

Metal Additive Manufacturing技術の最新動向

～PBF-LBにおける研究開発動向と課題～

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 Trends and Issues in R&D of PBF-LB Additive Manufacturing ～

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

In this review, the recent trends on metal additive manufacturing (AM) on powder bed fusion (PBF), directed energy deposition (DED), binder jetting (BJT), and material extrusion (MEX) processes, were reported. In particular, the trends and issues of research and development (R&D) in laser powder bed fusion (PBF-LB) additive manufacturing was introduced. The progress in PBF, DED, BJT, and MEX processes was discussed using AMPOWER maturity index in metal AM 2023. The technology maturity and industrialization in these processes have been improved greatly in a few years. The R&D reported in SFF symposium 2023, such as monitoring technology and analysis of monitoring data, manufacturing technology on wire-fed DED, BJT and MEX, and new functional materials were introduced. Additionally, the issues in R&D of PBF-LB on development of machines, monitoring and feedback technology, and quality assurance of products were discussed.

Keywords: Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Binder Jetting, Material Extrusion, Monitoring feedback system

1. はじめに

最近の金属3Dプリンタの発展は目覚ましく、航空宇宙分野、医療分野はもとより、エネルギー・産業機器分野、自動車分野へと利用され始めている。とりわけ、航空宇宙分野における製品への適用が盛んに行われていることから、製品の大型化が必須となってきたり、装置の大型化が進んできている。これに伴ってレーザのマルチ化による造形速度の高速化が進んできている。また、自動車の電動化などに伴って純銅への適用が要求されているため、グリーンレーザやブルーレーザを搭載した装置、マルチマテリアルに対応した装置開発など装置の高機能化が進んできている。加えて、適用可能な金属材料も増えてきており、Additive Manufacturing (AM) 特有の材料開発も行われている。

金属AM技術は、あくまでも従来の加工法である鋳造、鍛造、粉末冶金などと同様に、素形材を加工する新たな加工法で、従来の加工法と決定的に異なる点は、トポロジー最適化などによる形状付与、ラティス構造や水管な

ど内部構造を付与でき、材料特性だけでなく形状による製品の高機能化をも図ることができることである。そのため、“ものづくり”においてAM技術を有効に活用するためには、設計思想を変革する必要がある。このため、DfAM (Design for Additive Manufacturing) と呼ばれているAM向きの設計思想などを取り入れなければ、そのメリットは生かせなくなる。すなわち、3Dプリンタの出現により従来法では加工できなかった形状付与に加えて形状の複雑化や一体化造形が可能となり、軽量化や冷却能の向上など製品に新たな機能を付与できる。さらに、AMはデジタル・マニュファクチャリングであることから、将来のスマート・ファクトリーにおける重要な加工法であり、欧米や中国では、金属3Dプリンタを数十台、数百台並べた工場も出現してきている。

このように、金属AM技術は欧米や中国においては、極めて重要な加工技術として活用されている。

本稿では、金属AM技術の最近の動向を紹介するとともに、研究開発動向や課題についても述べる。

原稿受付 2023年10月13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

2. 金属 AM 技術の最近の開発動向⁽¹⁾⁻⁽³⁾

2.1 AM の分類と特徴

AM は、2009 年に ASTM F42 委員会により、7 つの categories に分類され、日本工業規格においても 2020 年 3 月に、表 1 に示すように JIS B 9441⁽⁴⁾により名称等が規定された。以後、各方式は、表 1 の括弧で示す 3 文字の略称で記す。

金属 3D プリンタに適用される方式は、PBF、特にレーザ粉末床溶融結合 (PBF-LB) が主流であるが、電子ビーム粉末床溶融結合 (PBF-EB) の装置開発も行われているとともに、DED においても多くの方式が取り入れられてきている。加えて、最近では BJT および MEX も注目されてきている。このように、AM の方式も多岐にわたってきており、高品質の製品の製造が可能となってきたが、造形方式により得意・不得意の形状があり、適用材料も造形方式に依存するため、各種方式の装置の特徴を理解し、製品形状と材質を装置に対応させることが重要である。

表 1 AM 技術の分類 (JIS B 9441 による) 2020 年 3 月制定⁽⁴⁾

| 用語 | 定義 | 対応英語 |
|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 結合剤噴射、ハインダジェット | 液状の結合剤を選択的に供給して、粉末材料を結合するプロセス | binder jetting (BJT) |
| 指向性エネルギー堆積 | 集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させるプロセス | directed energy deposition (DED) |
| 材料押出 | ノズル又はオフィスから材料を押し出し、選択的に供給するプロセス | Material extrusion (MEX) |
| 材料噴射、マテリアルジェット | 造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス | material jetting (MJT) |
| 粉末床溶融結合、パウダーベッドフュージョン | 熱エネルギーを利用して粉末床を選択的に溶融凝固するプロセス | powder bed fusion (PBF) |
| シート積層 | シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成するプロセス | sheet lamination (SHL) |
| 液槽光重合 | 容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化するプロセス | vat photopolymerization (VPP) |

2.2 開発動向

金属 AM に利用される方式は、表 1 に示す categories のうち、主に 4 つである。金属に利用されるこれらの方式の技術的成熟度と産業化度を図 1⁽⁵⁾に示す。この図からわかるように、金属 AM 技術として最も利用されている PBF-LB は、産業的に利用度も高く、技術的成熟度も非常に高い。PBF-EB は、ここ数年で技術開発が進み技術的成熟度も向上し、利用が拡大しつつある。DED に関しては、これまで主に利用されてきた熱源をレーザ、媒体を粉末とした方式に加えて、熱源を電子ビーム、媒体をワイヤーとした方式、熱源をアーク放電、媒体をワイヤーとした方式などが実用化段階に入ってきている。

PBF および DED は溶融凝固現象を利用した造形法であるのに対して、BJT および MEX は拡散現象による焼

結現象を利用した造形法である。BJT については、大手メーカーの参入により実用段階に入ってきたが、MEX については、実用的に利用される段階に入ってきたところであり、材料・成形・脱バインダ・焼結のプロセスを体系化していくことと併せて、製品への適用例を増やしておくことが重要である。

以下に、PBF および DED 方式の装置開発動向について述べる。

(1) PBF 方式

現状では、最も実用化されている PBF 方式の装置開発の動向を図 2 に示す。この図では、縦軸を高速化・大型化、横軸を高機能化の指標として描いている。PBF-LB 装置については、航空宇宙分野の製品製造に利用されることが多いことから装置の大型化が進んできており、これに伴って造形の高速化が要求されてきている。現在、最も造形体積が大きく高速造形可能な実用装置は、SLM Solutions 社の SLM NXII で 600 mm×600 mm×600 mm および造形速度 1000 cc/h で、GE Additive 社の X Line2000R も 800 mm×400 mm×500 mm の大型造形可能な装置である。逆に、自動車用部品など小型製品を大量に造形する試みもなされており、製品に対応した装置開発が行われ始めている。

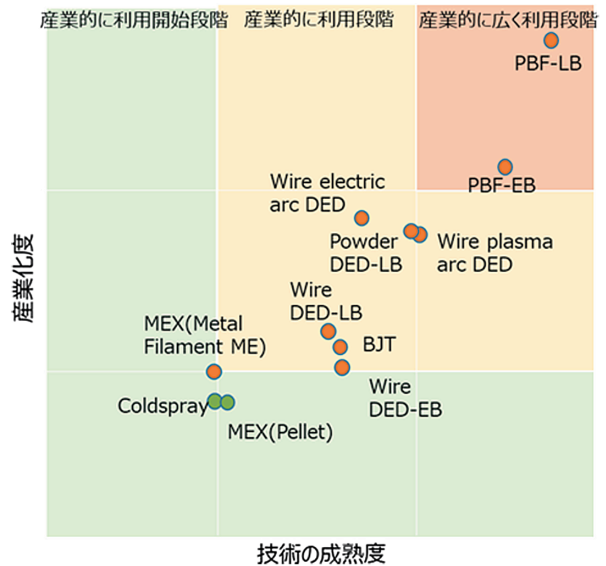


図 1 AM 技術の産業指数と技術的成熟度 (参考: <https://www.metal-am.com/ampower-report-2023-shows-additive-manufacturing-growth/>)

機能化の面からみると、現在、自動車の電動化が叫ばれていることなどから、純銅の造形に注目が集まっております。グリーンレーザを搭載した装置も TRUMPF 社からリリースされている。また、EOS 社のカスタム装置を開

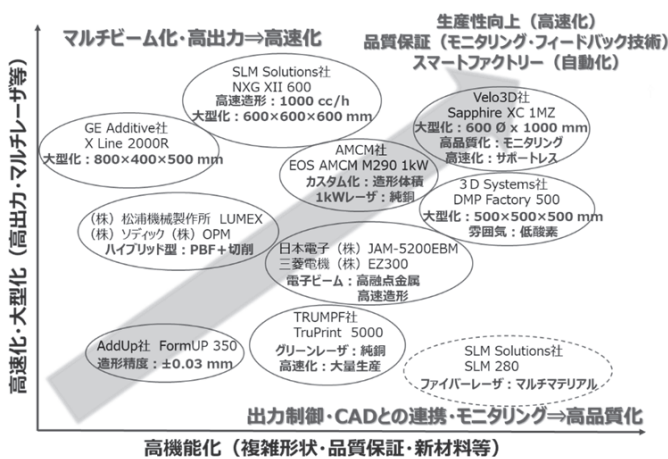
発している AMCM 社は 1 kW シングルモードファイバーレーザーで純銅の造形を行っている。Velo3D 社の装置はサポートレスの造形を謳っているなど、各社とも装置の高機能化を図っている。このように、装置の差別化が進んできている。

PBF-EB も、GE Additive 社だけでなく、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) のプロジェクトで開発した日本電子 (株) および多田電機 (株) (三菱電機 (株) ブランド) の装置、さらには海外メーカーも新たな装置開発が行われており、装置の高機能化が進んできており、製品の品質も向上してきている。

しかしながら、PBF における製品の品質向上および品質の安定化は、重要な課題として残っており、インプロセスモニタリング・フィードバック機能の開発が求められている。詳細は、次章で述べる。また、PBF は、従来の casting や forging などの加工法ではできない複雑三次元形状が造形可能なことから、新たな素材の加工技術の一つである。これを活かすためには、設計方法の革新を行うことが重要で、DfAM と呼ばれる AM 技術を生かした製品設計を行うことが重要である。すなわち、

- ①トポロジー最適化&シミュレーションの採用による軽量化・高機能化
- ②ラティス構造の利用による軽量化
- ③ジェネラティブ・デザインの採用による設計の効率化・製品の高性能化

などが重要であることに加えて、AM 独特のサポート設計なども考慮する必要がある。



(注：本図は、代表的な装置の特徴を示すのみで、優劣を示すものではない。)

図 2 PBF 装置の開発動向 (日刊工業新聞 2023 年 3 月 27 日付)

(2) DED 方式

DED は、図 3 に示すように、熱源をレーザー、媒体を粉末とした装置ほとんどであったが、最近では熱源を電子ビームやアーク放電、媒体をワイヤーとした装置も多く開発されてきている。図 1 に示したように、技術的成熟度も急速に向上してきており、対象製品はいずれも単純形状・大型部品が主であるが、ジェットエンジンのインペラの補修用装置などの開発も行われている。DED に関しては、ロボットアームを利用した装置やパラレルリンク機構を利用した装置なども開発されており、大型化が進んでいる。最近では、大型構造部材だけでなく、純銅と鋼を組み合わせるなどマルチマテリアルの製品にも利用されてきている。

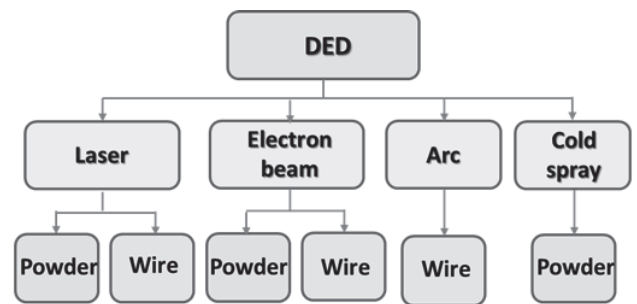


図 3 DED の分類

(3) 結合剤噴射 (BJT) 方式

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、脱脂・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、焼結を利用した造形法であり、バインダに対応した脱脂・焼結パターンなどが重要である。BJT は自動車用部品などの小型部品の大量生産向きであるが、GE Additive 社が開発した装置は、casting の代替技術として開発されており、他社の BJT が対応している小型部品と一線を画している。

(4) 材料押出 (MEX) 方式

金属材料を対象とした MEX 方式は、金属粉末を含んだ樹脂フィラメントあるいはコンパウンド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。フィラメントを利用する方式では、精度よく成形できるのに対して、コンパウンドを利用する方式では、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という特徴がある。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が、脱脂・焼結プロセスが必要であるため、導入のネックとなることから、レシピとして提示されている。

3. 研究開発動向と課題

3.1 研究開発動向

AM分野では最も古くから開催されているSFFシンポジウムを通じて最新の研究開発動向について紹介する。

2022年8月に米国テキサス州オースティン市で開催された第34回SFF Symposium2023では、講演件数：521件、参加登録者数：590名で、特に米国におけるAmerica Makesなどでの研究成果について、プロセス開発や材料開発など幅広い分野の研究報告がなされた。2023年における主な講演特集は、次のとおりであった。

- ① PBF モニタリングおよびデータ解析技術の開発
 - ・モニタリング技術の開発
 - ・機械学習等のAIを利用したモニタリングデータ解析に関する研究
- ② CAD, Scan Patterns, Slicingに関する研究
- ③ 製造技術に関する研究
 - ・WAAM, 特にWire-fed DEDに関する研究
 - ・BJTに関する研究
 - ・MEX (FFF: Fused Filament Fabrication)に関する研究

このように、製造技術や材料開発に加えて、我が国では講演の少ないWAAM, BJT, MEXなどに関する基礎的研究から応用研究までの情報を得ることができる。

主な講演の特徴をまとめると次のとおりである。

- ① Process Development: Powder Bed Fusion (PBF) Monitoring and Imagingに関する非常に多くの報告が行われ、これに付随して、Data Analytics: Laser Powder Bed Fusion(PBF-LB)に関する報告も多く、PBF-LBにおける品質保証の重要性が伺える。なお、モニタリングの対象は、メルトプールである。
- ② Process Development: Directed Energy Deposition, 特にWire-fed DEDに関する報告ならびに大型製品の製造に関する報告が多くなされ、DEDに関しては大型製品への対応が重要であることが伺える。
- ③ PBFおよびDEDに関しては、メルトプールのモニタリングデータを用いて種々のAI処理による欠陥予測ならびに組織予測まで、多くの研究報告がなされている。ただし、フィードバックに関する報告は、著者らの報告のみであった。
- ④ 米国の強いBJT及びMEXに関する基礎から応用までの報告が多く、今後の拡大が予測される。
- ⑤ そのほか、ダイオードレーザによるPBF造形に関する報告がシェフィールド大学, MJTに分類されるLiquid Metal Jet-on-Demand Printingに関する報告がローレンスリバモア研究所からなされるなど、新たな方式の装置開発も行われている。

⑥ CAD・Scan Pattern・Slicingの特集が生まれ、CAD/CAMに再度踏み込んで多くの講演がなされたことは、とりわけレーザPBFにおける装置の高機能化ならびに品質保証への対応に大きく寄与する。

⑦ 金属材料並びに樹脂材料に関しても、大型製品へ対応可能な装置開発に関しても多くの報告がなされた。

⑧ Applicationに関する報告と併せて、EducationおよびEconomics of AMに関する報告もなされ、実用化が急速に進んでいることが伺える。

以上のように、各方式のプロセスに関する研究開発が多く行われているとともに、材料開発やアプリケーションに関する報告も多く行われた。

3.2 研究開発における課題⁹⁾

金属AMにおいては、製品を高品質で安定して製造することが重要な課題である。そのためには、(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および(2)品質管理における製品の欠陥検出技術が重要な課題となっている。

ここでは、著者らが技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(TRAFAM)で実施しているPBF-LBに関する研究開発について紹介する。

(1) PBF-LBプロセスにおけるプロセスパラメータ¹⁰⁾
PBF-LBプロセスは、図4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。これまでPBF-LBにおける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おり¹¹⁾、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⁾。しかしながら、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。これは、メルトプールの計測においてはデータが非常に大きく高速での処理が難しいためである。

(2) モニタリング・フィードバック技術の開発

著者ら¹³⁾は、フィードバックを行うために、メルトプールの計測ではなく、造形面の表面性状を計測することにより、フィードバック制御を行うことを提案している。図5は、密度を指標としたプロセスマップで、併せて造形体の表面性状および欠陥発生状況を提示している。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ことがわかる。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。

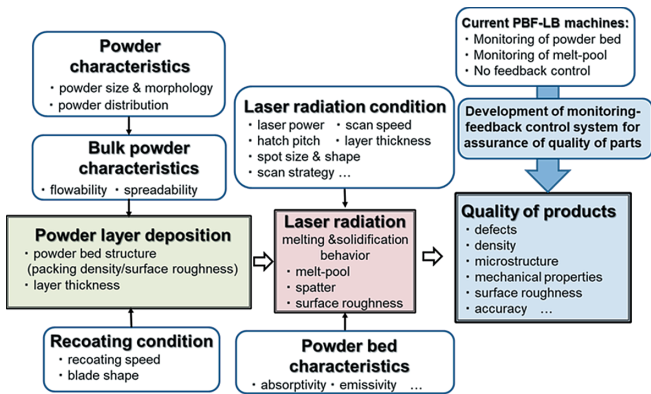


図4 PBFプロセスにおけるプロセスパラメータ⁽⁶⁾

そこで、図5に示したレーザ出力と走査速度の範囲でキューブ造形体を作製して、アルキメデス法による密度測定を行うとともに、造形面の表面性状をISO 25178-6⁽¹⁴⁾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 NewView9000) により測定した。図6に示すように、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、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を明らかにした。

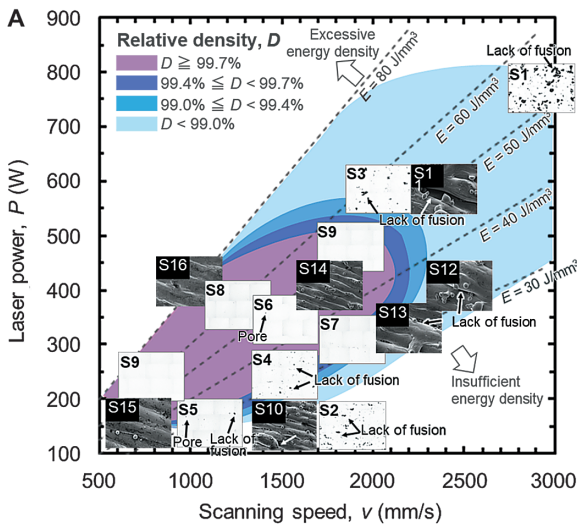


図5 PBF-LBプロセスにおけるプロセスマップの例⁽¹³⁾

このため、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。

本プロジェクトでは、造形面の表面画像を用いた機械学習による欠陥発生予測システムを開発しており、その概要を図7に示す。本システムでは、まず、造形面の表面画像を用いて機械学習によりプロセスマップを自動生成し、最適造形条件を導出する機能を開発している。しかし、PBF-LBにおいては、表面性状は複雑でスパッタの発生などから欠陥が発生しやすい。このため、造形における一層ごとの造形面の表面画像を用いて表面性状を計測し、密度と相関の深い表面性状パラメータを用いて各層ごとの表面画像から欠陥発生予測を行い、欠陥が発生すると予測された場合には再熔融するフィードバック制御を行うシステムを提案している。

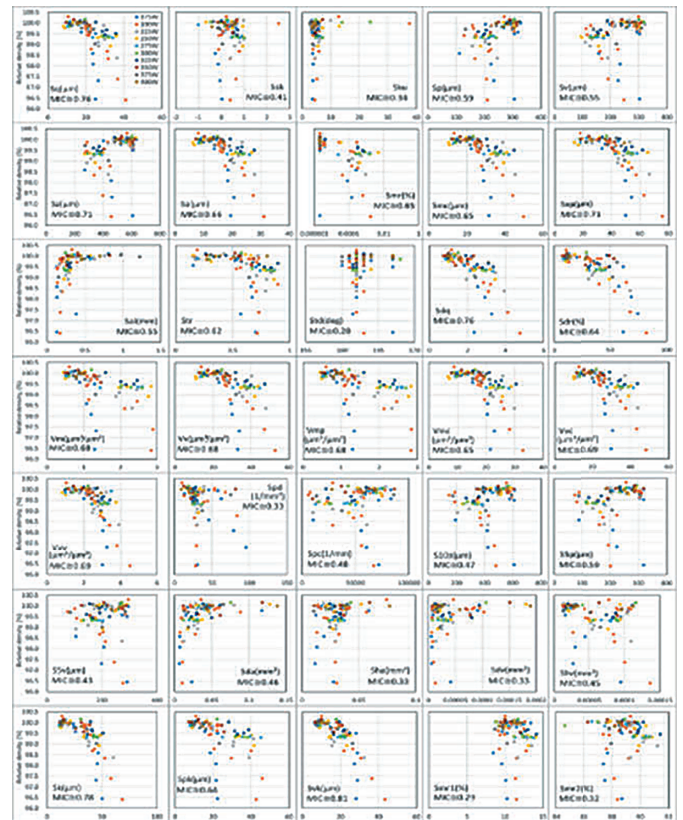


図6 非線形解析による表面性状パラメータと密度の相関⁽¹³⁾

3.3 金属AMにおける課題⁽³⁾

金属AMは、ここ十年くらいの間急速に発展してきた技術で、まだ多くの課題がある。装置開発における課題、特に技術的成熟度が高いPBF-LB装置に関して、

- ① 装置の大型化, 造形の高速化, 製品の高精度化
- ② 品質の安定化

が求められており、インプロセスモニタリング・フィードバック技術の開発が必要である。

加えて、

③ 品質評価法の確立

も求められており、現状では、非破壊検査の手段として X 線 CT などによる検査が行われているが、製品形状や材質により限界がある。このため、場合によっては、損傷許容設計の適用が行われている。最終的には、熱間静水圧成形 (HIP) の適用による欠陥の除去が実施されているが、表面欠陥や未溶融 欠陥が存在する場合には適用できないなどの課題がある。

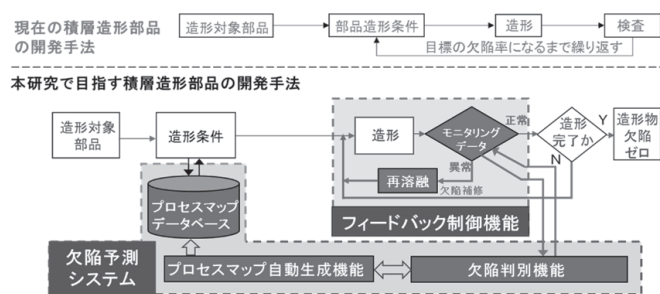


図 7 インプロセスモニタリング・フィードバックシステム (NEDO プロジェクト)

加えて、

- ④ 設計における AM 技術の理解が進んでいない
 - ⑤ 金属 AM 技術を使いこなす人材が不足している
- などの課題もある。

さらに、上述した SFF シンポジウムにおける講演内容と我が国における学会などでの講演内容を比較すると、我が国では材料関係に関する報告がほとんどであるが、SFF ではプロセスに関する報告が非常に多いのが特徴で、CAD/CAM から金属・セラミックスに関する PBF, DED, BJT, MEX プロセスにおける現象の解明、モニタリング技術の開発による品質保証の範囲まで幅広く網羅しており、基礎的内容から応用まで国立研究所、NIST、大学並びに企業が連携して体系的に研究開発が行われているなど、大きな違いがある。また、今回 CAD・Scan Pattern・Slicing (CAD/CAM) の特集が生まれ、多くの報告がなされた。これは、とりわけレーザ PBF 装置における高速造形やレーザ出力制御が可能となり、モニタリング・フィードバック機能による造形品質向上に大きく寄与すると考えられ、ソフト・ハードを含めた装置開発の新たなステージに入ってきたといえる。我が国においても、このような体系的な研究開発の体制を構築することが重要である。

4. おわりに

金属 AM 技術は、“ものづくり”における新たな重要な加工技術として活用されてきており、今後ますます利用が拡大していくものと思われる。欧米や中国の動きをみると、AM 技術を活用した製品づくりも行わなければ、我が国の“ものづくり”も将来的には危うくなる。

このため、次世代“ものづくり”を担う AM 技術を広めていくために、戦略的対応が重要で、研究開発拠点の整備と教育システムの構築などが重要である。

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る。

参考文献

- (1) 京極秀樹：機械技術, 70(1) (2022), pp.2-6.
- (2) 京極秀樹：型技術, 38(3) (2023), pp.24-27.
- (3) 京極秀樹：機械技術, 2023 年 9 月臨時増刊号, 71(9) (2023), pp.2-7.
- (4) JIS B 9441: 2020, 付加製造 (AM) - 用語及び基本概念. 日本規格協会(2020).
- (5) <https://www.metal-am.com/ampower-report-2023-shows-additive-manufacturing-growth/>.
- (6) K. Yuasa, M. Tagami, M. Yonehara, T.-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Aoki, H. Kyogoku, Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 109 (2021) 3919-3932.
- (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) M. Yonehara, C. Kato, T.-T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Kyogoku, Scientific Reports, 11(2021) 22874.
- (14) ISO 25178-2: 2012: Geometrical product specifications (GPS)-Surface texture: Areal-Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization (2012).