

# 熱処理技術セミナー

( 2023 年度 第 4 回 )

— 熱処理応用講座 —

一般社団法人 日本熱処理技術協会

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館6階

TEL. 03-6661-7167 FAX. 03-6661-7168

E-mail: [jsht-honbu@jsht.or.jp](mailto:jsht-honbu@jsht.or.jp)

# 熱処理技術セミナー

(2023年度 第4回)

## — 熱処理応用講座 —

### 講義日程と講義題目

日	時	講義題目	講師
1月29日 (月)	9:55~10:00	開会挨拶及び注意事項	(一社)日本熱処理技術協会事務局
	10:00~11:30	金属3Dプリンティングによる集合組織制御と高機能化 ~近未来の新設計に向けて~	大阪大学 中野 貴由
	12:30~13:30	電子ビーム金属積層造形の特徴および実施例の紹介 ~電子ビーム積層造形装置の最前線~	日本電子(株) 佐藤 崇
	13:40~15:10	ワイヤ・レーザDED方式金属3Dプリンター ~ワイヤ・レーザDEDによる新たなモノづくりへの挑戦~	三菱電機(株) 藤川 周一
	15:20~16:50	マグネシウム合金の粉末冶金と積層造形 ~粉末・焼結・造形のマイクロ組織変化~	(地独)東京都立産業技術研究センター 岩岡 拓
1月30日 (火)	10:00~11:30	金属積層造形に関するシミュレーション技術 ~寸法精度向上や試作回数削減のための活用方法~	(株)先端力学シミュレーション研究所 池田 貴
	12:30~14:00	金属積層造形による金型づくり ~金型納期短縮と成形プロセス革新~	大阪大学 吉田 徳雄
	14:10~15:40	金属3Dプリンタを活用した加熱コイルの開発 ~銅粉末を使った金属3D造形事例の紹介~	電気興業(株) 岩永 淳
	15:50~17:20	金属3Dプリントの品質保証と非破壊検査 ~規格整備状況と現在の品質評価方法~	(株)3D Printing Corporation 古賀洋一郎

## 一般社団法人 日本熱処理技術協会

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館6階

TEL. 03-6661-7167 FAX. 03-6661-7168

E-mail: jsht-honbu@jsht.or.jp

※ 講演中の録画及び録音は固くお断りします。

# 1. 金属3Dプリンティングによる集合組織制御と高機能化

～近未来の新設計に向けて～

大阪大学

中野貴由

# 金属 3D プリンティングによる集合組織制御と高機能化 ～近未来の新設計に向けて～

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 中野貴由

## 1 はじめに

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ている。一方で、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・大量生産としてのマスカスタマイゼーションへとモノづくりは変化している。こうした高付加価値化にむけたモノづくり展開は、世界のモノづくりマップを大きく塗り替えている<sup>1-4)</sup>。「Society 5.0」に代表される第 4 次産業革命により、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/グリーントランスフォーメーション(DX: Digital Transformation, GX: Green 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/インフォーマティクス(MI)等によるデジタル化の流れの中で、3D プリンティング(AM: Additive Manufacturing)は IoT の申し子ともいべき新規プロセスとして強く期待されている。

中でも金属製品の高機能化には、外形状のみならず組織や結晶集合組織の制御が要となる。IoT 化された金属 3D プリンティングは、デジタル情報としてのプロセスパラメータ制御によって、外形状に加え、内部形状や材質(組織や集合組織)までも自在に制御できる可能性を秘める。とりわけ、金属直接溶解による金属 3D プリンティングは、熔融池内外での熱分布、液相流動、固相/液相界面挙動の理解・制御により金属製品の高機能化へとつながる。さらに、金属 3D プリンティングによる繰り返し熱履歴の付与は、新たな *in situ* 熱処理手法ともいえる。

本稿では、工業材料用途から生体材料用途まで広範囲で活用される金属 3D プリンティングによる形状制御と集合組織制御に代表される材質制御、さらにはそれに基づく高機能化・高付加価値化について解説する<sup>5-8)</sup>。

## 2 3D プリンティング(AM)とは

3D プリンティング(AM)は、かつては試作品を製造するための技術として Rapid Prototyping と呼ばれたが、2009 年に ASTM<sup>9)</sup>により標準化された際に AM: Additive Manufacturing と定義された。今では、3D プリンティングと Additive Manufacturing はほぼ同義語として扱われている。

切削加工による材料の加工が引き算によるモノづくりであるとするれば、3D プリンティングは材料を付加する足し算によるモノづくりである。3D プリンティング技術は、当初は樹脂造形のための安価なローエンド装置の普及開発が先行した。その後、金属材料などの工業製品製造を行うハイエンドな装置が登場・普及するようになり、3D プリンティングはこれまでの切削加工で不可能であった複雑構造・多重構造といった形状制御、さらには製品機能に直結するテーラーメイド組織・集合組織制御を可能とする多様なニーズに合わせた新たなモノづくりシステムとして社会に認知されるようになってきた。

### 2.1 3D プリンティング(AM)の種類

3D プリンティング(AM)技術は、2009 年の ASTM<sup>9)</sup>によると、7 つの製造手法、(1) 粉末床熔融結合(Powder Bed Fusion)、(2) 結合材噴射(Binder Jetting)、(3) 指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition; DED)、(4) シート積層造形(Sheet Lamination)、(5) 液槽光重合(Vat Photo-Polymerization)、(6) 材料押出(Material Extrusion)、(7) 材料噴射(Material Jetting)、に分類される。使用材料別では、(a) 金属 3D プリンティング、(b) セラミックス 3D プリンティング、(c) 樹脂 3D プリンティング、(d) ゲル 3D プリンティング、(e) 複合材料 3D プリンティング、(f) パイオ 3D プリンティング(細胞 3D プリンティング)など多彩である。3D プリンティングの特徴は必要な部分を必要に応じて選択的に配置・固定させることにある。その手法としては原料材料・粉末に対して、レーザ、電子ビーム、アークなどを熱源として熔融/凝固さ



せる方法から、紫外線を含む光を用いて光重合反応により光硬化樹脂で造形体を作製する方法、さらにはバインダ中にセラミックスや金属粉末を分散させ、任意形状を造形した後、熱処理によってバインダを除去することで造形体を作製する方法もあり、切削加工と対比するモノづくりシステムである。

3Dプリンティングは手法毎に利点と欠点を持ち合わせているが、当初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<sup>10,11)</sup>。金属材料やセラミックスは実際の工業製品部材としてその利用価値が高く、こうした多彩な材料への適用拡大が3Dプリンティング活用の可能性を大いに高めている。金属材料に適した3Dプリンティングとしては、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(Powder Bed Fusion; PBF-EB/M(電子ビーム熱源), PBF-LB/M(レーザービーム熱源) in ISO52900)が注目され、金属材料の形状パラメータ、材質パラメータの制御が研究されている。加えて、レーザービームなどを熱源に金属粉末を投入する指向性エネルギー堆積法(DED)やアーク溶接を応用した金属3Dプリンティング技術であるWAAM(Wire and Arc-based Additive Manufacturing)が欧州を中心に開発されている<sup>12)</sup>。いずれも金属材料を溶融/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/凝固させるプロセスであるのに対し、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方法である。本稿では、粉末床溶融結合法の概略とそれによって得られた結果について示す。

## 2.2 粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion)法

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<sup>10,11)</sup>。本手法は、最終形態の3次元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))を熱源として走査し、一層分の金属粉末を選択的に溶融/凝固させ、それを多層に繰り返し積み上げることで、3次元構造体を作形する。粉末床溶融結合法による3Dプリンティングは、従来の鋳造法や切削加工法では困難であった複雑形状の構造体化や多孔質体化、ある

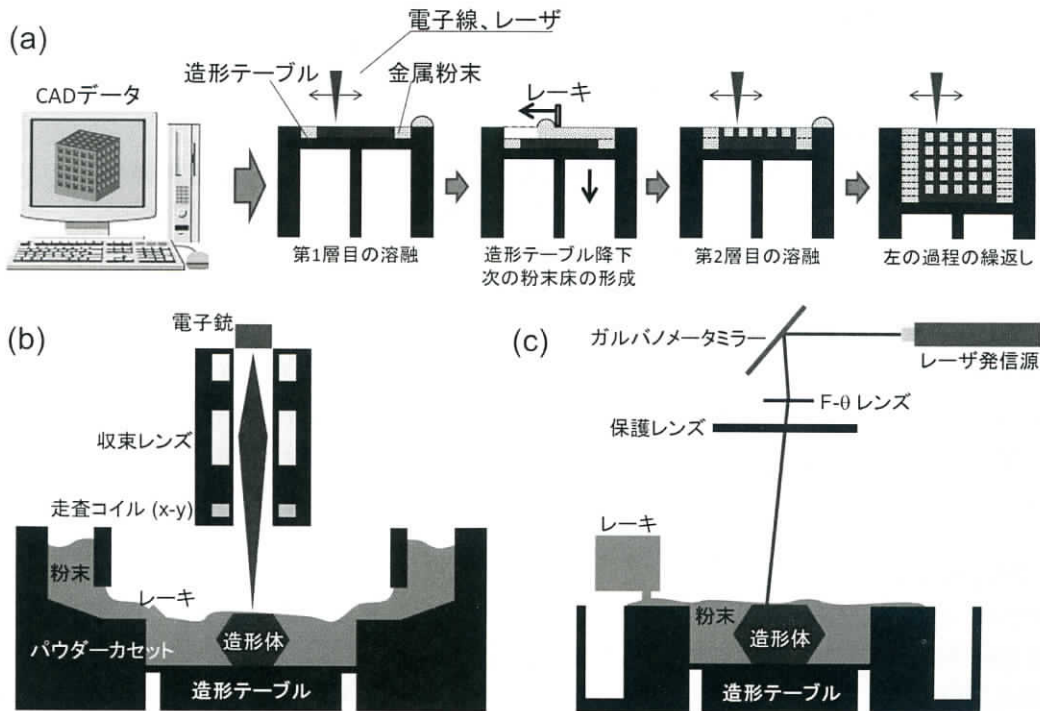


図1 粉末床溶融結合法の基本原理(電子線熱源(b), レーザ熱源(c))

いは表面形状構築を高い精度で実現可能とする。

粉末床溶融結合法は電子ビームやレーザービームといった熱源に基づき選択的に原料金属粉末を溶融する手法であり、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。取り除いた粉末は90%以上

を再利用するため、現状では同一組成の粉末のみ利用する。そこで機能発現は組織制御で対応する。さらに取り除くことのできない内包された粉末を積極的に利用する Powder/Solid 複合体<sup>13,14)</sup>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には不向きであり、創製する部位毎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。

プロセスパラメータは、単位体積当たりのエネルギー密度 ( $E$ ) で表現することが多く、ビームの出力 ( $P$ )、走査速度 ( $v$ )、走査間隔 ( $w$ )、積層厚さ ( $h$ ) の関数として、次式で表される (単位は  $J/m^3$ )。

$$E = P/(v \cdot w \cdot h)$$

$E$  は最適な造形体を作製するためのプロセスパラメータを決定する選択の一つの手がかりになる。ただし、後述するように、 $E$  はあくまでも単位体積に投入されるエネルギー量であり、周囲への抜熱は考慮されていない。実際の造形物の形状・組織設計には熱伝導・熱伝達を考慮した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。

### 3 形状と材質(組織や集合組織)の同時制御

3D プリンティングは 3 次元形状を造形するための手段としてみなされがちであるが、金属 3D プリンティングは、材質(組織や集合組織)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プロセスである。これは選択的溶解/凝固を行う際の走査パラメータ(スキャンストラテジー(層毎のレーザ走査方向の組合せ)など)を制御できることに由来する。形状と材質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、とりわけ両者の異方性・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化を実現できる可能性を秘めている。

#### 3.1 形状パラメータの制御

粉末を出発原料とする 3D プリンティングでは、構造体の形状は 3 次元 CAD による設計に基づくことから、任意の 3 次元形状制御が可能である。これにより、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要求される機能特性を発現させることができる。

近年、こうした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することを可能とし、特定の制約条件下にて最適形状をシミュレーションにより生成できる。例えば、特定の荷重負荷下にて寸法や体積の制限を設け、剛性が最大化するような形状が得られる。トポロジー最適化は、航空宇宙・輸送機産業<sup>15)</sup>、医療機器産業<sup>16)</sup>等での活用が期待されている。

#### 3.2 材質(組織や集合組織)パラメータ制御 ～Ti 合金を例に挙げて～

金属 3D プリンティングは自在な形状制御を得意とするものの、溶融池単位での熱流束の特異な方向性や、積層毎の造形ならではの繰り返し溶融/凝固と熱履歴を与えることにより材質(組織や集合組織)パラメータの制御を実現できる。とくに、単結晶化を含む集合組織制御は、近年の金属 3D プリンティングでの注目すべき技術の一つである<sup>17-45)</sup>。単結晶化によりヤング率をはじめとする力学特性の方位依存性を生じ、同一素材であるにも関わらず用途に応じた物性値を選択することが可能となる。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が、金属 3D プリンティングにより単結晶製品実現への期待が高まってきた。

例えば、単結晶化の実現は、応力遮蔽を抑制可能な骨インプラントを創製できる。bcc 構造を有する  $\beta$  型チタン合金は、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 2 に示すように、 $\langle 100 \rangle$ にて最小のヤング率値となる<sup>46)</sup>。さらに、ヤング率値  $E_{100}$  とその異方性  $E_{111}/E_{100}$  は 1 原子あたりの価電子数  $e/a$  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  $E_{111}/E_{100}$  は大きくなり、 $E_{100}$  は小さくなる(図 2)。

$$E_{100} = \frac{9}{(1/B)+(3/c')} = \frac{(c_{11}-c_{12})(c_{11}+2c_{12})}{c_{11}+c_{12}}$$



$$\frac{E_{111}}{E_{100}} = \left\{ 1 + \frac{3}{(1/B)+(3/c')} \left( \frac{1}{c_{44}} - \frac{1}{c'} \right) \right\}^{-1}$$

$$c' = 1.391 \times (e/a - 2)^{3.34} \text{ /GPa}^{47,48}$$

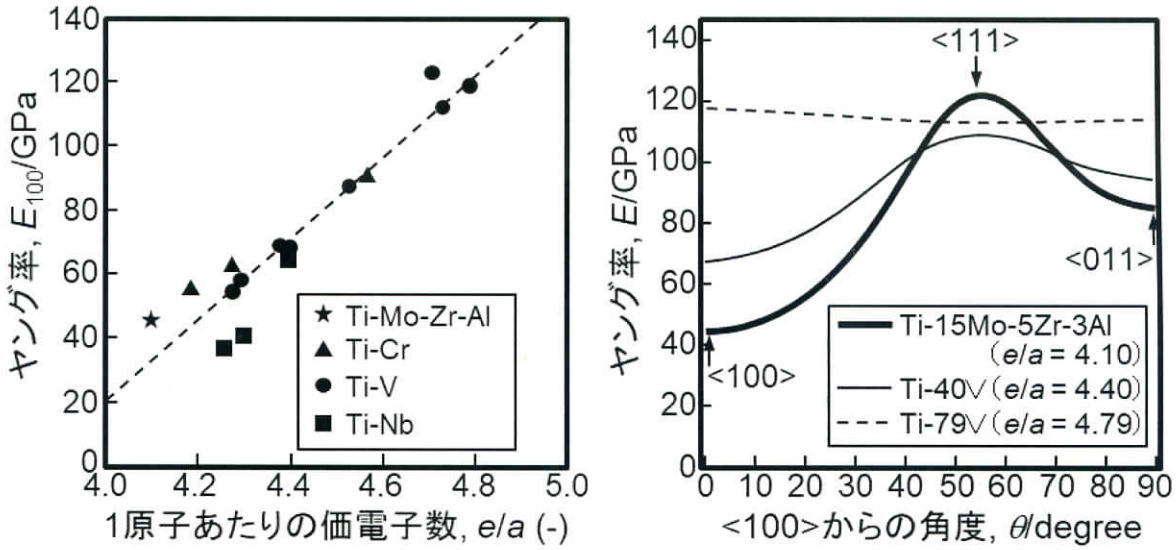


図2 Ti合金におけるヤング率の価電子数依存性( $e/a$ )と結晶方位依存性

$e/a$ が4.10と小さく、ISOにより薬事認可(ISO 5832-14)<sup>49)</sup>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<sup>46)</sup>。これは皮質骨のヤング率( $\sim 30$  GPa)に匹敵する低値であり、 $\langle 100 \rangle$ を長管骨長軸と平行方向に設置する場合においても応力遮蔽の抑制効果が期待される。

レーザ粉末床溶融結合法(PBF-LB/M)を本合金に適用し、スキャンストラテジーによる結晶成長方位の選択性制御は、図3に示すように、造形体中での結晶方位制御を実現し、造形体の特定方向に低ヤング率の $\langle 100 \rangle$ を優先配向させることを可能とする<sup>17)</sup>。この場合、 $\langle 100 \rangle$ が優先結晶配向した方位においては、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プリンティングによる材質異方性を有する部材の造形が可能になる。さらなる結晶配向性の

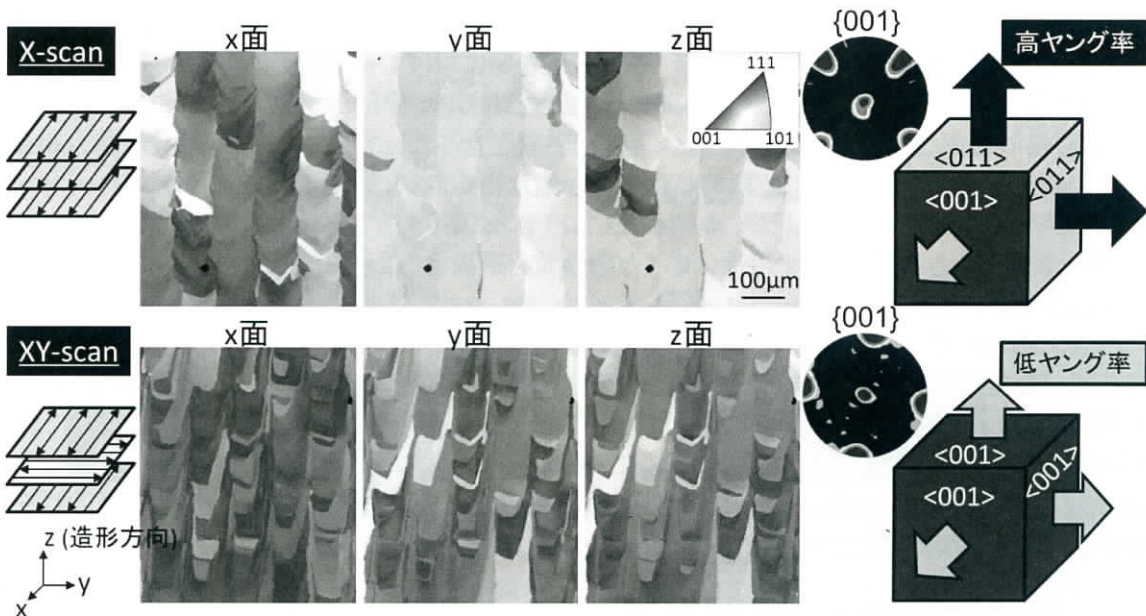


図3 Ti合金におけるX-scan、XY-scanによる結晶集合組織制御

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ことが期待される。さらに、レーザー粉末床溶融結合法を用いて、健康的なコラーゲン/アパタイト結晶からなる骨基質の集合組織を誘導できる世界初・日本発の Ti-6Al-4V 合金製脊椎スペーサが臨床応用されている<sup>50,51)</sup>。

### 3.3 材質(組織)の熱処理効果 ～TiAl 金属間化合物を例に挙げて～

金属 3D プリンティング特有の凝固後の溶融池直下での熱影響は、局所的な繰返し熱処理効果を生

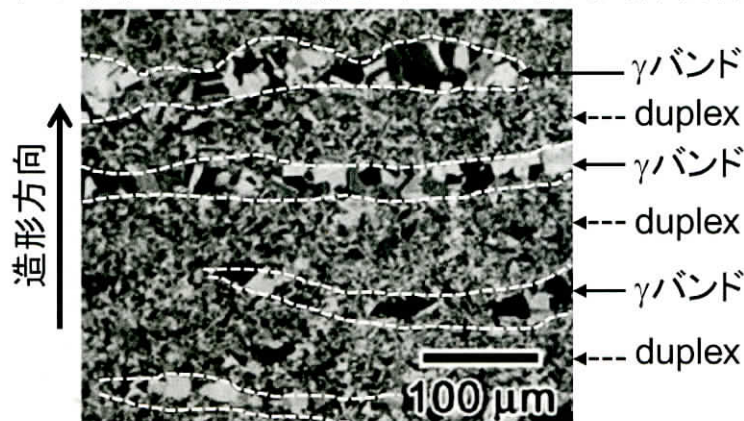


図 4 TiAl 金属間化合物における電子ビーム粉末床溶融結合法(PBF-EB/M)にて造形と繰返し熱処理を与えられ形成された  $\gamma$  バンド

じ、これを巧みに利用することで铸造などでは得られない特異な金属組織を形成する。図 4 には、電子ビーム粉末床溶融結合法(PBF-EB/M)にて造形した Ti-48Al-2Cr-2Nb (at%) 金属間化合物の光学顕微鏡写真を示す。造形体中では、等軸  $\gamma$  粒と  $\alpha_2/\gamma$  ラメラ組織からなる duplex 組織とバンド状のニア  $\gamma$  組織( $\gamma$  バンド)からなる層状構造が発達し、その周期性は造形時の積層厚さと一致する。さらに、特異層状組織形成の結果、力学特性は異方性化し、duplex/ $\gamma$  バンド界面に対して荷重軸が  $45^\circ$ の角度を有するとき、 $\gamma$  バンド部分がせん断変形を担うことで 550 MPa 以上の高い引張降伏応力と、铸造材では困難な 2%を超える大きな室温伸びの両立が達成される<sup>18)</sup>。

## 4 AM(3D プリンティング)研究会と今後の展望

2022 年 4 月 1 日に、(公社)日本金属学会 産学協創研究会の 1 つとして「AM 研究会」が、筆者を委員長、前川篤氏(大阪大学招聘教授、(株)シグマクス シニアフェロー、前・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)を副委員長として発足した<sup>52)</sup>。本 AM 研究会には、日本を代表する産官学の主要な 3D プリンティング関連研究者、技術者が世話人として参画し、多数の構成員を擁する。

本 AM 研究会は、我が国が 3D プリンティング(AM)を通じて世界の 3D プリンティングサイエンスを牽引するため、3D プリンティング分野における基礎研究から研究成果の社会実装、さらにはそのシステム構築までをシームレスに、幅広く網羅し、産学官の分け隔てなく議論するための「場」を提供するために設立された。我が国の 3D プリンティング分野、3D プリンティング関連材料分野のさらなる発展、日本発の優れた学術的研究成果の創出や高付加価値製品の実用化、さらには我が国での今後の 3D プリンティング分野の取り組みの方向性の議論・決定のため、多分野の有機的連携を促進する場として活用されている。そのため、3D プリンティングに関連する「研究開発動向調査」、「定例研究会」、「定例セミナー」、「シンポジウム」等の行事を定期的で開催している。すでに、2022 年度に 3 回の会合、2023 年度には大阪大学、東京大学で合計 4 回の会合を開催・予定しており、企業、大学関係者を中心に毎回 400~600 名の参加者が集うことからわかるように、3D プリンティングへの関心の高まりが窺える。

AM(3D プリンティング)研究会の最大のミッションは、「AM サイエンス」、「AM テクノロジー」、「AM ビジネス」を 3 本柱に、2025 年 4 月には、日本 Additive Manufacturing 学会®(日本 AM 学会)を設立するこ



とである。3D プリンティングの学術・技術を醸成し、デジタル技術と3D プリンティング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、最終的には日本の産業競争力の強化につなげることを目指し、AM 研究会、そして日本 AM 学会が3D プリンティング研究開発を先導する予定である。そのためには、日本 Additive Manufacturing 学会®(日本 AM 学会)(現:AM 研究会)がハブとなり、(一社)日本 AM 協会、(一社)日本 3D プリンティング産業技術協会、(一社)日本溶接協会 3D 積層造形技術委員会との強固な連携・協力体制のもと、産学官でのオールジャパンでの3D プリンティングものづくりネットワークを構築しつつある。こうしたオールジャパンでの取り組みが、日本の3D プリンティングを一つの基軸とした未来型モノづくりを強く先導するものと強く期待している。

## 5 おわりに

多彩な材料に基づく3D プリンティング技術は、今後益々モノづくり分野での存在感を増し、金属材料を対象とした金属3D プリンティングは、単に形状の制御に留まらず、溶融池形状や繰り返し熱処理に由来する材質(組織や集合組織)の制御をも可能とすることから、社会基盤材料における金属材料製品の特性を最大限にまで引き上げることが期待される。工業製品における多品種・大量生産(マスカスタマイゼーション)が今後の消費者のニーズに対応したモノづくりであるとするれば、3D プリンティング技術の利用は不可避である。同時に、3D プリンティングは計算機設計、情報科学、IoT、AI、DX/GX などの Society 5.0 の重点項目と深く連携しつつ、第4次産業革命へとつながるような近未来のモノづくり基盤技術といえる。

3D プリンティングは、その名の通り、元々は自在なマクロ三次元形状を実現可能な手法として出現し、産業界での世界的なブームを巻き起こした。しかしながら、材料において、その性能をつかさどるのは紛れもなく原子・分子や結晶粒、第二相の配置といったマイクロ・ナノレベルでの三次元的な構造である。中でも金属3D プリンティングによるマイクロ3D 材質制御は、我が国が、現状、世界を先導しているといっても過言ではなく、製品設計を根底から覆す可能性を持つ。

すなわち、金属3D プリンティングは、形状と材質との重畳により、製品の高機能化・高付加価値化を可能とする。そのため、金属3D プリンティングでしかなしえない「形状+材質」を考慮した全く新しい最適化設計手法が、“近未来の設計に向けて”、今後の金属3D プリンティング技術の根幹を支えることが期待される。その際、金属3D プリンティングにおける繰り返し熱処理を如何に制御するかが材質制御にとって今後理解すべき一つの重要課題である。

## 6 謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、内閣府が主導する 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(佐々木直哉 PD)」(管理法人:NEDO)、「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)、JST-CREST 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)」(JPMJCR2194)、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S)「骨異方性誘導のための「異方性の材料科学」の構築(研究代表者:中野貴由)」(平成30年度～令和4年度)(No. 25220912)の支援によって実施された。

## 【参考文献】

- 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)ウェブサイト: <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/sipk/am/>
- 2) 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.
- 3) 中野貴由, 石本卓也, 小笹良輔, 松垣あいら: 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, *溶射*, **58**, (2022), 121-128.
- 4) 金属積層造形～新たな可能性への挑戦, *ふえらむ*, **27** [12], (2022), 820-823.
- 5) 中野貴由: 第14章: 材料/製造 14-7 3D アディティブ・マニュファクチャリング(3D-AM), *テクノロジー・ロードマップ 2024-2033 全産業編*, 日経 BP, (2023), 466-469.
- 6) 中野貴由, 桐原聡秀, 近藤勝義, 西川宏, 田中学(編集): *デジタル化時代の Additive Manufacturing の基礎と応用(第2版)*, スマートプロセス学会, リプロ社, 2023年1月8日出版.



- 7) 新家光雄, 池田勝彦, 成島尚之, 中野貴由, 細田秀樹(編著): **チタンの基礎と応用**, 内田老鶴圃, 2023年3月31日出版.
- 8) 中野貴由, 石本卓也, 渡邊誠: マテリアルズインテグレーションとの協奏により最先端モノづくりを切り拓く金属 Additive Manufacturing, **金属**, **93** [4], (2023), 267-278.
- 9) ASTM Standard F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2009).
- 10) K. Hagihara, T. Nakano: Control of anisotropic crystallographic texture in powder bed fusion additive manufacturing of metals and ceramics – A Review, **JOM**, **74**, (2022), 1760-1773.
- 11) T. Nakano, K. Hagihara: Additive Manufacturing of Medical Devices, ASM Handbook, Volume **23A**, **Additive Manufacturing in Biomedical Applications**, (Edited by Roger J. Narayan), ASTM International, (2022), 416-433.
- 12) M. Armstrong, H. Mehrabi, N. Naveed: An overview of modern metal additive manufacturing technology, **J. Manuf. Proc.**, **84**, (2022), 1001-1029.
- 13) N. Ikeo, T. Ishimoto, T. Nakano: Solid/powder clad Ti-6Al-4V Alloy with low Young's modulus and high toughness fabricated by electron beam melting, **J. Alloys Compd.**, **639**, (2015), 336-340.
- 14) 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**, (2021), #959.
- 15) J.H. Zhu, W.-H. Zhang, L. Xia: Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design, **Arch. Computat. Methods Eng.**, **23**, (2016), 595-622.
- 16) X. Wang, S. Xu, S. Zhou, W. Xu, M. Leary, P. Choong, M. Qian, M. Brandt, Y.M. Xie: Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review, **Biomaterials**, **83** (2016), 127-141.
- 17) 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.
- 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, **Addit. Manuf.**, **13C**, (2017), 61-70.
- 19) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, S. yalatu, S.-H. Sun: Successful additive manufacturing of MoSi<sub>2</sub> including crystallographic texture and shape control, **J. Alloys Compd.**, **696**, (2017), 67-72.
- 20) 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. Des.**, **140**, (2018), 307-316.
- 21) 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.
- 22) 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, **Mater. Des.**, **173**, (2019), #107771.
- 23) 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.
- 24) 中野貴由: 金属 3D プリントによる特異組織形成と機能発現, **機械技術**, **67** [12], (2019), 21-27.
- 25) 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.
- 26) T. Ishimoto, S. Wu, Y. Ito, S.-H. Sun, H. Amano, T. Nakano: Crystallographic orientation control of 316L austenitic stainless steel via selective laser melting, **ISIJ Int.**, **60**, (2020), 1758-1764.
- 27) H. Amano, T. Ishimoto, R. Sukanuma, K. Aiba, S.-H. Sun, R. Ozasa, T. Nakano: Effect of a helium gas atmosphere on the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy built with laser powder bed fusion: A comparative study with argon gas, **Addit. Manuf.**, **48**, (2021), #102444.
- 28) S.-H. Sun, K. Hagihara, T. Ishimoto, R. Sukanuma, 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, **Addit. Manuf.**, **47**, (2021), #102329.
- 29) A. Takase, T. Ishimoto, R. Sukanuma, T. Nakano: Surface residual stress and phase stability in unstable  $\beta$ -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy manufactured by laser and electron beam powder bed fusion technologies, **Addit. Manuf.**, **47**, (2021), #102257.
- 30) 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.
- 31) K. Hagihara, T. Ishimoto, M. Suzuki, R. Ozasa, A. Matsugaki, P. Wang, T. Nakano: Factor which governs the feature of texture developed during additive manufacturing; clarified from the study on hexagonal C40-NbSi<sub>2</sub>, **Scr. Mater.**, **203**, (2021), #114111.
- 32) K. Cho, H. Kawabata, T. Hayashi, H. Y. Yasuda, H. Nakashima, M. Takeyama, T. Nakano: Peculiar



- microstructural evolution and tensile properties of  $\beta$ -containing  $\gamma$ -TiAl alloys fabricated by electron beam melting, **Addit. Manuf.**, **46**, (2021), #102091.
- 33) 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.
  - 34) 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.
  - 35) A. Takase, T. Ishimoto, R. Sukanuma, T. Nakano: Lattice distortion in selective laser melting (SLM)-manufactured unstable  $\beta$ -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy analyzed by high-precision X-ray diffractometry, **Scr. Mater.**, **201**, (2021), #113953.
  - 36) 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.
  - 37) M. Okugawa, Y. Ohgashi, 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, **J. Alloys Compd.**, **919**, (2022), #1658126.
  - 38) D. E. Jodi, T. Kitashima, Y. Koizumi, T. Nakano, M. Watanabe: Manufacturing single crystals of pure nickel via selective laser melting with a flat-top laser beam, **Addit. Manuf. Lett.**, **3**, (2022), #100066.
  - 39) T. Todo, T. Ishimoto, O. Gokcekaya, J. Oh, T. Nakano: Single crystalline-like crystallographic texture formation of pure tungsten through laser powder bed fusion, **Scr. Mater.**, **206**, (2022), #114252.
  - 40) M. Mizuno, K. Sugita, K. Do, T. Ishimoto, T. Nakano, H. Araki: Stability of vacancies in  $\beta$ -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy fabricated via laser powder bed fusion, **Addit. Manuf. Lett.**, **7**, (2023), #100162.
  - 41) H. Amano, T. Ishimoto, K. Hagihara, R. Sukanuma, K. Aiba, S.-H. Sun, P. Wang, T. Nakano: Impact of gas flow direction on the crystallographic texture evolution in laser powder bed fusion, **Virtual Phys. Prototyp.**, **18**, (2023), #e2169172.
  - 42) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, Y. Nishikawa, Y. S. Kim, A. Matsugaki, R. Ozasa, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, H. S. Kim, Y. Miyabayashi, T. Nakano: Novel single crystalline-like non-equiatomic TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion, **Mater. Res. Lett.**, **11**, (2023), 274-280.
  - 43) T. Ishimoto, T. Nakano: Review - Microstructural control and functional enhancement of light metal materials via metal additive manufacturing, **Mater. Trans.**, **64**, (2023), 10-16.
  - 44) H.-J. Kim, K. Mori, T. Nakano, H. Yamashita: Robust self-catalytic reactor for CO<sub>2</sub> methanation fabricated by metal 3D printing and selective electrochemical dissolution, **Adv. Funct. Mater.**, **33**, (2023), #2303994.
  - 45) 中野貴由, 石本卓也, 松垣あいら, 小笹良輔, ゴクチェカヤオズカン, 安田弘行, 趙研, 小泉雄一郎, 奥川将行, 吉矢真人, 藤井進, 多根正和, 三好英輔, 東野昭太: 金属 3D プリンティングの特異界面形成による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びつつ~, **まてりあ**, **63**[1], (2024), 36-41
  - 46) 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.
  - 47) 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.
  - 48) E.S. Fisher, D. Dever: Relation of the c' elastic modulus to stability of b.c.c. transition metals, **Acta Metall.**, **18**, (1970), 265-269.
  - 49) ISO 5832-14:2007, Implants for surgery -- Metallic materials -- Part 14: Wrought titanium 15-molybdenum 5-zirconium 3-aluminum alloy (2007).
  - 50) 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.
  - 51) 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.
  - 52) AM (Additive Manufacturing) 研究会, <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp6/nakano/jiam/>