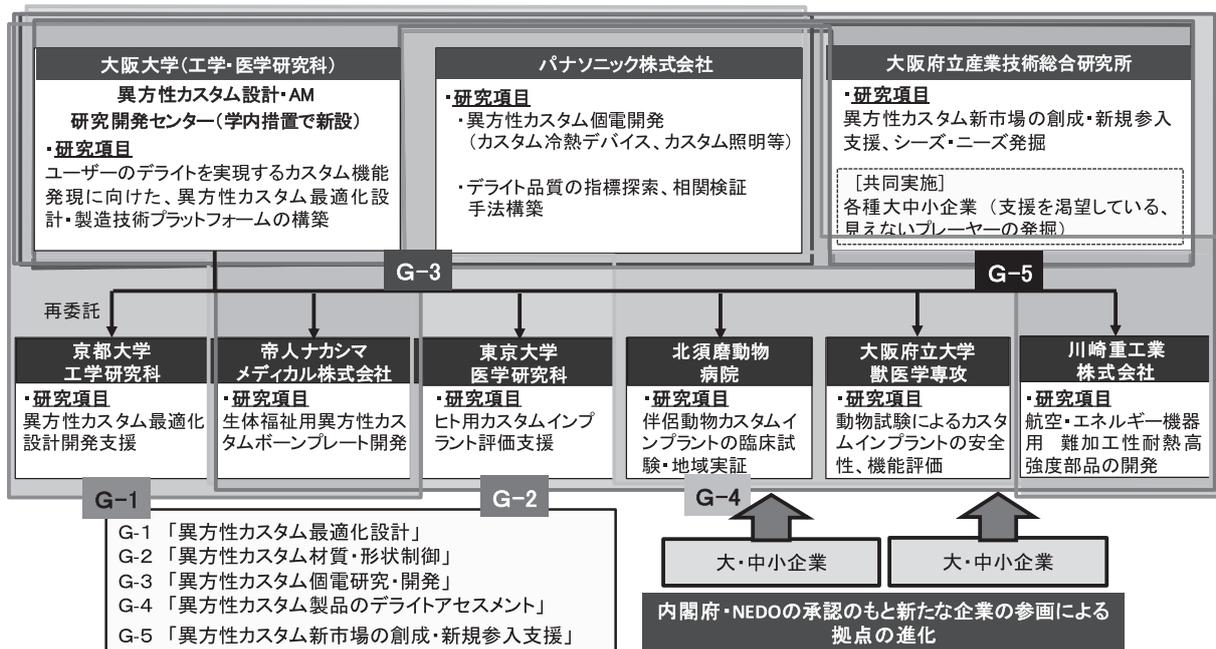


図1 SIP第1期「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」における研究開発体制。

ためのシステムを構築するものとなった。

結果として、図2に示すように、フルカスタム化からスタートし、用途に応じたカスタム化レベルの最適化による、最大の経済効果創発を追求することで様々な製品群の開発に成功するとともに、後述する日本の大学としては最高水準のハード・ソフトを備える金属AM（3Dプリンター）の研究開発拠点である、「大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター（阪大金属AMセンター）」を設立・運営する礎となった²⁾。

2.2 SIP第2期／統合型材料開発システムによるマテリアル革命

SIP第2期の統合型材料開発システムによるマテリアル革命³⁾は、我が国で開発してきたマテリアルズインテグレーション（MI）の技術基盤を生かし、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする逆問題MIに対応した統合型材料開発システムを世界に先駆けて開発することを目的とする。高い国際競争力が要求される革新的炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic：CFRP）複合材料や粉末・金属AM材料などを対象とし、既存の材料データベースの活用はもとより、新たなプロセス・評価技術に対応したデータベースの構築を図り、材料科学・工学と情報工学を融合した逆問題MIを活用して社会実装に向けた開発期間・開発費用を低減するマテリアル革命に取り組むことを目指している。本課題は、図3に示すような研究開発体制による、産学官44機関（企業18、大学22、公的（非営利）機関4）の参画による3領域の13チームが一丸となって取り組んでいる。

大きくはA領域「先端的構造材料・プロセスに対応した逆問題MI基盤の構築」、B領域「逆問題MIの実構造材料への適用（CFRP）」、C領域「逆問題MIの実構造材料への適用（粉末・3D積層）」の3領域に分類される。A領域は、『欲しい性能から必要となる材料の構造・特性を提案し、かつその実現可能プロセスの提示を可能とするSociety 5.0の実現を目指した統合型材料開発システムを構築』する。さらに、我が国が強みを持ち、今後重要性を増す先端構造材料・プロセスに展開することで、「逆問題への対応」、「先端材料・プロセスへの適用拡大」、「産

学官連携の拠点形成」に取り組む。B領域は、『軽量構造用材料として普及が進むCFRP複合材料の特性・生産性向上に関する技術を、統合型材料開発システムを活用して開発し、その成果をもとに、航空機等の輸送機器開発において世界をリードする』ことを目標とする。C領域は、『開発競争の激しい耐熱合金粉末プロセスと、次世代輸送・エネルギー機器用超高温耐熱材料であるセラミックス基複合材料について、統合型材料開発システムを活用した革新的な材料・プロセスを実現し、我が国の産業競争力強化を図る』ことを目標としている。

2.1で示した第1期SIPで金属AMを中心としたモノづくりに臨んだ阪大金属AMセンターを中心とするチームは、図3の13チームのうち、A2「プロセスデザイン」、C1「Ni基合金の3D積層造形プロセスの開発」、C4「高性能TiAl基合金動翼の粉末造形プロセス開発と基盤技術構築」の3チームに所属する。全てのチームは相互に有機的連携をとりつつMIの社会実装に向けた取り組みを行っている。中でも我々の阪大金属AMセンターは、フィジカル空間とサイバー空間の融合を念頭に置きつつ、A2チームでは、『航空宇宙分野などにおいて重要なNi合金やTi合金、超耐熱セラミックス複合材料の開発を加速するためのMI技術を開発し、対象となる材料およびそのプロセスに対し、性能予測に必要なモジュールを開発し、それらをつなぎ合わせたワークフローを構築している。逆問題解析技術を活用することで、欲しい性能から材料やプロセスの最適化を可能とする技術の確立を目指す』ための一翼を担う。さらにC領域は、執筆者である中野が領域長の一人を務めるが、C1チームでは、『Ni基合金のレーザービーム方式金属AMプロセスは、部品形状・材料物性に革新をもたらす先端プロセスであり、発電用ガスタービン向け燃焼バーナーなどへの適用が期待されているが、本プロセスが要求する複雑多岐に渡るパラメータの最適化が非常に難しいのが現状であるため、3D積層造形プロセスMIにより見いだされる新規Ni基合金をフィジカル空間にて製造実証することを通じ、燃焼バーナーの高耐久化を目指す』ことを目的とする。さらに、C4チームでは、『需要が急増しているTiAl製低圧タービ

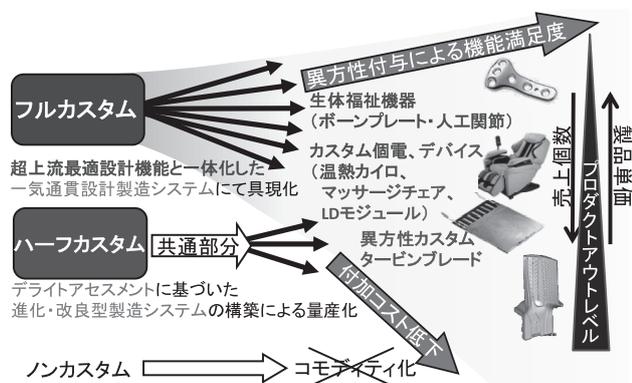


図2 SIP第1期での当拠点の実際のアウトプット。フルカスタム化からスタートし、用途に応じたカスタム化レベルの最適化（プロダクトアウト含）による、最大の経済効果創発の追求。



図3 SIP第2期／統合型材料開発システムによるマテリアル革命における全体の研究開発体制。

ン動翼を設計の自由度が高い粉末プロセスにより開発することを目標に、材料工学と情報工学の融合により、その開発に資するMI基盤の構築（順問題）と検証（逆問題）を産学連携にて実施する。大学が設計し、企業側が製造する無二の「カスタマイズ粉末」を金属粉末射出成形法（MIM）とAMで同時に適用し、MI基盤の逆問題への適用と検証はMIMにて行い、それらの知見を将来の産業力強化に生かす』という目標を設定している。

とりわけC1は、レーザビーム方式の金属AMプロセスをNi基合金に適用しつつ、レーザ金属AMプロセスを部品形状ならびに材料物性の両方に革新をもたらす可能性のある先端プロセスと位置づけ、高温環境に曝され、複雑流路を有する発電用ガスタービン向け燃焼バーナー等への適用を模索する。しかしながら、レーザ金属AMプロセスが要求する複雑多岐に渡るパラメーターを最適化することに難しさがあることから、MIを活用したサイバー空間での条件探索に加え、単なる条件の最適化に留まらず、3D積層造形材ならではの機能を発揮させる可能性をも追求する。つまり、MI基盤により開発される3D積層造形プロセス向けMIと連携しつつ、サイバー空間にて見いだされたプロセス条件をフィジカル空間にて検証し、新規Ni基合金の開発も含めて実証を行っており、阪大金属AMセンターはMI基盤の構築のための基礎データベースの構築とレーザ金属AMプロセスの最適化、さらには耐熱性新合金の開発にまで深く関わっている。

2.3 経産省地域新成長産業創出促進事業

本事業¹⁾は、大学・公設試等に対するIoT設備等の導入や人材育成に係る取組等を支援することを通じ、地域における中小企業の生産性向上のためのオープンイノベーション・プラットフォームを構築し、地域経済の活性化を図るものである。そこで、阪大金属AMセンターでは、

現有の3台の金属AM装置（レーザビーム方式1台と電子ビーム方式2台）に加え、レーザビーム方式の金属AM装置の増設により、地域企業に対して大学の保有する技術の実用化を促進する。図4は、本事業における研究分担と地域企業との関わりを示す体制図である。金属AM技術の活用により、構造設計の革新、デザインの自由度の向上、カスタム部材の迅速製造はもちろんのこと、材料特性に優れた革新的部材製造の実現を可能とすることを目的としている。これらは、新規開発部材の生産性を向上するとともに、異方性制御に裏付けられた高性能化という付加価値により製品を差別化し、競争力の向上に寄与するものとなる。

金属AM造形体の特性を飛躍的に向上させる手法として、阪大金属AMセンターは、従来の緻密度、造形精度に加え、後述する「結晶配向性」に代表される異方性の制御法を提案している。現在の金属製工業製品において、材質の異方性が意図的に導入されているものは、一部の耐熱材を除いて皆無に等しい。すなわち、ほとんどすべての製品に関して部分的もしくは全体への異方性の導入による付加価値の向上が期待できる。

この概念は未だ実際の生産現場には普及しておらず、本事業を通じ世界に先駆けて、関西地域の地場産業を通じ社会普及することで、金属加工部材の高付加価値化と高信頼性を同時に達成した製品開発を通じて関西地域の金属加工業の生産性を向上し、グローバルな競争力を大きく高めることが可能となるものと期待している。さらに、この異方性制御には金属AM造形時における適切な装置パラメーター制御が必須となる。本事業を通じ新規に導入する最新鋭造形モニタリングシステムの活用は、この最適パラメーター設定を少ない試行で探索する方法を確立し、それを支援企業に伝授することで、支援企業

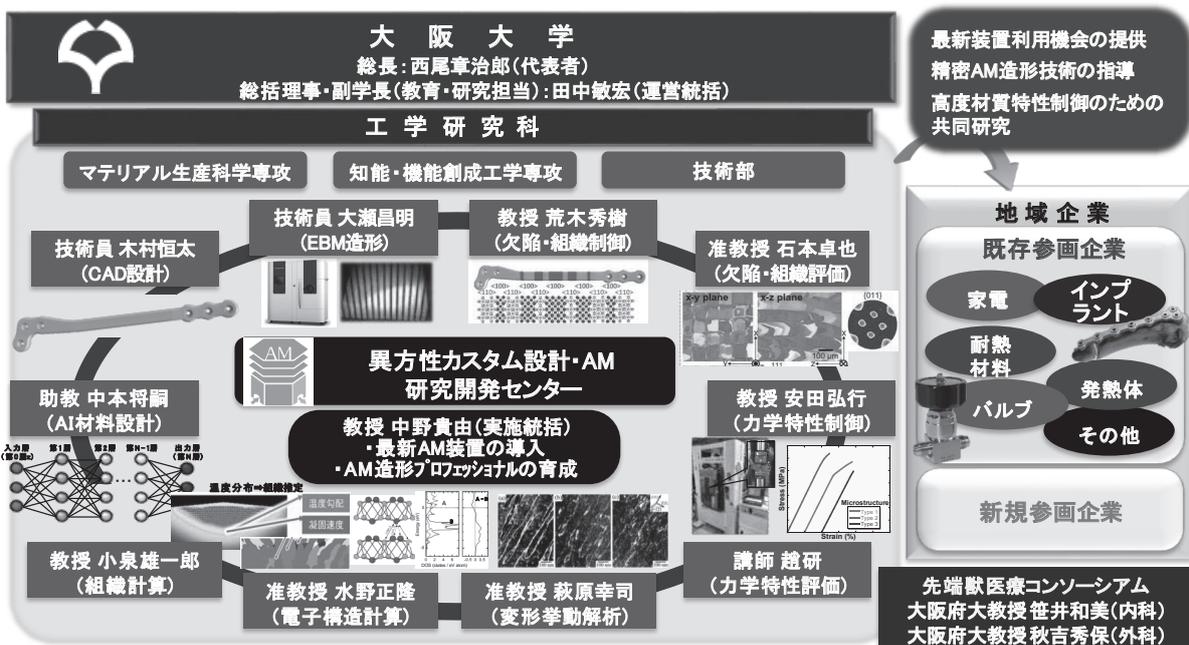


図4 経済産業省・地域新成長産業創出促進事業費補助金（地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業）（2019年度）「金属3D造形による機械・医療分野等の高付加価値製品の実用化開発支援事業」の体制図。

図7には、阪大金属AMセンターの根底を流れる設計思想と学理構築のための「異方性の材料科学」ともいべき概念図を示す。当該センターが異方性／等方性機能化の設計を目指すことには理由がある¹⁾。人工物（金属材料など）のほとんどが、等方的な機能を発揮するよう設計されているのに対し、自然界の構成物は異方性構造とその結果として、三次元方向に必要な機能性を発揮できるように異方性の材料組織構築がなされている。つまりマルチスケールでの異方性構造が存在する⁶⁾。

その一例として、図8には生体骨における微細構造の解剖学的部位に応じた異方性構造を示す^{7,8)}。骨は主としてコラーゲンとアパタイト結晶の整合な関係⁹⁾により構築されているが、コラーゲン線維の方向に沿った異方性アパタイト結晶のc軸配向性は生体内での応力分布を強く反映して変化する。特に最大主応力ベクトル方向に対して、コラーゲン／アパタイト結晶c軸が優先配列を示すことで、その配向方向に強い強度を発揮する。生体骨での集合組織の存在は必要な方向に高機能性を発揮する好例であり、疾患骨や再生骨などではその健全な異方性を失う¹⁰⁻¹⁴⁾。

つまり「異方性の材料科学」は、『必要な方向に究極の高機能性を引き出すための材料開発とメカニズム解明に関するサイエンス』と定義でき、金属AMはこうした異

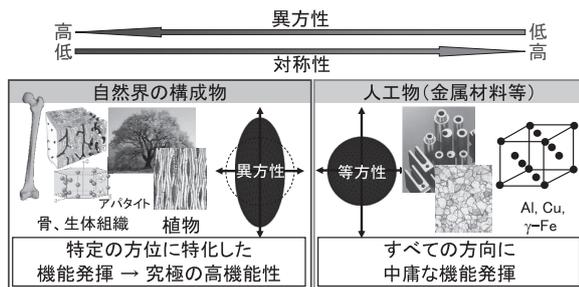


図7 異方性と等方性の概念図。大阪大学大学院工学研究科附属異方性カスタム設計・AM（3Dプリンター）研究開発センターは異方性を設計思想とするとともに「異方性の材料科学の構築」を学理構築の基盤としている。

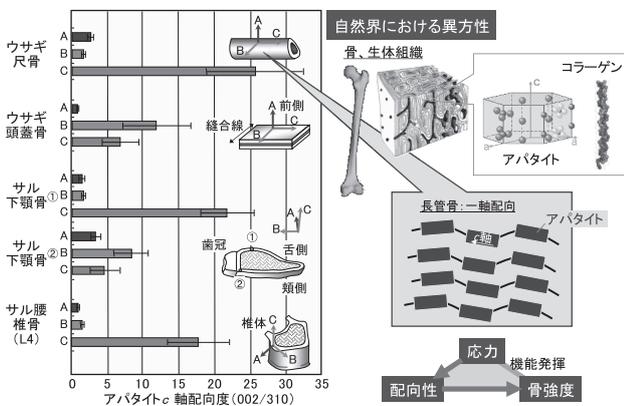


図8 皮質骨におけるユニークなコラーゲン／アパタイト結晶の配向性。コラーゲンとアパタイト結晶c軸はほぼ平行に自己組織化し、骨部位に応じた集合組織を形成する。長管骨や椎体骨は1軸配向性を示すのに対し、頭蓋骨は2次元配向性、下顎骨は咀嚼応力状態に応じた複雑な配向性を示す。文献7, 8)を改変引用。

方性を含め自由自在に造形物を作製するための究極の手段と言える^{15,16)}。そのため金属AMは変化に富む生体骨代替医療デバイスの創製に対し、最適なプロセスの1つともいえる^{1,17)}。

4. 金属AMによる形状と材質パラメーターの制御

AMは三次元造形体を単純形状から複雑形状まで制御するための手段として一般に見なされる。AMにおいて、原材料が高分子やバインダを利用した金属粉末やセラミックス粉末とする場合の造形では、主に形状制御の手段としての利用が主たる目的となる。

一方で、形状制御を行っただけの造形体でも、レーザなどの熱源により特定部位を選択的に溶融・凝固して造形した場合には、凝固時の固液界面の移動速度や熱勾配などの影響により、優先方位を持ったセル成長やデンドライト成長、さらには繰り返しの層毎での造形を繰り返す場合には、エピタキシャル成長や繰り返しの熱履歴の影響を受けて、微細組織が複雑に変化する^{18,19)}。つまり、金属原料を直接溶融する粉末床溶融法や指向性エネルギー堆積法は、形状パラメーターを制御する手段であるだけでなく、材料組織や原子配列などの材質パラメーターをも制御可能な手段となる。しばしば利用される凝固マップ²⁰⁾によると、組成的過冷や核生成・成長条件により、非晶質から多結晶、柱状晶、さらには単結晶に至るまでの材質パラメーターの制御が可能である。

図9には、金属AMプロセスで制御可能な材質（材料組織や原子配列）パラメーターと形状パラメーターを示している。金属材料において材質パラメーターは、造形物の力学特性や機能性に直結することから、材質パラメーターをいかにデザインするかが金属AMによるモノづくりの高付加価値化を決め、等方性／異方性を考慮しつつ機能制御することが、特定方向への高機能性を付与し、さらには特異材料組織構造の形成や高次機能発現につながる可能性を秘めている^{1,17,21)}。

造形体の形状や材質を制御するためのプロセスパラメーターは、一般に単位体積当たりのエネルギー密度（ E ）で表現されることが多く、 E は、出力（ P ）、ビームの走査速度（ v ）、走査間隔（ w ）、積層厚さ（ h ）の関数として、式（1）にて記述される（単位は J/m^3 ）。

$$E = \frac{P}{v \cdot w \cdot h} \tag{1}$$

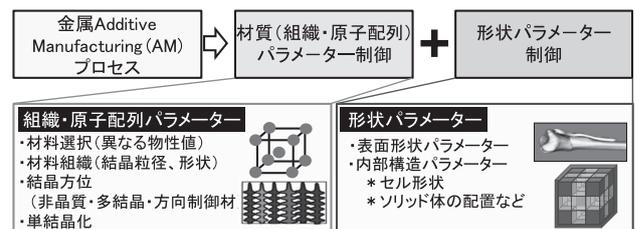


図9 金属AMで制御可能な形状と材質（材料組織・原子配列）パラメーター。

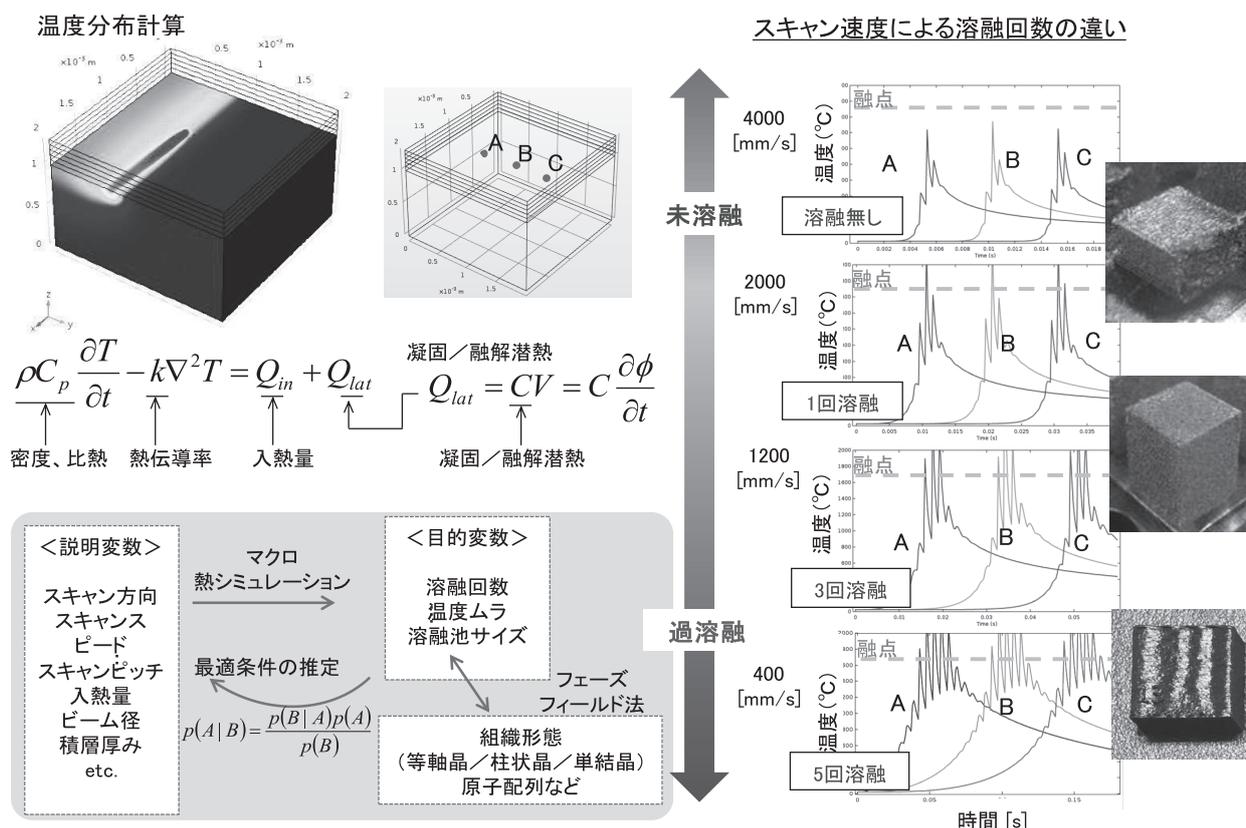


図10 温度分布シミュレーションによる溶融地の形状予測(Ti合金)と走査速度を変数とした場合の形状の最適化予測. 順シミュレーションと逆問題解析が, 期待する機能を得るための試行錯誤を必要としない重要なツールとなる.

E は最適な造形体を作製するためのプロセスパラメーター選択の一つの手がかりになる. しかし, E はあくまでも単位体積へ投入されるエネルギー量であり, 周囲への放熱によるエネルギーロスとは考慮されていない. 実際の造形物の形状や材料組織設計は, 熱伝導や熱伝達に基づく熱分布を制御する必要があり, 特に熱源の走査により形成される溶融池形状, さらにはその周囲の熱勾配を含む温度分布の管理が特に重要となる.

図10には, 放熱を考慮した熱シミュレーションによる造形体の最適パラメーター算出法を示す. 溶融条件の最適化を図ることで未溶融から最適溶融, さらには過溶融の条件を見出し, 形状パラメーターが最適化される. 加えて, 温度分布による溶融池形状や熱勾配等を最適化し, フェーズフィールドシミュレーション等を駆使することで材質の最適設計が可能となる^{22,23)}.

4.1 形状パラメーターの制御

金属粉末を出発原料とする金属AMでは, 構造体の形状は3D-CADによる設計に基づくため, 任意の三次元形状の制御が可能となる. つまり, 外形状のカスタム化のみならず, 内部形状を最適化することで等方性/異方性を含む要求される機能特性を発現させることができる.

図11に示すように, パウダー部(図中, 薄色の部分)とソリッド部(図中, 濃色の部分)を緻密に組み合わせることで, 図8で示した骨組織の異方性¹⁷⁾, さらにはその結果としての骨ヤング率の等方性/異方性を予め計算し, 再現することさえも可能となる. 図11は, 3×3×3の27

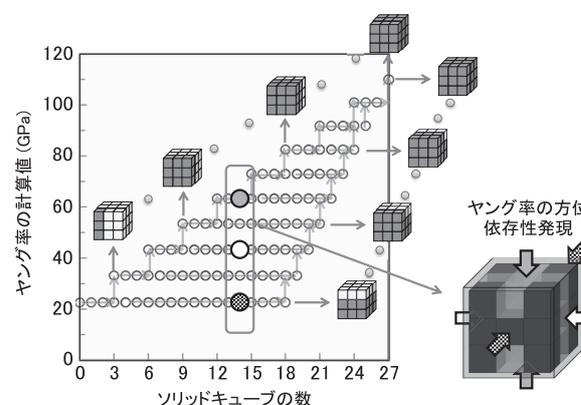


図11 部分溶融・凝固したパウダー/ソリッド複合体のヤング率予測. 27個の立方体のソリッド数とその配置を自由に選択することで, 1億通り以上の組み合わせができ, 広範囲にヤング率を選択することが可能となる. さらに右図の複合体は各荷重方向に対して柱の数が異なることから, 3軸異方性を発現する.

個の立方体構造を任意に組み合わせパウダー/ソリッド部分を選択した造形体でのヤング率をあらかじめ設計・シミュレーションにより予測している²⁴⁾. 図11の構造体(右図)ではそれぞれの軸に対して, 3軸異方性のヤング率を示すことが期待される. 実際の造形体においても3軸異方性が実現され, こうした内部構造制御による等方性/異方性発現は, 荷重に平行な支柱の数と点・線・面接触によって決定される²⁴⁾. こうした内部構造の付与は

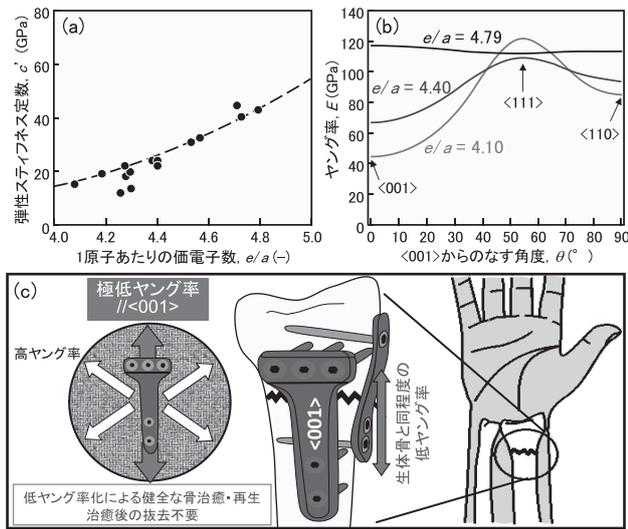


図 12 β型 Ti 合金単結晶における (a) 平均価電子数 (e/a) による弾性スティフネス定数 (c') の変化と, (b) それにともなうヤング率異方性の変化. 低弾性である結晶方位 $\langle 001 \rangle$ に沿って低ヤング率が達成され, (c) $\langle 001 \rangle$ を骨軸と一致させたインプラントにより, 応力遮蔽を抑制可能となる. 文献 34, 35) より改変引用.

構造体のマクロな力学特性を直接的に制御するため, 金属 AM の特徴を活かした極めて有用な活用法といえる.

金属 AM により可能となる複雑な形状制御は, 図 8 で示した部位に応じて最適な骨基質配向化を促す骨代替デバイスの創製にとって極めて有効である. 骨は部位に応じたアパタイト/コラーゲン配向性を示すことで, 骨本来の機能を発揮する. したがって, 骨デバイスを開発する場合には, 骨代替インプラント部, さらにはその周囲の骨基質異方性を考慮し, 新生骨を誘導するための仕組みを考える必要がある.

金属 AM を用いた内部構造制御や表面形状²⁵⁻²⁷⁾ の付与は骨基質異方性の誘導を必要とする骨代替用医療デバイスにとって極めて重要であり, 患者ごとの疾病の程度に応じたカスタマイズも可能となる²⁸⁾.

4.2 材質パラメーター (材料組織・原子配列) の制御

金属 AM は 4.1 で述べた自由自在な形状制御を得意とする一方で, 熔融池における特異な熱流束の方向性や, 層毎での造形ならではの繰り返し熔融・凝固と熱履歴により, 材質 (材料組織・原子配列) パラメーターの制御を可能とする. とりわけ, 単結晶化を含む集合組織制御は, 近年の金属 AM での注目すべき特長の一つである^{21, 29-33)}. 方向制御化や単結晶化は, ヤング率をはじめとする力学特性の異方性化を実現し, 同一素材にも関わらず用途に応じた物性値を選択することを可能とする. 単結晶は従来法では作製に長時間を必要とするが, 十分な形状・サイズが得られず, 医療デバイスとしての製品化には限界があった. しかしながら, 金属 AM の出現により大型単結晶製品実現への期待が高まっている.

単結晶化の実現は, 例えば, 応力遮蔽を抑制可能な骨インプラントの創製を可能とする^{16, 17)}. bcc 構造を有する β 型 Ti 合金は, 多結晶体においても比較的低いヤング率

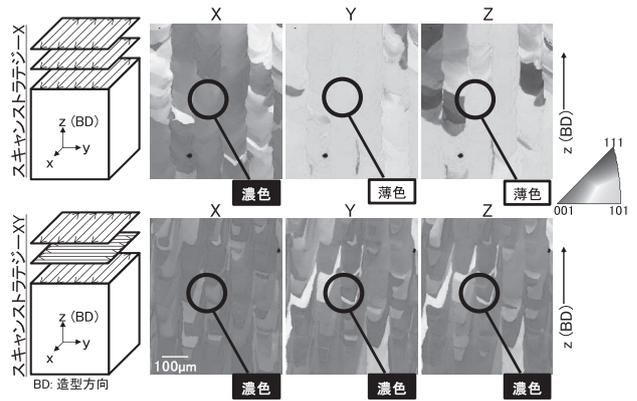


図 13 レーザビーム方式の金属 AM による医療用 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金に対し 2 種のスキャンストラテジー (X スキャンと XY スキャン) を用いることで異方性原子配列制御が達成. X スキャン (一方向に繰り返し走査) と XY スキャン (積層毎に垂直に走査). 濃色は高弾性方位, 薄色は低弾性方位で, 生体用ボーンプレートに適している. 文献 29) から改変引用.

を示すが, 単結晶化により結晶方位に依存したヤング率の異方性を発現し, 図 12 に示すように, $\langle 001 \rangle$ にて最小のヤング率値を示す^{34, 35)}. 弾性スティフネス定数 (c') は, 1 原子あたりの価電子数 e/a (平均価電子数) に依存することから (図 12 (a)), ヤング率値 E_{001} とその異方性 E_{111}/E_{001} は e/a に依存し, 次式のように算出される. e/a が減少し, 4 に近づくにつれて E_{111}/E_{001} は大きくなり, E_{001} は小さくなる (図 12 (b)).

$$E_{001} = \frac{9}{(1/B) + (3/c')} = \frac{(c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + c_{12}} \quad (2)$$

$$\frac{E_{111}}{E_{001}} = \left\{ 1 + \frac{3}{(1/B) + (3/c')} \left(\frac{1}{c_{44}} - \frac{1}{c'} \right) \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$c' = 1.391 \times (e/a - 2)^{3.34} / \text{GPa}^{36)} \quad (4)$$

e/a が 4.10 と小さく, ISO により薬事承認 (ISO 5832-14)³⁷⁾ された Ti-15Mo-5Zr-3Al (mass%) 合金は, 多結晶体にて約 85 GPa と低ヤング率を示す. さらに単結晶化により E_{001} は 44.4 GPa まで低下する³⁴⁾. これは皮質骨のヤング率 (~30 GPa) に匹敵する低値であり, $\langle 001 \rangle$ を長管骨長軸と平行方向に設置する場合において応力遮蔽の抑制効果が期待される¹⁶⁾.

レーザービーム方式の金属 AM を本合金に適用することで, スキャンストラテジー (層ごとのレーザー走査方向の組み合わせ) 制御による結晶成長方位の選択的造形が成功した. 図 13 に示すように, X スキャンと XY スキャンにより造形体中での結晶方位は異なり, いずれの場合も造形体の特定方向に低ヤング率の $\langle 001 \rangle$ を優先配向させることを可能とする²⁹⁾. 結晶方位の制御は熔融池における凝固時の固液界面移動方向と平滑面の安定性, さらには結晶成長方位の優先性によって決定づけられる. この場合, $\langle 001 \rangle$ が優先結晶配向した方位では, 約 69 GPa の低ヤング率を示している. 一方, $\langle 011 \rangle$ 優先結晶配向方

向でのヤング率は約 100 GPa であり、金属 3D プリンターは結晶異方性を有する部材の造形を可能とする。さらなる結晶配向性の高集積化と軽元素の蒸発を考慮した最適組成制御により、ヤング率は単結晶の理論値に近づき、骨に類似したヤング率が達成できるものと期待される²⁹⁾。

5. 金属 AM による高次機能化と特異材料組織形成

4.2 で示したように、金属 AM はスキャンストラテジーを変化させるだけで、部位ごとの結晶方位を変化させることができる²⁹⁾。そのため通常のプロセスとは異なり、製品の部位ごとに材質特性を変化させることさえも可能となる。

図 14 には、 β 型 Ti 合金製の骨代替インプラントを示すが、中央の骨折部位に相当する部分は応力遮蔽を避けるために骨軸に対して、低弾性率の結晶方位を、スクリュー固定する部位は高弾性率の方位を、さらに低弾性率・高弾性率部位の界面での応力集中を防ぐためには、界面を多数導入することが必要となる。従来プロセスでは不可能であった部位ごとの特性制御を金属 AM では実現できる。

その上、熔融地形状の制御により 2 つの結晶方位を整合に並べることで、100 μm といった微細な周期性を有する層状組織などの特異材料組織の形成も可能となる。図 15 には、その一例として生体用 SUS316L オーステナイト

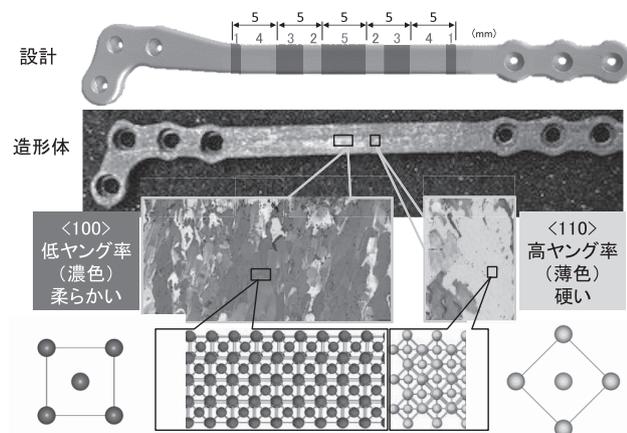


図 14 低弾性率部分（濃色）と高弾性率部分（薄色）で部位依存的に弾性率特性を制御したボーンプレート。

系ステンレス合金の原子配列と力学特性、さらには 0.9 mass% NaCl 水溶液中でのアノード分極曲線を示す²¹⁾。造形体は結晶方位のそれぞれ異なる 2 つの層（主層、副層と呼ぶ）からなる層状組織を形成し、主層・副層界面にて以下の結晶学的方位関係を示す。

$$\begin{aligned} & \{01\bar{1}\}_{\text{主層}} // \{110\}_{\text{副層}}, \\ & \langle 011 \rangle_{\text{主層}} // \langle 001 \rangle_{\text{副層}} \end{aligned} \quad (5)$$

こうした特異層状組織形成は、界面における応力伝達係数が 1 から低下するにしたがって界面でのひずみの伝達性が低下し、SUS316L の高降伏応力化へと貢献する²¹⁾。さらに、副産物として、レーザービーム方式での金属 AM の急冷効果は、MnS 系析出物をはじめとする孔食の発生原因を排除することで、図 15 (c) に示すように従来材を大幅に上回る耐食性を示すようになる。これは他の様々なステンレス鋼種でも確認されつつある。

6. おわりに

レーザーなどを熱源とする金属 AM 技術は、単に外部複雑形状を制御するだけではなく、内部構造や材料組織・原子配列といった材質の制御、さらにはそれによって決定される機能発揮までの設計をも可能とする³⁸⁾。その上、図 16 にその特徴をまとめたように、金属 AM ならではの部位ごと材質特性の異なる材料組織制御や原子配列制御を可能とする。結果として、これまで形状を中心に設計されてきた製品に対し、部位に応じた力学特性を変えたような新たな発想からの造形物の創製を可能とする。異方性／等方性の概念も含め、金属 AM ならではの新しい製品設計・開発コンセプトを取り入れつつ、金属 AM 技術は益々発展し、新規市場を拡大³⁹⁾していくものと確信している。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S) (JP25220912, JP18H052540)、基盤研究 (A) (JP18H03844)、ならびに内閣府 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) (管理法人: NEDO)、SIP / 統合型材料開発システムによるマテリア

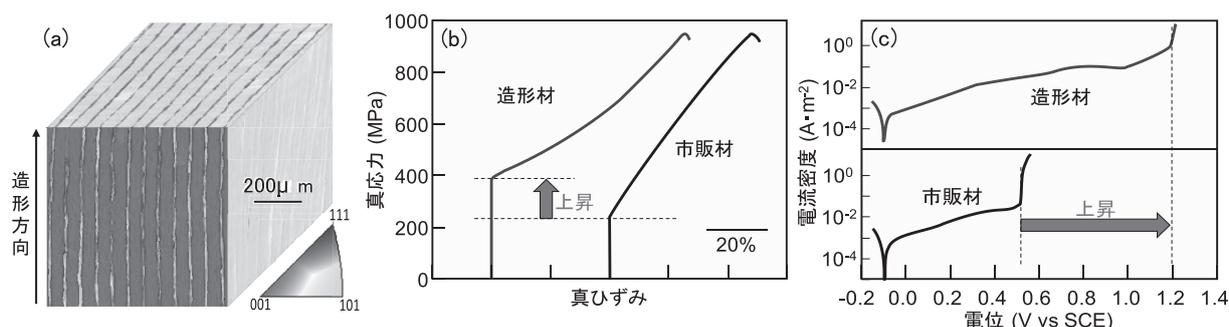


図 15 SUS316L オーステナイト系ステンレス鋼における (a) 層状組織の形成と (b) 高降伏応力、(c) 高耐食性の発現。文献 21) より改変引用。

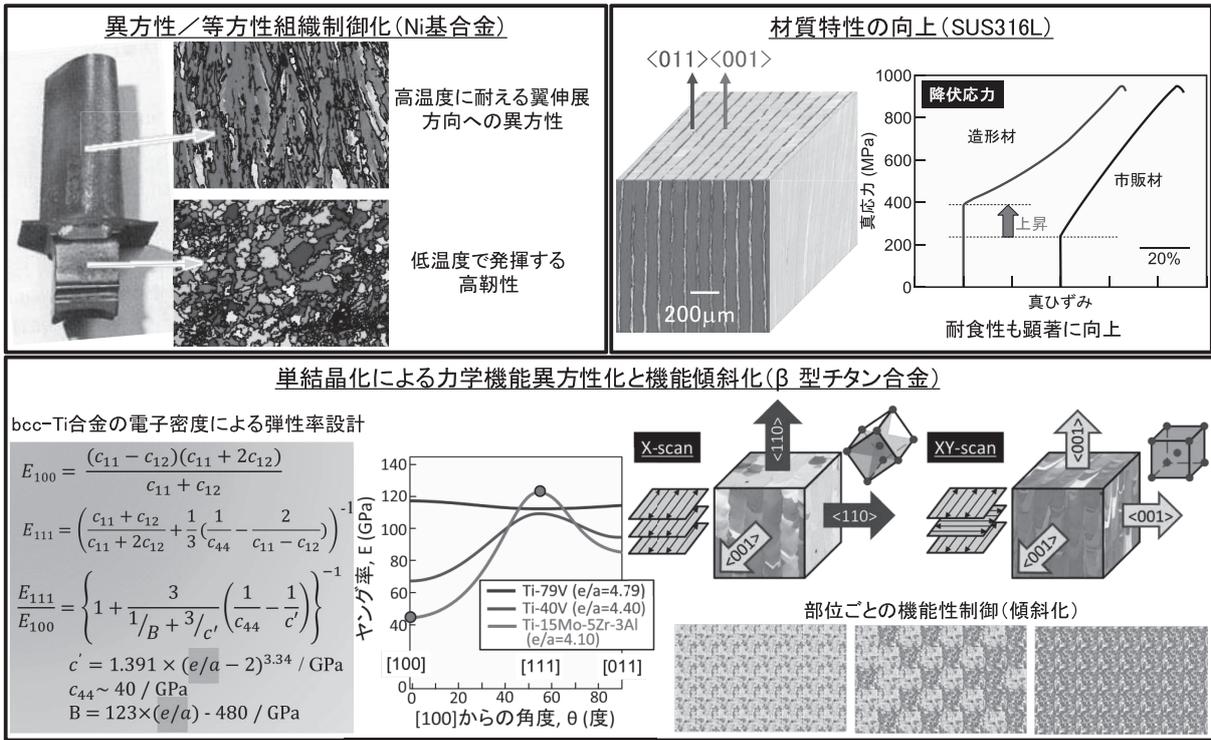


図 16 金属 AM プロセスで初めて可能となる金属材料の高機能化の複数の方法論と具体例。

ル革命(三島良直 PD)(管理法人：JST)，平成 30 年度第 2 次補正予算「地域新成長産業創出促進事業費補助金(地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業)などをはじめとする研究費支援により実施されました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 掛下知行, 田中敏宏, 中野貴由, 荒木秀樹, 古寺雅晴, 山口勝己, 西田一人, 寺西正俊: まてりあ, プロジェクト研究報告 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, 25, (2015), 419-521.
- 2) 大阪大学工学研究科附属異方性カスタム設計・AM研究開発センター (阪大金属AMセンター) のホームページ: <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/sipk/am/>
- 3) 戦略的イノベーション創造プログラム/統合型材料開発システムによるマテリアル革命 (パンフレット), 科学技術振興機構 (JST), (2019), 1-10.
- 4) 地域新成長産業創出促進事業費補助金 (地域未来オープンイノベーション・プラットフォーム構築事業) のホームページ: <https://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/2018/k181225001.html>
- 5) 経済産業省近畿経済産業局「Kansai-3D実用化プロジェクト」の取り組み概要 (旧: 3D積層造形によるモノづくり革新拠点化構想) のホームページ: <https://www.kansai.meti.go.jp/3jisedai/project/3DKansai/ivent/2019torikumi/torikumigaiyou.html>
- 6) R. Lakes: Materials with structural hierarchy, Nature, 361, (1993), 511-515.
- 7) T. Nakano, K. Kaibara, Y. Tabata, N. Nagata, S. Enomoto, E. Marukawa, Y. Umakoshi: Unique alignment and texture of biological apatite crystallites in typical calcified tissues analyzed by micro-beam X-ray diffractometer system, Bone, 31, (2002), 479-487.

- 8) T. Shinno, T. Ishimoto, M. Saito, R. Uemura, M. Arino, K. Marumo, T. Nakano, M. Hayashi: Comprehensive analyses of how tubule occlusion and advanced glycation end-products diminish strength of aged dentin, Scientific Reports, 6, (2016), srep19849.
- 9) W. J. Landis: The strength of a calcified tissue depends in part on the molecular structure and organization of its constituent mineral crystals in their organic matrix, Bone, 16, (1995), 533-544.
- 10) T. Nakano, K. Kaibara, T. Ishimoto, Y. Tabata, Y. Umakoshi: Biological apatite (BAP) crystallographic orientation and texture as a new index for assessing the microstructure and function of bone regenerated by tissue engineering, Bone, 51, (2012), 741-747.
- 11) T. Ishimoto, T. Nakano, Y. Umakoshi, M. Yamamoto, Y. Tabata: Degree of biological apatite c-axis orientation rather than bone mineral density controls mechanical function in bone regenerated using rBMP-2, Journal of Bone and Mineral Research, 28, (2013), 1170-1179.
- 12) J. -W. Lee, A. Kobayashi, T. Nakano: Crystallographic orientation of the c-axis of biological apatite as a new index of the quality of subchondral bone in knee joint osteoarthritis, Journal of Bone and Mineral Metabolism, 35, (2017), 308-314.
- 13) A. Sekita, A. Matsugaki, T. Nakano: Disruption of collagen/apatite alignment impairs bone mechanical function in osteoblastic metastasis induced by prostate cancer, Bone, 97, (2017), 83-93.
- 14) R. Ozasa, T. Ishimoto, S. Miyabe, J. Hashimoto, M. Hirao, H. Yoshikawa, T. Nakano: Osteoporosis changes collagen/apatite orientation and Young's modulus in vertebral cortical bone of rat, Calcified Tissue International, 104, (2019), 449-460.
- 15) 中野貴由, 石本卓也: 材料学的視点からの骨基質配向性構造の解明ならびに骨配向化促進に向けた骨代替材料の開発, 応用物理, 10, (2018), 759-763.
- 16) 中野貴由, 石本卓也: 医療デバイスへの金属3Dプリンタ技

- 術の適用—形状・組織・原子配列制御—, ふえらむ, 24, (2019), 21-30.
- 17) 中野貴由: 金属3Dプリンタによる特異組織形成と機能発現, 機械技術, 67, (2019), 21-27.
 - 18) M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H. Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda, M. Takayama: Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, Additive Manufacturing, 13, (2017), 61-70.
 - 19) K. Cho, R. Kobayashi, J. -Y. Oh, H. Y. Yasuda, M. Todai, T. Nakano, A. Ikeda, M. Ueda, M. Takeyama: Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting, Intermetallics, 95, (2018), 1-10.
 - 20) N. Raghavan, R. Dehoff, S. Pannala, S. Simunovic, M. Kirk, J. Turner, N. Carlson, S. S. Babu: Numerical modeling of heat-transfer and the influence of process parameters on tailoring the grain morphology of IN718 in electron beam additive manufacturing, Acta Materialia, 112, (2016), 303-314.
 - 21) S. -H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa, T. Nakano: Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting, Scripta Materialia, 159, (2018), 89-93.
 - 22) 中野貴由: チタンのAdditive Manufacturing (付加製造), 軽金属, 67, (2017), 470-480.
 - 23) 中野貴由, 石本卓也: チタンならびにチタン合金のAdditive Manufacturingプロセス, まてりあ, 58, (2019), 181-187.
 - 24) T. Nakano, H. Fukuda, H. Takahashi: Development of a new powder/solid composite for biomimic implant materials by electron-beam additive manufacturing, Materials Science Forum, 879, (2016), 1361-1364.
 - 25) A. Matsugaki, G. Aramoto, T. Nakano: The alignment of MC3T3-E1 osteoblasts on steps of slip traces introduced by dislocation motion, Biomaterials, 33, (2012), 7327-7335.
 - 26) A. Matsugaki, G. Aramoto, T. Ninomiya, H. Sawada, S. Hata, T. Nakano: Abnormal arrangement of a collagen/apatite extracellular matrix orthogonal to osteoblast alignment is constructed by a nanoscale periodic surface structure, Biomaterials, 37, (2015), 134-143.
 - 27) Y. Nakanishi, A. Matsugaki, K. Kawahara, T. Ninomiya, H. Sawada, T. Nakano: Unique arrangement of bone matrix orthogonal to osteoblast alignment controlled by Tspan11-mediated focal adhesion assembly, Biomaterials, 209, (2019), 103-110.
 - 28) 吉川秀樹, 中野貴由, 松岡厚子, 中島義雄 編: 未来型人工関節を目指して—その歴史から将来展望まで, 日本医学館, (2013).
 - 29) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S. -H. Sun, T. Nakano: Crystallographic texture control of beta-type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy by selective laser melting for the development of novel implants with a biocompatible low Young's modulus, Scripta Materialia, 132, (2017), 34-38.
 - 30) S. -H. Sun, K. Hagihara, T. Nakano: Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at.% Mo alloys fabricated by selective laser melting, Materials & Design, 140, (2018), 307-316.
 - 31) T. Nagase, T. Hori, M. Todai, S. H. Sun, T. Nakano: Additive manufacturing of dense components in beta-titanium alloys with crystallographic texture from a mixture of pure metallic element powders, Materials & Design, 173, (2019), 107771.
 - 32) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, Suyalatu S. H. Sun: Successful additive manufacturing of MoSi₂ including crystallographic texture and shape control, Journal of Alloys and Compounds, 696, (2017), 67-72.
 - 33) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, D. Wei, K. Yamanaka, A. Chiba: Comprehensive study on mechanisms for grain morphology evolution and texture development in powder bed fusion with electron beam of Co-Cr-Mo alloy, Materialia, 6, (2019), 100346.
 - 34) S. H. Lee, M. Todai, M. Tane, K. Hagihara, H. Nakajima, T. Nakano: Biocompatible Low Young's modulus achieved by strong crystallographic elastic anisotropy in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy single crystal, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 14, (2012), 48-54.
 - 35) M. Tane, S. Akita, T. Nakano, K. Hagihara, Y. Umakoshi, M. Niinomi, H. Nakajima: Peculiar elastic behavior of Ti-Nb-Ta-Zr single crystals, Acta Materialia, 56, (2008), 2856-2863.
 - 36) E. S. Fisher, D. Dever: Relation of the c' elastic modulus to stability of b.c.c. transition metals, Acta Metallurgica, 18, (1970), 265-269.
 - 37) ISO 5832-14:2007, Implants for surgery - Metallic materials -Part 14: Wrought titanium 15-molybdenum 5-zirconium 3-aluminium alloy, (2007).
 - 38) 中野貴由 (分担執筆): レーザ積層造形法 (第1章 複雑形状の積層造形), 多次元アディティブ・マニファクチャリング, 日本溶接協会, (2018), 1-25.
 - 39) 中野貴由 (分担執筆): テクノロジーロードマップ2019-2028 全産業編, 日経BP社, (2018), 386-389.