

新たなものづくり：3D 積層造形
(Additive Manufacturing) の技術開発動向

Innovative Manufacturing :
Technical Trends in 3D Additive Manufacturing

白石記念講座はNKK（現JFEスチール株式会社）より
同社創立 70 周年に際し初代社長故白石元治郎氏記念のため
寄贈された資金により運営されるものです。

本講座は斯界の権威者を講師とし鉄鋼業の進歩に貢献する
関連分野の各種技術に関するものを主な内容として構成され
ています。

2023年10月17日（第74回・東京）

一般社団法人 日本鉄鋼協会

日本における AM 研究開発の現状と今後の展開

大阪大学
大学院工学研究科

中 野 貴 由

2023年10月17日（第74回・東京）

一般社団法人 日本鉄鋼協会

目 次

1. はじめに.....	3
2. AMのこれまで.....	3
3. AMとは.....	4
3.1 AMの種類.....	4
3.1.1 粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion) 法.....	5
3.1.2 指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) 法.....	8
4. 形状と材質 (組織) の同時制御.....	8
4.1 形状パラメータ制御.....	8
4.2 材質 (組織) パラメータ制御.....	9
5. AM研究会と今後の展開.....	9
6. おわりに.....	11
7. 謝辞.....	11
参考文献.....	11

1 はじめに

Additive Manufacturing (以降、AM と略す) は、材料を添加しながら成形する足し算の加工法であり、切削等による引き算の加工法とは一線を画す。足し算であるがゆえに、一定の自由度をもって三次元の複雑形状を高速で造形することが可能となり、金属、セラミックス、高分子、さらには複合材と材料種に関わらず適用され、全世界的に研究開発競争が繰り広げられている。中でも、金属材料に対する AM 適用は、社会基盤部材・製品の作製法として、装置・材料開発から、それを取り巻く順・逆計算シミュレーション技術、データ伝送・蓄積技術に至るまで、ゼロ距離での高付加価値製品の造形に向けた研究開発が日進月歩で進められている。

金属材料を高機能化するには、外形状のみならず結晶粒や結晶集合組織に代表される組織・結晶配向の制御が重要となる。IoT (Internet of Things) 化された金属 AM 法は、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) までも自由自在に制御を可能とする。とりわけ、金属直接熔融では、熔融池内での熱分布、液相流動、固相/液相界面挙動の理解・制御により金属材料の高機能化へとつながる。本講演では、工業材料用途から生体材料用途まで広範囲で利活用される金属 AM を中心とした、本邦における AM 研究開発の現状と今後の展開について解説する¹⁻⁶⁾。

2 AM のこれまで

AM の基本概念は、1980 年に小玉秀男氏により樹脂を用いて実証・特許出願され、1981 年に論文化された⁷⁾。その後、世界初の商用 3D プリンタは、Chuck Hull 氏と Raymond Freed 氏により設立された 3D Systems 社から、1987 年に樹脂用 AM 装置として生まれた。

1990 年代には、金属 AM の本格的な研究開発が進み、1992 年には Texas 大にて選択的レーザ焼結方式 (SLS: Selective Laser Sintering) が開発され、1995 年には独 EOS 社が DLS (Direct Laser Sintering) 方式として装置を製品化した。2002 年にはスウェーデンの ARCAM 社が電子ビーム熔融 (Electron Beam Melting) 方式の AM 装置を製品化し、それ以来、医療機器分野、エネルギー分野、さらには輸送機器分野とりわけ航空宇宙分野への適用が世界規模で模索されるようになった。

AM プームを加速させたのは、2013 年のオバマ元大統領の一般教書演説であり、「3D プリンタに代表される技術によって製造分野でのイノベーションを起こす」との発言である。米国では、公的機関、民間企業、非営利団体の連携による America Makes (設立当初は National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII)) により、デジタルモノづくりに世界を先導するため、複数の国家プロジェクトが推進された。

本邦でも 2014 年 9 月より経済産業省による「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 プリンタ等技術開発)」がスタートし、2016 年には技術研究組合次世代 3D 造形技術総合開発機構 (TRAFAM) が設立され、国産 AM 装置の産業化推進が推進された。時を同じくして 2014 年からスタートした内閣府主導による SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) においても、その一つの「革新的設計生産技術」では、AM によるモノづくり手法の研究開発が主要課題とされた。それを受けて 2014 年には、大阪大学工学研究科内に附属異方性カスタム設計・AM 研究開発センターが設置され、大学では国内初の金属 AM センターとしての運用が開始された。当センターは、個々に特徴のあるレーザと電子ビームという異なる熱源を用いた金属 AM 装置を保有し、「異方性/等方性階層的組織・機能制御」、「高付加価値カスタマイゼーション」、「ゼロ距離モノづくり (物流革命)」を主眼とし、『欲しいモノを、欲しい時に、

欲しい場所で』手に入れることができるような未来社会を指向することで、金属 AM による形状・組織制御研究が進められている。2018 年 11 月からは SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」の中の課題として、「MI 基盤と金属 3D プリンタでの造形技術開発」を中心にサイバーフィジカルシステムの融合を基盤に研究展開するとともに、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～」、学術変革 A「超温度場材料創成学：巨大ポテンシャル勾配による原子配列制御が拓くネオ 3D プリント」などの支援により基礎研究基盤の構築と応用を推進している^{8,9)}。

3 AM とは

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 ASTM¹⁰⁾により標準化された際に AM:Additive Manufacturing と再定義された。今では、Additive Manufacturing、3D プリンティング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れば、AM は材料を付加することによる足し算によるモノづくりである。これまでの大量生産・大量消費 (Mass Production) は製品のコモディティ化へとつながるため、新しいモノづくりのあり方が再度検討されている。時代とともに消費者の価値観が多様化することで、少量・多品種生産によるオンリーワン製品の具現化、IoT や AI (Artificial Intelligence) によるスマートファクトリーの実現、サイバーフィジカルシステムの高度な融合に向け、ドイツの Industry 4.0 や日本の Society 5.0 などが提唱され、推進されている。こうした中、IoT と極めて相性の良い AM は、多品種生産を効率的に行うマスカスタマイゼーションへと直結するモノづくりシステムとして、第 4 次産業革命の一端を担うシステム重要技術として位置づけられている。

AM 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、AM はこれまでの切削加工で不可能であった複雑形状・多重構造といった構造制御、さらには製品機能に直結するテーラーメイド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的に認知されるようになってきた³⁾。

3.1 AM の種類

AM 技術は、2009 年の ASTM¹⁰⁾によると、その製造法は 7 つの手法、(1) 粉末床溶融結合 (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 AM、(b) セラミックス AM、(c) 樹脂 AM、(d) ゲル AM、(e) 複合材料 AM、(f) バイオ 3D プリンタ (細胞 3D プリンタ) など多彩である。AM の特徴は必要な部分を必要に応じて選択的に配置・固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、レーザー、電子ビーム、アークなどを熱源として溶融/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。

AM は手法毎に利点と欠点を持ち合わせているが、当初の RP (Rapid Prototyping) と呼ばれた時代には、比較的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が、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¹¹⁾。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、こうした材料への適用拡大が AM 活用の可能性を大いに高めてい

る。金属材料に適した AM 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), PBF-LB/M (レーザービーム) 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 AM 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¹²⁾。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的に配置していく方法である。以下に、粉末床溶融結合法と指向性エネルギー堆積法の概略を示す。

3.1.1 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^{13,14)}。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 次元構造体を造形する。粉末床溶融結合法による AM 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、あるいは表面形状構築を高い精度で実現可

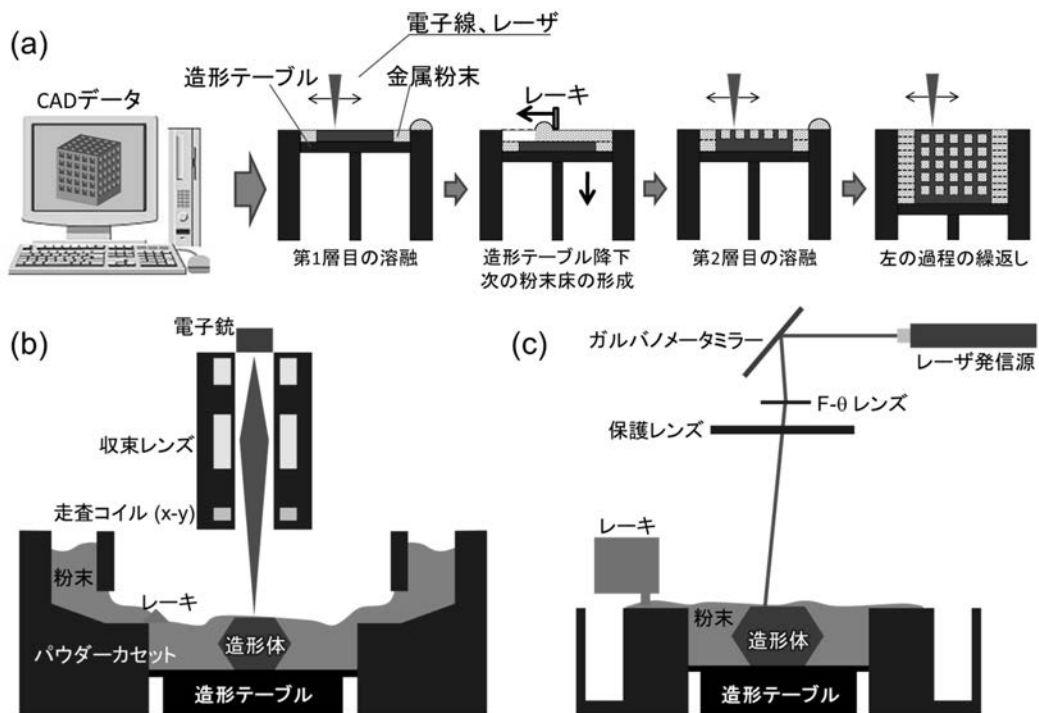


図 1 粉末床溶融結合法の基本原理 (電子線熱源 (b), レーザ熱源 (c))

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により、それぞれ利点と欠点が存在するが、両者を使い分けることで合金系や合金組成に合わせた 3 次元金属造形体の創製が可能となる。表 1 には、電子ビームを熱源とする Q10 (Arcam 社 (現 GE 社)) とレーザーを熱源とする EOSINT M290 (EOS 社) の装置性能の比較を示す。表 1 に、熱源の違いに由来する両手法の特徴をまとめる。

(A) 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(b)参照) するのに比べ、レーザはガルバノメータミラーによる走査 (図 1(c)参照) を行うことから、最大ビーム走査速度は電子ビームでは 3 桁程度速い。高速度に走査可能な電子ビームの特長を生し予加熱することは、原料粉末を再生利用可能な範囲でわずかにネッキングさせることを可能とし、造形体のサポート数を削減できる。同時に予加熱により造形体の熱膨張・収縮を抑制できることから、残留ひずみの低減が図られる。一方、時効の影響を受けやすい合金では、予加熱による組織形成にともなう機能変化をおこす。例えば、時効硬化性のアルミニウム合金の一部では、過時効により降伏応力が低下する場合もある。

(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の走査をとまなうことから、金属材料表面では 80%以上の高いエネルギー吸収率となる。一方で、レーザ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 AM の登場初期に広く利用されていた炭酸ガスレーザ (波長: 9.4~10.6 μm) は、チタンや鉄、さらにはその合金に対しては比較的高い吸収率を示すものの、アルミニウムやアルミニウム合金では極めて低い吸収率を示し、造形が極めて困難であった。一方、最近のイッテルビウム (Yb) ファイバレーザ (波長: 1.07 μm) の AM 搭載は、ほとんどの金属材料の造形を可能とし、さらに金属材料粉末

表 1 電子ビーム粉末床溶融法 (PBF-EB/M) とレーザ粉末床溶融法 (PBF-LB/M) の特徴

Arcam Q10	モデル	EOSINT M 290
200 x 200 x 180 mm	造形サイズ	250 x 250 x 325 mm
電子線 (単結晶 (CeB ₆))	熱源	Ybファイバレーザ
50 - 3000 W	パワー	0 - 400 W
Max. 8000 m/s	走査速度	Max. 7 m/s (Min. 0.05 m/s)
< 80 cm ³ /hr	造形速度	5 - 20 cm ³ /hr
Min. 100 μm	ビーム径	Min. 60 - 70 μm
1 x 10 ⁻⁵ mbar (通常時) He 2 x 10 ⁻³ mbar (溶融中)	雰囲気	Nitrogen, Argon (O<0.1%)
> 125 μm	スキャン幅	80 (標準) - 300 μm
45 - 105 μm	粉末径	10 - 45 μm
> 50 mm	積層厚み	20 - 60 μm
0 - 1100°C	予加熱	0 - 200 °C

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効率的にエネルギー吸収される。近年では、レーザエネルギー吸収の効率化のため、緑色、青色レーザを熱源とする装置も登場している。

(C) (B)に関連して、出発原料としての適正な粉末のサイズは、電子ビームで大きく (45~105 μm ϕ)、レーザビームでは小さい (10~45 μm ϕ)。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て高いためである。さらに、粉末積層性は、ガスアトマイズや水アトマイズで作製した球状粉末が最適であるが、脆性材料の場合には不定形状の破碎粉で対応する場合もある。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速いが、実際には粉末の積層速度が律速段階となることから、必ずしも大きな造形速度差は存在しない (表 1 参照)。

(D) 電子ビームはビームの直線性を保つために高真空とし、その後アルゴン (Ar) ガスに比べて熱伝達率の高いヘリウム (He) ガスを利用することでチャージアップ、さらにはそれにとまなうスモーク現象を

防止する¹⁵⁾。結果として大気中の不純物ガスの混入が抑えられる。一方、レーザービームを用いる場合には、一旦真空にすることなく不活性ガス雰囲気下で造形することが多いが、最近ではレーザーにおいても、真空引きを行う、もしくはシールド性を高めることで、不純物が低減された高純度な造形体が得られるようになっている。

(E) AMは原則として溶融/凝固現象を利用するため、一度溶解/蒸発/凝固した粉末の一部はヒュームとして超微細粉末として残存することになる。比表面積の大きい活性な超微細粉末は発火をともしない易いことから、取り扱いには十分注意する必要がある。

以上のように、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

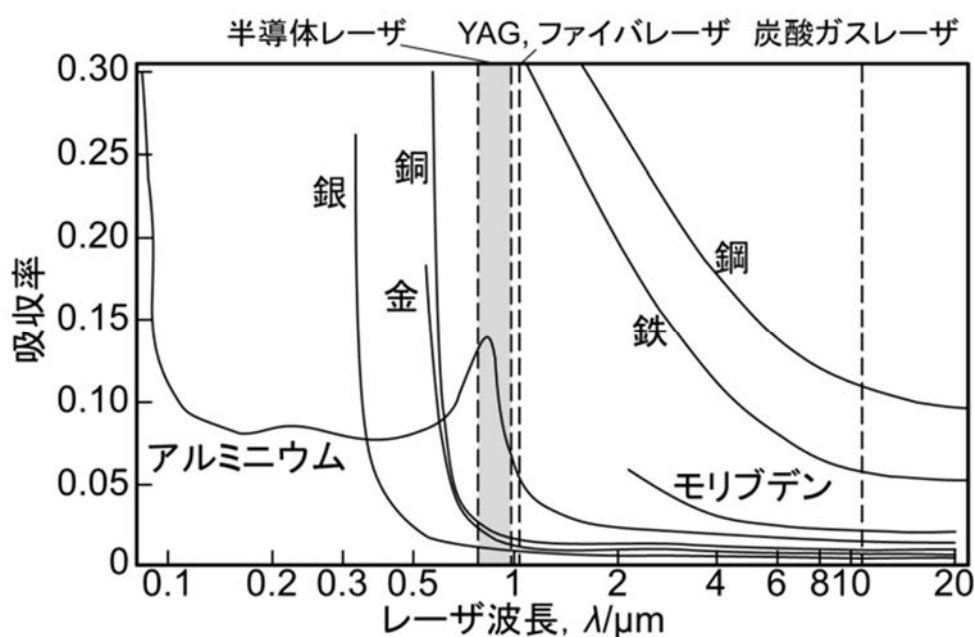


図2 各種金属材料のレーザー波長に依存した吸収率依存性

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^{16, 17)}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、周囲への放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。

3.1.2 指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) 法

粉末床溶融結合法が原料粉末を一定厚さに敷いた後、造形部分の粉末粒子を溶解／凝固させる手法であるのに対し、指向性エネルギー堆積法は、レーザを局部的に照射し、溶融池形成部分に、集中的に原料となる金属粉末（もしくはワイヤなど）を投入し、造形部を溶融堆積させていく方法である（図3）。その結果、粉末床溶融結合法と同様にモールドレスで造形体を創製することが可能になり、余分な粉末を造形物周囲に残留させることがないため、粉末を回収する必要がない。供給する原料粉末の組成や供給量を変化させることで、組成傾斜した造形体や複合材料の造形をも可能とする。ただし、本手法は表面コーティングや破損部分の補修（例えばタービンブレードの補修）に対して開発されてきたため、最終仕上げとして切削加工を行うことを前提にしている¹⁸⁾。したがって、造形精度は数 mm オーダーと低く、さらに積層方向に大きく広がりを持たせるような形状（オーバーハング）や内孔構造、多孔質構造といった複雑形状の造形には不向きである。一方で、出力を大きくすると同時に溶融池への原料粉末の投入量をほぼ比例的に増加させられるため、造形速度は速い。最新の造形機では、溶融堆積直後に加工ローラで形状を整えて

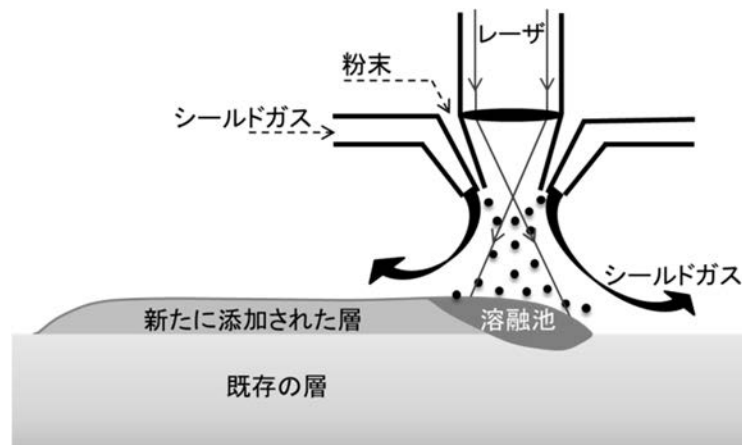


図3 指向性エネルギー堆積法の基本原理

いくような複合機も開発され、今後の発展が期待される金属 AM 手法である。

4 形状と材質（組織）の同時制御

AM は 3 次元形状を制御するための手段としてみなされがちであるが、金属材料に対する AM 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。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も重要な因子であり、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できる可能性を秘めている。

4.1 形状パラメータ制御

粉末を出発原料とする AM 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。

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計算機シミュレーションにより生成できる。例えば、特定の荷重負荷下で寸法や体積の制限を設け、剛性を最大化するような形状が得られる。図4は、荷重に対して座屈耐性を向上させるための最適化形状の計算例を示す¹⁹⁾。トポロジー最適化は、航空宇宙・輸送



図4 トポロジー最適化法による形状パラメータの最適化

機産業²⁰⁾、骨インプラント医療機器産業²¹⁾等での活用が期待されている。AMでは、微細な形状を有する構造体の作製が可能であるため、計算機シミュレーションの際の要素数が非常に多くなる場合には、トポロジー最適化と均質化法を相補的に用いて計算負荷を低減しつつ形状パラメータ制御を行うことも試みられている²²⁾。

4.2 材質（組織）パラメータ制御

金属AMは自由自在な形状制御を得意とする一方で、熔融池単位での熱流束の特異な方向性や、積層造形ならではの繰返し熔融／凝固と熱履歴による材質（組織）パラメータ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での注目すべきトピックスの一つである²³⁻⁵¹⁾。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AMの出現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医療デバイスの創製を可能とする。bcc構造を有する β 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、 $\langle 100 \rangle$ にて最小のヤング率値となる⁵²⁾。PBF-LB/Mを本 β 型チタン合金に適用し、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を行った場合には、造形体中での結晶方位制御、さらには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が可能となる²³⁾。この場合、 $\langle 100 \rangle$ が優先結晶配向した方位においては、低ヤング率を示すようになる。一方、 $\langle 011 \rangle$ 優先結晶配向方向でのヤング率は中程度に高く、 $\langle 111 \rangle$ 方位では、最高値を示し、金属AMによる材質異方性を有する部材の造形が可能になる。

以上のように、金属AMは結晶方位制御を含めた材質制御においても極めて有効な手法であるため、形状の自在造形能力と合わせて、形状・材質同時制御による高機能製品の創製に強く貢献する可能性を秘める。同時に、形状と材質を同時制御することで機能最適化を図るような設計法の根本的革新も期待される。

5 AM研究会と今後の展開

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、筆者を

委員長、前川篤氏（大阪大学招聘教授、株式会社シグマックス 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⁵³⁾。本 AM 研究会には、本邦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 AM 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、多分野の有機的連携を促進する場として活用されている。その



図5 第4回 AM 研究会委員会（2023年6月27日）大阪大学中ノ島センター（現地）とハイブリットで500名近くが出席（パネルディスカッションの様子）

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、AMへの関心の高まりが窺える（図5参照）。

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。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、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®（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。

こうしたオールジャパンでの取り組みが、日本の AM 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、願っている。

6 おわりに

様々な材料に基づく AM 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 AM は、単に形状の制御に留まらず、材質（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、AM 技術の利用は不可避である。同時に、AM は計算機設計、情報科学、IoT、AI 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今後の研究・開発が大きく進む学際的領域であり、国の掲げる「経済安全保障」の強い基盤技術と言える。

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きた。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 AM によるマイクロ 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く、製品設計を根底から覆す可能性を持つ。

現在の AM ブームが、単なるブームとして終わることなく、デジタル技術と 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®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。

7 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）、日本学術振興会学術変革領域研究（A）「超温度場材料創成学：巨大ポテンシャル勾配による原子配列制御が拓くネオ 3D プリント（研究代表者：小泉雄一郎）」（令和 3 年度～令和 7 年度）、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) 桐原慎也（監修）、「新たなものづくり」3D プリンタ活用最前線～基盤技術、次世代型開発から産業分野別導入事例、促進の取り組みまで～、エヌ・ティー・エス、(2015)。
- 2) 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.
- 3) 中野貴由：第 10 章 材料/製造 10-7 3D アディティブ・マニファクチャリング (3D-AM), *テクノロジー・ロードマップ 2023-2032 全産業編*, 日経 BP, (2022), 396-399.

- 4) 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 (監修), リプロ社, 2023年1月8日出版.
- 5) 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, *までりあ*, **58** [4], (2019), 181-187.
- 6) 中野貴由: 連載講座 (チタンの基礎講座 6) チタンの Additive Manufacturing (付加製造), *軽金属*, **67** [9], (2017), 470-480.
- 7) H. Kodama: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Rev. Sci. Instr.*, **52**, (1981), 1770-1773.
- 8) 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** [1], (2020), 27-37.
- 9) 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.
- 10) ASTM Standard F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2009).
- 11) J. Deckers, J. Vleugels, J.-P. Kruth: Additively manufactured Ti-6Al4V before and after hot isostatic pressing, *J. Ceram. Sci. Tech.*, **5**, (2014), 245-260.
- 12) M. Armstrong, H. Mehrabi, N. Naveed: An overview of modern metal additive manufacturing technology, *J. Manuf. Proc.*, **84**, (2022), 1001-1029.
- 13) T. Nakano, T. Ishimoto: Powder-based additive manufacturing for development of tailor-made implants for orthopedic applications, *KONA Powder Particle J.*, **32**, (2015) 75-84.
- 14) 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.
- 15) C. Körner: Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review, *Int. Mater. Rev.*, **61**, (2016), 361-377.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: 3D Printing, Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (2nd ed.), Springer, (2015).
- 19) A. Clausen, N. Aage, O. Sigmund: Exploiting additive manufacturing infill in topology optimization for improved buckling load, *Engineering*, **2**, (2016), 250-257.
- 20) J.H. Zhu, W.-H. Zhang, L. Xia: Topology optimization in aircraft and aerospace structures design, *Arch. Computat. Methods Eng.*, **23**, (2016), 595-622.
- 21) 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.
- 22) J. Schwerdtfeger, F. Wein, G. Leugering, R. F. Singer, C. Körner, M. Stingl, F. Schury: Design of auxetic structures via mathematical optimization, *Adv. Mater.*, **23**, (2011), 2650-2654a
- 23) 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.
- 24) 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.
 - 25) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, S. yalatu, S.-H. Sun: Successful additive manufacturing of MoSi₂ including crystallographic texture and shape control, *J. Alloys Compd.*, **696**, (2017), 67-72.
 - 26) 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.
 - 27) 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.
 - 28) 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.
 - 29) 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.
 - 30) 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.
 - 31) 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.
 - 32) 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.
 - 33) H. Amano, T. Ishimoto, R. Suganuma, 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.
 - 34) 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, *Addit. Manuf.*, **47**, (2021), 102329.
 - 35) A. Takase, T. Ishimoto, R. Suganuma, T. Nakano: Surface residual stress and phase stability in unstable β -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy manufactured by laser and electron beam powder bed fusion technologies, *Addit. Manuf.*, **47**, (2021), 102257.
 - 36) 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.
 - 37) 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-NbSi₂, *Scr. Mater.*, **203**, (2021), 114111.
 - 38) 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, *Addit. Manuf.*, **46**, (2021), 102091.
 - 39) 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.
- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 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, *J. Alloys Compd.*, **919**, (2022), 1658126.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 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).
- 47) M. Mizuno, K. Sugita, K. Do, T. Ishimoto, T. Nakano, H. Araki: Stability of vacancies in β -type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy fabricated via laser powder bed fusion, *Addit. Manuf. Lett.*, **7**, (2023), 100162.
- 48) H. Amano, T. Ishimoto, K. Hagihara, R. Suganuma, 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.
- 49) 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.
- 50) T. Ishimoto, T. Nakano: Review - Microstructural control and functional enhancement of light metal materials via metal additive manufacturing, *Mater. Trans.*, **64**, (2023), 10-16.
- 51) H.-J. Kim, K. Mori, T. Nakano, H. Yamashita: Robust self-catalytic reactor for CO₂ methanation fabricated by metal 3D printing and selective electrochemical dissolution, *Adv. Funct. Mater.*, (2023), 2303994.
- 52) 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.
- 53) 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/>

育成委員会技術講座WG

主査	平本 治郎	J F E スチール(株)			
委員	有田 吉宏	日本製鉄(株)	井手 信介	J F E スチール(株)	
	宇佐見 明	日本製鉄(株)	江村 聡	物質・材料研究機構	
	佐藤 巧	大同特殊鋼(株)	鈴木 進補	早稲田大学	
	多田 英司	東京工業大学	田中 克廣	(株)神戸製鋼所	
	拜司 裕久	J F E スチール(株)	村上 太一	東北大学	
	森戸 茂一	島根大学			

第 74 回白石記念講座

新たなものづくり：3D 積層造形 (Additive Manufacturing) の技術開発動向
Innovative Manufacturing : Technical Trends in 3D Additive Manufacturing

SMS-ISIJ 74

定 価	15,000円 (税込)				
会員割引価格	8,000円 (税込)				
発行日	2023年10月17日				
編集	一般社団法人 日本鉄鋼協会	育成委員会	技術講座WG		
発行者	一般社団法人 日本鉄鋼協会	専務理事	小澤 純夫		
発行所	一般社団法人 日本鉄鋼協会				
	〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10 鉄鋼会館 5階				
印刷所	タナカ印刷株式会社				

©COPYRIGHT 2023 一般社団法人 日本鉄鋼協会
ISSN 1344-0942

「金型用ダイス鋼系粉末開発による金属積層造形の用途拡大」については、著作権は大同特殊鋼株式会社に、「金属 AM 装置の最新技術や国内外の活用事例について」については、著作権は柚田圭二に帰属します。

本書に掲載されている記事の無断転載ならびに無断コピーを禁じます。

複写される方へ

本会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を下記協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、同協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結している場合にあつては、その必要はありません。(社外頒布用の複写は、許諾が必要です。)

権利委託先： 一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル
FAX, 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

なお、著作権の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。
また、アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

・ Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA
TEL. 1-978-750-8400 FAX. 1-978-646-8400