

Metal Additive Manufacturing技術の最新動向

～NEDO プロジェクトの成果 (中間報告)～

京極 秀樹*1, 池庄司 敏孝*2, 米原 牧子*3

Recent Trends on Additive Manufacturing Technology: A Review ～ The results of the NEDO project ～

Hideki KYOGOKU*1, Toshi-Taka IKESHOJI*2, Makiko YONEHARA*3

In this review, the recent trends on Additive Manufacturing (AM), in particular metal AM on powder bed fusion (PBF) and directed energy deposition (DED) processes as well as binder jetting (BJT) and material extrusion (MEX) processes, were described. Additionally, the results of the NEDO project on the development of an in-process monitoring and feedback control system to assure the quality of the final products were introduced. It is essential to reveal the phenomena of recoating and melting-solidification processes in laser powder bed fusion (PBF-LB) using an in-process monitoring system because they influence strongly the occurrence of defects. Consequently, the correlation among the powder characteristics, recoating conditions, and surface morphology of the powder bed was revealed by employing the surface morphology measurement system. Moreover, the existence of areal surface-texture parameters, which are strongly correlated to the density or internal defects of PBF-LB-manufactured specimens, was revealed. These findings enable the use of in-process surface-texture monitoring of specimens to predict their density or internal defects in their products.

Keywords: Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Binder Jetting, Material Extrusion, Monitoring, Pattern Projection, Surface Texture

1. はじめに⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

積層造形あるいは3Dプリンティングとも呼ばれているアディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing, AM) (付加製造) 技術は, “ものづくり” における新たな製造技術としてますますその重要性が高まってきており, 今後のデジタル社会におけるキーテクノロジーの一つとなつてきている⁽¹⁾. 加えて, このコロナ禍において, サプライチェーンの寸断を機に3Dプリンタは再度大きな注目を集めている.

Wohlers Report⁽⁶⁾によれば, 2021年の金属3Dプリンタの出荷台数は, 約2300台余りで, コロナ禍のためここ数年はほぼ横ばいで推移しているが, 今後増加していくと予測されている. 最近では, 中国製の安価な金属3Dプリンタも台数を伸ばしてきているとともに, 新たな方式の金属3Dプリンタも開発されてきている. 我が国においても, 推計で400-500台が導入されており, 十数万台を導入しているサービスビューローもある. 世界的にみる

と, 欧米や中国においても製品を実用化している企業は限られるが, 航空宇宙分野ではロケットエンジン, ジェットエンジン部品, エネルギー関連分野ではタービンブレードなど実用製品への適用が加速しており, 我が国との差はますます広がることが危惧される. このため, 我が国においてもエネルギー・産業機器分野さらには自動車分野などへの適用を図り, 製品の高機能化を図る必要がある. また, 最近ではバインダージェットティング (BJT) の技術開発も注目を集めており, HP社やGE Additive社が新たに製品を開発するなど, 我が国の得意な自動車分野への適用も検討されており, 電動化に向けた新たな部品への適用も期待されている.

金属3Dプリンタは, このところ装置の高機能化が加速しており, 今後の製品の量産化を見越して装置のモジュール化・システム化が行われているとともに, 品質保証のためのモニタリング・フィードバック機能の開発も進められている.

原稿受付 2022年10月14日

*1 近畿大学 次世代基盤技術研究所 特任教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

*2 近畿大学 次世代基盤技術研究所 客員准教授, *3 近畿大学 次世代基盤技術研究所 研究員

E-mail: kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

一方、AM 技術を生かすためには設計技術の開発も重要で、DfAM (Design for Additive Manufacturing) と呼ばれる AM 向け設計技術が注目されている。CAD ソフトウェアにトポロジー最適化やラティス構造作成用の機能が付加されてきているとともに、AM 特有のサポート設計などを考慮した機能も追加されてきている。加えて、熱変形シミュレーション、さらには組織予測シミュレーションの開発も行われており、これらが統合された設計・製造・管理統合ソフトウェアとして体系化されてきている。これらは、今後のデジタル社会における“スマート・ファクトリー”に向けて基盤となる技術である。

本稿では、金属 AM 技術の最近の開発動向と併せて、本研究所・3D 造形技術研究センターで実施している、NEDO プロジェクトにおける研究成果についても紹介する。

2. AM 技術開発の動向⁽²⁾

(1) パウダーベッド (PBF) 方式

PBF 方式の装置の開発動向をみると、航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野の製品を対象とすることが多いため、装置の大型化・高速化、加えて高精度化・高機能化が開発目標となっている。現在、最も高速造形が可能な装置は、SLM Solutions 社が開発した 600×600×600 mm³ の造形面積を有する 12 本のレーザを備えたマルチビームの大型装置で、造形速度 1,000 cc/h とこれまでの 20 倍で桁違いの造形速度を有している。一方、高精度化・高機能化を目指した装置開発も盛んに行われており、Trumpf 社による純銅および銅合金向けのグリーンレーザを搭載した装置、Velo3D 社によるサポートレス造形が可能など高機能化した装置、熱変形や割れの防止のためのベースプレートの高温加熱機構を搭載した装置などが開発されている。

また、高品質の製品を安定して製造するために、モニタリング機能を備えている。モニタリング機能については、現状では一層毎の温度分布などの造形状況を画像として取得し、造形後に欠陥発生の原因を追究するため利用されているが、インプロセスモニタリングによるフィードバック機能も研究開発されている。

(2) デポジション (DED) 方式

DED 装置は単純形状で大型製品の製造に向いており、装置の大型化が可能である。DED 装置については、これまで多くのメーカーが装置開発を行ってきた。最近では、図 1 に示すように、従来のレーザや電子ビームを熱源とした粉末やワイヤー供給方式の装置だけでなく、アーク放電やコールドスプレーによる装置開発が行われている。アーク放電とワイヤーによる WAAM (wire arc additive

manufacturing) と呼ばれる、溶接における肉盛技術を応用した装置では単純形状の大型製品製造には有効であることから注目を集めている。加えて、溶射技術であるコールドスプレーを利用した装置開発も行われているが、現状では材質がほぼアルミニウムおよびその合金と銅およびその合金に限定されている。

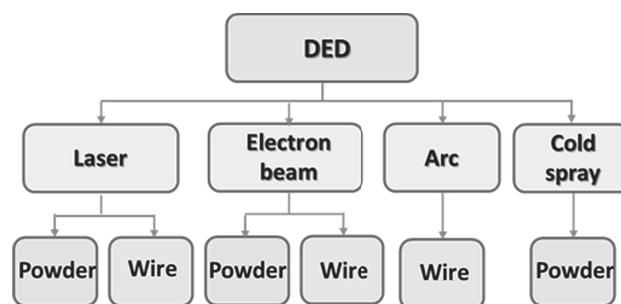


図 1 DED の分類

(3) 結合剤噴射 (BJT) 方式

PBF 方式および DED 方式は、基本的には熔融凝固現象による造形であるのに対し、BJT 方式および MEX 方式は、焼結現象を利用した造形であり、成形後に脱脂・焼結を行って製品とする方式であることから、焼結体として認識することが必要である。BJT 方式においては、パウダーベッドに樹脂を噴霧して成形体を作製した後、脱バインダ・焼結を行う造形方式で、大量生産には向いている。本方式は、粉末特性による粉末床 (パウダーベッド) の特性と併せてバインダの選択、さらにはこれらに対応した脱脂・焼結パターンなどが重要である。

最近、GE Additive 社が大型の BJT 装置、HP 社が Volkswagen 社および GKN 社と連携して BJT 装置の販売を相次いで発表したことに対抗して、先行する ExOne 社を Desktop Metal 社が買収、Digital Metals 社を Markforged 社が買収するなど BJT の分野においては大きな動きがある。BJT 方式は、自動車分野をはじめとする産業機器分野などの小物部品の大量生産への適用が期待されている。

(4) 材料押出 (MEX) 方式

MEX 方式は、樹脂用 3D プリンタでは最もよく利用されている方式で、樹脂フィラメントをノズルから吐出させて積層して成形し、成形体を脱脂・焼結して製品を製造する方式である。最近では、材料供給をフィラメントではなくコンパウンドを利用する方式の装置も開発されており、金属だけでなくセラミックスへの適用も可能となり、材料の選択範囲が広がることから注目される。また、他の方式より低価格であるため、中小企業での利用が期待できる。

3. NEDO プロジェクトの成果

3.1 金属 AM における研究開発課題⁽⁴⁾

金属 AM 技術においては、装置開発、材料開発さらにはソフトウェア開発において、まだ多くの課題がある。とりわけ、ユーザーからの要望として挙げられている課題は、従来の加工法とは異なることから、製品の品質の安定化および品質保証である。また、AM 技術を生かすための設計技術や今後のスマート・ファクトリーを考えた際のプラットフォーム構築などが重要な研究開発課題となっている。

(1) 品質保証のためのモニタリング・フィードバック技術開発

品質を保証するために、モニタリング・フィードバック技術の開発は重要である。DED 方式においては、TRFAM プロジェクトにおいて、三菱重工工作機械（株）（現在、日本電産マシントール（株））がインプロセスモニタリング・フィードバック技術を開発しており、メルトプール（熔融池）のモニタリングを行い、その形状処理を行うことによりフィードバック制御を実現している。これに対して、PBF 方式においては、レーザや電子ビームの走査速度は極めて速いことから、造形状況を把握するためのモニタリング機能が搭載されているが、フィードバック機能はまだ研究段階で搭載されていない。

PBF におけるメルトプールのモニタリングについては、CCD カメラによる一層毎のパウダーベッドの状況やサーモビューワなどによるメルトプールの温度計測などが実施されている⁽⁷⁾⁽¹¹⁾。現在、NIST（米国標準技術研究所）をはじめ多くの機関で機械学習や深層学習を利用したリアルタイムモニタリングデータを高速処理するための技術開発が行われている⁽¹²⁾。

(2) 品質管理における製品の欠陥検出技術

製品の欠陥検出については、ポストプロセスで従来の素形材や溶接における X 線 CT、超音波探傷などによる欠陥検出手法が適用されているが、ガス欠陥のような内部の細かな欠陥の検出は難しいのが現状である⁽⁷⁾⁽⁹⁾。このため、重要製品には他の素形材と同様に HIP 処理が行われている。また、航空宇宙分野などにおいては損傷許容設計手法の考え方が取り入れられて設計されている。

3.2 PBF-LB プロセスにおけるプロセスパラメータ⁽¹³⁾

PBF-LB プロセスは、図 2 に示すように粉末を積層するプロセスとレーザ照射による熔融凝固プロセスからなることから、製品の品質を担保するために多くのプロセスパラメータを最適化しておく必要がある。加えて、上述したように、造形状況をモニタリングし、欠陥の発生が予測される場合にはフィードバック制御を行う必要が

ある。現状の装置では、パウダーベッドあるいはメルトプールのモニタリングは行われているが、フィードバック制御は行われていない。Mani ら⁽¹⁴⁾は、PBF-LB プロセスにおけるリアルタイムモニタリングおよび制御を行うためのプロセスパラメータと最終製品の品質との関係を調査し、リアルタイムモニタリング・フィードバック制御技術開発のための指針を与えている。

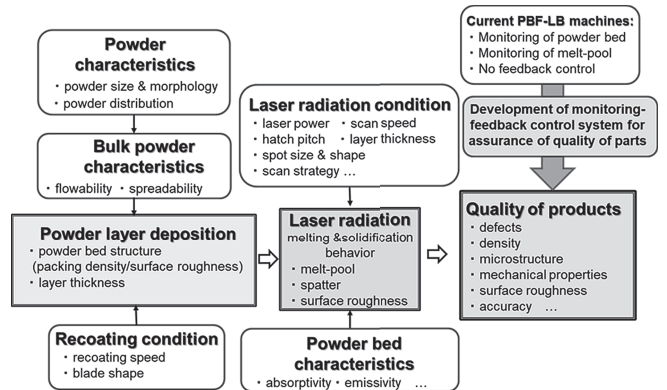


図 2 PBF プロセスにおけるプロセスパラメータ⁽¹³⁾

レーザ照射における造形条件を検討する場合には、主要なパラメータであるレーザ出力 P (W)、走査速度 v (mm/s)に加えてハッチピッチ h (mm)、積層厚さ t (mm)が重要なパラメータである。これらを含めたプロセスパラメータとしてよく利用されるのが、次式で与えられる（体積）エネルギー密度 E (J/mm³)である。

$$E = P/vht \quad (1)$$

また、造形条件を決定するためによく利用されるのがプロセスマップである。図 3 に示すように、一般的に密度を指標としたレーザ出力と走査速度の関係を示すマップが作成され、高密度の造形体が得られるプロセスウィンドウを使って最適なレーザ出力と走査速度を決定する。加えて、造形体の表面性状は密度との関係が深く表面粗さを指標としてプロセスマップを作成する場合もある⁽¹⁰⁾。図 3 は、密度を指標としたプロセスマップであるが、併せて造形体の表面性状および欠陥発生状況を示している。この図からわかるように、プロセスウィンドウ内では、相対密度が 99.7%以上と高く、欠陥の発生が少ないとともに、造形表面においてほぼ均一なトラック（メルトプール痕）が観察される。このことは、造形体の密度と表面性状に相関があることを示唆している。

3.3 パウダーベッド表面性状モニタリング技術の開発⁽¹³⁾

プロジェクトにおいては、パウダーベッド表面および

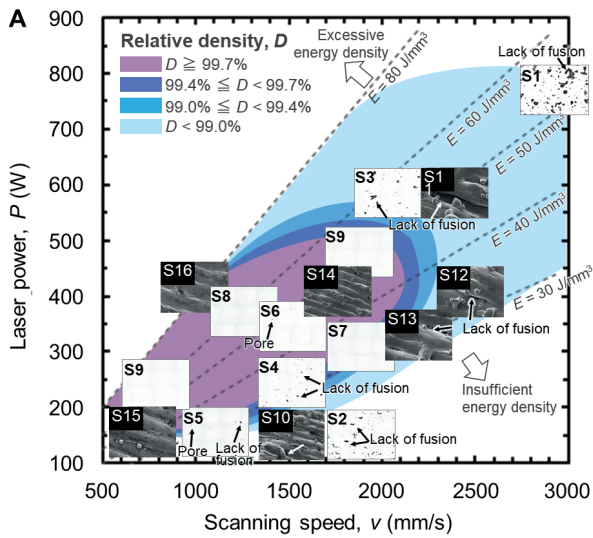


図3 PBF-LBプロセスにおけるプロセスマップの例⁽¹⁹⁾

造形面のモニタリングにパターン投影（fringe projection）法を用いた。これまでの研究報告によると、Zhang ら⁽¹⁶⁾や Kalms ら⁽¹⁷⁾は、パターン投影法により表面性状を高さ方向で 10 μm 以下で計測している。DePond ら⁽¹⁸⁾は、低コヒーレント光干渉法により表面性状を Sa として計測しておりマップ化している。また、Fleming ら⁽¹⁹⁾も inline coherent imaging (ICI) システムを開発し、in-situ モニタリング可能な装置開発を行っている。以下に、パウダーベッドの表面性状計測法について紹介する⁽¹³⁾。

プロジェクトにおいては、パウダーベッドの表面性状を計測できる専用のパウダーベッド表面性状測定装置（図4）を開発した。本装置は、図4に示すように粉末をリコートするリコート装置（テストベンチ）とパウダーベッド表面性状を測定する装置から構成されている。リコート装置の主な仕様は、次のとおりである。

- ①リコート速度：30～40000 mm/min
- ②造形面積：150 mm×150 mm
- ③ブレード：硬質金属製

表面性状測定装置を用いてパウダーベッド表面性状を次のように定量化した。プロジェクターにより二次元パターンを被検物に投影し、別の角度の受光カメラでその画像データを取得し、二次元パターンの変形量から三角測量の原理により三次元形状（点群）データを算出した。三次元形状（点群）データを基にベストフィット面（最小二乗法により求めた最小二乗（回帰）平面）を設定し、ベストフィット面を基準として、パウダーベッドの凹凸高さ方向の分布を標準偏差 σ の値を用いて、ノイズを除去するため 2σ（約 95%）の領域を算出し、2σ 値を表面

の凹凸高さ方向のパラツキとして表面性状を評価した。σ は次式で与えられ、ほぼ表面性状パラメータ Sq に対応する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \approx S_q$$

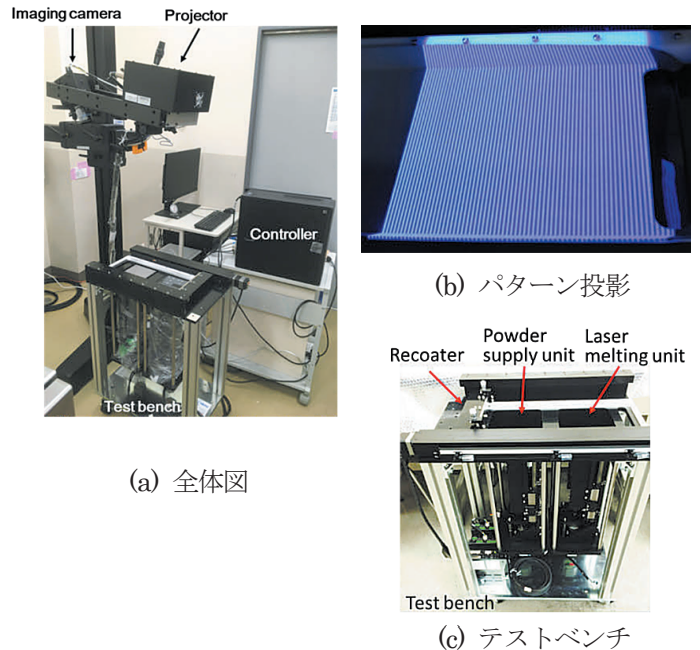


図4 パウダーベッド表面性状測定装置

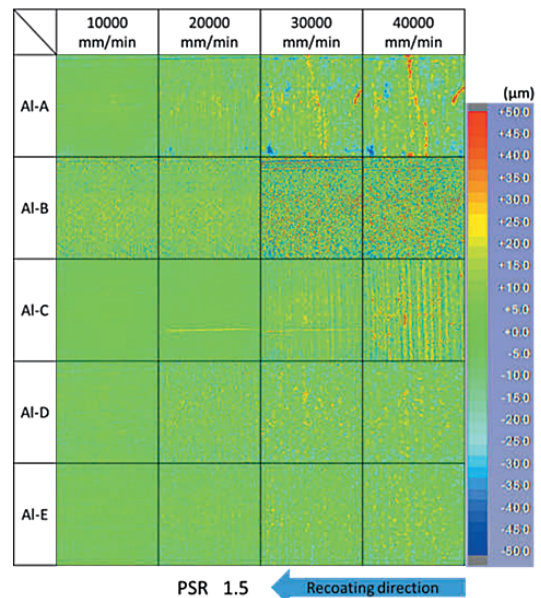


図5 パウダーベッド表面性状とリコート速度の関係⁽¹³⁾

Al-10Si-0.4Mg 合金粉末の粉末特性とリコート速度を変化させて計測した表面性状 2σ をカラーマップ化した例を図5に示す。図中の赤は凸、青は凹の状態を示す。2σ 値はリコート速度が遅い場合には、10～20 μm で、リコ

ート速度が速くなると流動性の悪い粉末ほど表面が荒れる傾向を示した。このように、パターン投影法により表面性状を数値化して評価できた。また、モニタリング装置の計測結果から、粉末の材質および特性、ならびにリコート速度により粉末床の表面性状は大きな影響を受けることがわかった。

3.4 モニタリング装置による欠陥発生予測⁽¹⁹⁾

レーザ照射による熔融凝固現象に関するモニタリングについては、熔融凝固現象を解明し、欠陥発生の原因を明らかにすることは重要である。これまで、メルトプールの形状あるいは温度変化をモニタリングすることによりフィードバック制御を可能とする試みもなされている。

メルトプールの現象を利用したモニタリング・フィードバック制御を考慮した研究は、Creaghs ら⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾や Lane ら⁽²³⁾は、高速度カメラとフォトダイオードセンサを用いてメルトプールをモニタリングすることによりプロセスパラメータを制御してフィードバック制御を行うことを提案している。しかし、これらは高速度カメラを利用することから高価で実用的ではない。これに対して、Coeck ら⁽²⁴⁾は、フォトダイオードを使用したメルトプールモニタリングにより熔融不良を高感度で予測する手法を開発しているが、フィードバック制御までは行っていない。このように、モニタリングに関しては、多くの研究が行われているが、PBF-LB においてはフィードバック制御までには至っていないのが現状である。

プロジェクトにおいては、3.2 節で述べたように、密度と造形面の表面性状の相関があることがわかった。加えて、Aoyagi ら⁽²⁵⁾は、電子ビームパウダーベッド積層造形において、欠陥発生と表面性状に相関があることを明らかにしている。このため、レーザ出力と走査速度を変化させてキューブ造形体を作製して、密度測定を行うとともに、造形面の表面性状を ISO 25178-6⁽²⁶⁾に規定されている 35 個の表面性状パラメータについて三次元プロファイラ (Zygo New View9000) により測定した。測定例を図 6 に示す。三次元プロファイラの計測結果から、取得できた表面性状パラメータ 35 個のうち、表面の突出谷部深さ Svk や二乗平均平方根高さ Sq が造形密度との相関が高く、表面性状パラメータを用いて造形密度の予測が可能であることがわかった。このように、三次元プロファイラによる造形体の表面性状と造形密度および内部欠陥状況の相関を検討した結果、表面性状パラメータによる造形密度および欠陥発生予測が可能であることがわかった。

このため、図 7 に示すプロジェクトで開発したモニタリング装置 (ニコン株式会社と近畿大学で共同開発) に

より造形面の表面モニタリングを行い、密度と表面性状の関係を検討した。その結果、三次元プロファイラによる計測と同様に密度と表面性状パラメータの相関が認められた。このことは、表面性状パラメータによる欠陥発生の予測とフィードバック制御の可能性を示唆している。現在、モニタリング装置による欠陥発生予測とフィードバック機能について開発中である。

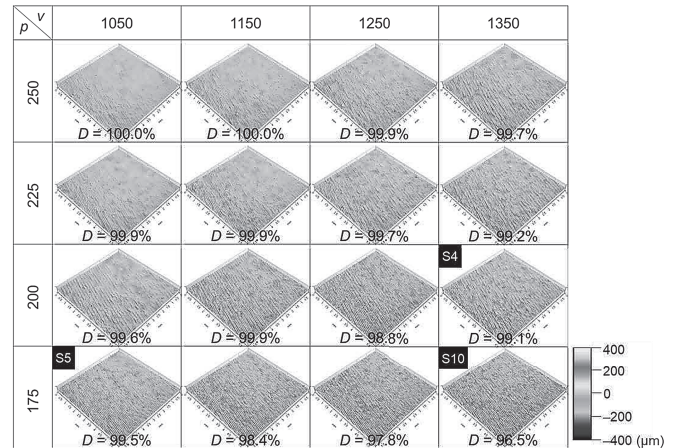


図 6 三次元プロファイラによる測定結果の例⁽¹⁹⁾

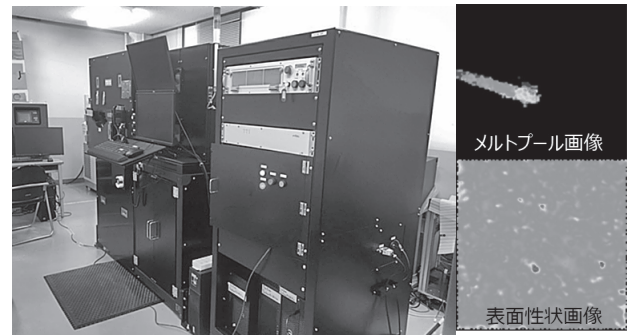


図 7 モニタリング装置および取得データ

4. おわりに

本稿では、最近の金属 AM 装置の開発動向と NEDO プロジェクトの研究開発状況について紹介した。金属 AM 技術の変遷と今後の展開について、その概要を図 8 にまとめた。この図に示すように、この 40 年間で装置開発の状況も試作品を製造するラピッドプロトタイプ用の装置から、2000 年から 2010 年の間はいわゆる“死の谷”を経験して、2010 年以降は欧米や中国の国家プロジェクトの実施やデジタル化の波に乗って、ここ数年で急速に実用製品を製造できる AM 装置へと変わってきた。対象製品も各分野に広がってきたことから、その方式も多種多様となってきたとともに、汎用装置からカスタム装置さらには装置のシステム化へと変化しつつある。

将来は、各種方式の装置のハイブリッド化が進むことにより、材料もマルチマテリアル化、さらにはスマートマテリアル化へと進んでいくものと予測される。加えて、設計技術やシミュレーション技術の高度化が進むことにより、デジタルツインやサイバーフィジカル（CPS）システムの開発などの製造技術の革新により、今後は“ものづくり”が変革していくと予測される⁽²⁷⁾。

このような世界の潮流を見ると、我が国においてもさらなるAMに関する基盤技術の開発と併せて、AM技術普及のための基盤整備および人材育成を早急に行う必要がある。

本稿が、読者の皆様の参考となれば幸いである。

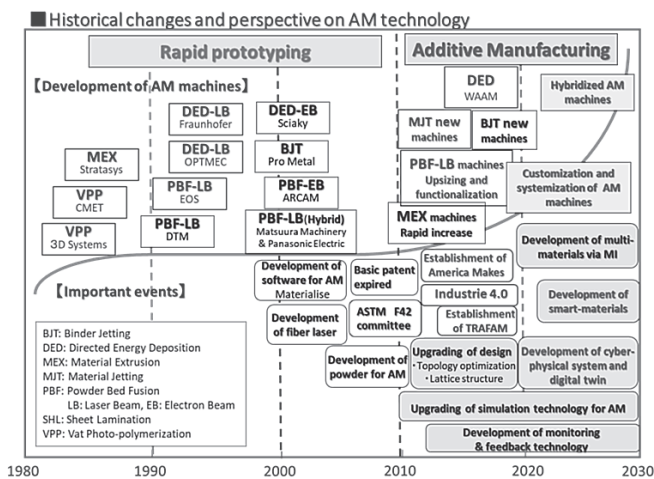


図8 AM技術の変遷と今後の展開⁽²⁸⁾

謝辞

本稿の一部は、NEDO「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」ならびに「積層造形部品開発の効率化のための基盤技術開発事業」による研究成果の一部である。ここに、経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ならびに技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）の関係各位に深謝の意を表す。また、装置開発して頂いた株式会社ニコンに深謝の意を表す。

参考文献

(1) 京極秀樹：日本機械学会誌，122 (2019) 4-7。
 (2) 京極秀樹：機械技術，70(1) (2022) 2-6。
 (3) 京極秀樹：日本溶射学会誌，58 (2021) 115-120。
 (4) 京極秀樹：日本画像学会誌，60 (2021) 333-342。
 (5) 京極秀樹：型技術，60 (2021) 1-5。
 (6) Wohlers Report 2022, Wohlers Associates Inc. (2022)。

(7) S.K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R.K. Leach, A.T. Clare, *Materials and Design*, 95 (2016) 431-445.
 (8) 渡邊誠：日本ガスタービン学会誌，46 (2018) 187-192。
 (9) 京極秀樹，池庄司敏孝：日本ガスタービン学会誌，46 (2018) 181-186。
 (10) H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji, *Mechanical Engineering Reviews*, 7, 19-00182 (2020)。
 (11) P. Yadav, O. Rigo, C. Arvieu, E. Le Guen, E. Lacoste, *Crystals*, 10 (2020) 524。
 (12) National Institute of Standards and Technology, “A Review of Machine Learning Applications in Additive Manufacturing.”
<https://www.nist.gov/publications/review-machine-learning-applications-additive-manufacturing>. (accessed 2021 05-06)
 (13) K. Yuasa, M. Tagami, M. Yonehara, T.-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Aoki, H. Kyogoku, *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, 109 (2021) 3919-3932。
 (14) M. Mani, B.M. Lane, M.A. Donmez, S.C. Feng, S.P. Moylan, R.R. Fesperman, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), (2015) 8036。
 (15) B. Zhang, J. Ziegert, F. Farahi, A. Davies, *Additive Manufacturing*, 12 (2016) 100-107。
 (16) M. Kalms, R. Narita, C. Thomy, F. Vollertsen, and R. B. Bergmann, *Additive Manufacturing*, 26 (2019) 161-165。
 (17) P.J. DePond, G. Guss, S. Ly, N.P. Calta, D. Deane, S. Khairallah, M.J. Matthews, *Materials and Design*, 154, (2018) 347-359。
 (18) T.G. Fleming, S. G.L. Nestor, T.R. Allen, M.A. Boukhaled, N.J. Smith, J.M. Fraser, *Additive Manufacturing*, 32, (2020) 100978。
 (19) M. Yonehara, C. Kato, T.-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Kyogoku, *Scientific Reports*, 11(2021) 22874。
 (20) T. Craeghs, F. Bechmann, S. Berumen, J.-P. Kruth, *Physics Procedia*, 5 (2010) 505-514。
 (21) S. Berumen, F. Bechmann, S. Lindner, J.-P. Kruth, T. Craeghs, *Physics Procedia*, 5 (2010) 617-622。
 (22) T. Craeghs, S. Clijsters, E. Yasa, F. Bechmann, S. Berumen, J.-P. Kruth, *Optics and Lasers in Engineering*, 49 (2011) 1440-1446。
 (23) B. Lane, S. Moylan, E.P. Whinton, *Rapid Prototyping J.*, 22 (2016) 778-787。
 (24) S. Coeck, M. Bisht, J. Plas, F. Verbist, *Additive Manufacturing*, 25 (2019) 347-356。
 (25) K. Aoyagi, H. Wang, H. Sudo, A. Chiba, *Additive Manufacturing*, 27 (2019) 353-362。
 (26) ISO 25178-2: 2012: Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Areal-Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization (2012)。
 (27) M. Ghobakhloo, J. Manufacturing Technology Management, 29 (2018) 910-936。
 (28) 京極秀樹：機械技術，68(14) (2020) 16-19。