

■ レビュー ■

金属積層造形技術の最新動向と応用展開

京極 秀樹^{*1}, 池庄司 敏孝^{*2}, 米原 牧子^{*3}

The Recent Trend and Applications on Metal Additive Manufacturing: A Review

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

The recent trend and applications on metal Additive Manufacturing technologies are reviewed. Additive manufacturing (AM) technology has been dramatically attracting attention as a breakthrough technology in advanced manufacturing since 2013, and the sale of AM systems has increased rapidly in the aerospace, automotive, and medical industries. The recent trend of the development of metal 3D printers, the development of the AMed functional materials and the recent applications are introduced. Also the current state of the research development in the national (TRAFAM) project and the activities in the Advanced Additive Manufacturing Center are introduced.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Printer, Laser Sintering/Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition, Binder Jetting, TRAFAM Project

1. はじめに

金属積層造形技術は、アディティブマニュファクチャリング (Additive Manufacturing, 以下 AM と記述する) 技術の一分野であるが、昨年のレビュー⁽¹⁾にも書いたように、ここ数年の進展は目覚ましいものがある。昨年のこの分野における大きなニュースは、GE 社が、唯一の電子ビームパウダーベッド方式の装置メーカーである ARCAM 社と世界第 2 位のレーザパウダーベッド方式の Concept Laser 社を傘下に収めたことである。また、工作機械メーカーである DMG MORI 社が開発したデポジション方式のハイブリッド型装置だけでなく、ヨーロッパでは多くの販売台数を誇るレーザパウダーベッド方式の装置メーカーである Realizer 社を子会社したことは、装置開発が“ものづくり”において極めて重要で、今後の装置販売の伸びが期待できることを示唆している。さらに、Trumpf 社のように、一度販売をやめていた企業が新たに装置開発を始めたことは、その証左でもある。

Wohlers report 2016⁽²⁾によると、金属 3D プリンタの導入台数は、世界市場において、2013 年には 340 台程度、2014 年には 640 台程度との報告があり、2015 年度には 800 台に上ったといわれており、各社とも増産体制を築いてきており、“ものづくり”における新たな加工法としての地位を築いてきている。我が国においても、2016 年

には、大手企業などにかかなりの数の装置導入が行われていると予測される。

ここ数年の金属 3D プリンタ開発のトレンドは、高速化・高精度化・大型化で、これらの課題を解決する要素技術として、レーザや電子ビーム光源の高出力化や高品質化、製品の高品質化に必要なモニタリング技術やシミュレーション技術の開発などが行われてきている。2015 年 11 月にフランクフルトで開催された Formnext 2015⁽³⁾で提案されたようにモジュール化された装置は、昨年 Tier1 の大手部品メーカーで稼働を開始した。

我が国の工作機械メーカーを中心として AM 技術と切削技術を融合化したハイブリッド型の装置開発も注目を浴び始めており、DMG MORI 社、YAMAZAKI MAZAK 社はデポジション方式と切削のハイブリッド型装置の改良を行って新たな装置を投入している。また、新たに OKUMA 社がハイブリッド型の装置を導入した。パウダーベッド方式と切削のハイブリッド型の装置メーカーである (株) 松浦機械製作所も大型化に向けて舵を切り、600×600mm の造形面積を有する装置を発売した。これに併せてソディック社も 350×350mm の造形面積を有する装置を発売した。このように、我が国においても、工作機械メカを中心とした大きな動きが出てきている。

海外においては、America Makes のプロジェクト、EU

原稿受付 2017 年 5 月 1 日

^{*1} 近畿大学工学部 ロボティクス学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)

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

^{*2} 近畿大学次世代基盤技術研究所 准教授

^{*3} 近畿大学次世代基盤技術研究所 研究員

連絡先: 京極秀樹 (研究代表者)

のプロジェクトをはじめ、多くのプロジェクトが動いており、着々と成果が出始めているとともに、大学や研究機関の拠点化が進んできている。我が国においても、2014年度より開始された経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム—次世代産業用 3D プリント技術開発—」⁽⁴⁾と内閣府による府省連携の SIP プログラム 24 テーマが開始され、この 3 年間で成果が出始めている。

本稿では、2016 年におけるレーザーを用いた最近の AM 技術の動向と今後の展開、さらには国家プロジェクトなどを実施している当研究所・3D 造形技術研究センターの動きについても紹介する。

2. AM 技術の最新動向⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾

金属 3D プリントに利用されている造形方式は、主として(1)粉末床溶融 (Powder Bed Fusion ; 以後、パウダーベッドと記す。)方式と(2)指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition ; 以後、デポジションと記す。)方式であるが、我が国を中心に開発されている。これらの方式と切削機能をハイブリッド化した方式がある。最近では、バインダージェット方式やマテリアルージェット方式の装置開発も行われ始めている。以下に、これらの最近の動向について紹介する。

(1)パウダーベッド方式

光源としてレーザーを利用したパウダーベッド方式の金属 3D プリント開発のトレンドは、

- ① 1 kW の高出力のファイバーレーザを搭載するなど、レーザーの高出力化
- ② 2 台あるいは 4 台のファイバーレーザを搭載するなど多重光源化
- ③ 250mm×250mm から 500mm×500mm 以上への造形エリアの大型化

が進んでいるとともに、

④ 溶融池 (メルtpール) のモニタリング機能の付与などが挙げられる。表 1 には、大型のパウダーベッド方式の装置について示している。大型装置については、我が国では、昨年 SLM Solutions 社の SLM500HL が数社で導入されている。

2015 年に、Trumpf 社が再度パウダーベッド方式の装置 TruPrint 1000 LMF を投入し、2016 年には TruPrint 3000LMF を投入している。

また、2015 年に提案されたオランダの Additive Industries 社のモジュール化した MetalFAB1 システムは、2016 年には Tier1 の大手部品メーカーである GKN 社において稼働を開始している。将来的には、製品によっては、マスカスタマイゼーションへ展開するものと予

測される。

表 1. 金属大型 3D プリントの仕様 (各社ホームページによる)

装置	EOS M400	SLM SLM500HL	Concept Laser X line 2000R	3D Systems ProX400
造形サイズ(mm)	400x400x400	500x280x320	800x400x500	500x500x500
レーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー
出力 (W)	1000	400/1000	1000x2	500x2
スポット径 (μm)	—	80~120	100~500	—
走査速度 (m/s)	~7	~10	~7	—
積層厚さ (μm)	20~	20~200	30~150	10~100
造形速度 (cm ³ /h)	—	105	10~100	—

(2)デポジション方式

デポジション方式は、単純形状で大型製品の製造が可能、複層製品の製造が可能などのメリットを有している。昨年も紹介したが、フランス・IREPA Laser 社が開発した CLAD®と呼ぶデポジション技術を用いて、BeAM 社は、図 1 に示すような新たな装置開発を行っており、パウダーベッド方式で造形した製品にデポジションを行うなど新たな製品開発へ展開している。

このように、最近ではデポジション方式においても、高速で高精度の造形体の作製が可能となっており、今後さらに開発が進んでいくものと予測される。



図 1. デポジション方式の装置と製品例 (提供 : BeAM 社)

(3)ハイブリッド方式

工作機械の技術を活かして AM 技術と切削技術をハイブリッド化した装置開発は、我が国の特徴でもある。(株)松浦機械製作所は、大型化へ展開しており、造形面積 600×600mm の装置開発を行っている。この装置の特徴は、大型の造形テーブルと併せて、1 kW ファイバーレーザを搭載し造形容量を増やすとともに、切削パスも最適化することで高速化を図っている点である。同様の形式の装

置をソディック社も 2014 年に開発し、2016 年には 350 × 350mm の造形面積へと大型化を図っている。これらの装置は、金型メーカーを中心に導入されている。また、切削機構とデポジション方式のハイブリッド型の装置は、DMG MORI 社が 2013 年に世界に先駆けて開発し、YAMAZAKI MAZAK 社も 2014 年にデポジション方式の積層造形と切削機構を複合化した装置を開発したが、2016 年には装置改良を行っている。また、2016 年には、新たに OKUMA 社も参画し、造形だけでなく熱処理も可能な複合機として売り出している。

2016 年には、新たにバインダージェット方式の装置開発も ExOne 社により行われている。この方式は 2000 年頃に実用化されていたが、間接法で密度の問題もあり、金属ではなく鋳物用の砂型に利用されてきた。しかし、最近になって金属への適用も行われるようになってきた。ExOne 社の報告⁹⁾によると、ステンレス鋼を対象とした場合には、表 2 に示すように相対密度は 98 % 程度で、金属粉末射出成形法(MIM)に匹敵する密度が得られており、高強度部品でなければ、適用の可能性は高いと思われる。製品例を図 2 に示す。我が国では、RICOH 社¹⁰⁾も研究開発を進めており、この方法は大量生産が可能であるため、材質と形状を絞れば今後の展開が期待できる。

表 2. バインダージェット法と他の加工法との比較¹⁰⁾

Parameter	3DP	MIM	Press & Sinter	Casting	Machining
Density	98%	98%	86%	100%	100%
Roughness	1.6	0.8	1.6	3.2	1.6
Weight	0.1-20Kg	0.1-100g	5g-2Kg	30g-4.5Kg	No limit



図 2. バインダージェット方式による製品例 (PowderMet2016, Boston, ExOne 社ブース展示)

3. 機能性材料の開発状況

新たな材料開発に関してみると、

①水アトマイズ粉末(SUS)や Fe と Ni 混合粉末によるコストダウンを図る研究などが行われている。水アトマイズステンレス鋼粉末を利用した報告では、酸素量は高く

なるが、機械的性質に関してはほぼ同等の結果が得られている。

②新たな材料による積層造形技術の開発

Mg 合金粉末の電子ビームパウダーベッド(EBM)方式による造形体を HIP 処理と T6 熱処理を施すことにより、降伏強さ 194 MPa, 引張強さ 312 MPa, 伸び 14% の合金が作製できると報告されている。また、W 粉末のレーザパウダーベッド(SLM)方式による造形体では、相対密度 95%, EBM 方式では相対密度 99.9%の造形体が作製できると報告されている。その他、形状記憶合金などの造形に関する報告もなされている。

このように、装置の性能向上と相まって、AM 技術の適用範囲も広がりを見せている。AMPM2016 において報告された造形方式と適用材料に関する例を表 3 にまとめて紹介しておく。

表 3. 造形方式と適用材料 (AMPM2016 報告より)

造形方式	装置	材料
SLM	SLM125HL	Mg合金 (MAP+43 (Mg-4%Y-3%Nd))
	—	Ti64
	RenishawAM250	W (原子炉用)
	EOS	二相ステンレス鋼(原子炉用)
	—	SUS316L(WA&GA)
EBM	3D SystemsProX250	17-4PH(WA&GA)
	3D systemsPXM	Fe&Ni混合粉末
	—	IN718, IN713C
	—	Cu-4.3Sn, AlSiMg, マルエージング鋼
	—	—
EBM	ARCAMQ20	Ti64
	ARCAM	W (原子炉用)
LMD(DED)	—	Mg合金 (MAP+43 (Mg-4%Y-3%Nd))
	Optmec	Ti64
BJ	ExOne	SUS420, SUS316L, Atomet (W-AT)
AFS	—	AlSiC, Al2219

4. 先進活用事例

金属積層造形による製品への適用例は、現状では航空宇宙分野、自動車用試作品、インプラントなどの医療関連分野が主体で、その傾向は昨年と変わっていないように思われる。

航空宇宙関連では、GE 社が図 3 に示す燃料噴射ノズルの本格的な製造に入ろうとしており、タービンブレードなど航空機関連の製品への利用が加速してきている。エアバスグループは、新たな 3D プリント技術研究のため航空宇宙専門工場の立ち上げを発表するなど、積極的に航空機への利用を促進している。その例を図 4 に示す。設計においてはバイオニックデザインによる製品設計を行っている。そのほか、Tier1 の大手部品メーカー ATOS 社も航空機関連の軽量部品への開発に乗り出しており、従来の 1/3 程度までの軽量化を実現した報告例もある。これは、トポロジー最適設計とラティス構造を駆使して設計が行われて達成されている。

自動車分野においては、各社装置導入を行って積極的にエンジン回りの試作品などへの適用を進めている。また、Metal Additive Magazine 誌⁽¹¹⁾によれば、電子自動車の試作車には、本体フレームの継手やシート用の構造体などへの適用例も示されている。

その他、産業分野では、Schunk 社のグリッパへの適用なども行われ、欧米の展示会で展示されている。

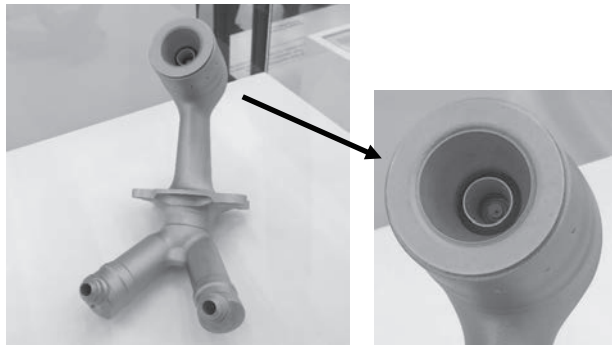


図 3. 燃料噴射ノズル
(Materialise World Summit 2017 展示より)

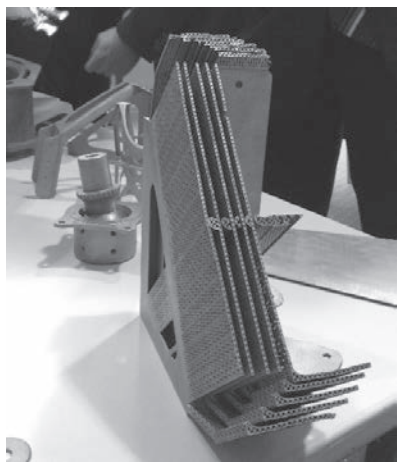


図 4. 航空機用部品の例 (World PM2016, Hamburg, Special Interest Seminar, Airbus Hamburg 社講演展示より)

5. 3D 造形技術研究センターの取り組み

5.1 3D 造形技術研究センターの概要

本センターは、平成 26 年度に採択された経済産業省「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 プリント技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発プログラム）」^{(4)・(8)}を実施する母体として設置した。現在、次の 2 テーマを中心に活動している。

(1)経済産業省「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 プリント技術開発及

び超精密三次元造形システム技術開発プログラム）」（平成 26 年度～30 年度）の実施母体である技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構(TRAFFAM)による「次世代産業用 3D プリント技術開発プロジェクト」の実施

(2)経済産業省平成 26 年度「地域イノベーション協創プログラム補助金」（3D プリント拠点整備によるオープンプラットフォーム構築支援事業）により導入した SLM Solutions 社製 SLM280HL 装置による共同研究（平成 28 年度 4 社）及び人材育成事業

その他、東広島市補助金による AM 研究会の開催などにより、人材育成を行っている。

5.2 次世代型産業用 3D プリント技術開発の状況⁽¹²⁾

当センターにおいては、本プロジェクトにおける基礎技術である溶融凝固機構の解明、熱変形シミュレーション技術の開発、加工データベースの構築などに関する研究を実施している。2016 年までのうち一部を紹介する。

(1)溶融凝固機構の解明

金属積層造形においては、溶融凝固機構を明らかにしておくことは、造形体の品質を安定化するためにも非常に重要なことである。このため、本プロジェクトで開発した要素技術研究機に高速度カメラとサーモビューワを設置して、溶融凝固現象の解明を行っている。その結果、図 5 に示すような溶融形態をとることがわかった。

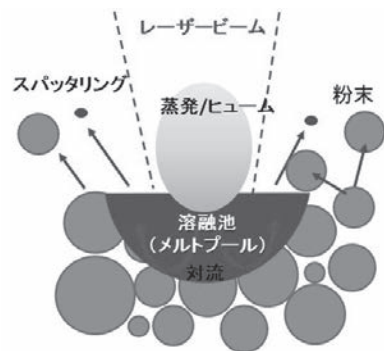


図 5. 高速ビデオによる溶融現象のモデル

(2)加工データベースおよび材料データベースの構築

要素技術研究機によりステンレス鋼、ニッケル基超合金、アルミニウム合金およびチタン合金に関する最適造形条件の検討を行い、図 6 に示すようなプロセスマップの作成を行っている。特に、高出力化での高速造形条件の検討について詳細に検討を行っている。また、最適条件下で各種材料の造形を行い、材料特性を検討し、各種材料において、優れた強度を有する造形が可能となっている。

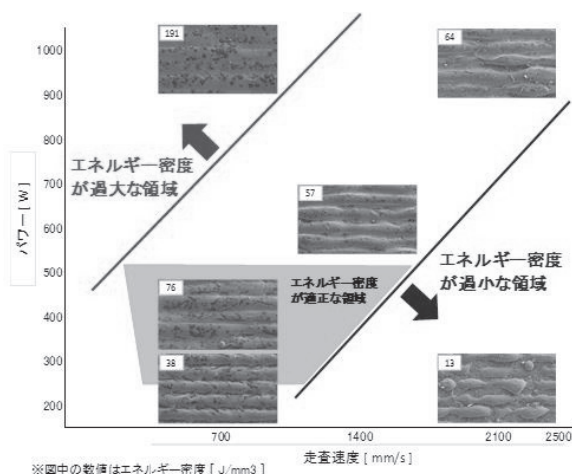
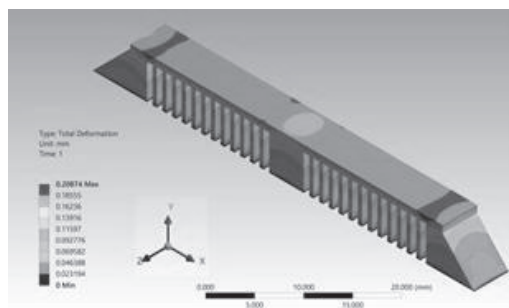


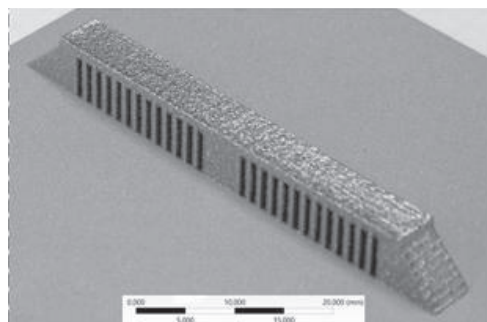
図 6. インコネル 718 粉末のプロセスマップ

(3)熱変形シミュレーション

金属積層造形では、溶融凝固現象を伴うため、熱変形が生じる。このため、できる限り熱変形のない造形条件を検討する必要があるが、現状では試行錯誤によるところが多い。このため、熱変形シミュレーション技術の開発は重要となっている。当センターでは、汎用ソフトウェアを用いて単純形状の造形体に対する解析技術を開発している。他の研究でもよく利用されている櫛型試験片の解析例を図 7 に示す。



(a) 解析例



(b)造形体

図 7. インコネル 718 造形体の解析例

6. おわりに

本研究所報告に、ここ数年 AM 技術の最新動向に関するレビューを報告しているが、AM 技術における世界の動きをみると、ここ数年の急速な 3D プリンタの性能および AM 技術の向上により、本技術の高付加価値製品への適用は目覚ましいものがある。とりわけ、航空宇宙関連を中心とした高付加価値製品への適用は、急速に進んでいる。

これまで述べてきたように、GE 社は自社の AM 技術のプラットフォームを確実に確立してきており、Tier1 の大手部品メーカーも航空宇宙部品から AM 技術を取り込んだ製品設計・製造へと着実に歩んでいるように思える。我が国の企業においても、これを見逃すと世界のものづくり産業の流れに取り残されるように感じる。欧米はもちろんのこと、中国においても大きな産業としての動きが見えてきた。我が国においても、TRAFAM を中心にこの流れに取り残されないようにしたいと考えている。本稿が読者の皆様の参考となれば幸いである。

本稿をまとめるに当たりご協力頂いた近畿大学次世代基盤技術研究所・3D 造形技術研究センター関係者各位ならびに研究室の院生諸君に謝意を表する。

参考文献

- (1) 京極秀樹, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, 6, (2015), pp.179-183
- (2) Wohlers report 2016, (2016), Wohlers Associates Inc..
- (3) N. Williams, Metal Additive Manufacturing, Winter 2015, 1, (2015-4), pp.27-39
- (4) 大胡田稔, 素形材, 55, (2014), pp.54-59
- (5) 京極秀樹, 計測と制御, 54, (2015), pp.386-391
- (6) 京極秀樹, 機械技術, 63, (2015-9), pp.68-72
- (7) H. Kyogoku, Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015, 1, (2015), pp.31-39
- (8) 京極秀樹, 型技術, 31, (2016-2), pp.18-23
- (9) R. Lucas, AMPM Proceedings 2016, Boston, (2016)
- (10) T. Sasaki, H. Iwatsuki, T. Yamaguchi, D. Yamaguchi, Proceedings of Printing for Fabrication 2016, Manchester, (2016), pp.139-142
- (11) D. Hund, Metal Additive Manufacturing, Summer 2016, 2, (2016-2), pp.63-75
- (12) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構, “ひらめきを形に！ 設計が変わる新しいモノづくり” シンポジウム講演集, (2016)