

# 産業用金属 3D プリンタの普及への阻害要因と対応策に関する一考察

松下 隆

## 要約

日本の産業界において産業用金属 3D プリンタが普及するには何が必要なのか。普及に向けた取組策をみたらうえで、考察を加えたい。

本稿では研究対象を主としてパウダーベッド方式に絞り込んだ。既存技術研究結果から「造形体の強度」については、鋼系材料、アルミニウム合金、チタニウム合金において、「展伸材」や「鋳造材（溶製材）」よりも 3D プリンタでの造形材の方が優位なことが明らかとなっている。しかし、「造形速度」は未だ切削加工機と比較するレベルにない。加えて、「材料や装置本体」でも切削加工機や複合機などよりも高額である。これら普及に向けた課題を解決すべく、日本国内で既存の産業用金属 3D プリンタよりも優れた装置本体の開発に「技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）」が取り組んだ。しかし、事業期間が終了に近づいたが、普及にネックとなっている価格面での解決には至っていない。今後は①各装置メーカーの価格の引下げ努力、②唯一無二な機能部品での設計手法の開発による需要創出が必要である。そうすることで、基幹産業である自動車産業および、中堅・中小企業への現場導入が進展するであろう。

## 目次

1. 産業用金属 3D プリンタとは
2. 既存研究と本稿で明らかにすること
3. 市場動向
4. 技術の活用状況
5. 性能と価格
6. 普及に向けた国家プロジェクト
7. 考察まとめ

「産業用」としているのは、ホビーユース以外の主に工業向け装置として、3D プリンタを利用する場合に考察の範囲を限定するためである。

最後に、本稿で取扱っている 3D プリンタは、本体の価格が約 1000 万円以上であり、かつメーカーが 3D プリンタを組立、製品保証しているものとする。なお、参考する文献で「3D プリンタ」、「3D プリンター」などと呼称が異なる場合は、原典を参照してそのまま用いる<sup>1</sup>。

## 1. 産業用金属 3D プリンタとは

まず、本稿で取上げる産業用金属 3D プリンタについて、定義したい。AM (Additive Manufacturing =付加加工) 技術を実現する装置に対して、「三次元積層造形機」など様々な呼称が与えられているが、ここでは、近年呼称として認知度が高い「3D プリンタ」を使用する。ただし、技術や工法を指す際には、世界で統一された呼称「AM」を用いる。

使用する材料は、樹脂から金属、セラミックスなど幅広いものの、ここで考察対象とするのは、鉄系金属、非鉄金属材料などの「金属」とする。

### 1-1 AM 技術の種類一覧と金属材料での工法

ASTM (2009) <sup>2</sup>によると、AM 技術には 7 つの工法が定められている (図表 1)。ここでは、日本独自の複合加工法を加えた 8 つの工法に分類した。詳細説明は省くが、金属材料で造形が可能なのは、「3 結合剤噴射法：(Binder Jetting)」、「6 粉末床熔融結合法：(Powder Bed Fusion)」、「7 指向性エネルギー堆積法：(Directed Energy Deposition)」、「8 複合装置」である。

これら 4 つの工法による産業用金属 3D プリンタの中で、日本において販売台数が多いのは、「6 粉末

<sup>1</sup> 「レーザー」と「レーザ」、「プリンタ」と「プリンター」など。

<sup>2</sup> 標準化団体である ASTM International が 2009 年に策定した企画。Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies。

床熔融結合法」である。「6 粉末床熔融結合法」はドイツの EOS 社が古くから日本で販売実績を有し、現在でも本工法においてシェアが最も高い。本工法を採用した 3D プリンタが選ばれやすい理由として、造形品質（材質、精度など）の安定性や多岐にわたる素材の選択の多様性などが考えられる。一方、材料や本体装置の価格が比較的高額である点はユーザーが選択する際のマイナス要因となっている。

「8 複合装置」としては、「6 粉末床熔融結合法」と切削加工の複合機、または、「7 指向性エネルギー堆積法」と切削加工の複合機が上市されている。中でも、(株)松浦機械製作所の LUMEX は、元松下電工(現パナソニック株式会社)と松浦機械製作所、福井工業技術センター等が協力して開発した<sup>3</sup>「6 粉末床熔融結合法」と切削加工の複合機は、世界的にもユニークである。

本稿では、公開された資料から判断して、主として「6 粉末床熔融結合法」と複合技術に限定して取上げる。

## 2. 既存研究と本稿で明らかにすること

産業用金属 3D プリンタによる金属 AM 技術に関する既存研究は、技術面に関して蓄積が多い。例えば、公設試の地方独立行政法人大阪産業技術研究所森之宮センターでは、中本ほか(2013)、木村(2018)など製造現場で必要になる基礎的実験データを多数発表している。また、大学の研究現場でも電子ビームによる工法について、中野(2017)はチタン造形の優位性を示す。一般技術者向けの図書として、京極・池庄司(2017)では簡便な表現を用いながら、金属 AM 技術に関して、実験結果をまとめている。また、国の産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ(2016)では、金属 AM 技術に関して国の開発方向について議論されている。これら研究論文等は

<sup>3</sup> 2000 年に科学技術振興事業団(現在の科学技術振興機構: JST)の地域結集型共同研究事業に福井県の「光ビームによる機能性材料創成技術開発」が採択。

福井県の地域結集型共同研究事業の中核機関は福井県産業振興財団(現 ふうい産業支援センター)であり、(中略)同事業には、ふうい産業支援センターのみならず、福井県工業技術センターも技術者 10 名が技術開発に従事し、事務局に職員 2 名をふうい産業支援センターに派遣したりするなど県を

金属 AM 技術について実験によって技術データを明らかにし、製造現場に示唆を与えるものである。

一方、技術経営のアプローチとして、技術の普及による影響について拙稿(2016、2017)があるものの、産業用金属 3D プリンタに特化、着眼し、その普及に関して各種データから考察したものは限定的であることから、本領域での研究蓄積に貢献できる。

図表 1 工法一覧と金属 3D プリンタ

工法の名称	工法説明	材料	
		(金属)	(その他)
1 液槽光重合法 (Vat Photo Polymerization)	紫外線硬化樹脂を水槽に貯め、上部から紫外線を照射し、重合(固化)し造形する	—	樹脂
2 シート積層法 (Sheet Lamination)	紙などをデータに基づきカッターで切り、積層させ造形する	—	紙、樹脂
3 結合剤噴射法 (Binder Jetting)	石膏などの粉末を結合剤によって接着し、造形する	金属	石膏、砂
4 材料押出法 (Material Extrusion)	樹脂を細いノズルから押し出し、一筆書きのように造形する	—	樹脂
5 材料噴射法 (Material Jetting)	樹脂等をノズルから噴射し、紫外線等で硬化させ造形する	—	樹脂
6 粉末床熔融結合法 (Powder Bed Fusion)	粉末樹脂や金属等を平面上に敷き詰め、レーザー等によって部分的に焼き固める	金属	樹脂
7 指向性エネルギー堆積法 (Directed Energy Deposition)	熱エネルギーを集中し、主として金属粉末を溶かし付けることで造形する、「溶射」	金属	セラミックス
8 複合装置	「6」または「7」と切削加工を組み合わせ造形、削り出しを連続させる	金属	—

(出所) 大阪産業経済リサーチセンター(2014)を元に筆者作成

## 3. 市場動向

### 3-1 産業用金属 3D プリンタの需要

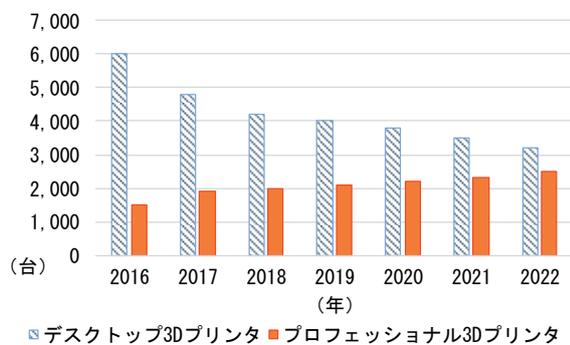
2010 年代から 3D プリンタの需要が高まった。

挙げたの事業となっていた。(中略)松浦機械製作所では、福井県工業技術センター内に設置された実証化棟に社員 2 名を 5 年間常駐させレーザーの特性を学び、レーザー加工技術の習得に努めた。出所:野澤一博(2016)「地方創生と科学技術地域の力を集結して開発された金属 3D プリンタとレーザー加工技術から拡がる産業展開」『STI Horizon』, 文部科学省科学技術・学術政策研究所(NISTEP), Vol.02, No.01

それは、ホビーユースの家庭用プリンタの台頭、米国オバマ大統領の教書演説での取組表明などで期待が高まったためである。しかしながら、2010年代後半から家庭用プリンタの需要は急激に萎み始めた。一方、産業用プリンタの需要は堅調に増加している。

例えば、IDC Japan は 2018 年 7 月 11 日のプレスリリースで、国内 3D プリンティング市場の 2017 年実績と 2018~2022 年の予測について「2017 年の総売上額は前年比 8.9%増の 308 億円で、2017~2022 年の年間平均成長率を+9.1%、2022 年の市場規模を 476 億円と予測する」と発表した。

図表 2 産業用途向けは増加傾向



(出所) IDC Japan プレスリリース、2018 年 7 月 11 日

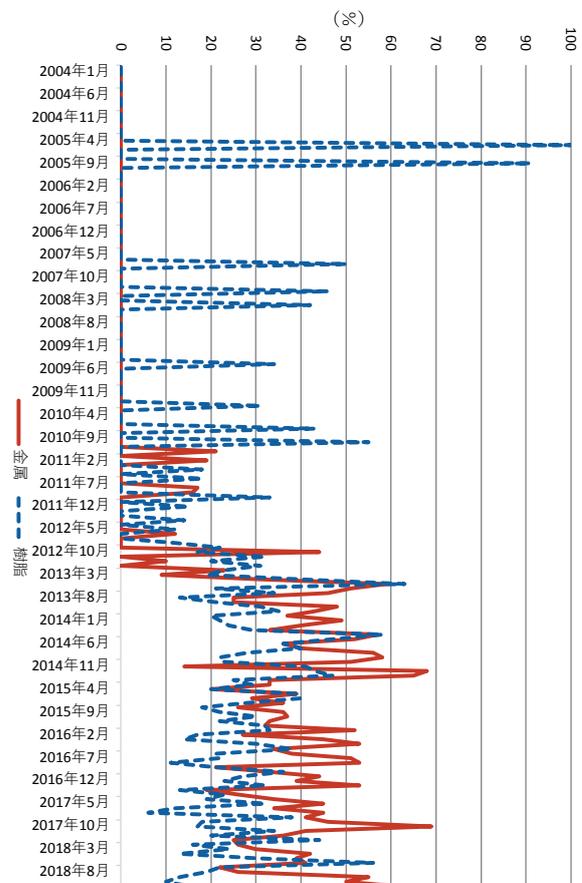
加えて、金属の高額なものをプロフェッショナル向けプリンタと定義したうえで、「出荷台数が、前年比成長率+27.1%の 1,900 台、売上額は+5.9%の 114 億 3,000 万円となっている。2016 年の 3D プリンタ本体の売上はマイナス成長だったが、2017 年はプラス成長に転じた。IDC では、これをプロフェッショナル 3D プリンタの出荷台数が堅調に伸びた結果と考えている」と産業用需要の堅調さを指摘した(図表 2)。他にも、矢野経済研究所でも「ハイエンド装置については、特に金属を材料にする装置の伸びが顕著」と指摘しているのを確認できる<sup>4</sup>。

「6 粉末床溶融結合法」については、米国 DTM 社が米国での基本特許を保有していたが、2014 年 2 月に保護期間が終了、日本国内においても主要工法の特許が期限切れになることから、日本のみならず

産業用金属 3D プリンタの開発やユーザーからの期待が高まってきた。

それを裏付けるものとして、GoogleTrend<sup>5</sup>が提供する検索ワードの傾向分析からも期待の高さが見て取れる。日本国内における「3D プリンタ 金属」、「3D プリンタ 樹脂」の 2 つの用語の検索推移を示したもの(図表 3)で、これをみれば、「3D プリンタ 樹脂」は 2005 年がもっとも多かったものの、近年減少傾向にある。

図表 3 GoogleTrend による検索推移



(出所) GoogleTrend による検索結果

(注) 検索条件としては以下の項目による。

ワード: 「3D プリンタ 金属」「3D プリンタ 樹脂」、集計期間: 2004 年 1 月 1 日~現在、集計地域: 日本、集計ジャンル: すべて

<sup>4</sup> 矢野経済研究所 プレスリリース No.2056 2018/12/27  
<sup>5</sup> GoogleTrend の仕組み: ①検索インダレスト=(各時点の検索ボリューム÷検索ボリュームの最大値)×100、ア. 指定地域における、イ. 指定期間での、ウ. 全検索回数に対する指定

キーワードの検索割合を、0~100%にスケールして推移を表したものを、②正規化し比較している。  
<https://trends.google.co.jp/trends/>  
 、2019 年 1 月閲覧。 研究論文は多数あり。

一方、「3D プリント 金属」では、2013 年頃から急激に検索数が増加、高止まりし、2018 年にはさらに増加傾向にある。

### 3-2 国内で販売される産業用金属 3D プリント

国内では、図表 4 のように国内・海外メーカーの装置が販売されている。また、工法においても「6 粉末床溶融結合法」、「8 複合装置」では、「6 粉末床溶融結合法」と切削加工の複合機、または、「7 指向性エネルギー堆積法」と切削加工の複合機が揃う。また、「3 結合剤噴射法」+焼結を行って造形する工法の装置も販売予定となっている<sup>6</sup>。

図表 4 日本国内での産業用金属 3D プリント

<販売装置一覧>

	「3 結合剤噴射法」 +焼結	「6 粉末床溶融結合法」	「7 指向性エネルギー堆積法」	「8 複合」 「6 粉末床溶融結合法」と 切削加工	「8 複合」 「7 指向性エネルギー堆積法」と 切削加工
株式会社松浦機械製作所				○	
DMG森精機株式会社		○	○		○
ヤマザキマザック株式会社			○		○
オークマ株式会社			○		○*1
株式会社アスペクト		○			
株式会社Sodick				○	
株式会社リコー	○				
3Dsystems		○			
EOS		○			
SLM Solutions		○			
Arcam AB (親会社GE)		○*2			
Concept Laser (親会社GE)		○			
DeskTopMetal	○				
Optmtec			○		○

<sup>6</sup> この工法は、型を用いて粉末を焼結させ部品を製造する MIM (Metal Injection Molding) の方法に類似するが、MIM

<販売予定一覧 2018年12月現在>

TRAFAM開発機

株式会社東芝			○		
三菱重工株式会社					○
株式会社松浦機械製作所				○	
日本電子株式会社		○*2			
多田電機株式会社		○*2			

その他

Hewlett-Packard	○				
Markforged	○				

\*1: 加えて、「旋回焼入れ」と「研削」を1台に集約

\*2: 電子ビーム

(出所) 各企業の資料から筆者作成

## 4. 技術の活用状況

### 4-1 ユーザーがみる長所と短所

金属造形の特徴を俯瞰すれば、①他の加工法で難しい三次元複雑形状品の製造ができること、②表面だけでなく内部構造も表現できること、③ラティス(格子)構造体が製造できること、④傾斜構造・複層構造体が製造できることが挙げられる(京極・池庄司(2017)、p.21)。

ただ、金属造形には長所と短所が二律背反に存在する。こうした点をユーザー企業が指摘している(図表 5)。

まとめると、現状における産業用金属 3D プリントでの製造における長所として①除去加工や変形加工にできない機能性を付与できること、②開発サイクルを短縮できること、③未焼結の材料を回収するなど高価な材料の節減が可能となることなどが挙げられる。短所としては、①金属特有の放熱と残留応力を検討する必要があること、②大ロット品への対応が困難なこと、③粉末材料や造形機本体が高額であることなど挙げられる。

では次に、金属造形の用途、なかでも「生産用金型」と「立体物の直接造形」に範囲を限定していく。

は金型等を用いるが、AM では用いない部分が異なる。

図表5 産業用金属 3D プリンタの長所と短所

<p>&lt;長所&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試作のためにイニシャルコスト・時間がかかっていたものをスピーディーに造形し、開発サイクルの短縮が可能</li> <li>・複雑形状のニアネットシェイプ成形により、駄肉除去（切削加工等）工程の短縮が可能 ※難削材について、非常に効果大きい</li> <li>・複雑、薄肉形状を成形するには非常に向いている</li> <li>・現在の積層エリアにあったサイズ、数量である場合、ものにより現在の機械加工より早く成果物を得ることが可能。一回の造形バッチにて、効率的に多数個取りすることにより、成果物1個あたりの単価を劇的に低減することが可能</li> <li>・積層造形をよく理解した設計をすれば、機能的・コスト的に非常にメリットの大きいものづくりが可能となる ※未焼結材料の回収と再利用に必要な材料のみ</li> </ul>
<p>&lt;短所&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・積層造形を前提とした設計思想が、国内ではまだ定着していないため、コスト的なメリットをすぐに得ることが難しい</li> <li>・イメージと異なり、どのような形状でも造形可能なわけではなく、積層造形に特化した制約も存在する</li> <li>・造形時の入熱を効率的に放熱させるノウハウが必要。放熱の工夫がないと、造形物への歪み、残留応力が懸念される</li> <li>・積層造形に使用する材料、積層造形時の造形条件、成果物の評価方法について、JISのような規格がないため、作り手・使い手ともに評価基準の制定が必要となる</li> <li>・材料となる金属粉末がバルク材にくらべ、非常に高価である</li> <li>・自動車の標準部品等の大量生産品については、対応が難しい ※理由：積層造形の造形サイズが小さい。造形スピードが大量生産に見合うレベルになっていない</li> </ul>

（出所）東金属産業株式会社 Web サイト 2019年1月閲覧から作成

#### 4-2 生産用金型

塑性加工のうち金型を利用した変形加工は、日本において長い伝統と歴史がある。鍛造やプレスに利用される金型は量産加工におけるキーデバイスであり、日本が世界に誇れる基盤的技術である。

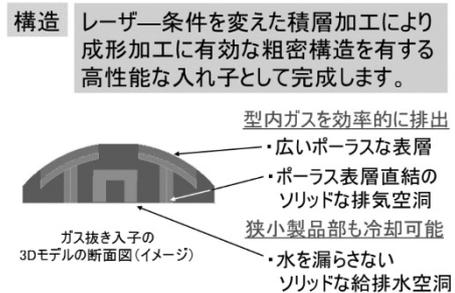
しかしながら、金型製造業は産業用途で市場が細分化されること、完全受注産業であることなどから小規模性が強い<sup>7</sup>。そのため、熟練技術者の減少、若年者の成り手不足により非常に厳しい経営状況にある企業が多い。加えて、製造原価の圧縮で金型にかかるコストも削減傾向にある。

こうした中、AM 技術を利用して小ロット向け、試作用の金型を製作する企業がでてきている。

三光合成株式会社（富山県）では、「8 複合装置」（「6 粉末溶融結合法」と切削加工）によって、「産

業用金属 3D プリンタ（松浦機械製作所製の「LUMEX Avance-25」）を使用して3年間で180の金型を製作した。入子だけなら数は3から5倍になる。180型製作してトラブルは1度だけ。今では60万ショット以上成形している型や、成形サイクルも倍以上になったものもある」という。ただ、ここまで利用できるのは、これまで冷却用水管の通し方や研磨方法などかなりのノウハウを蓄積した成果によるところが大きい<sup>8</sup>。加えて、レーザーの走査で意図的にポーラス構造を製作することで、射出成形時に「ガス抜きが可能な入子」（自社オリジナル製品）の開発に成功した。この入子を使用すれば射出成形時にガス溜りを解消し、冷却性に優れることで成形時間の短縮が実現する（図表6）。AM 技術を利用すればこそ製造できる金型である。

図表6 三光合成 ガス抜き入子



（出所）三光合成株式会社 Web サイト 2019年1月閲覧

#### 4-3 立体物の直接造形

立体物の造形体を直接製作することで、除去加工や変形加工と異なる産業用金属 3D プリンタによるAM 技術の優位性が発揮できる。特に、造形体の内部構造を「軽量化」や「異方性」など必要な機能に合わせて設計すれば、他に得られない構造の造形体を製造できる。そのためには、軽量化手法や材料の特性、使用する部品の用途など様々な要件から必要となる形状を3DCAD で設計し、あわせて、機械的特性などをCAEなどで解析、評価することが必要となる。

<sup>7</sup> 「金型製造業では「5人以下」、「5人超-10人以下」の категорияに成形業よりも集中し、小規模性が強い」大阪産業経済リサーチセンター（2016）、p.29。

<sup>8</sup> 『金型新聞』2017年8月10日号インタビュー記事。およ

び、松浦機械製作所（2015）「ユーザーを訪ねて No.162・三光合成株式会社」『松浦機械製作所広報誌』、Vol.34-2 No.177 平成27年7月号。

株式会社ダイヘン（大阪市）は、レーザーの反射率が高く造形が困難な銅合金で高能率アーク溶接システムの水冷トーチの小型化、軽量化を実現した。地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所（現大阪産業技術研究所 本部・和泉センター）との共同研究により産業用金属 3D プリンタ（コンセプトレーザー社製「M2」）を用いて、銅合金 3D 積層造形を可能とする造形技術（銅合金粉末および加工プロセスのノウハウ）を独自に確立し、本技術に関する特許を取得した<sup>9</sup>（図表 7）。この技術は第 7 回ものづくり日本大賞「特別賞」を受けた<sup>10</sup>。

図表 7 銅合金の冷却機能を付した一体造形部品



（出所）日刊工業新聞電子版 2017 年 11 月

また、強度を保ちながら形状を創り出すために、「寸法最適化」や「形状最適化」以上に最も自由度の高い「構造最適化」手法である構造物の位相を設計変数として最適化する「トポロジー最適化」により導出された形状は、幾何学模様となり機能的デザインとしても今後必要性が高まる。「トポロジー最適化」ソフトウェアの開発ならびに利用ノウハウが積み重ねられれば、産業用金属 3D プリンタによって、その特異な造形体を具現化できる。

## 5. 性能と価格

製造するうえで、製品の品質を決定づけるのは、「造形体の強度」である。加えて、そうした造形物を製作する際の「造形速度」、「材料や本体装置の価格」についてみていこう。

### 5-1 機械的強度

#### 5-1-1 鋼系の造形体の機械的強度

産業用金属 3D プリンタの利用に必要な要件として、「樹脂成型型やプレス成型型などの金型や各種機械部品に適用する実用性を考慮すると、造形体の高密度化および高強度・高硬度化が必要」（中本、白川、乾（2013））としている。

こうした中、中本ら（2013）は、造形体と溶製材とでの強度など機械的特性を比較することで実用性を示した。

実験には、「6 粉末溶融床造形法」で EOS 社製の EOSINT M250-Xtended を使用して、鋼系粉末は、水アトマイズ法により作製された平均粒径 30  $\mu\text{m}$  の炭素量が 0.33% から 1.04% まで含む 4 種類の粉末を使用した。走査速度が 50 mm/s、走査ピッチが 0.1 mm の条件で作製した造形体の降伏応力と造形体内部のビッカース硬さを比較した。その結果、4 種類の造形体は同組成の溶製材に比べて優れることがわかった。

#### 5-1-2 アルミニウム合金の機械的強度

アルミニウム合金は、航空機や産業機械、自動車分野で採用されているものの、AM 技術で造形するには、アルミニウム合金はレーザーを反射しやすく、かつ高い熱伝導率により放熱しやすいことから、かつて主流であった炭酸ガスレーザーでの装置では高密度な造形体を製造できなかった。

しかし、近年ファイバーレーザーが主流となり、短波長のレーザーにより、反射率は大幅に低減でき、アルミニウム合金粉末の直接造形で高密度な造形体を得ることができている（木村（2018））。

しかし、造形メカニズムについて解明されていないことから、①造形でのレーザー照射条件と造形体の相対密度の関係、②造形体の組織形態と機械的特性の関係の 2 点について実験している。実験には、「6 粉末溶融床造形法」でドイツ EOS 社製の EOSINT M280 を装置に、材料は東洋アルミニウム（株）製の平均粒径 27.1  $\mu\text{m}$  の Al-7%Si-0.3%Mg 合金（窒素ガスアトマイズ法）粉末を使用した。①の結

<sup>9</sup> 株式会社ダイヘン「NEWS RELEASE」2016 年 10 月 26 日。

<sup>10</sup> 「銅合金 3D 積層造形技術の開発」が第 7 回『ものづくり日本大賞』「特別賞」、2018 年 1 月 19 日。

果は、最も高密度な（相対密度 99.9%）造形体を得るには出力 250W、走査速度 1400 mm/s、走査ピッチ 0.1 mmであった。②の結果は、比較対象である同組成の金型鑄造材と比較して、造形まま材（造形後、熱処理等を全く行っていない造形体のこと）の引張強度は、約 400MPa（金型鑄造材：約 250）、0.2%耐力は約 200MPa（同材：200 未満）、破断伸びは 12～17%（同材：5%）だった。

これより、アルミニウム合金材料での金属造形材は、同組成の金型鑄造材よりも引張強度、耐力、破断伸びにおいて優れていることがわかる。

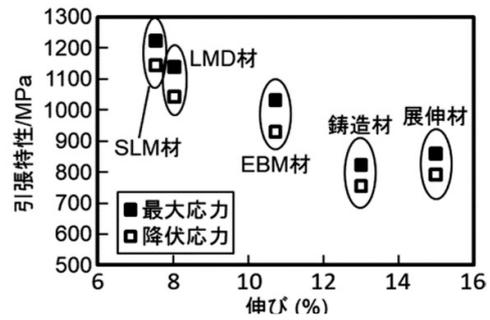
「今後、組織制御と構造制御という SLM（レーザー積層造形法）の特長を組み合わせることで、優れた特性やこれまでにない革新的な機能を有する高付加価値な部品や製品の創製が期待される」（木村（2018）、p.31）とみる。

### 5-1-3 チタン材の工法別引張特性と伸びの比較

中野（2017）では、B.Dutta etc（2017）を改変しながら各種金属 AM 儀法で作製した Ti-6Al-4V 合金材ならびに鑄造材、展伸材の引張特性と伸びの関係を実験した。使用装置は、「6 粉末床溶融結合法」で熱源としてレーザーでは EOS 社製の EOSINT M290、電子ビームでは Arcam 社製の Q10 を使用した。

チタン合金材の引張特性では、レーザーによる「6 粉末床溶融結合法」の Selective Laser Melting（セレクトティブ・レーザー・メルティング：SLM）と電子ビームによる「6 粉末床溶融結合法」の Electron Beam Melting（エレクトロン・ビーム・メルティング：EBM）、「7 指向性エネルギー堆積法（Directed Energy Deposition：DED）」の 3つの工法による造形体は、鑄造材や展伸材に比べて、引張特性が高く、伸びは低い。

図表 8 各種金属 AM 技術で作製した Ti-6Al-4V 合金材ならびに鑄造材、展伸材の引張特性と伸び

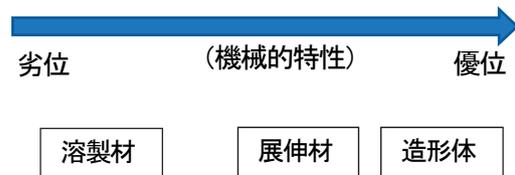


（出所）中野（2017）、p.476（B.Dutta and F.H.Froes:Met.Powdew Rep., 72(2017)、pp. 96-106 を元に改変引用）

（注）上図で AM 技術は、SLM、LMD、EBM の 3つ。SLM（Selective laser melting）は「6 粉末床溶融結合法」と同義、EBM（Electron Beam Melting）は電子ビームによる「6」。LMD（Laser Metal Deposition）と「7 指向性エネルギー堆積法」と同義。原文まま

これら 3つの実験結果から、3つの材質の金属造形体は、展伸材もしくは、溶製材（鑄造材含む）<sup>11</sup>よりも優れた引張強度等の機械的特性を有すると推定できる（図表 9）。

図表 9 造形体の引張特性のポジション



（出所）筆者作成

（注）「溶製材」には、「鑄造材」が含まれる

### 5-2 造形速度

産業用金属 3D プリンタの造形速度は、熱源の出力と、工法、走査ソフト（積層厚、ピッチ等）等の効率性によって決定する。ここでは、熱源となる出力とその代表的機種による造形速度を比較する。

<sup>11</sup> 田中ほか（1990）『金属材料の事典』、朝倉書店。「展伸材（wrought products）」構造用材料としては、①板、棒、形材、管、線、鍛造品などの展伸材、②金型、ダイカストなどの鑄造材があり、展伸材は、圧延加工、押出加工、引抜加工、

鍛造などの展伸法により加工、鑄造組織中にあった大きな異質物が破壊されるなど、組織が様となり、高度の加工を加えることができる。

「6 粉末床溶融結合法」での熱源は 2 種類あり、レーザーの出力は、2018 年度段階では 400W が主流であり、代表機種として EOS M290 を挙げる。一方、電子ビームでは Arcam Q20 を挙げる。

双方の造形速度は、EOS M290 が 5-20cm<sup>3</sup>/h、Arcam Q20 が 55-80cm<sup>3</sup>/h である。

図表 10 レーザーと電子ビーム 2 機種の造形速度比較

	EOS M290	Arcam Q20
熱源の種類	レーザー	電子ビーム
出力	400W	3000W
造形サイズ (mm)	W250×D250× H325	直径 350× H380
造形速度 (cm <sup>3</sup> /h)	5-20	55-80
走査速度 (m/s)	Max. 7	Max. 8000
ビーム径 (μm)	Min. 60-70	Min. 140
粉末径 (μm)	10-45	45-100
積層厚み (μm)	20-60	90

(出所) 中野 (2017) および (株) コイワイ社 Web サイト資料、Arcam 社資料より筆者作成

10 cm角の立方体に収まる形状を造形すると仮定した場合の具体的所要時間をみる。ある公設試から EOS 製の M290 の一世代前の M280、および Arcam 製の Q20 よりもやや小型の A2X での比較データを手に入れた。それによると、M280 では約 70 時間、A2X では約 24 時間を要し、電子ビーム方式はレーザーよりも格段に所要時間が少ないことが窺える。

一方、同様の体積に収まる複雑形状の立体を切削加工、5 軸マシニングセンタなどで加工してもここまで時間を要することはない。つまり、AM 技術では一個あたりの生産性において切削加工法よりも時

間を要することに間違いはない。しかしながら、今後、レーザーなどの熱源出力の大型化、複数レーザー搭載などにより造形時間は短縮可能である。また、一回の造形エリアに複数個造形可能であり、1 度の造形で数個取りできれば生産性の向上につながる。

### 5-3 材料や装置本体の価格

次に、産業用金属 3D プリンタに使用する各種金属粉末材料<sup>12</sup>の価格であるが、総じて一般に販売されている展伸材のそれよりも高く、加えて、メーカーの指定金属粉末材料は一般的な金属粉末材料より高価である。

一般的に、産業用金属 3D プリンタメーカーが装置本体の利益とは別に、「消耗品収益モデル」のビジネスモデルを採用し、指定金属粉末材料以外の使用による故障を保証していない。このため、装置と材料は対の関係となり、排他性が生じていることが多く、安価な指定外品が生み出される機会が少ない<sup>13</sup>。東金属産業は、短所として「材料となる金属粉末がバルク材にくらべ、非常に高価なことである」(前出図表 5) と指摘する。

併せて、3D プリンタ装置本体価格も高額である。例えば、EOS M290 は稼働のために必要な付帯装置を含めて一式で約 1 億円、Arcam Q20 に至っては一式約 2 億円の価格である。

例えば、国産工作機械メーカーで「8 複合装置」(「6 粉末床溶融結合法」と切削加工)と 5 軸マシニングセンタを開発販売している松浦機械製作所の製品で比較する。同社製産業用金属 3D プリンタ「LUMEX Avance-25」(造形サイズ 256 256×185 mm) の販売価格は一式約 8,000 万円、一方、小物部品加工向け 5 軸制御立形マシニングセンタ「MX-330」(最大ワークサイズ Φ420×H320mm) の販売価格は一式約 3,000 万円と相当の価格差がある。

これより、導入検討企業からみれば、現在最大の導入阻害要因が装置本体の価格といえよう。

<sup>12</sup> 産業用金属 3D プリンタに必要な金属粉末材料の特性は、①流動性、②拡がり性、③充填性である(京極ら (2017)、pp.44 - 45)。高い流動性のためには、真球度の高い、表面に微細粒子が少ない粉末が好ましい。なかでも電子ビーム法には粒度分布の狭い粉末がよい。

<sup>13</sup> 消耗品収益モデルを設定してもインクジェットプリンタ市場では非正規品が出回り、価格優位性から市場がスライド化するなどの動きがみられる(藤原 (2013))。しかし、産業用金属 3D プリンタの材料の場合は、そうした動きにはなっていない。

## 6. 普及に向けた国家プロジェクト

### 6-1 概要

日本国内での第四次産業革命の推進には、産業用金属 3D プリンタの普及は必須である。そのためには、装置の造形速度、価格面での需要に応えることが求められる<sup>14</sup>。政府は外国製の金属 3D プリンタに頼らず、国力を結集して国産機を開発、普及させ、新たなモノづくり革命を目指している<sup>15</sup>。

解決のために経済産業省は民間企業等と協業し、2014 年に技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（Technology Research Association for Future Additive Manufacturing：「TRAFAM」と略する）を設立し、現在市場で販売されているものを超える性能を実現する産業用金属 3D プリンタを開発、普及に向けたプロジェクトを先導している<sup>16</sup>。

本プロジェクトは、大学、工作機械・粉末材料メーカー、ユーザー企業、公設試研究機関がチームを組んで取組む体制である。運営の特徴は、開発者だけでなくユーザーが含まれることで、ユーザーの需要を汲み取った開発体制を取ることにある。

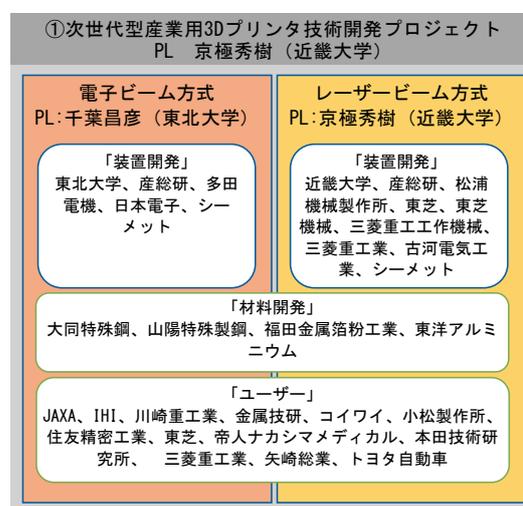
開発内容は大きく二つに分かれ、①産業用金属 3D プリンタ及び金属粉末材料を開発する「次世代型産業用 3D プリンタ」事業であり、近畿大学の京極秀樹氏がプロジェクトリーダーを務め、電子ビーム方式は東北大学、レーザービーム方式は近畿大学が担当する。もう一つのプロジェクトは、②「超精密三次元造形システム」開発事業であり、鑄造のための

砂型造形 3D プリンタを開発する。本稿では、①のみについて触れる。

### 6-2 プロジェクトでの目標と達成度

現行の海外メーカーの産業用金属 3D プリンタに対抗して、「造形速度」「材料や装置本体の価格」に関して目標を掲げ開発に取り組んだ。平成 30 年度で事業期間を終えるが、現在の状況では、装置本体価格 5,000 万円以下に関して、目標達成が困難であるとみられる。それ以外の速度、品質については目標クリアが見込まれるようだ（図表 5）。

図表 1 1 TRAFAM の参画メンバー



(出所) 経済産業省製造産業局素材産業室 (2016) 「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) 研究開発プロジェクトの概要」

(注) 次世代型産業用 3D プリンタ技術開発のみ

<sup>14</sup> 経済産業省ほか (2018) 『2018 年版ものづくり白書』、p.151 マスカスタマイゼーションの推進と短納期の実現を目指す。

<sup>15</sup> 2013 年 10 月、経済産業省は、3D プリンタが生み出す付加価値と今後のものづくりの方向性を考察することを主目的とした「新ものづくり研究会」(座長：東京大学大学院経済学研究科 新宅純二郎教授)を開催し、報告書を 2014 年 2 月 21 日に公表。この中で、「今後の付加製造 (積層製造) では金属造形分野が有望だが、欧米に比べて立ち遅れているため、我が国の競争力強化のため早急な取り組みが必要」と指摘した。合わせて、政府が関与する必要性として、①金属及び砂型の三次元積層技術は我が国製造業において基盤技術となりうる技術である。しかしながら、現状において、我が国においては当該技術が確立されていないこと、②実用に耐え、複数の材料で金属及び砂型の三次元積層技術を開発するためには、装置だけでなく、材料、ソフトなど一体的に開発する必要がある。特に金属積層については、レーザー、電子ビーム双方について開発する必要がある。しかしながら、これらを

一社で一体的に開発できる企業はなく、それぞれの得意分野を持つ大学、公的研究機関、企業が結集させることが必要であること、③三次元積層技術を普及させるためには、造型や造形物の品質評価、安全性評価等に関して研究開発を通じて標準を確立する必要があること、④(省略) 出所：「経済産業省製造産業局素材産業室 (2016) 「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)」研究開発プロジェクトの概要」

<sup>16</sup> 目的：我が国ものづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した三次元積層造形技術や金属等の粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発、鑄造技術の開発等を行う。実用化の方向性：開発した 3D プリンタ装置等を我が国産業競争力強化に繋げるため、製造企業だけでなく、有識者やユーザー企業等の意見を聞いて、標準化や市場動向調査等を踏まえて実用化を図る。出所：「経済産業省製造産業局素材産業室 (2016)

図表 1 2 プロジェクトのスケジュール 抜粋

レーザービーム方式装置技術開発		
2014 (平成26) 年度	試作機・ノズル・モニタリング機構開発	試作機・1KWレーザー・CAD/ CAMソフト開発
2015 (27) 年度	性能評価・改良	性能評価・改良 2KWレーザー開発
2016 (28) 年度	試作機付加機能・造形品質の安定化技術開発・複層ノズル改良	高速化・2KWレーザーの評価/改良・大型開発機設計製作
2017 (29) 年度	性能評価・改良	
2018 (30) 年度	性能評価・改良	性能評価・改良
2020年頃	各企業における製品化・事業化	量産試作用途で普及
2025年頃	各企業におけるニーズへの対応 ・機能面や材料、価格面	製品製造用途で普及
2030年頃		

中間審査

プロジェクト終了

実用化へ

(出所) 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ (2016)「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム 技術評価結果報告書 (中間評価)」から抜粋

今後は、ロードマップのように 2020 年頃には各社から産業用金属 3D プリンタの製品化と上市が相次ぎ、国産機の試作用途での活用・普及と製品製造用途での活用・普及へと繋げる計画である (図表 12)。

図表 1 3 TRAFAM プロジェクトの目標と評価

		熱源：レーザー、方式：「6 粉末床熔融結合法：(Powder Bed Fusion)」		
		レーザートリミング方式の複層レーザービーム	マシニングセンター方式の複層レーザービーム	大型高速レーザービーム
		東芝、東芝機械	三菱重工工作機械、三菱重工業	松浦機械製作所、古河電気工業
中間目標	造形サイズ (mm)	W:300, L:300, H:100	W:300, L:300, H:100	W:500, L:500, H:400
	造形速度 (cc/h)	250	250	250
	寸法精度 (μm)	±50	±50	±50
中間実績 (平成28年度)	造形サイズ (mm)	W:100, L:100, H:10		W:100, L:100, H:10
	造形速度 (cc/h)	359	360	68.5 (未達)
	寸法精度 (μm)	±30	±24	±50
	その他成果	※1		※2
事業終了時 (平成30年度)	造形サイズ (mm)	W:500, L:500, H:400 以上		
	造形速度 (cc/h)	500 以上		
	寸法精度 (μm)	±20		
	装置本体の販売価格	5,000万円以下		

(出所) 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ (2016)

(注) ※1：①複層積層に成功、SUS316Lと炭素鋼、SUS316Lとインコネル 718、②レーザーポリッシュで表面粗さ Ra が 14 μmから 3.9 μmへ改善、※2：大型化として W:600、L:600、H:400 も成功

### 7. 考察まとめ

「産業用金属 3D プリンタが、日本の産業界へ普及するには何が必要なのか」への問いに対して、普及に向けては「造形強度」に関して全く問題ではないと考える。一方、「造形速度」の改良、「材料や装置本体の価格」に関しては普及に対する最大の阻害要因だと考える。

「造形速度」の改良には、搭載レーザーの数を増やすこと、レーザー走査の方法に関してプログラム改良するなど改善の見込みがある。

一方、「材料や装置本体の価格」の引下げに関しては需要の増大による開発コストや部品コストの削減を見込む必要があり、普及による販売台数の増加と裏腹の関係にある。

### 7-1 販売台数と価格の予測

経済産業省生産動態統計から国内における工作機械の平均販売単価を割り出せば、平成 29 年度での 1 台当たりの平均販売単価は「金属工作機械全体」で 12-14 百万円、「マシニングセンタ」10-15 百万円、「その他数値制御工作機械」約 22 百万円である（図表 14）。

図表 1 4 工作機械の販売動態

	金属工作機械 (区分 1-23)		マシニングセン タ (12-16)		その他の数値制 御工作機械(22)	
	数量 (台)	平均 単価 (百万 円)	数量 (台)	平均 単価 (百万 円)	数量 (台)	平均 単価 (百万 円)
2013 (平成 25) 年	62,518	14.6	20,155	15.7	2,899	22.7
2014 (26) 年	102,231	11.9	55,145	9.3	3,914	22.6
2015 (27) 年	105,147	12.5	56,544	9.8	4,404	22.3
2016 (28) 年	73,443	14.4	30,731	13.1	3,616	22.6
2017 (29) 年	92,174	12.8	46,178	10.4	4,211	23.0

(出所) 経済産業省 (2017) 「生産動態統計年報 機械統計」

(注) 平均単価：販売金額を数量で除したもの

こうしてみた場合、TRAFAM による目標設定価格の 50 百万円（図表 13）でもまだ高額といえる。特に、中堅・中小企業における生産設備を導入推進には、もう一段の販売価格の引下げが必要であろう。

産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ (2016)、p.9 によれば、「直接市場として、本プロジェクトにより開発され、実用化された装置の販売台数見込み及びそれに伴う材料の市場を予測することによって試算した。具体的には、TRAFAM によるメンバー企業等への調査・検討の結果、2030 年に次世代型産業用 3D プリンタ 1,800 台の装置販売が見込まれるとした。また、金属粉末材料の販売は装置 1 台当たり 1,000 万円であると見込んだ。その結果、2030 年の装置売上は、次世代型産業用 3D プリンタは 900 億円 (1,800 台×5,000 万円/台)、金属粉末材料売上は 180 億円 (1,000 万円/台×1,800 台) と予測された (p.9)」(※超精密三次元造形システムの試算はここでは含めていない) と試算している。

2017 年の生産動態統計から国内での販売台数をみれば、金属工作機械全体では年約 9 万 2 千台、マシニングセンタでは約 4 万 6 千台、その他数値制御工作機械で約 4 千 2 百台である。

これらから考察すると TRAFAM での販売目標等の試算は大手企業を中心とした参画メンバーへの意向だと考えられるが、現実的には実際の市場に出る場合、数字結果の達成は厳しいと考える。

### 7-2 普及を阻害する要因と対応策

販売台数の増加、つまり普及を目指すには、各メーカーでの開発コスト、製造コストの圧縮が不可欠である。そのためには、量産効果を期待する販売台数の増加が不可欠である。

現状の日本国内での需要マインドをみれば、拙稿 (2016) でコメントした「除去加工の精度追求型で世界と競合してきた」日本、大阪の金属製品加工業においては現在のところ、内部構造に機能性を持たせたトポロジー最適化理論を組み入れた設計手法は取り入れられず、AM 技術に関して懐疑的な思考が強い。需要マインドを喚起するための産業構造の変化が、特に大阪産業集積では緩やかである。

こうした「需要マインド」や「高度な設計手法の未活用」が産業用金属 3D プリンタの普及を妨げている強い要因だと考える。

これら阻害要因を解決し、産業用金属 3D プリンタの普及を図るには、この工法による唯一無二な価

値を大学、公設試、民間企業が実験結果などを報告共有し、実験結果を広く知らしめる必要性がある。そうすることで、除去加工にしか向けられない近視眼的な需要マインドはやや薄められる。また、CAD で動かせる高度な設計・解析、トポロジー最適化などの設計手法を操作できる技術者の養成とそれによる部品の付加価値向上と実用化が必要であろう。

### 7-3 普及を期待する基幹産業

特に、日本では基幹産業である自動車産業における活用、普及が望まれる。

自動車部品は振動などに対する機械的強度が必要であり、そこには鍛造部品が当てられる。また、複雑形状が必要な場合は、鋳造品となる。鍛造技術、鋳造技術とも量産性に優れるものであり、自動車販売価格の引き下げ、普及に大きく貢献している。

しかし、試作用途のエンジンシリンダーブロック製造や、モデルチェンジで生産終了となり金型保管に課題を抱える部品の再製造、または、軽量化が必要な部品の最適化製造（トポロジー最適化の導入）など 3D プリンタの適応可能な領域がある。さらにその領域を増やしていくことが望まれる。その場合、造形体の機械的強度の向上のため、HIP（Hot Isostatic Pressing：熱間等方圧加圧法<sup>17</sup>）処理加工など 2 次加工の検討により導入余地が高まるものと考えられる。

日本国内における自動車産業のすそ野は広い。本産業において、AM 技術を如何に利用できるのか、コスト面、技術面で検討を重ね、2020 年頃までに金属造形における実用事例を発表することが重要である。導入ターゲットとしては、軽量化と高強度を両立する機能が必須で、生産台数が限定的なハイエンド・スポーツカーや高級車での採用から始め、その後はカスタマイゼーションが必要なミドル・グレードへと適用範囲を展開することがよいであろう。AM 技術を積極的に採用する動きは、ヨーロッパの大手自動車メーカーではかなり進んでおり、日本メ

ーカーの動きとの差異が大きくなっている<sup>18</sup>。自動車部品関連サプライヤーの精力的な研究開発、実用化試験を進展させなければならない。

そうした動きが、産業用金属 3D プリンタ導入企業の増加に結び付き、需要の増加による部品供給価格の下落、販売価格のさらなる引き下げへとつながり、多くの中堅・中小企業において本技術の利用による付加価値獲得が可能となる。

### 〈参考文献〉

- 大阪産業経済リサーチセンター（2015）、『三次元積層造形技術の活用に関する調査研究』
- 大阪産業経済リサーチセンター（2016）、『金型製造業、成形業におけるイノベーション - 三次元積層造形技術がもたらす現場での変化 - に関する調査研究』
- 木村貴広（2018）、「アルミニウム合金粉末を用いたレーザ積層造形体の金属組織制御による熱的・機械的性質の向上」『レーザ加工学会誌』、Vol.25、No.3
- 京極秀樹（2016）、「レーザーを用いた金属 AM 技術の最新動向」『精密工学会誌』、Vol.82 No.7、pp.619- 623
- 京極秀樹、池庄司敏孝（2017）、『図解 金属 3D 積層造形のきそ』、日刊工業新聞社
- 中野 貴由（2017）、「チタンの Additive Manufacturing（付加製造）」『軽金属』、第 67 号、pp.470-480
- 経済産業省製造産業局素形材産業室（2016）「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） 研究開発プロジェクトの概要」
- 産業構造審議会産業技術環境分科会 研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ（2016）「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） 技術評価結果報告書（中間評価）」

<sup>17</sup> 数 100～2000℃の高温と数 10～200MPa の等方的な圧力を被処理体に同時に加えて処理するプロセス。被処理体に均一に圧力が作用し、加圧後の形状は初期の被処理体の形状と大きく変わることがないのが特長で、①粉末材料の加圧焼結、②焼結品の残留空孔除去や鋳造品の内部欠陥除去など機械的強度が増す。㈱神戸製鋼所 Web サイト 2019 年 1 月閲覧。

<sup>18</sup> 2018 年 9 月、米国での工作機械見本市「IMTS2018」で、Hewlett-Packard 社の金属部品の量産に対応する 3D プリンタ「HP Metal Jet」を独 Volkswagen が採用することが報道されている。また、独 Porsche ではクラシックパーツに AM 技術の採用を決定するなど大手自動車メーカーが積極的に本技術を活用し始めている。

中本貴之、白川信彦、乾晴行 (2013)、「鋼系粉末の積層造形法における造形物の高性能化」『粉体および粉末冶金』、第 60 巻、第 11 号

藤原雅俊 (2013)、「消耗品収益モデルの陥穽：ビジネスモデルの社会的作用に関する探索的事例研究」『組織科学』、Vol.46 No.4、pp.56-66

松下 隆 (2016)、「現代における三次元積層造形技術の普及 - 普及理論による考察 -」『産開研論集』、第 28 号

松下 隆 (2017)、「三次元積層造形技術と公設試験研究機関の先導的役割—歴史、技術比較、普及、地域性と技術支援—」『産開研論集』、第 29 号

松下 隆 (2018)、「デジタルものづくりによる産業の構造的変化-歯科技工所のイノベーションを題材に -」『産開研論集』、第 30 号

丸谷 洋二、早野 誠治 (2014)、『解説 3D プリンター -AM 技術の持続的発展のために』、オプトロニクス社

山口修一監修 (2015)、『産業用 3D プリンターの最新技術・材料・応用事例 (エレクトロニクス)』、シーエムシー出版