

# 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

中野 貴由, 石本 卓也, 渡邊 誠

欲しい性能から材料・プロセスをデザインする『逆問題 MI (マテリアルズインテグレーション) システム』の構築は、我が国における材料の研究開発サイクルを短縮し、多くの高性能な新材料創製を導く、まさに「マテリアル革命」を引き起こすものと期待される。本稿では、MI システムの社会実装に向けて、その構築と検証を推進する国家プロジェクトとしての『戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)』における取り組みの概要と MI システムによる材料開発の進捗について、未来のモノづくりの中核の最先端技術としての金属 Additive Manufacturing を軸に解説する。

## はじめに

我が国の製造業は、その品質の高さから「メイド・イン・ジャパン」との代名詞に象徴されるように、世界のモノづくりを牽引してきた。その強みの一つである、年月をかけて培われてきた熟練技術者の「匠の技」の継承、すなわち、アナログ方式により、これまで世界でのモノづくり競争力を下支えしてきた。一方で、製造業は大変革の時代を迎え、AI (Artificial Intelligence), IoT (Internet of Things), DX (Digital Transformation), ビッグデータといった、サイバー・フィジカルシステムの高度な融合が試みられ、デジタル技術活用が世界的に推進されている。デジタル技術との相性の良い Additive Manufacturing (AM) の発展は、この流れを強く後押ししている。

製造業の基盤をなす材料科学・工学分野においても、デジタル化やデータベース蓄積による自動化推進への流れは全く同様であり、デジタル技術を駆使した材料探索・開発手法の刷新に向けての集中投資が行われることで、モノづくりシステムそのものが大きく変わりつつある。こうした中、我が国の製造業が世界でのプレゼンスを維持するため、我が国独自のデジタル技術としての『マテリアルズインテグレーション (Materials Integration: MI)』が構

築され、計算機上 (サイバー空間) でプロセスから性能を一貫予測 (順問題) し、材料開発効率を向上させるための基盤が整備されてきた。ただし、さらなる材料開発力の向上と時々刻々変化する新たなニーズへの臨機応変な対応には、欲しい性能から材料・プロセスをデザインする『逆問題 MI システム』への進化が必須となる。さらには、当該システムのフィジカル空間での実証は不可欠である<sup>1)</sup>。

本稿では、未来の製造業を牽引するメインプレーヤーとなる金属 AM を軸として、我が国が推進している MI 基盤構築とその検証に取り組んでいる国家プロジェクト「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)」での第 1 期における関連する研究開発の概要、さらには、2023 年 3 月末に向けて進められてきた 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 MI を駆使した材料開発の先進的な取り組みについて紹介する。

## 金属 Additive Manufacturing (AM)

金属 Additive Manufacturing (AM)、もしくは金属 3D プリンティングは、粉末もしくはワイヤ状などの金属原料を用い、ボトムアップ方式で加算的に任意の 3 次元形状をもつ製品を作製可能な最先端のモノづくりプロセスである。金属 AM は、従来の減算的加工手法による大量生産において、形状制約に

より困難とされてきた多くの課題を克服可能とし、近年、学术界・産業界の双方で大きな注目を集めている<sup>2)3)</sup>。紙上に文字を印刷するかのごとく、薄い金属層を層ごとにプリントし、3次元に積層することで、幾何学的に複雑な形状を有する部品がワンストップ、かつ(ニア)ネットシェイプで獲得できる。

金属AMに関する産学での研究開発は、参画者(機関)、予算ともに年々その規模が拡大し、衰える兆しを見せない。図1に、2000年以降のAMに関する学術論文出版数の推移を示す。とりわけ2014年前後からの論文出版数の増加率が著しく、AM研究の世界的な隆盛を示している。2014

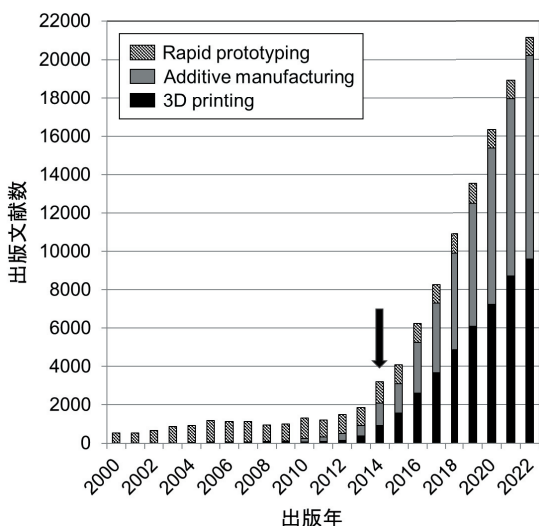


図1 科学技術論文誌におけるAM関連の文献数の推移。Scopusにて、“rapid prototyping”、“additive manufacturing”、“3D printing”を論文タイトル、アブストラクト、キーワードに含む文献を抽出(2023.1.25時点)。

年は、オバマ米国元大統領が2013年の一般教書演説にて、“The 3D Printing that has the potential to revolutionize the way we make almost everything. (3Dプリンタはあらゆるモノづくりに革新をもたらす可能性を秘めている)”と言及した翌年に当たり、これをきっかけにAMブームが世界を席卷した。

ASTM (ASTM F2792-12a)に基づき、AMは7種類のカテゴリに分類される。その中で、金属に適用可能なものは、主として、粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion: PBF)法(図2(a))、指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition: DED)法(図2(b))、結合剤噴射(Binder Jetting: BJT)法である。とりわけ、微細粉末を原料としてlayer-by-layerにて三次元形状を構築するPBF法は、複雑形状を精緻に造形することが可能である。さらに近年では、造形体内部の金属組織、すなわち、結晶集合組織(原子の並びの強さや向き)や析出物の晶析出までも制御可能であることが明らかになってきた<sup>5)~9)</sup>。すなわち、PBF法は、形状制御と材料組織の両面から金属製品の性能付与を可能とする<sup>10)</sup>。

PBF法のもう1つの特徴は、プロセスパラメータの組み合わせの多様性といえる。粉末を溶融するための熱源として、主にレーザビーム方式(PBF-LB/M)と電子ビーム方式(PBF-EB/M)がある。両者は、ビームエネルギーやエネルギー吸収率が大きく異なり、例えば、電子ビームを用いる場合には高温での予加熱を行うため、レーザビームを用いた場合とは、形成組織や関連する特性はしばしば異なる。さらに、最適な造形条件探索と性能発揮のためには、ビームパワー、ビーム走査速度、ハッ

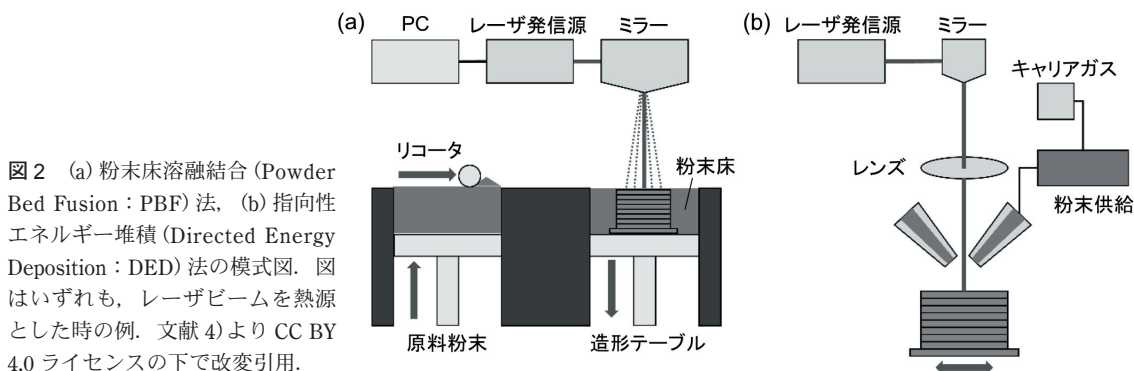


図2 (a) 粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion: PBF)法、(b) 指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition: DED)法の模式図。図はいずれも、レーザビームを熱源とした時の例。文献4)よりCC BY 4.0 ライセンスの下で改変引用。

チ間隔、積層厚さ、ビーム走査戦略(層ごとの走査方向の組み合わせ)といった多様なプロセスパラメータの制御・組み合わせが必要である。PBF法は、簡便に多種のパラメータを変更して材料を作製することが可能であるという点では、コンビナトリアル的に最適解を導くために有利な手法であるといえる。一方で、作製した材料をフィジカル空間にて解析・評価する過程には、多大なリソースを投入する必要がある、これがボトルネックとなり金属新材料の研究開発サイクルの大幅な短縮にはつながらない。加えて、ほとんどの場合、出発原料として合金粉末を作製する必要があることから、多数の組成を網羅的に造形することができないことも克服すべき課題である。

ただし、最適な合金組成とプロセスパラメータの候補を、高精度に推定することができるようになれば、金属PBF法は、材料開発のサイクルを高速化し、より高性能な金属製品の創出に貢献することが期待される。それを可能とするために、我が国において急ピッチで構築が進められているのが、「マテリアルズインテグレーション」のコンセプトである。

## マテリアルズインテグレーションとは？

マテリアルズインテグレーション (Materials Integration : MI) は、2010年代中盤に日本で提案された概念であり、材料開発で重要となる4つの要素、すなわちプロセス、(微細)構造、特性、性能(図3(a))をコンピュータ上で結び付けて、プロセスから性能

までを一気通貫で予測しようとする概念である<sup>11)</sup>。

従来の材料開発(図3(b)左)は、フィジカル空間での試行錯誤による実験の繰り返しに基づくため、膨大な時間とコストが必要とされてきた。数多くの金属組成に対し、多岐にわたる条件でのプロセッシング(熱処理に限定しても、温度、時間、回数、冷却方法等、条件の選択幅は極めて大きい)により作製された材料の組織や特性は、1つずつ地道に解析することが求められてきた。自ずと、試行錯誤数(=検証可能な条件の数)は制限され、最適解を見逃す可能性があった。一方で、計算機上(=サイバー空間)でのバーチャルな実験を可能とするMI(図3(b)右)は、材料や製品の研究開発時間を大幅に短縮する。さらには、サイバー空間で紐づけられた材料(組成)-プロセスパラメータ-微細構造-機能特性情報を用いれば、内挿的ではあるものの制御因子の発見や見落としていた最適解の発見につながる可能性がある。つまり、従来型の、材料・プロセスから機能特性を導く「順方向」のみならず、必要とされる機能特性から最適な材料やプロセスを導く「逆方向」の解析により、サイバー空間にて新材料を創製することも可能となる。

こうした中、これまでに我が国で高度に蓄積されてきた材料科学の成果(データベース)と、近年目覚ましい進化を遂げているデジタル技術により、MIコンセプトの実現と社会実装、すなわち、統合型材料開発システムの完成がもたらされることが期待されてきた。

この実現のため、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第1期「革新的構造材料」

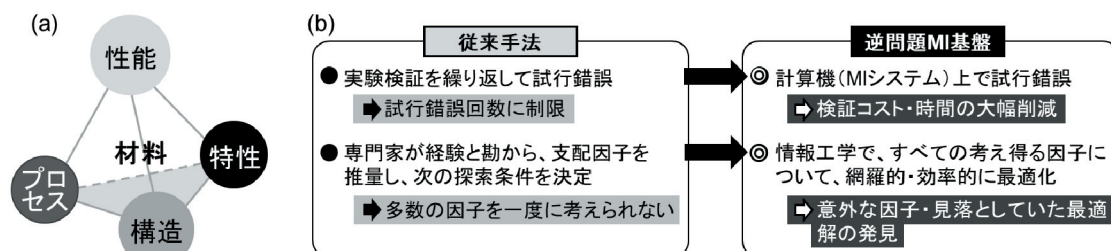


図3 (a) 材料開発で重要となる4つの要素<sup>11)</sup>。(b) 従来手法に対する逆問題MI基盤に基づく材料開発のメリット。実験から計算へ、限定的な探索から網羅的・効率的な探索へと、材料開発手法の刷新がもたらされる。戦略的イノベーション創造プログラム「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」パンフレット<sup>12)</sup>より改変引用。

にて、MI のコンセプトが提案・実証され、その後、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」において、社会実装を目指した研究開発が行われてきた（SIP 第 2 期は 2023 年 3 月で終了し、今後、より強く社会実装を指向した SIP 第 3 期のプログラムへと移行）<sup>13)</sup>。

## 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」と C 領域「逆問題 MI の実構造材料への適用（粉末・3D 積層）」での取り組み<sup>14)</sup>

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」では、① 我が国が開発してきた MI の技術基盤を生かし、必要とされる性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」に対応した次世代型 MI システムを世界に先駆けて開発すること、さらに、② MI システムを活用して、発電プラント用材料や航空用材料を出口とし、競争力ある革新的な高信頼性材料を設計・開発・製造することを

ミッションとして掲げている。すなわち、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した新たな材料開発手法による「マテリアル革命」を加速する<sup>1)</sup>。

本プログラムは、三島良直 PD、毛利哲夫サブ PD の指揮の下、A 領域「先端的材料・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 領域にて展開されてきた（図 4）。本項では、筆者の中野、渡邊が領域長を務める C 領域を中心としつつ、次世代型 MI システム構築・活用の心臓部を担い C 領域と密接に連携してマテリアル革命を推進する A 領域の一部について紹介する。

A 領域（領域長：NIMS 出村、東大 榎）は、『Society 5.0 の具現化として、欲しい性能から、必要となる材料の構造・特性を提案し、さらに、それを実現するプロセスを提案するための、材料科学・工学とデータ科学を融合した新しい統合型材料開発システムを構築する』ことを目標に掲げた。とりわけ、金属系構造材料に特化した材料設計 MI シス



図 4 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。



テムとして、NIMS を拠点として MInt (Materials Integration by Network Technology) システムを開発している。MInt 上で、ユーザーはさまざまなモジュールを組み合わせ、多種多様な材料の問題を解くことができる。さらに MInt は、モジュールを追加することで新しい材料課題に対応する「進化するシステム」であり、先端プロセスである金属 AM に特化した材料・プロセス設計への拡張すら可能である<sup>15)</sup>。

C 領域 (領域長: 大阪大 中野, NIMS 渡邊) 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』ことを目標とした。

C 領域は、C1「Ni 基合金の 3D 積層造形プロセスの開発」、C2「高性能化のための Ni 粉末鍛造プロセスの開発」、C3「Ti 合金の粉末・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」、C5「セラミックス基複合材料の航空機エンジン部材化技術の開発」の 5 チームから編成されている (図 4)。ただし、C3 は一定の成果が得られたため、2020 年度末を以て研究開発を完了した。

そのうち、C1、C4 は、本稿のトピックである金属 AM を基盤とし、材料設計 MI システムを活用することで、組成 (合金設計)、プロセス両面から金属材料 (それぞれ Ni 基耐熱合金、TiAl 基耐熱合金) の組織制御と高機能化を実現した。C1 は A2「プロセスデザイン (リーダー: NIMS 渡邊)」との連携により、新規合金の創出に成功している。以下は、こうした特筆すべき成果の一例を紹介する。

## Ni 基合金の組織・力学特性制御と MI に基づくクラックフリー造形体獲得のための組成・プロセスパラメータの確立

Society 5.0 ならびにカーボンニュートラル社会

の実現に向けて温室効果ガスの排出削減が必須であり、水素社会の実現に向けた研究開発の推進が求められている。とりわけ、発電部門における温室効果ガスの排出抑制は喫緊の課題であり、一つの解決策として、水素燃焼ガスタービン発電の活用が挙げられる。その実現にあたっては、水素ガス燃焼の制御に困難 (燃焼温度の高温化や燃焼速度の増大) があり、燃焼バーナ設計の複雑化、加えて、材料の耐久性能の向上への要求がますます高まるものと見込まれる。

Ni 基合金の AM 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、水素燃焼ガスタービン向け燃焼バーナへの適用が期待されている。しかしながら、前述のように、本プロセスが要求する複雑で多岐に渡るパラメータの最適化が大きな課題であった。水素燃焼対応の高耐久化燃焼バーナの世界に先駆けた実現には、サイバー空間とフィジカル空間の有機的連携の下、MI システムによる新規 Ni 基合金の組成最適化と、実造形・解析による実証を高サイクルで実行することが不可欠であった。

C1 チームでは、複雑な水素燃焼バーナを実現するため、高い形状精度を有する PBF-LB/M 法を用いた。さらに PBF-LB/M 法は、複雑な三次元形状を実現できるのみならず、急速な溶融・凝固現象にともなう特異組織の形成を特徴とし、その特徴を生かした新たな合金創出が期待された。一方で、高温での高強度発現に不可欠な  $\gamma'$  析出強化型の Ni 基合金 ( $\gamma'$  相は主に  $L1_2$  構造を示す  $Ni_3(Al,Ti)$  金属間化合物相) においては、造形プロセス中のクラック発生がボトルネックであった。すなわち、高温強度発現に必須の  $\gamma'$  相析出が造形中の割れを促進するのである。この克服のため、優れた高温強度と造形中のクラックフリー化という相反する性質を共存させるチャレンジングな課題に、MI によるデータ駆動型の研究開発による取り組みが生かされた。

図 5 は、本研究開発での取り組みの流れと成果をまとめたものである。

A2 チームとの連携により、MI システムを用い、

強度指標・割れ指標に基づいて候補となる合金組成をサイバー空間上で選定した。複数の候補合金に対して、フィジカル空間にて粉末製造・造形・解析を行い、サイバー/フィジカル間の整合性検証を行った。同時に、既存のいくつかの合金に対するフィジカル空間での組織プロセスマップの構築により、合金組成、固溶強化型/析出強化型の別に依存せず、プロセスパラメータ変化に対する組織変化の傾向が類似していることを示し<sup>16)17)</sup>、Ni基合金の組織制御の統一的な指針を得ている。さらに、フィジカル空間にて蓄積した、①造形パラメータ⇔②金属組織⇔③力学諸特性に関するデータベースに対し、項目間をつなぐ多層ニューラル

ネットワークからなる機械学習 MI を構築し、順方向解析(①→②, ②→③, ①→③)、逆方向解析(③→②, ②→①, ③→①)を可能としている。とりわけ逆方向解析により、所望の組織を得るための造形条件を高精度に予測可能となり(図6)、新合金における組織の最適化制御が即座に可能となり、製造実証サイクルのさらなる高速化を可能とした。

MI システムと逆解析を駆使することで、平衡状態での $\gamma'$ 析出量が多いにもかかわらず、造形時のクラック形成が大幅に低減された(クラックフリー)いくつかの合金の創製に成功している<sup>18)</sup>。さらに、高温強度試験、燃焼バーナの実圧燃焼試験

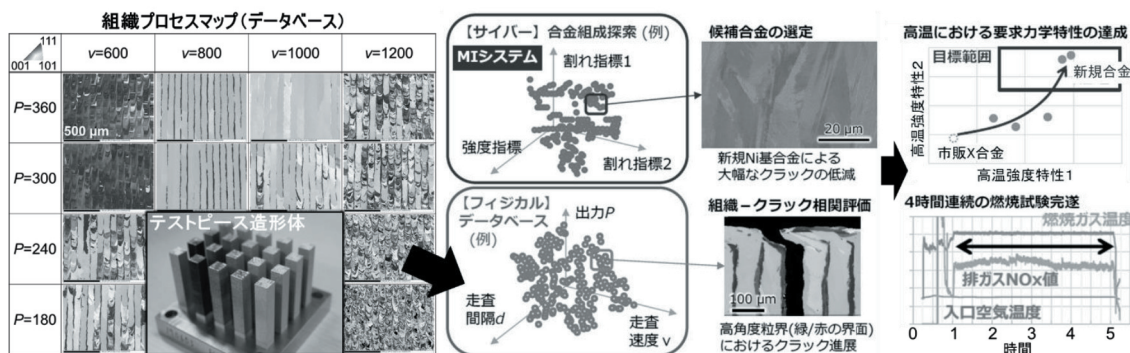


図5 C1 チームにおける取り組みの流れと主な成果。P：レーザー出力[W]，v：レーザー走査速度[mm/s]。

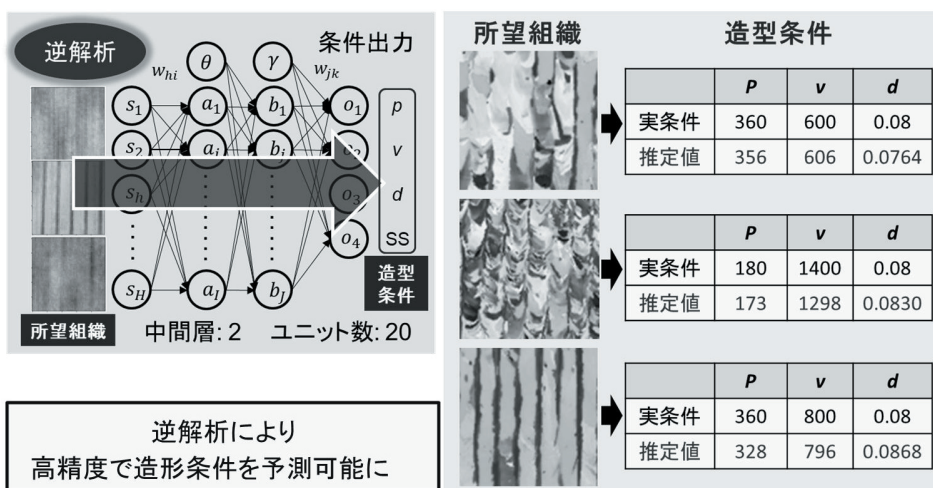


図6 機械学習 MI による逆解析による、求める組織を実現するためのプロセスパラメータの推定と、実際のパラメータと推定値との比較。

においても目標とする特性を上回り、新規な高機能 Ni 基合金の創製に成功した。

こうした取り組みの中で、PBF-LB/M によって特異的に形成される層状の結晶集合組織が、強度上昇に寄与する<sup>16)</sup>一方で、造形時や時効熱処理時のクラック発生の起点となることが示された。すなわち、用途に応じて組織を自在に作り分けることが不可欠である。前述の機械学習 MI による統計学的な最適解の導出と並行して、物理現象に根差した計測（フィジカル空間）と計算（サイバー空間）に基づき、PBF プロセス中での結晶集合組織形成機構の解明に取り組んできた。PBF 法特有の熱源走査によって形成される溶融池の形状<sup>19)20)</sup>、溶融池内での凝固の際の固液界面での温度勾配と界面移動速度<sup>16)</sup>、不均一核生成サイト（晶出物や融け残り等）の有無<sup>21)22)</sup>が結晶集合組織形成の主要な制御因子であり、Ni 基合金においては、レーザプロセスパラメータ<sup>16)</sup>やレーザ強度分布の形状<sup>23)</sup>によって溶融池形状を変化させることにより、単結晶様組織や層状組織の作り分けを可能とした。

## TiAl 造形プロセス最適化のための逆問題 MI システムの構築と高精度タービン翼造形の実現

$\gamma$ -TiAl 合金は、低密度、優れた高温強度と耐クリープ性といった特長から、航空宇宙産業や自動車産業において魅力的な構造材料であり<sup>24)</sup>、航空機エンジンの低圧タービン翼や自動車エンジンのターボチャージャーホイールとして実用化に成功している<sup>25)</sup>。 $\gamma$ -TiAl 部材は一般的に精密鑄造にて成形されるが、酸素や窒素などとの反応性が高い、金型との界面で反応層が形成されやすいといった課題がある。鑄造後に反応層を切削除去する必要があるものの、室温での加工性に乏しいことから精密な加工が困難であり、歩留まりが悪く、生産コストが高くなる。そこで、 $\gamma$ -TiAl 合金の革新的な製造プロセスの確立が必要となる。

真空中にてネットシェイプ成形が可能な PBF-

EB/M 法は、こうした課題を一度に解決するための手段になりうる。しかしながら、TiAl の室温での低い延性が冷却時にクラックを誘起する等、PBF-EB/M 法においては形状の維持・高密度化さえも困難であった。

C4 チームでは、直方体状のテストピース（図 7 (a)）により TiAl の PBF-EB/M 造形体のプロセスパラメータ・寸法精度・欠陥率・微細組織—力学特性を繋ぐデータベースを構築するとともに、本データベースを活用した独自の逆問題 MI システムの確立により高品質なタービン翼の実形状造形体（試作品）の獲得を目指した。

造形体の微細組織は、プロセスパラメータに依存して大きく変化した。図 7 (b), (c) には、高エネルギー密度（高ビームパワー・低走査速度）と低エネルギー密度（低ビームパワー・高走査速度）のプロセスパラメータにて作製した Ti-44Al-4Cr (at%) 合金造形体の微細組織と、条件に依存した相変態挙動 (time-temperature-transformation (TTT) 図と冷却曲線) を示す<sup>26)</sup>。

高エネルギー密度条件では、 $\beta$  相が初晶として晶出し、引き続き、温度低下とともに  $\beta$  相が  $\beta + \alpha$  の二相へと分離する。この際、Cr が  $\beta$  相に、Al が  $\alpha$  相へと分配される。さらに冷却が進むと、Al に富む  $\alpha$  相中に  $\gamma$  相が析出し、微細な  $\alpha_2/\gamma$  ラメラ領域が形成される。同時に、Cr に富む  $\beta$  相は、 $\beta + \gamma$  二相温度域で予加熱により焼鈍されることで  $\beta/\gamma$  二相組織へと変化する。

低エネルギー密度条件の場合でも、 $\beta$  相が初晶として晶出するが、冷却速度が速いため、 $\beta + \alpha$  二相領域での相分離が生じにくく、結果としてマッシュ変態により濃度分配することなく直接  $\alpha$  相が形成される。この時、 $\alpha$  相中の Al 濃度は高エネルギー密度条件の場合よりも低く、この低 Al 濃度化が、 $\alpha_2/\gamma$  ラメラのさらなる微細化へとつながる。

プロセスパラメータの差異に基づくこうした微細組織の違いは、力学性能に顕著な影響を及ぼす。さらに、寸法精度や欠陥率もプロセスパラメータに依存して大幅に変化する。こうしたフィジカル空間での実験データを蓄積し、高品質なデータ



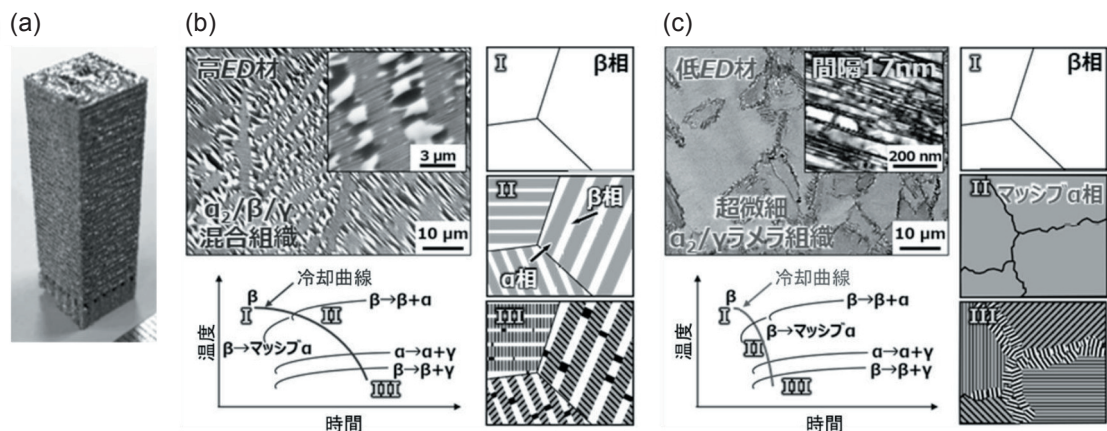


図7 (a) 底面サイズ 10 mm × 10 mm の角柱状テストピースの外観写真。(b) 高エネルギー密度, (c) 低エネルギー密度条件での、エネルギー密度と微細組織の関係。エネルギー密度 (= 電子ビーム照射条件) に依存して冷却速度が異なることで、全く異なる微細組織が形成される。ED: Energy density. 文献26)よりCC BY 4.0 ライセンスの下で改変引用。

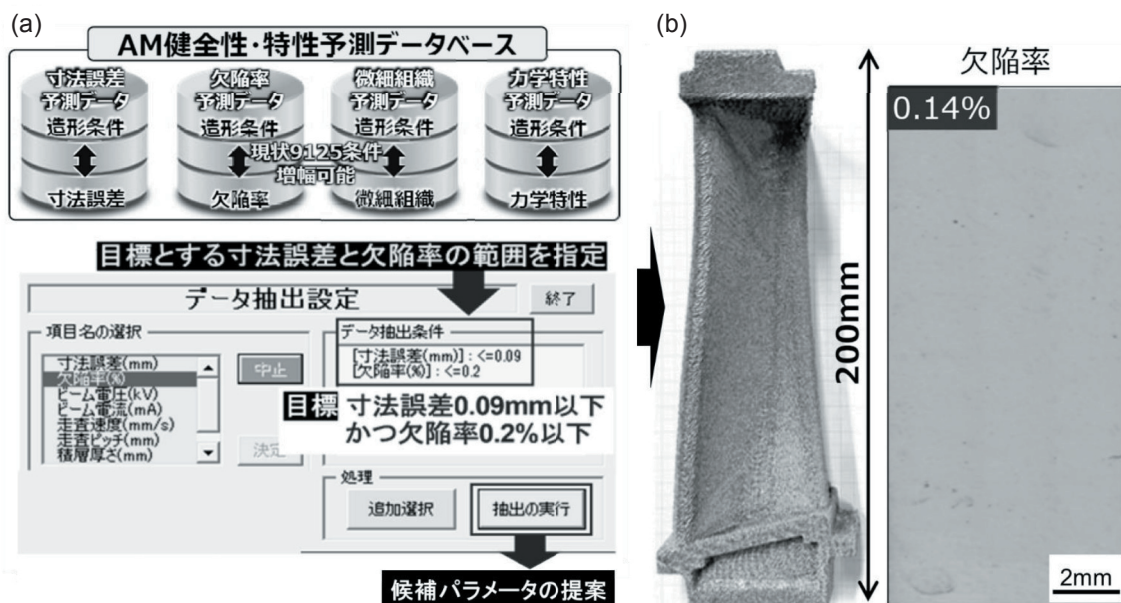


図8 (a) 集積したデータベースに基づき構築した逆問題 MI システムのインターフェイスと、候補パラメータの出力。(b) 逆問題 MI によって提案された候補パラメータを用いて PBF-EB/M 法にて造形されたタービン翼の試作品。

ベースを構築することが可能となる。

データベースを活用し、寸法精度、欠陥率、微細組織や力学特性を予測するニューラルネットワークに基づいた逆問題 AI が新規に構築された。図 8 (a) は、逆問題 AI にて、寸法誤差と欠陥率を目的変数とし、最適プロセスパラメータを予測した場合の例を示す。実際に逆問題 AI によって提案

されたプロセスパラメータにて、高精度・高密度な大型タービン翼 (幅 50 mm × 高さ 200 mm) の造形に成功し (図 8 (b))、逆問題 AI を駆使した TiAl 合金 AM の先駆的な成功例となった。本逆問題 AI は、粉末組成が異なる場合にも対応可能であり、合金設計-検証サイクルの高速化にも大きく貢献するものと期待される。



## AM を基盤としたデジタルモノづくりの発展に向けて

金属 AM に関する研究開発は、ここまでで紹介した SIP プロジェクト以外にも、企業、大学・国研、公設試の単位で、もしくはこれらの協働にて、種々の研究費を活用しながら実施されている。しかしながら、こうした成果を世界での競争力のあるモノづくりへと昇華させるためには、現在の最先端の知見を集約し、それを基盤として、産学官が一体となり、基礎から応用まで多分野の専門性を持つ研究者・技術者が集結し、オールジャパンの体制で AM 研究開発とその産業適用に邁進する仕組み作りが必須である。

AM に関する最先端の知見の集約と国内への周知による AM 研究開発の裾野拡大を狙いとし、「デジタル化時代の Additive Manufacturing の基礎と応用」(リブロ社 発行；一般社団法人スマートプロセス学会 監修；中野貴由、桐原聡秀、近藤勝義、西川宏、田中学 編集)が 2022 年 1 月 8 日に発刊された。AM に関する国内での関心の高さから第 1 版 1500 冊をほぼ完売し、2023 年 1 月 5 日に第 2 版が出版されている(図 9)。本書では、産学官の枠組みを超えた AM ならびにその関連分野に関わる最先端を担っている研究者・技術者が総登場しており、まさにオールジャパンで作り上げた一冊と言える。本書は、学部学生ならびに一般読者、さら

にはさまざまな角度から AM に関わる専門の研究者・技術者、さらに専門外の AM に興味のある読者をも対象としており、AM の現時点でのエッセンスが結集した書籍となっている。本書は、前述の SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」が協賛し、我が国を代表する AM 書籍といえる。

さらに、こうしたプロジェクトの推進や関連学協会での精力的な活動、学術雑誌の出版や書籍の発刊といった取り組みをきっかけとし、2022 年 4 月 1 日に、公益社団法人日本金属学会 産学協創研究会の 1 つとして「AM 研究会」が、中野貴由を委員長(代表世話人)、前川篤(大阪大学招聘教授、株式会社シグマクシス 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(副代表世話人)として発足した<sup>27)</sup>。本研究会には、我が国を代表する産官学の主要な AM 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。

本研究会は、我が国が AM を通じて世界の AM 科学を牽引するため、AM 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 AM 分野、AM 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



図 9 基礎研究から実用化に至るまでの AM のエッセンスが結集された「デジタル化時代の Additive Manufacturing の基礎と応用」。



図 10 2023 年 1 月 20 日にハイブリッド開催された 2022 年度 AM 研究会第 2 回委員会 (於ベルサール六本木グランドコンファレンスセンター) の様子。

は我が国での今後の AM 分野の取り組みの方向性の議論・決定のため、多分野の有機連携を促進する場として活用されている。

そのため、AM 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」等の行事を定期的に開催する。すでに、昨年 8 月と本年 1 月に 2 回の会合を開催しており、企業、大学関係者を中心に延べ 1000 名を超える出席者を集め、AM への関心の高まりが窺えた。

そして、AM 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 本の矢として、2025 年 4 月を目途に、日本 Additive Manufacturing 学会<sup>®</sup>(日本 AM 学会)を設立することである。AM の学術・技術を醸成し、デジタル技術と AM 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て、AM 研究会、そして日本 AM 学会が AM 研究開発を先導していく予定である。

そのためには、日本 Additive Manufacturing 学会<sup>®</sup>(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 AM ものづくりネットワークを構築しつつある。

## おわりに

本稿では、デジタルモノづくりへの転換加速のための我が国の取り組みとしての、マテリアルズインテグレーション (MI) 基盤の構築と MI を駆使した金属 Additive Manufacturing (AM) による材料開発の現状について、SIP 第 1 期・第 2 期での研究開発内容を中心に解説し、デジタルモノづくりの発展、産業適用加速のための我が国での現状、そして今後の活動について紹介した。

AM 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ている。しかしながら、材料において、その性能を司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ミクロ・ナノレベルでの三次元的な構造である。AM (3D プリンティング) は今や、MI と融合することにより、人の手で直接触る (制御する) ことのできないミクロな 3D 構造を高い精度と再現性で「プリント」可能なテクノロジーとなってきた。金属 AM によるミクロ 3D 構造制御は、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い。

現在の AM ブームが、単なるブームとして終わることなく、MI と AM の共創による我が国のデジタルモノづくりの社会実装が、今後、加速度的に進むものと確信している。筆者らもそのメンバーとして、オールジャパンでの日本 Additive Manufacturing 学会<sup>®</sup>の設立を踏まえつつ、我が国の製造業の一層の発展・変革促進に微力ながらも、尽力する所存である。

## 謝辞

本稿で紹介した研究は、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)、ならびに、JST-CREST ナノ力学「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 ~」(JPMJCR2194) の支援によって実施された。

## 参考文献

- 1) 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局, 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 研究開発計画 2022 年 5 月 11 日, [https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/5\\_material.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/5_material.pdf).
- 2) D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk and C. Emmelmann: Additive manufacturing of metals, *Acta Mater.*, **117** (2016), 371-392.
- 3) T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De and W. Zhang: Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Prog. Mater. Sci.*, **92** (2018), 112-224.
- 4) R. Shah, N. Pai, A. Rosenkranz, K. Shirvani and M. Marian: Tribological behavior of additively manufactured metal components, *J. Manuf. Mater. Process.*, **6** (2022), 138.
- 5) K. Hagihara and T. Nakano: Control of anisotropic crystallographic texture in powder bed fusion additive manufacturing of metals and ceramics—A review, *JOM*, **74** (2022), 1760-1773.
- 6) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, Y. Nishikawa, Y. S. Kim, A. Matsugaki, R. Ozasa, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, H.S. Kim, Y. Miyabayashi and T. Nakano: Novel single crystalline-like non-equiatom TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion, *Mater. Res. Lett.*, **11** (2023), 274-280.
- 7) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S. H. Sun and 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.
- 8) S. H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa and 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.
- 9) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto and 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.
- 10) 中野貴由, 石本卓也, 萩原幸司: 粉末積層造形法による形状と組織制御による異方性付与, 粉体及び粉末冶金, **64** (2017), 259-264.
- 11) 日刊工業新聞 2022 年 2 月 16 日, <https://newswitch.jp/p/31570>.
- 12) 国立研究開発法人科学技術振興機構: 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, (2019).
- 13) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP: エスアイビー), <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 14) 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.
- 15) M. Demura and T. Koseki: SIP-Materials Integration Projects, *Mater. Trans.*, **61** (2020), 2041-2046.
- 16) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, S. Hibino, J. Yasutomi, T. Narushima and 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.
- 17) S. Hibino, T. Todo, T. Ishimoto, O. Gokcekaya, Y. Koizumi, K. Igashira and T. Nakano: Control of crystallographic texture and mechanical properties of Hastelloy-X via laser powder bed fusion, *Crystals*, **11** (2021), 1064.
- 18) 北嶋具教, 平賀知輝, 草野正大, 北野萌一, 皆川和己, 源聡, 川岸京子, 渡邊誠, 出村雅彦, 井頭賢一郎, 東誠, 日比野真也, 藤光利茂, 中野貴由: ニッケル基超合金及びその粉末, 並びにニッケル基超合金造形体の製造方法, 特願 2021-138686, 2021 年 8 月出願.
- 19) T. Todo, T. Ishimoto, O. Gokcekaya, J. Oh and T. Nakano: Single crystalline-like crystallographic texture formation of pure tungsten through laser powder bed fusion, *Scr. Mater.*, **206** (2022), 114252.
- 20) S. H. Sun, K. Hagihara, T. Ishimoto, R. Suganuma, Y. F. Xue and 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.
- 21) Y. Ekubaru, O. Gokcekaya, T. Ishimoto, K. Sato, K. Manabe, P. Wang and T. Nakano: Excellent strength-ductility balance of Sc-Zr-modified Al-Mg alloy by tuning bimodal microstructure via hatch spacing in laser powder bed fusion, *Mater. Des.*, **221** (2022), 110976.
- 22) T. Ishimoto, R. Ozasa, K. Nakano, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, A. Matsugaki, T. Nagase, T. Matsuzaka, M. Todai, H. S. Kim and 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.

- 23) D. E. Jodi, T. Kitashima, Y. Koizumi, T. Nakano and M. Watanabe: Manufacturing single crystals of pure nickel via selective laser melting with a flat-top laser beam, *Addit. Manuf. Lett.*, **3** (2022), 100066.
- 24) Y. W. Kim: Ordered intermetallic alloys, part III: gamma titanium aluminides, *JOM*, **46** (1994), 30-39.
- 25) Y. W. Kim and S. L. Kim: Advances in gammalloy materials – processes – application technology: successes, dilemmas, and future, *JOM*, **70** (2018), 553-560.
- 26) K. Cho, H. Kawabata, T. Hayashi, H. Y. Yasuda, H. Nakashima, M. Takeyama and T. Nakano: Peculiar microstructural evolution and tensile properties of  $\beta$ -containing  $\gamma$ -TiAl alloys fabricated by electron beam melting, *Addit. Manuf.*, **46** (2021), 102091.
- 27) 公益財団法人日本金属学会産学共創研究会 AM (Additive Manufacturing) 研究会, <http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp6/nakano/jiam/>

#### なかの・たかよし NAKANO Takayoshi

1990 大阪大学工学部金属材料工学科卒業, 1992 大阪大学大学院工学研究科金属材料工学専攻博士前期課程修了, 同年 大阪大学大学院工学研究科助手. 1996 博士(工学)(大阪大学), 1999 同講師, 2001 同助教授, 2008 同教授, 2017 同栄誉教授. 2023.2 現在, 同工学研究科附属異方性カスタム設計・AM 研究開発センター長, 大阪公立大学客員教授, 熊本大学客員教授(兼任), 日本学術会議第24期・第25期連携会員, (公社)日本金属学会会長, 日本バイオマテリアル学会常任理事, (一社)粉体粉末冶金協会代議員, 日本チタン学会理事, (一社)スマートプロセス学会理事, (一社)日本骨代謝学会代議員, (公社)日本金属学会産学共創研究会 AM 研究会委員長等を務める.

#### いしもと・たくや ISHIMOTO Takuya

2003 大阪大学工学部応用理工学科卒業, 2008 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士後期課程修了, 博士(工学)(大阪大学). 同年 大阪大学大学院工学研究科特任助教, 2009 同助教, 2014 同講師, 2016 同准教授, 2021 富山大学学術研究部都市デザイン学系先進アルミニウム国際研究センター教授, 大阪大学大学院工学研究科特任教授を兼任.

#### わたなべ・まこと WATANABE Makoto

1995 東京大学工学部材料学科卒業, 2000 東京大学大学院工学系研究科材料工学専攻修了, 博士(工学)(東京大学). 2000 Princeton University(US), Postdoctoral Researcher, 2002 University of California Santa Barbara(US), Research Associate を経て, 2004 物質・材料研究機構(NIMS)材料研究所溶射工学グループに参画. NIMS 構造材料研究拠点 接合・造型分野分野長, 同積層スマート材料グループグループリーダー, 統合型材料開発・情報基盤部門 SIP-MI ラボ 3D 粉末積層チームチームリーダーを務める.