

積層造形の基礎から応用と産官学連携の取り組み

中野 貴由（大阪大学 大学院工学研究科）

1. はじめに

積層造形(AM; Additive Manufacturing)は、航空・宇宙、医療、自動車、産業機械、エネルギーなどの幅広い分野でモノづくりを変革するための手段として注目されている。本稿では、積層造形の基礎と応用、学術分野での新技術動向、関連する国家プロジェクトや社会実装に向けた産官学連携の取り組みについて概説する。

2. 積層造形の基礎¹⁾

積層造形は、材料を2次元面内で結合・接合し、積層することで3次元造形物を作製する最先端プロセスである。この基本概念は、1981年に日本の小玉氏によって発明された。その後、様々な方法、材料に対して研究開発が進められ、オバマ元大統領が2013年の一般教書演説で、「The 3D Printing that has the potential to revolutionize the way we make almost everything.」と紹介したことをきっかけに、世界中で積層造形ブームがスタートした。それから10数年が経過した現在、積層造形は産業界、学術界を中心に広く浸透し、基礎学理の深まりとともに、様々な分野での社会実装が着実に進んでいる。積層造形は、欧米や中国、日本のみならず、近年では、南米やASEAN諸国にも急速にマーケットを拡大している。金属材料を出発原料とする金属積層造形は、とりわけ航空・宇宙、医療、自動車、産業機械、エネルギー、防衛・軍事などの幅広い分野にてモノづくりを変革するための手段としての適用が進められている。積層造形の中でも微細粉末を出発原料とする粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion: PBF)は、3次元複雑形状を高精度に造形するために開発された技術である。しかしながら、近年では形状のみならず、材質の重要性が認識され始めている。例えば、超急速溶融／凝固、積層ごとの造形の繰り返し、熱分布・残留応力の発生といった積層造形固有に発生する種々の状況に対応し、最適化された合金を設計するためには、積層造形による材質制御は今後大きな流れとなっていくものと期待されている²⁾。今や、結晶集合組織制御は、積層造形における最も重要でホットな研究対象の一つと言っても過言ではない。本稿では、我々のグループでこれまで得られた研究成果を中心に、金属積層造形、特に粉末を用いたプロセスとしての粉末床溶融結合での金属材料の組織制御・高機能化³⁻¹¹⁾について最新の知見を解説するとともに、医療分野での応用例について紹介する。

2-1 積層造形法の分類

積層造形は、2009年のASTM、2014年のISOに準拠すると、その製造法は7つの手法、(1)粉末床溶融結合、(2)結合材噴射、(3)指向性エネルギー堆積、(4)シート積層造形、(5)液槽光重合、(6)材料押出、(7)材料噴射、に分類される。使用材料別に分類した場合は、(a)金属積層造形、(b)セラミックス積層造形、(c)樹脂積層造形、(d)ゲル積層造形、(e)複合材料積層造形、(f)バイオ3Dプリンタ(細胞3Dプリンタ)、(g)フード3Dプリンタなど、さらに多彩である。積層造形の特徴は必要な部分を必要に応じて選択的に配置・固化もしくは固定化させることにある。その手法としては原料材料・粉末に対して、熱源を照射・走査することで溶融／凝固させるものから、光重合反応により光硬化樹脂で造形体を作製する手法、さらにはバインダ中に粉末を分散させ、任意形状を造形後、熱処理によってバインダを除去することでセラミックスや金属造形体を作製する手法、さらにはその他の固定化法を利用する場合もあり、切削加工とは対峙するモノづくりシステムである。積層造形は手法ごとに利点と欠点を持ち合わせており、当初のRapid Prototypingと呼ばれた時代には、比較的に利用しやすい樹脂による模型の設計・製造にとどまっ

ていた。しかし、現在では融点が高く、造形が困難である金属材料やセラミックスにまでその適用範囲が広がっている。金属材料は実際の工業製品としての利用価値が高く、社会実装に向けた適用拡大が積層造形活用の可能性を大いに高めている。金属材料に適した積層造形は、電子ビームやレーザービームを熱源とし、金属粉末を出発材料とした粉末床溶融結合法が注目され、金属材料の複雑形状の付与と材質パラメータの制御が可能となる。加えて、レーザービームなどを熱源に金属粉末・ワイヤを投入する指向性エネルギー堆積法やアークを熱源として金属ワイヤを積み重ねていく WAAM 法が開発・活用されており、切削加工と組み合わせることにより高速な造形品の生産を可能としている。いずれも造形中に金属材料を溶融／凝固させることで任意形状の造形を可能とする技術であるが、前者は金属粉末を積層し選択的に溶融／凝固させる手法であるのに対し、後者は必要な部位に溶融金属を肉盛りのように配置していく手法である。

2-2 金属粉末床溶融結合法の原理

図 1(a)には、粉末床溶融結合法により格子形状の金属造形体を作製する手順を示した模式図を示す¹⁾。本手法は、最終形態の 3 次元 CAD (3D-CAD) データから作成した 2 次元スライスデータに基づいて、電子ビーム(図 1(b))やレーザービーム(図 1(c))を走査し、一層分の金属粉末を選択的に溶融／凝固させ、その繰り返しにより多層を積層することで、3 次元構造体を造形する。粉末床溶融結合法による金属材料の造形は、従来の鋳造法や切削加工法では困難であった複雑で高精細な構造体化や多孔質化、あるいは表面形状構築を高精度で実現可能とする。電子ビームやレーザービームといった熱源の違いは、各々利点と欠点を有するが、両者を使い分けることで合金系や合金組成に合わせた金属造形体の創製が可能となる。

加えて、熱源の違いに由来する両手法の特徴としては、(A) レーザはガルバノメータによる走査(図 1(b)参照)を行うことから、機械的な走査による。一方、電子ビームは荷電粒子であることから電磁コイルを用いた偏光によりビームを走査(図 1(c)参照)するため、最大ビーム走査速度はレーザービームに比べて 3 桁程度速い。こうした高速度での走査により予加熱を実施することは、原料粉末を再生利用可能な範囲でわずかに結合させ、マイナス電荷の粉末粒子への帯電・反発によるスモーク現象の発生抑制や造形体のサポート削減につながる。同時に予加熱により造形中の造形物の温度変動を最小化し、膨張・収縮を抑制できることから、残留応力の低減と亀裂発生抑制にもつながる。(B) 電子ビームは加速電圧に応じた波長の短い高速な電子線を熱源とすることから、金属材料表面にて 80%以上の高いエネルギー吸収率を示す。一方で、レーザービームは金属材料に対する吸収率の波長依存性が強く(図 2参照)、金属積層造形の登場初期に広く利用されていた炭酸ガスレーザー(波長:9.4~10.6 μm)は、チタン(Ti)や鉄(Fe)、さらにはその合金に対しては比較

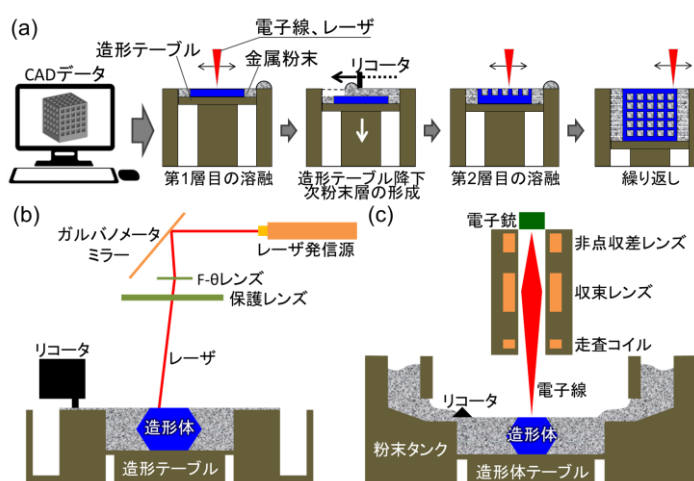


図 1 粉末床溶融結合法の原理

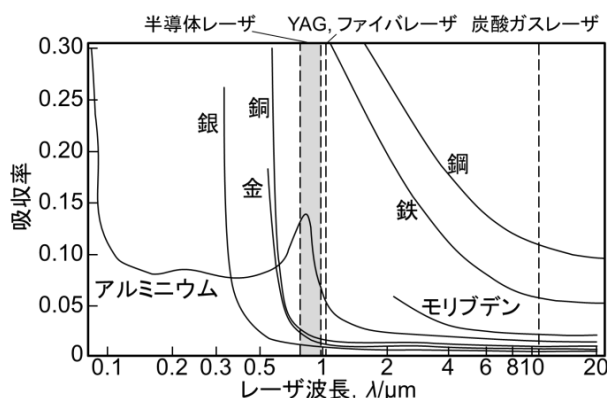


図 2 レーザ吸収率

的高い吸収率を示すものの、Al や Al 合金では極めて低い吸収率を示すことから造形が困難であった。一方、最近のイッテルビウム (Yb) ファイバーレーザ (波長: 1.07 μm) の積層造形搭載は、ほとんどの金属材料の造形を可能とした。さらに金属粉末への照射では、レーザは多重散乱により複数回の吸収の機会を持つことから、照射粉末のサイズ、形状、分布に依存して、実際には図 2 で示す吸収率よりも高効率でエネルギーが吸収される。こうしたエネルギー吸収率の違いから、レーザビームと電子ビームでは、最適形状や高密度化を実現可能な走査速度領域やエネルギー密度が大きく異なる¹⁾。こうした違いは、造形時の熔融池形状とも深く関わり、後述するスキャンストラテジー制御による結晶集合組織の形成にも大きく影響を与える。エネルギー吸収率の低いレーザビーム利用では、熔融池は深く急峻であるのに対して、吸収率の高い電子ビーム利用では広くフラットな熔融池が形成される⁸⁾。(C) (B)に関連して、適正な造形用粉末サイズは、電子ビームで大きく(平均粒径 80 $\mu\text{m}\phi$ 程度)、レーザビームでは小さい(平均粒径 30 $\mu\text{m}\phi$ 程度)。これはエネルギー吸収率が電子ビームではレーザビームに比べ高く、電子ビームでは粉末間の反発によるスモーク現象を抑制しなければならないためである。造形体表面の造形精度は、粉末サイズに依存し、電子ビームよりもレーザビームで高くなる。(A)の走査速度差を考慮すると、造形速度は電子ビームでやや高いが、実際には粉末の積層速度が律速段階となることから、造形速度差はそれほど大きくならない。(D) 積層造形は原則として局所的な熔融／凝固現象を利用することから周囲への熱拡散が高速に進行し、 10^7 K/s 程度の非常に大きな昇温と冷却の繰り返しになる^{12,13)}。その結果、造形中の造形体での温度分布の時間変化は通常の凝固現象とは大きく異なる場合も多く、非平衡相の形成や析出物の分布、さらには急峻な温度勾配や高速な固液界面の移動により、特定方向への結晶方位の優先成長が発生する¹⁻¹⁰⁾。一度溶解／蒸発した粉末の一部はブルームとして蒸発し、ヒュームとなり超微細粉末として残存することになる。

以上、粉末床熔融結合法はレーザビームや電子ビームといった熱源に基づき選択的に原料粉末を熔融する手法であり、周囲の同組成の粉末を取り除くことで、造形体を創製する。除去粉末は 90% 以上を再利用できるよう、一般的には同一組成の粉末のみを利用する。さらに除去できない内包された粉末を積極的に利用するパウダー／ソリッド複合体¹⁴⁾も提案されているが、大きく組成の異なる複合材料や傾斜材料の造形には不向きであり、高機能化には造形する部位ごとのプロセスパラメータを変化させることで場所により異なる組織を形成させる必要がある。

2-3 積層造形法による外部／内部形状制御

積層造形は 3 次元造形体を単純形状から複雑形状まで制御可能であり、複雑な外部・内部形状、メッシュ形状、外部形状をカスタマイズしたソリッド形状、表面へのメッシュ形状の導入など 3D-CAD による 3 次元形状を反映させることが可能である。積層造形において、原材料が高分子やバインダを利用した金属粉末、セラミックス粉末の造形では、主として形状制御の手段としての利用が主たる目的となる。積層造形における構造体の形状は積層造形特有の制限はあるものの任意の 3 次元形状の制御が可能である。その一例として、内部形状の最適化により等方性／異方性を含む要求される機能特性を発現させることを可能とする。

図 3 には、各辺に沿って 3×3×3 の 27 個の立方体要素を任意に組み合わせ、パウダー部とソリッド(図中、灰色の部分)部を緻密に組み合わせている。最適化設計に基づき外部・内部形状を制御することで、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は、あらかじめ設計・計算機シミュレーションにより予測できる¹⁵⁾。図 3 に示した構造体では、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

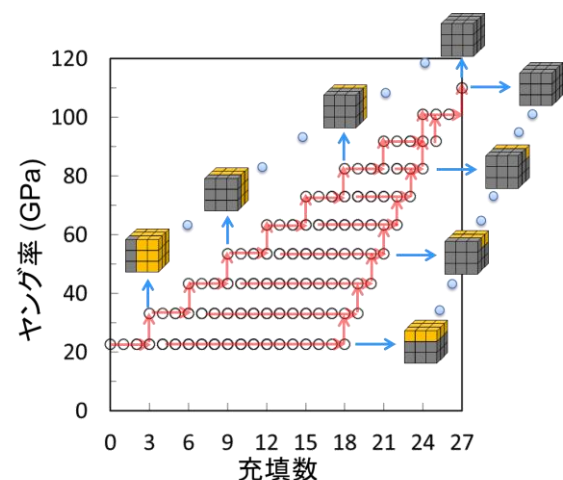


図 3 パウダー／ソリッド複合体

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。こうした内部構造の付与は構造体のマクロな力学機能を直接的に制御するため、金属積層造形の特長を活かした極めて有用な活用法といえる。形状パラメータ制御は、トポロジー最適化により、任意のモデル入力変数から最適解を算出可能とし、特定の制約条件下での最適形状をシミュレーションにより生成できる。さらに、金属積層造形の最大の特徴は、造形方向に沿って金属材料の積層と熱源の投入を繰り返し行うことにあり、その都度、積層面に垂直方向に繰り返し熱履歴が生じる。こうしたプロセスを利用することにより、積層方向に垂直な特異構造や特異組織の形成が可能となる。

2-4 積層造形法による材質制御

結晶集合組織(結晶方位の分布, 集積度合)制御は、強度、延性、ヤング率、耐摩耗性等の機械的特性や、磁性、耐食性等の機能的特性を支配する重要な材質制御因子である。したがって、結晶集合組織を緻密に制御することで、異方性に基つた構造物の高機能化が可能となる。結晶集合組織の制御には、等方的な特性を得るためのランダムな多結晶化と、異方的な特性を得るための単結晶化もしくは柱状晶組織形成という2つの方向性がある。これらを、要求に合わせて自在に制御していくことが高機能性材料創製には不可欠であり、積層造形こそがそれを実現するための強力なプロセスとなることが近年示されつつある。結晶集合組織の発達は、熔融池での凝固条件(固液界面での温度勾配(G), 固液界面での移動速度(R)), 熔融池形状とそれにとまう熱流方向といったプロセス条件にとまう凝固挙動に加えて、結晶成長の優先方向やその多重度と対称性といった材料そのものの結晶学的特徴の重量によって支配される。

一般に、単結晶を形成するには、固液界面での温度勾配を大きくし、固液界面移動速度を小さくすることで組成的過冷却の発生を抑制し、柱状一等軸遷移(CET)線の外側に凝固条件を制御する。レーザ粉末床溶融結合法においては、最近の計算機シミュレーションにおいて、凝固条件がCET線付近に位置することが予測されている。すなわち、造形時のレーザ条件によって凝固条件を緻密に制御することで、単結晶、多結晶を作り分けることが可能である。

以上より、結晶集合組織はレーザ出力と走査速度によって制御可能であり、単結晶様の強配向化組織には、適度に高いレーザ出力と低い走査速度が、多結晶組織にはその逆のレーザ条件が、それぞれ必要となる。CET線の位置は、固相線／液相線温度差や核生成密度といった材料固有の特性によって材料ごとに異なるが、レーザ条件と単結晶－多結晶形成の傾向は種々の金属材料において一致する。レーザ条件を単結晶形成可能な範囲に調整すると、熔融池性状や材料種に依存した結晶集合組織形成が可能となる。

2-5 積層造形法による立方晶系金属材料での結晶集合組織

積層造形法による結晶集合組織の形成挙動は、金属の結晶学的特徴によって大きく異なる。BCC構造やFCC構造を有する立方晶系金属材料においては、凝固過程における優先成長方向は、一般に $\langle 100 \rangle$ に平行であることが知られている。PBFにおいては、超急冷に基づき、 $\langle 100 \rangle$ に伸展した柱状セル組織もしくは2次デンドライトアームの発達しないデンドライト組織が発達する。積層造形における熔融池内の凝固過程については、エピタキシャル成長の影響が無視できる場合、柱状セル($\langle 100 \rangle$)は熔融池の接線方向に対して垂直な

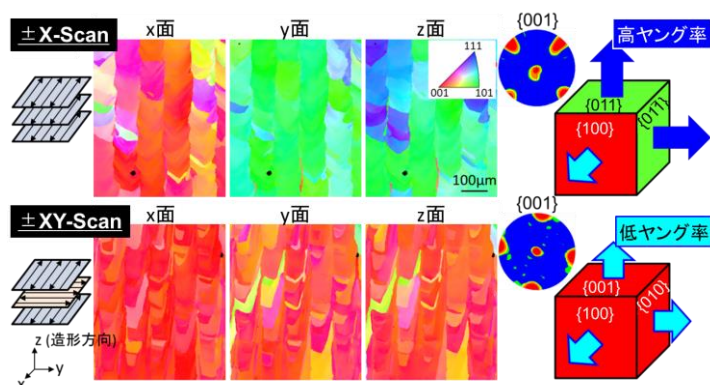


図4 β 型Ti合金におけるレーザ粉末床溶融結合法による結晶集合組織のスキャンストラテジー依存性

熱流方向に平行に成長する傾向がある。しかしながら実際には、下層および隣接する凝固部からのエピタキシャル成長を生じることから、優先成長方向と溶融池形状および凝固部での結晶方位の兼ね合いによって最終的な結晶集合組織、優先配向方向が決定される^{1,2)}。言い換えれば、これらの幾何学的関係を人為的に調整することで、単結晶や繊維状集合組織、さらにはその配向方位を制御することが可能であり、熱源のスキャンストラテジーはそのための代表的なパラメータの1つである。図4には、 β 型Ti合金におけるレーザ粉末床溶融結合法による造形体の結晶集合組織のスキャンストラテジー依存性を、Inverse Pole Figure (IPF) マップと $\{100\}$ 極点図にて示す^{3,9)}。 β 型Ti合金の粉末床溶融結合による造形ではスキャンストラテジーに依存して配向方向が変化し、スキャンストラテジー $\pm X$ では $\{110\}z<100>x$ 、スキャンストラテジー $\pm XY$ では $\{100\}z<100>x$ なる結晶集合組織が形成する。

β 型Ti合金では溶融池は長いテール(尾)を有し、凝固(結晶成長)がレーザ走査方向に垂直なyz面内にて生じる。溶融池中央部では角度差の小さな結晶粒界がおおよそxz面内に存在している。つまり、レーザ粉末床溶融結合において結晶方位は、溶融池中央部の会合界面での結晶方位差が小さくなるよう、すなわち界面エネルギーの低減を駆動力として自己調整される。結果として、 $\{110\}z<100>x$ が安定し、この方位は、隣接するもしくは次層の溶融池へと、溶融池境界において、セルが成長方向を 90° 変えながらも結晶方位を保ちつつ凝固が生じ、エピタキシャル成長が可能となる。スキャンストラテジー $\pm XY$ では、レーザ走査方向がx方向(溶融池内では $<100>//x$, $<011>//y$ が安定方位)からy方向($<100>//y$, $<011>//x$ が安定方位)へと交互に変わること、レーザ走査方向において凝固部での $<100>$ と前層の $<011>$ が競合する。 $<100>$ の成長速度が $<011>$ より大きいため、 $<011>$ が淘汰され、2つの走査方向(x, y方向)に $<100>$ が配向し、二次的にz方向に $<100>$ が配向することで、 $\{001\}z<100>x$ なる結晶集合組織が安定化する。結晶集合組織の積層中での安定化過程では、スキャンストラテジー $\pm X$ の場合と同様に、溶融池の横断面内での固液界面の会合部における結晶方位差の低減を駆動力とした結晶方位の調整がなされている。こうした結晶学的な対称性と優先成長方位の競合を駆動力にして、今では長いテールを引くような溶融池では、代表的な方位である $<100>$ 、 $<011>$ に加えて、 $<111>$ を結晶成長方向に制御することが可能になっている¹¹⁾。

2-6 積層造形法による形状と材質組織の同時付与による高機能化

金属積層造形は、材質(組織)パラメータと形状パラメータを同時に制御することができる画期的な手法である。これは選択的溶解/凝固を行う際のプロセスパラメータ(スキャンストラテジーなど)を制御できることに由来する。材質と形状はいずれも金属材料の機能を決定するための最重要因子であり、特に両者の異方性・等方性を考慮しつつ機能制御することは、特定の方向に高機能性を発揮する製品を創製できる可能性を秘めている。つまり人為的に形状と材質の自在な組み合わせから、異方性/等方性制御が可能になる。図5には計算機シミュレーションによる計算値と実際に造形した結果を示すが、両者は良い一致を示すとともに、形状のみ、材質のみの制御に加えて、形状と材質の制御によっ

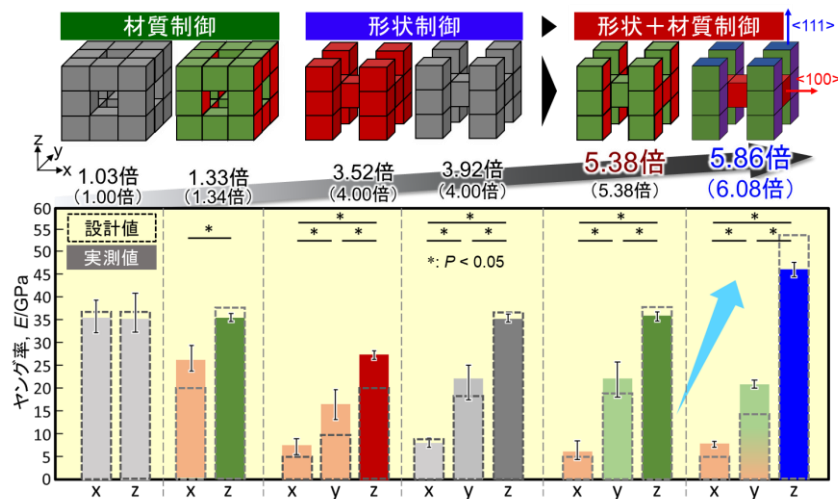


図5 形状と材質組織の同時付与による異方性化

て、この場合、約6倍の異方性を発揮する¹¹⁾。このことは、金属積層造形ならではの形状・材質の同時制御が力学機能(この場合は、弾性率)を自在に制御できることを意味している。これまでの加工法では、一定の材質を仮定して3D-CADによる形状設計によって部材の機能を設計しているのに対して、金属積層造形は材質まで制御できることか

ら、形状とともに材質を場所ごとに最適化するような形状と材質の両者の最適化を行うことが可能となる¹⁴⁾。

3. 積層造形の医療応用例

脊椎は、体幹を支持する極めて重要な骨部位であり、椎間スペーサーには疾患や外傷によって不安定化した椎体間を迅速に、力学的に固定化することが要求される。すなわち、スペーサー内部に力学機能に優れた骨組織を迅速に誘導し、長期間維持する仕組みを、スペーサー自体に導入する必要がある。従来、臨床で使用されているスペーサーは、中央部に空洞が設けら

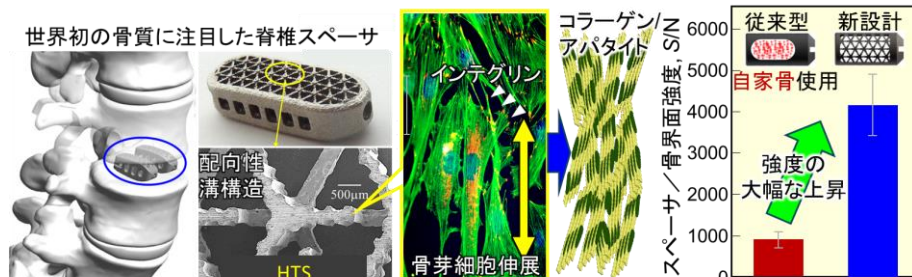


図 6 骨基質配向性誘導を可能とする積層造形脊椎椎体間スペーサー

れたボックス型であり、隣接する椎体との骨癒合を促進するために空洞部に自家骨を移植する術式が長年ゴールドスタンダードとして世界的に定着している。しかしながら、健全な部位からの自家骨の採取を要するにもかかわらず、必ずしも良好な術後成績は得られていない。高度な骨再生医療においても骨基質配向化誘導は不可能であるため^{15,16)}、こうした配向化特性を椎体間スペーサーに実装するには、脊椎周辺環境下において骨基質配化誘導を実現するための多孔体デザインの最適化が不可欠となる。我々のグループは、配向溝を付与した基板上において溝に沿った骨芽細胞が遊走・伸展し、骨基質の優先配向性が決定されることを見出している^{17,18)}。そこで、デバイス埋入初期には非荷重下で骨芽細胞を伸展・配向化誘導し、骨髄液の流動性を制御し、中長期では健全な骨質維持が可能となる階層性骨基質配向化設計により、図 6 に示す階層型一方向配向溝構造として“Honeycomb Tree Structure® (HTS)”を考案した^{19,20)}。金属積層造形を活用することで、空隙の構造制御と連通性、および力学機能も考慮した自由度の高い形状設計が可能となる。本デザインは、異方性基板上での骨芽細胞配列化とアパタイトを含む骨基質配向化、さらには骨中の応力感受細胞であるオステオサイトの応力シグナルの受信機構の基礎的知見を生かした原理に基づいており、骨基質(コラーゲン/アパタイト)配向化誘導の可能性を証明するため、ヒツジを用いた大型動物試験によって、その有効性を確認した。その結果、HTS 内包の試験体は、従来型の約 5 倍程度の押出強度を発揮した。カルセイン蛍光染色による新生骨分布からは、HTS の試験体内部にまで誘導された新生骨組織が見られ、HTS の配向溝構造に沿って骨形成がなされており、かつ正常骨と類似した海綿骨の梁様形態であった。一方、自家骨埋入の従来型試験体では、新生骨は自家骨表面に局在しており、試験体内部には充填した自家骨が残存し、ランダムな骨配向となっていた(図 6)²⁰⁾。さらに、HTS では頭尾軸方向にコラーゲンが一軸優先走行しており、健全骨に類似した頭尾軸方向への強い骨基質配向化誘導を呈していることが確認された。HTS では、試験体内部も外部の正常骨と同程度のアパタイト配向度を示しており、HTS の優れた骨基質の配向化誘導能が実証された。骨質治療用椎間スペーサーの原理が構築され、あたかも生体組織として振る舞う世界初の骨質制御型デバイスの誕生となった。

本スペーサーは、2021 年 4 月に PMDA の薬事承認を取得し、2021 年 6 月に保険収載され、初期臨床では良好な骨癒合性が確認されている。2022 年 9 月より大規模臨床応用を開始し、既に 7500 個以上(2025 年 9 月時点)の金属積層造形製椎体間スペーサーが患者へ埋入されている。この世界初・日本発の配向化誘導設計スペーサーは、「UNIOS® PL スペーサー」として、ナカシマヘルスフォース株式会社から販売されている。

4. 積層造形における産官学連携の取り組み

オバマ元大統領の 2013 年の一般教書演説の前後から、日本でも、政府主導で様々な積層造形に関わるプロジェクトが推進されてきた。2014 年からは、経済産業省次世代型産業用 3D プリント技術開発 (TRAFAM) により、世界

最高水準の造形速度と精度を持つ国産金属 3D プリンタ装置(熱源:レーザビーム, 電子ビーム)の技術開発が進められた。同時並行して, 積層造形装置を活用した高付加価値モノづくりの推進のため, 内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第 1 期「革新的設計生産技術(佐々木直哉 PD)」(管理法人:NEDO) (2014 年度～2018 年度)が推進され, 大阪大学大学院工学研究科には, 国立大学法人ではじめての積層造形を牽引するセンター組織として, “異方性カスタム設計・AM 研究開発センター(2026 年 4 月から, “3DPTec 統合センター”として拡張)”が設置され, 現在でも積層造形技術により高付加価値モノづくりを推進している。その後, 2018 年からは, 戦略的イノベーション創造プログラム(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) (2018 年度～2022 年度)が推進され, データ駆動による材料開発を積層造形技術で支えるための研究開発が実施された。

その後, JST-CREST (戦略的創造研究推進事業)「ナノ力学」(伊藤耕三 PD)「カスタム力学機能制御学の構築 ～階層化異方性骨組織に学ぶ～(研究代表者:中野貴由)」(2021 年度～2026 年度)等の様々なプロジェクトが推進されるとともに, 2024 年度からは, JAXA(宇宙航空研究開発機構)内に設置された宇宙戦略基金により, ロケットの低コスト化や軽量化を目的としたプロジェクトが実施されている。同時に, K Program(経済安全保障重要技術育成プログラム)「高度な金属積層造形システム技術の開発・実証(芦田極 PD)」(管理法人:NEDO) (2024 年度～2028 年度)」により, 金属積層造形技術の社会実装を目指した多額の投資がなされるとともに, 2026 年度からは, K Program「耐熱超合金の高性能化・省レアメタル化に向けた技術開発及び革新的な製造技術開発(中島英治 PD)」(管理法人:JST) (2026 年度～2030 年度)により航空機向けの積層造形技術の開発もスタートすることになっている。

こうした環境の中で 2025 年 4 月には, 一般社団法人 日本 Additive Manufacturing 学会®(日本 AM 学会)が設立され, 「AM サイエンス」, 「AM テクノロジー」, 「AM ビジネス」を 3 本柱に「アート」や「サイバーセキュリティ」を横串として, 活動している。本学会は, オールジャパンで産官学が連携し, 積層造形の学術・技術を醸成し, デジタル技術と積層造形技術が融合したデジタルものづくりを我が国に広く普及させることを目的としている。

5. おわりに

積層造形は, 高付加価値モノづくりを推進するための一つの手段としてデジタル時代にマッチしたプロセスといえる。これまでの塑性加工技術に加えた新たな手法として, サイバーフィジカルシステムの中において, 日本のみならず世界で益々重要な位置づけになっていくものと考えられる。今まさに新しいモノづくりの姿を構築する重要な時期に来ている。

6. 参考文献

- 1) 中野貴由: 積層造形(Additive Manufacturing)による金属材料の高機能化, 山陽特殊製鋼技報, 32 [1], (2025), 3-24.
- 2) 中野貴由: 異方性材料デザインにより材料を主役に～耐熱性金属間化合物から, 骨組織, 金属 3D プリンティングによる生体材料まで, までりあ, 64 [5], (2025), 317-330.
- 3) 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.
- 4) 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, 13C, (2017), 61-70.
- 5) 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 [11], (2019), 21(687)-30(696).
- 6) 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 [15], (2019), 89-93.

- 7) 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 Materialia*, 212, (2021), 116876; 1-12.
- 8) S.-H. Sun, K. Hagihara, T. Ishimoto, R. Suganum, Y.-F. Xue, T. Nakano: Comparison of microstructure, crystallographic texture, and mechanical properties in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloys fabricated via electron and laser beam powder bed fusion technologies, *Additive Manufacturing*, 47, (2021), 102329; 1-17.
- 9) K. Hagihara, T. Nakano: Control of Anisotropic Crystallographic texture in powder bed fusion additive manufacturing of metals and ceramics -A Review, *Journal of Metals (JOM)*, 74, (2022), 1760-1773.
- 10) T. Mayama, T. Ishimoto, M. Tane, K. Cho, K. Manabe, D. Miyashita, S. Higashino, T. Kikukawa, H. Y. Yasuda, T. Nakano: Novel strengthening mechanism of laser powder bed fusion manufactured Inconel 718: Effects of customized hierarchical interfaces, *Additive Manufacturing*, 93, (2024), 104412; 1-16.
- 11) T. Ishimoto, N. Morita, R. Ozasa, A. Matsugaki, O. Gokcekaya, S. Higashino, M. Tane, T. Mayama, K. Cho, H. Y. Yasuda, M. Okugawa, Y. Koizumi, M. Yoshiya, D. Egusa, T. Sasaki, E. Abe, H. Kimizuka, N. Ikeo, T. Nakano: Superimpositional design of crystallographic textures and macroscopic shapes via metal additive manufacturing--Game-change in component design, *Acta Materialia*, 286, (2025), 120709; 1-12.
- 12) N. Ikeo, H. Fukuda, A. Matsugaki, T. Inoue, A. Serizawa, T. Matsuzaka, T. Ishimoto, R. Ozasa, O. Gokcekaya, T. Nakano: 3D puzzle in cube pattern for anisotropic/isotropic mechanical control of structure fabricated by metal additive manufacturing, *Crystals*, 11 [8], (2021), 959; 1-10.
- 13) M. Okugawa, Y. Ohigashi, Y. Furushiro, Y. Koizumi, T. Nakano: Equiaxed grain formation by intrinsic heterogeneous nucleation via rapid heating and cooling in additive manufacturing of aluminum-silicon hypoeutectic alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 919, (2022), 165812; 1-6.
- 14) M. Okugawa, K. Saito, H. Yoshima, K. Sawaizumi, S. Nomoto, M. Watanabe, T. Nakano, Y. Koizumi: Solute segregation in a rapidly solidified Hastelloy-X Ni-based superalloy during laser powder bed fusion investigated by phase-field and computational thermal-fluid dynamics simulations, *Additive Manufacturing*, 84, (2024), 104079, 1-13.
- 15) T. Nakano, K. Kaibara, T. Ishimoto, Y. Tabata and 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.
- 16) 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 recombinant bone morphogenetic protein-2, *Journal of Bone and Mineral Research (JBMR)*, 28 [5], (2013), 1170-1179.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) T. Ishimoto, Y. Kobayashi, M. Takahata, M. Ito, A. Matsugaki, H. Takahashi, R. Watanabe, T. Inoue, T. Matsuzaka, R. Ozasa, T. Hanawa, K. Yokota, Y. Nakashima, T. Nakano: Outstanding in vivo mechanical integrity of additively manufactured spinal cages with a novel "honeycomb tree structure" design via guiding bone matrix orientation, *The Spine Journal*, 22, (2022), 1742-1757.
- 20) A. Matsugaki, M. Ito, Y. Kobayashi, T. Matsuzaka, R. Ozasa, T. Ishimoto, H. Takahashi, R. Watanabe, T. Inoue, K. Yokota, Y. Nakashima, T. Kaito, S. Okada, T. Hanawa, Y. Matsuyama, M. Matsumoto, H. Taneichi, T. Nakano: Innovative design of bone quality-targeted intervertebral spacer: Accelerated functional fusion guiding oriented collagen/apatite microstructure without autologous bone graft, *The Spine Journal*, 23, (2023), 609-620.