

デジタル時代における金属積層造形による 組織制御と機能発現

中野 貴由, 石本 卓也, 小笹 良輔, 松垣あいら

Microstructure Control and Function Expression
by Metal 3D Additive Manufacturing in the Digital Age

Takayoshi NAKANO, Takuya ISHIMOTO, Ryosuke OZASA, Aira MATSUGAKI

溶 射 第 58 卷 第 3 号 2021 年 7 月 発行別刷

デジタル時代における金属積層造形による 組織制御と機能発現*

中野 貴由^{*,**,†}, 石本 卓也^{*,**}, 小笹 良輔^{*,**}, 松垣あいら^{*,**}

Microstructure Control and Function Expression by Metal 3D Additive Manufacturing in the Digital Age*

Takayoshi NAKANO^{*,**,†}, Takuya ISHIMOTO^{*,**}, Ryosuke OZASA^{*,**}, Aira MATSUGAKI^{*,**}

3D Additive Manufacturing is the heaven-sent child for Internet of Things (IoT) in the digital age, and is a process that can be used for customized design and production. In particular, metal Additive Manufacturing enables not only the fabrication of complex shapes but also the control of crystal orientation at the atomic level by locally melting and solidifying the metal materials, thereby realizing high functionality of the product through simultaneous design of shape and materials properties. Therefore, it is expected to be applied in various social infrastructure fields including medical, energy-related, aerospace, and automotive, and also as a means of adding high value. In this review article, the new manufacturing concept that can be realized by metal Additive Manufacturing is introduced.

Keywords : Powder bed fusion, Crystallographic texture, Anisotropy, Materials Integration (MI) system, Cross-Ministerial Strategic Innovation Promotion (SIP) Program

1. 緒 言

日本の製造業を牽引してきたモノづくり力は、今でも世界経済に強い影響力を与え続けている。少品種・大量生産はコモディティ化し、多品種・少量生産、さらには多品種・大量生産であるマスカスタマイゼーションへとモノづくりシステムは変貌を遂げている。こうした高付加価値化の加速展開は、世界のモノづくり地図を大きく塗り替えている¹⁻⁴⁾。日本の「Society 5.0」に代表される第4次産業革命に向け、IoT (Internet of Things)、人工知能 (AI: Artificial Intelligence)、ビッグデータ構築・解析、デジタルトランスフォーメーション (DX: Digital Transformation)、サイバーフィジカルシステム (SPS)、マテリアルズ・インテグレーション (MI) システム等によるデジタル化の大きな流れの中で、3D積層造形 (AM: Additive Manufacturing) はIoTの申し子ともいべき新たなプロセスとして大きな期待を背負っている。さらに計

算機シミュレーション (順問題・逆問題解析)、3D / 4D 設計、マテリアル開発、マテリアル製造プロセス、表面処理技術、加工・接合技術、品質管理システムなどは、デジタル化に対応した積層造形のキーテクノロジーを支える全体システムとして、新たなモノづくりプラットフォームとしての構築が進んでいる。

本稿では、こうしたモノづくりを将来支えることになる金属積層造形法を取り上げ、その拠点としての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、大阪大学・金属AMセンター)、さらには金属積層造形にかかわる国家プロジェクトをはじめとする社会の流れと、DX化に適合しつつ金属積層造形により初めて可能になる複雑形状設計ならびに原子レベルでの組織制御による機能化デザインについても紹介する。

※原稿受付 2021年6月17日

* 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 (R2棟))

** 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 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 (F2棟))

* Division of Materials & Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (Building R2, 2-1, Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

** Anisotropic Design & Additive Manufacturing Research Center, Osaka University (Building F2, 2-1, Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

† Corresponding author, E-mail: nakano@mat.eng.osaka-u.ac.jp

2. 大阪大学・金属AMセンター

大阪大学大学院工学研究科では、2014年12月に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（大阪大学・金属AMセンター）（図1参照）を設立し、電子ビーム/レーザービームを熱源とする粉末床溶融結合（PBF: Powder Bed Fusion）による金属積層造形装置、ならびに形状デザインやインプロセスモニタリングを含む品質管理などを可能とする各種ツールを備えている¹⁾。加えて、金属積層造形過程における温度場、応力場、造形後の材料組織や原子配列などを予測する計算機シミュレーションの実施やそれを可能とするツールの開発に取り組んでいる。最近では、必要な造形物の形状や機能の最適化のために、AI手法としての機械学習による金属積層造形プロセスパラメータの最適造形条件探索を可能とする逆問題解析を活用したMIシステムの研究開発を行っている⁵⁾。MIシステムの活用は金属積層造形システムの効果的な活用、さらには造形材の力学特性、耐腐食性、耐酸化性、表面機能化、生体親和性付与といった様々な機能の高付加価値化につながる⁶⁻¹⁸⁾。

本センターには電子ビーム方式金属積層造形装置を2台（Arcam Q10と国産機）とレーザービーム方式金属積層造形装置を2台（EOS M290）の合計4台の金属積層造形装置を保有し、研究開発はもとより大学としての中立的な立場からの企業・研究所・大学への支援を積極的に行っている¹⁾。

**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
（大阪大学・金属AMセンター）**



2014年12月設立

目的

高付加価値な製品の設計・製造を可能とする革新的な技術研究開発及びモノづくりに関する異なるプレーヤーを繋ぐ拠点を形成し積層造形をはじめとする新たなモノづくり技術を確立する

主要設備



- ・金属積層造形装置（電子ビーム・レーザービーム方式各2台）
- ・インプロセスモニタリングシステム
- ・各種シミュレーション用ソルバー
- ・各種粉末性状解析装置 など

図1 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（大阪大学・金属AMセンター）の概略。

図2には、大阪大学・金属AMセンターの根幹となる設計思想と学理構築のための「異方性材料学」の概念図を示す。当該センターは異方性/等方性を切り口に階層構造を利用した材料の高機能化を設計指針としている¹⁾。金属材料を含む人工物の多くが、等方的な機能を発揮するようにデザインされているのに対し、自然界の創成物の大半は異方性構造を保有し、3次元空間の必要な方向に機能性を発揮できるように異方性組織構築がなされている。つまり多階層での異方性構造が存在する¹⁹⁾。

例えば、図3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^{20, 21)}。骨は主としてタイプIコ

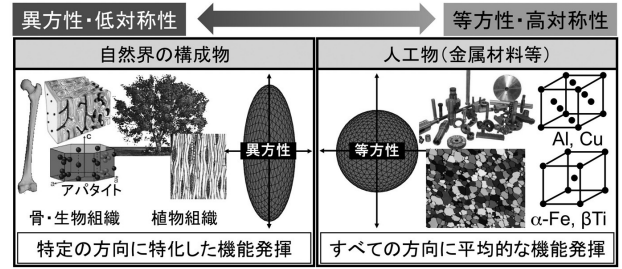


図2 異方性と等方性の概念図。大阪大学・金属AMセンターは異方性を設計思想とするとともに「異方性材料学の構築」を目指している。

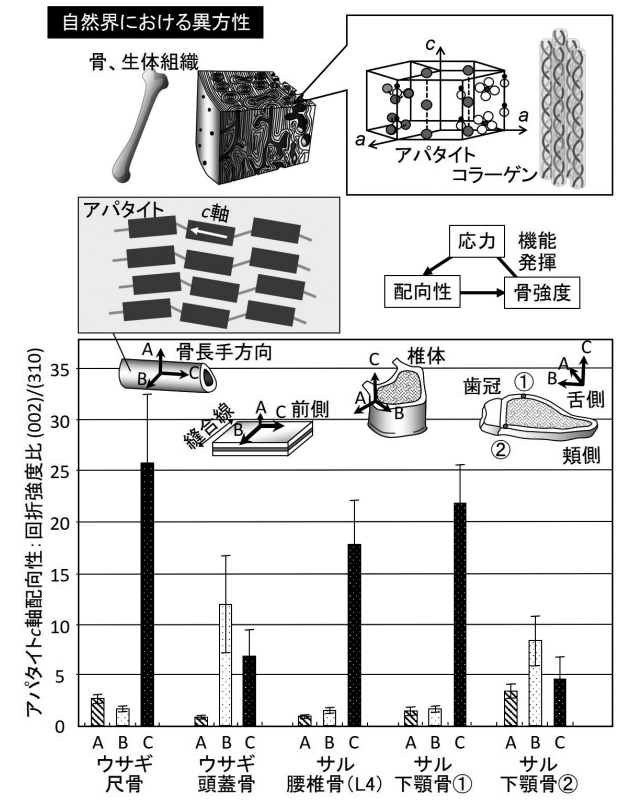


図3 皮質骨におけるユニークなコラーゲン/アパタイト結晶の配向性。コラーゲンとアパタイト結晶c軸はほぼ平行に自己組織化し、骨部位に応じた集合組織を形成する。長管骨や椎体骨は1軸配向性を示すのに対し、頭蓋骨は2次元配向性、下顎骨は咀嚼応力状態に応じた複雑な配向性を示す。文献20, 21)を改変引用。

ラーゲンとアパタイト結晶の整合関係²²⁾により構築されているが、コラーゲン線維に沿った異方性アパタイト結晶のc軸配向性はin vivo（生体内）応力分布を反映して変化する。最大主応力ベクトル方向に対して、コラーゲン/アパタイト結晶はc軸優先配列を示すことで、その配向方向に沿った高強度特性を発揮する。生体骨での結晶集合組織の存在は必要な方向に高機能性を発揮するための好例であり、疾患骨、再生骨、一部の遺伝子変異マウスなどではその健全な異方性を消失する²²⁻²⁶⁾。さらに近年ではオステオカルシンがコラーゲン/アパタイトの結晶学的整合性を司る極めて重要なタンパク質であることが見出されている²⁷⁾。

異方性材料学は、「必要な方向に究極の高機能特性を発揮するための材料の研究・開発とメカニズム解明に関するサイエンス」と定義することができ、金属積層造形はこうした異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である^{28, 29)}。つまり金属積層造形は個別にカスタム化された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つである^{1, 29)}。

3. 金属積層造形に関連する国家プロジェクト

金属積層造形は国内外からの注目度が極めて高く、日本でも金属積層造形に関わる様々な大型プロジェクトが推進されてきた。例えば、2014年からスタートした内閣府SIP(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PD)(管理法人:NEDO)では金属積層造形装置を用いた高付加価値なデザイン化や組織制御による高機能化の研究開発が進められた³⁰⁾。同時期にスタートした経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発)事業」では、国産の次世代産業用金属積層造形装置の開発に着手し、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(TRAFAM)(理事長:京極秀樹近畿大学教授)によって継続的に世界最高水準の次世代型産業用3Dプリンタおよび超精密三次元造形システムの構築が現在も推進されている³¹⁾。

2018年からスタートした内閣府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PD)(管理法人:JST)⁵⁾は、我が国で開発してきたMIシステムの技術基盤を活かし、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している。粉末・金属積層造形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ることで、材料工学と情報工学を融合した逆問題MIシステムを活用し、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。本課題には、産学官44機関の参画によるA~Cの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。B領域は、「軽量構造用材料として普及が進む炭素繊維強化プラスチック複合材料の特性・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」ことを目標としている。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。

大阪大学・金属AMセンターを中心とするチームは、13チームの中で、A2「プロセスデザイン」、C1「Ni合金の3D積層造形プロセスの開発」、C4「高性能TiAl合金動翼の粉末造形プロセス開発と基盤技術構築」の3チームを率いて、相互に有機的連携をとりつつMIシステムの社会実装に向けた取り組みを行っている。なかでも大阪大学・金属AMセンターは、フィジカル空間とサイバー空間の高度な融合を基軸に、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」ための一翼を担っている。さらにC領域は、筆者の中野が領域長を務める。C1チームでは、「Ni合金のレーザービーム方式金属積層造形プロセスは、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ーの最適化が非常に難しいのが現状であることから、3D積層造形プロセスMIにより見いだされる新規Ni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」ことを目的としている。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している。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)と積層造形で同時に適用し、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チームは、レーザービーム方式の金属積層造形プロセスを、MIシステムで開発したNi合金に適用しつつ、レーザー金属積層造形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ることで、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している。しかしながら、レーザー金属積層造形プロセスが要求する複雑多岐にわたるパラメーターを最適化することは困難であり、MIシステム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積層造形部材ならではの機能を発揮させる可能性をも追求している。つまり、MIシステムにより開発される3D積層造形プロセス向けMIシステムと連携しつつ、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合金の開発も含めて実証を行っ

ており、大阪大学・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積層造形プロセスの最適化、さらには耐熱性新合金の開発にまで深く関わっている。MIシステムは最終的には、物質・材料研究機構（NIMS）に集約され、コンソーシアム型でのオールジャパンでの運用システムが構築されつつある³²⁾。

4. 金属積層造形による形状・材質パラメーターの制御

3D積層造形は3次元造形体を単純形状から複雑形状まで構築するための手段としてしばしば見なされる。実際に原材料を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、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では、凝固時の固液界面の移動速度や熱勾配などの温度分布に基づく影響から、優先方位を持ったセル成長やデンドライト成長、さらにはレイヤーバイレイヤーでの造形を行う場合には、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^{7, 33)}。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³⁴⁾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4には、金属積層造形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まとめて示している。金属材料において材質パラメーターは、造形

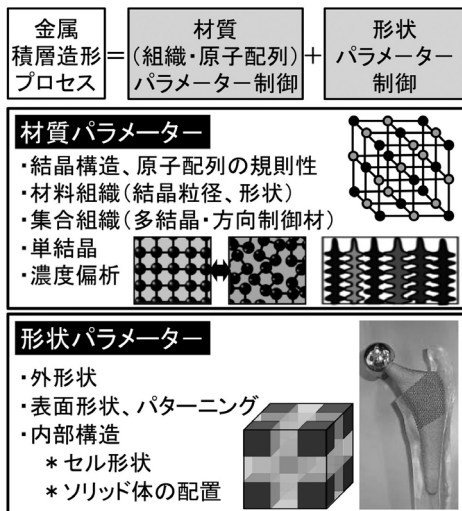


図4 金属積層造形で制御可能な形状と材質（材料組織・原子配列）パラメーター。

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積層造形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, 4, 11)}。

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 ）。

$$E = \frac{P}{v \cdot w \cdot h} \quad (1)$$

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損失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統制が特に重要となる。したがって、放熱を考慮した熱シミュレーションにより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の各種計算機シミュレーション手法を駆使することで材質パラメーターの最適設計が可能となる^{35, 36)}。

4.1 形状パラメーターの制御

金属積層造形法では、構造体の形状は3D-CADによる設計に基づくため、任意の3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5には、各辺に沿って $3 \times 3 \times 3$ の27個の立方体要素を任意に組み合わせパウダー／ソリッド部分を選択的に配置した造形体でのヤング率を、あらかじめ設計・計算機シミュレーションにより予測している³⁷⁾。図5の構造体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・面接触により決定される³⁷⁾。こうした内部構造の付与は構造体のマクロな力学特性を直接的に制御するため、金属積層造形の特徴を活かした極めて有用な活用法といえる。

4.2 材質パラメーターの制御

金属積層造形は4.1で述べた自由自在な形状制御を得意とする一方で、溶融池における特異な熱流束の方向性や、繰り返して溶融／凝固と熱履歴により、材質（材料組織・原子配列）バ

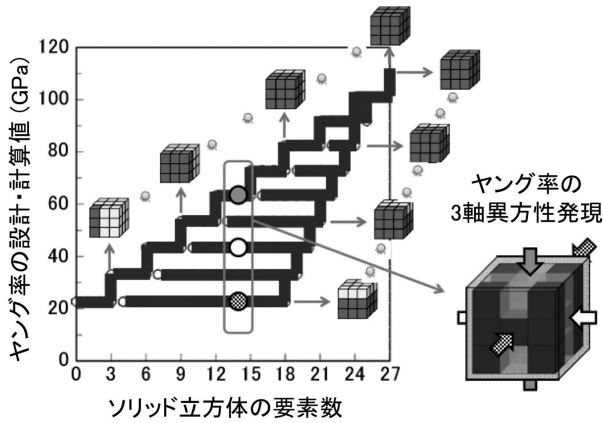


図5 パウダー／ソリッド複合体のヤング率シミュレーション結果。27個の立方体要素のソリッド数とその位置を自由に選択することで、1億通り以上の組み合わせができ、広範囲にヤング率を選択することが可能となる。さらに複合体は各荷重方向に対する柱の数に応じたヤング率の等方性／異方性を発揮する。図は3軸異方性の例。

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、金属積層造形ならではの注目すべき特長の一つである⁶⁻¹⁸⁾。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の選択的制御を可能とする。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、製品化には限界があった。しかしながら、金属積層造形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^{2, 4)}。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6に示すように、<001>にて最小のヤング率値を示す^{38, 39)}。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 に依存することから(図6(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、 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6(b))。

e/a が4.10と小さく、ISOにより薬事承認(ISO 5832-14)⁴⁰⁾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_{100} は44.4 GPaまで低下する³⁷⁾。これは皮質骨のヤング率(～30 GPa)に匹敵する低値であり、<001>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²⁾。

レーザービーム方式の金属積層造形を本合金に適用することで、スキャンストラテジー制御による結晶成長方位の選択的造形を達成した。図7に示すように、スキャンストラテジーXとスキャンストラテジーXY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<100>を優先配向させることを可能とする⁶⁾。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

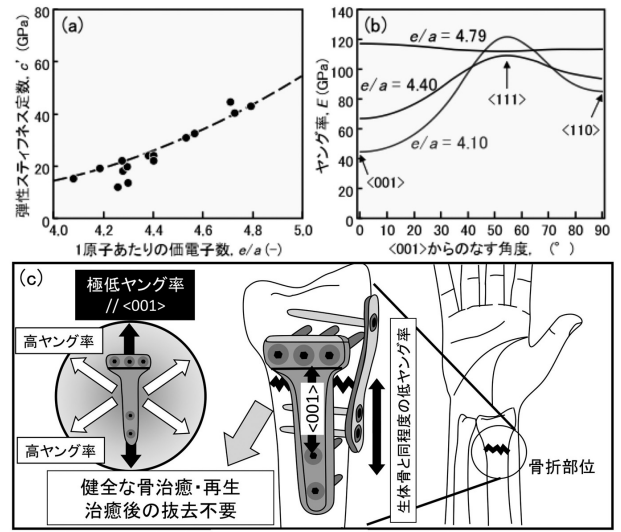


図6 β型Ti合金単結晶における(a) 価電子密度(e/a)による弾性スティフネス定数(c')の変化と、(b) それにともなうヤング率異方性の変化。低弾性率である結晶方位<001>に沿って低ヤング率化が達成され、(c) <001>を骨軸と一致させた骨インプラントにより、応力遮蔽を抑制可能となる。文献38, 39)より改変引用。

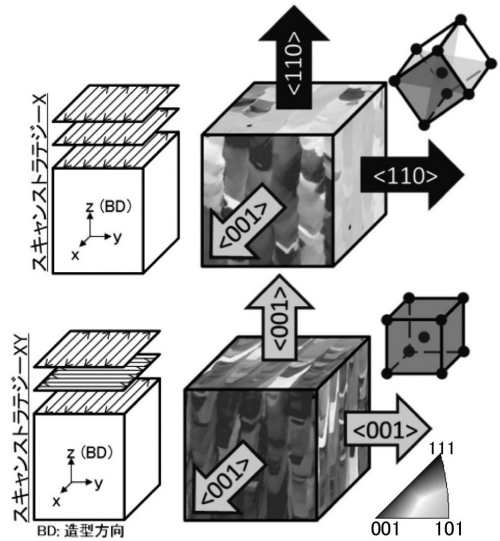


図7 レーザービーム方式の金属積層造形による医療用Ti-15Mo-5Zr-3Al合金に対し2種のスキャンストラテジー(XスキャンとXYスキャン)を用いることで異方性原子配列制御が達成。<001>配向による低弾性率化は生体用ポーンプレートに適している。文献6)から改変引用。

る。この場合、<100>が優先結晶配向した方位では、約70 GPaの低ヤング率を示している。一方、<011>優先結晶配向方向でのヤング率は約100 GPaであり、金属積層造形は材質異方性を有する部材の創製を可能とする。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⁶⁾。

5. 金属積層造形による特異材料組織形成と高次機能化

4.2で示したように、金属積層造形はスキャンストラテジーに依存して、部位ごとの結晶方位を変化させることができる⁶⁾。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が可能となる。

さらに、溶融池形状の制御により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。例えば、図8には、SUS316L オーステナイ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¹¹⁾。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する。

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の高強度化へとつながる¹¹⁾。さらに、副産物として、レーザービーム方式での金属積層造形の急冷効果は、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8(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。

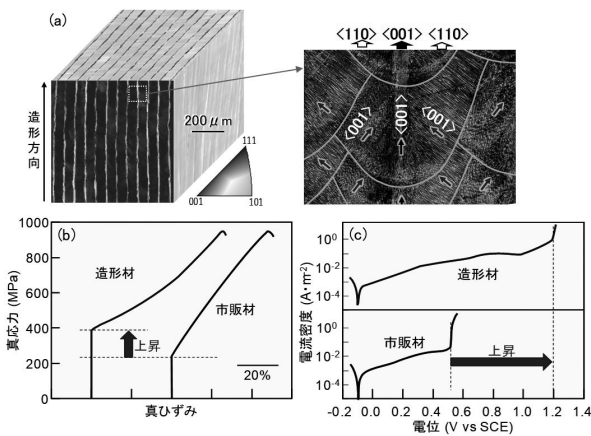


図8 レーザ金属積層造形法によるSUS316Lオーステナイト系ステンレス鋼への(a)層状組織の形成と(b)高降伏応力、(c)高耐食性の付与. 文献11, 17)より改変引用。

最近では、新たなジャンルの材料として5元素以上の多元系からなるハイエントロピー (HEA) 合金の金属積層造形が注目されている。ハイエントロピー効果による強い固溶体硬化が期待される一方で、通常の溶融/凝固法では、強い偏析が見られ、理想的な固溶体強化を発揮しない。レーザーを熱源とした積層造形法では10⁷ K/s程度の急冷が得られることから、図9に示すように偏析防止効果が認められ、結果として理想的な強制固溶による高強度化と形状の付与が図られているなど組織制御に基づく金属積層造形特有の機能性発揮の場が広がっている¹³⁾。

反射電子像

組成マップ

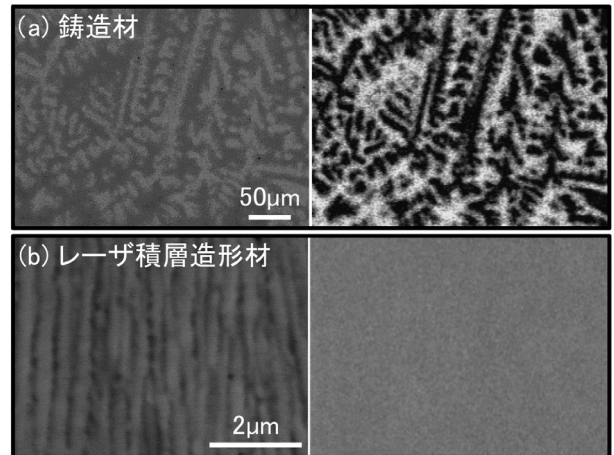


図9 多元系のハイエントロピー合金(HEA)の(a) casting材, (b) レーザ積層造形法による偏析の比較. レーザ積層造形法の超急冷により偏析抑制が可能となる. 文献13)より改変引用。

6. 結 言

金属積層造形技術は、単に外部複雑形状を制御するだけでなく、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。その上、金属積層造形ならではの部位ごとにカスタマイズされた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。こうした部位に応じた複雑な形状・材質パラメータの同時制御は、DX時代でこそ実現できる新たな高付加価値モノづくりプロセスといえる。加えて金属積層技術はバルク材料の造形だけではなく、原子配列や組織制御を行った表面処理技術としても今後広く活用されるものと考えられ、溶射技術とも深く関わる新規表面制御技術としても発展していく可能性を秘めている。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、バルク部や表面部に応じた機能を制御した新たな発想からのカスタム造形物の創製を可能とする。異方性/等方性の概念も含め、金属積層造形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、金属積層造形技術は益々発展し、新規市場を拡大していくものと期待している。

7. 謝 辞

本研究は、SIP(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(三島良直PD)(管理法人: JST)、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S)(JP25220912, JP18H05254)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。

文 献

- 1) 大阪大学工学研究科附属異性カスタム設計・AM研究開発センター (大阪大学・金属AMセンター) のウェブサイト: <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/sipk/am/>
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 中野貴由: 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, *溶接学会誌*, **89**, (2020), 27-37.
- 5) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) / 統合型材料開発システムによるマテリアル革命のウェブサイト: <https://www.jst.go.jp/sip/p05/index.html>
- 6) 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, *Scr. Mater.*, **132**, (2017), 34-38 (open access).
- 7) 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, *Addit. Manuf.*, **13C**, (2017), 61-70 (open access).
- 8) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, S.-H. Sun: Successful additive manufacturing of MoSi₂ including crystallographic texture and shape control, *J. Alloy. Compd.*, **6965**, (2017), 67-72 (open access).
- 9) 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, *Mater. Design*, **140**, (2017), 307-316 (open access).
- 10) 天野宏紀, 佐々木智章, 野村祐司, 石本卓也, 中野貴由: レーザ積層造形における雰囲気中の酸素がスパッタ発生に与える影響, *スマートプロセス学会誌*, **8**, (2019), 102-105.
- 11) 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, *Scr. Mater.*, **159**, (2019), 89-93 (open access).
- 12) O. Gokcekaya, N. Hayashi, T. Ishimoto, K. Ueda, T. Narushima, T. Nakano: Crystallographic orientation control of pure chromium via laser powder-bed fusion and improved high temperature oxidation resistance, *Addit. Manuf.*, **36**, (2020), 101624 (open access).
- 13) T. Ishimoto, R. Ozasa, K. Nakano, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, A. Matsugaki, T. Nagase, T. Matsuzaka, M. Todai, H. S. Kim, T. Nakano: Development of TiNbTaZrMo bio-high entropy alloy (BioHEA) super-solid solution by selective laser melting, and its improved mechanical property and biocompatibility, *Scr. Mater.*, **194**, (2021), 113658 (open access).
- 14) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, S. Hibino, J. Yasutomi, T. Narushima, T. Nakano: Unique crystallographic texture formation in Inconel 718 by laser powder bed fusion and its effect on mechanical anisotropy, *Acta Mater.*, **212**, (2021), 116876 (open access).
- 15) A. Takase, T. Ishimoto, R. Suganuma, T. Nakano: Lattice distortion in selective laser melting (SLM) -manufactured unstable β -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy analyzed by high-precision X-ray diffractometry, *Scr. Mater.*, **201**, (2021), 113953 (open access).
- 16) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, T. Nakano: Stability of crystallographic texture in laser powder bed fusion: Understanding the competition of crystal growth using a single crystalline seed, *Addit. Manuf.*, **43**, (2021), 102004 (open access).
- 17) Y. Tsutsumi, T. Ishimoto, T. Oishi, T. Manaka, P. Chen, M. Ashida, K. Doi, H. Katayama, T. Hanawa, T. Nakano: Crystallographic texture- and grain boundary density-independent improvement of corrosion resistance in austenitic 316L stainless steel fabricated via laser powder bed fusion, *Addit. manuf.*, **45**, (2021), 102066 (open access).
- 18) K. Cho, H. Kawabata, T. Hayashi, H. Y. Yasuda, H. Nakashima, M. Takeyama, T. Nakano: Peculiar microstructural evolution and tensile properties of β -containing γ -TiAl alloys fabricated by electron beam melting, *Add. Manuf.*, **46**, (2021), 102091 (open access).
- 19) R. Lakes: Materials with structural hierarchy, *Nature*, **361**, (1993), 511-515.
- 20) 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.
- 21) Y. 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, *Sci. Rep.*, **6**, (2016), srep19849 (open access).
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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, *J. Bone Miner. Res.*, **28**, (2013), 1170-1179 (open access).
- 25) 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, *J. Bone Miner. Metab.*, **35**, (2017), 308-314.
- 26) 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 (open access).
- 27) T. Moriishi, R. Ozasa, T. Ishimoto, T. Nakano, T. Hasegawa, T. Miyazaki, W. Liu, R. Fukuyama, Y. Wang, H. Komori, X. Qin, N. Amizuka, T. Komori: Osteocalcin is necessary for the alignment of apatite crystallites, but not glucose metabolism, testosterone synthesis, or muscle mass, *PLoS Genet.*, **16**, (2020), e1008586 (open access).
- 28) 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, *Calcif. Tissue Int.*, **104**, (2019), 449-460.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構のウェブサイト: <https://www.trafam.or.jp/index.html>
- 32) 出村雅彦: データ時代の材料・プロセス研究, スマートプロセス学会誌, **10**, (2021), 78-84.
- 33) 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 (open access).
- 34) 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 Mater.*, **112**, (2016), 303-314.
- 35) 中野貴由: チタンの Additive Manufacturing (付加製造), 軽金属, **67**, (2017), 470-480.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **14**, (2012), 48-54.
- 39) 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 Mater.*, **56**, (2008), 2856-2863.
- 40) ISO 5832-14:2007, Implants for surgery - Metallic materials -Part 14: Wrought titanium 15-molybdenum 5-zirconium 3-aluminium alloy, (2007).