

■ 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

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

Hideki KYOGOKU*¹

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 mechanical properties of the AMed 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

1. はじめに

2010 年の本誌創刊号において、「最近のレーザ積層造形技術の開発動向」⁽¹⁾と題して寄稿して以来、毎年金属積層造形に関する内容の論文やレビューを寄稿してきた。ご存じのとおり、アメリカ・オバマ大統領による 2013 年 2 月の一般教書演説以後、3D プリンタへの関心が世界中で急速に高まり、2010 年当時と比べて様相が一変している。この間、ラピッドプロトタイピングと呼ばれていた技術は、AM(Additive Manufacturing)あるいは 3D プリンティングと呼ばれるようになってきた。このような三次元積層造形技術の急速な進歩の背景には、3D プリンタの基本特許が切れて低価格の樹脂用 3D プリンタが出現したこと、デジタルものづくりの重要性が増してきたことなどによると考えられる。また、金属 3D プリンタに関しても、ここ数年でその性能が大幅に向上し、航空宇宙用分野、インプラントなどの医療分野を中心に自動車や産業機器の試作品などへ適用されるようになってきたためと考えられる。Wohlers report 2015⁽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 年度には千数百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、金属積層造形技術も新たな段階に入ってきたといえる。

ここ数年の金属 3D プリンタの開発のトレンドは、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、レーザー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。新たな動きとした 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へ向かう動きがある反面、パウダーベッド方式では小型装置の高機能化を図る動きもあり、装置開発の拡がりも見られる。また、装置開発を中止していたメーカーも再度新たな装置開発を始める動きもあり、中国や台湾など各国での開発も活発化してきている。このような動きはパウダーベッド方式が中心ではあるが、デポジション方式の装置開発もヨーロッパを中心に進められてきており、イギリス・TWI(The Welding Institute)を中心とした AMCOR(Additive Manufacturing for Wear and Corrosion Applications)プロジェクトが実施されるなど、この分野での動きも活発化してきている。さらに、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いる。

これまでも報告してきたが、我が国においても、AM 技術の重要性についての認識が高まり、2014 年度より経

原稿受付 2016 年 5 月 6 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

産産業省「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⁾が、金属粉末を対象とした国家プロジェクトとして開始され、また内閣府による SIP プログラム 24 テーマが開始され、この 2 年間で成果が出始めている。

本稿では、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⁾⁻⁽¹¹⁾

AM 技術は、2009 年に ASTM F 42 委員会により 7 つのカテゴリーに分類され、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。また、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。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ーを搭載するなど、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ーを搭載するなど多重光源化
- ③ 250×250mm から 500×500mm 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 (メルトプール) のモニタリング機能の付与などが挙げられる。

最近の代表的な大型装置の仕様を表 1 に示す。EOS 社 M400 は、1 kW の Yb ファイバーレーザーを使用した造形サイズ 400 mm×400 mm の装置で、走査速度は従来機と同様であるが、高速・高精度を図るためのリコータ、パウダーベッド等のモニタリングシステム、さらには本体造形部に接続して粉末処理および製品の自動取出しが可能なりサイクリング・フィルタリングシステムを装着でき、最近では 4 台の光源を搭載して大型の薄肉製品を製作することが可能となっている。SLM Solutions 社は、他社に先行して多重光源化を進めており、SLM500HL では 4 台光源を搭載した装置を開発している。これらの装置についても、自動化機構やモニタリング機能を搭載しており、生産性の向上を図っている。また、大型化については、2012 年に Concept Laser 社が Fraunhofer 研

究所および Dimler 社と共同開発した造形サイズ 600 mm×400 mm の X Line 1000R に続き、2015 年にさらに大型の 800mm×400mm の超大型装置 X Line 2000R を開発している。また、Concept Laser 社は、メルトプールのモニタリング機能を搭載した装置を開発しており、今後品質保証が重要となる航空宇宙部品製造などにおいてはフィードバック機能も含めた開発が加速されると思われる。

2015 年には、Trumpf 社が再度パウダーベッド方式の装置 TruPrint 1000 LMF を投入しており、Renishaw 社も 500W ファイバーレーザーを搭載した AM500M を投入するなど新たな装置開発が進められている。2015 年 12 月には、台湾の工業技術院(ITRI)が、レーザー方式のパウダーベッド方式の装置開発を行っており、新たに組織制御用のモジュレータを搭載するなど新たな動きが加速してきている。

また、装置開発において注目されるのは、2015 年 11 月にフランクフルトで開催された Formnext 2015⁽⁶⁾において、ドイツの Concept Laser 社が、“AM Factory of tomorrow”と題する金属 3D プリントのモジュール化及びシステム化を、オランダの Additive Industries 社もモジュール化した MetalFAB1 システムを提案している点である。これは、ドイツの Industrie 4.0 におけるスマートファクトリーを意識した取り組みであると思われる。このような提案は当然の流れで、まだコンセプトの段階ではあるが、近いうちに実現されマスマスプロダクションへと移行することが予測される。

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)	400×400×400	500×280×320	800×400×500	500×500×500
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	1000×2	500×2
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。最近の動きとして、ドイツ・Trumpf 社は、TruLaser Cell 3000 を新たに投入してきており、造形速度は、5~200 cm³/h である。フランス・IREPA Laser 社が開発した CLAD⁽⁷⁾と呼ぶデポジション技術を用いて、BeAM 社は Magic2.0 を開発しており、Pratt&Whitney 社のエンジン

開発プロジェクトなどへも参画している。また、同社は5軸制御のソフトウェアを開発しており、FANUC などのCNC 制御への返還も可能にしている。

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きており、今後さらに開発が進んでいくものと予測される。

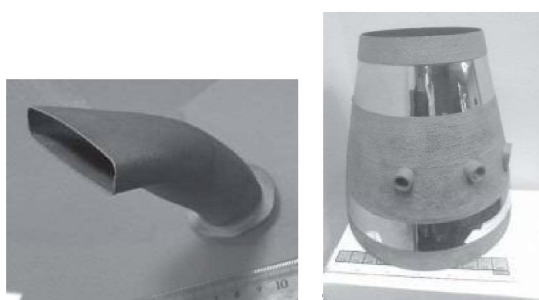


図 1. デポジション方式による製品例 (提供: BeAM 社)

(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)松浦機械製作所が松下電工(株)(現在、パナソニック(株))の技術であるパウダーベッド方式の粉末積層造形と切削機構を合わせた装置を世界に先駆けて開発し、同様の形式の装置をソディック社も 2014 年に開発した。これらの装置は、金型メーカーを中心に導入されてきている。また、デポジション方式のハイブリッド型の装置は、DMG MORI 社が世界に先駆けて開発し、YAMAZAKI MAZAK 社も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ている。

ハイブリッド型については、造形速度が遅いが、トータル製品の製造時間とコストの削減、材料の削減、AM 製品の表面後加工の除去などのメリットがあるため、これらのメリットを活かせる高機能金型、現在溶接などの接合を利用している製品などへの適用が有効である。

3. AM 用粉末と造形体の特性

3.1 AM 用粉末に要求される特性

粉末に要求される特性は、装置の光源、粉末供給方式、リコータの方式などに依存するため、装置に合った特性を有する粉末を選択する必要がある。これらに係る因子として、次のような項目が挙げられる。

- ①流動性(Flowability)
- ②拡がり性(Spredability)
- ③粉末形状(真球度)
- ④粒度分布
- ⑤酸素量

⑥リサイクル性

通常、粉末については装置メーカーから指定されることも多いが、これらの項目については、十分に管理しておくことが重要である。また、多量に造形を行う際には、リサイクル性も検討しておく必要がある。この際には、

- ・粉末の真球度の変化
- ・酸素量の増加

について十分に管理しておくことが肝要である。

3.2 造形体の特性とその評価法

造形体の機械的性質については、造形方向により組織が異なるため ASTM 規格では、造形面に対して 0° 、 45° 、 90° の試験片(図 2)の作製が求められている。このように、造形方向により組織に異方性が現れることが報告されているため、造形条件を考慮した機械的性質について十分に検討しておくことが重要である。また、造形体の疲労強度や破壊靱性値についても求められてきており、これは本法による造形体の信頼性が増してきたことの証左でもあるが、重要部品については、最終的にはマイクロ X 線 CT などによる品質保証を行うことが必要である。

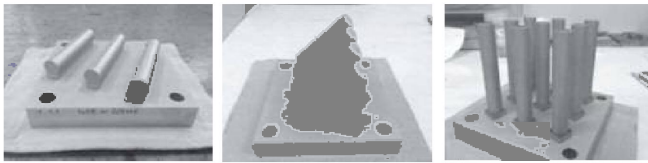
レーザービームパウダーベッド方式の装置による造形体と熱処理体の機械的性質について、それぞれ表 2 および表 3 に示す。

表 2. レーザービームパウダーベッド方式の装置による造形体の機械的性質 (EOS 社データシートより) ⁽¹²⁾

Materials	Direction	As-built			
		Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hardness
		(MPa)	(MPa)	(%)	
Ti64	horizontal	1140±50	1290±50	(7±3)	320±20HV5
	vertical	1120±80	1240±50	(10±3)	
Al10SiMg	horizontal	270±10	460±20	(9±2)	119±5HBW
	vertical	240±10	460±20	(6±2)	
IN718	horizontal	780±50	1060±50	(27±5)	30HRC
	vertical	634±50	980±50	(32±5)	

表 3. レーザービームパウダーベッド方式の装置による熱処理体の機械的性質 (EOS 社データシートより) ⁽¹²⁾

Materials	Direction	Heat treated			
		Yield strength	Tensile strength	Elongation	Hardness
		(MPa)	(MPa)	(%)	
Ti64	horizontal	1000±50	1100±40	(13.5±2)	—
	vertical	1000±60	1100±40	(14.5±2)	
Al10SiMg	horizontal	230±15	345±10	12±2	—
	vertical	230±15	350±10	11±2	
IN718	horizontal				47HRC
	vertical	1150±100	1400±100	(15±3)	



(a) 0° (b) 45° (c) 90°
図2. 引張試験片の例

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ほとんどである。

航空宇宙関連では、GE社が次世代LEAPエンジンの25%をAM技術により製作すると発表して噴射ノズルやブレードへの適用を決めて以来、各社とも本分野への適用を加速させている。GE社は噴射用ノズルについては、2018年には年間4万個製造するとしている。Rolls-Royce社は、イギリス・MTCセンター、ARCAM社との共同でジェットエンジンのベインを製造したと発表している。Airbus社は、多くの航空機部品への適用を行ってきている。また、各ロケット開発メーカーにおいては、ロケットエンジンの燃料噴射ノズル、噴射ノズルなどへの適用も考えており、この分野への適用は、今後ますます進むものと予測される。

我が国においても、自動車メーカーの動きが活発化してきており、自動車分野へのエンジン回りはじめとする試作品への適用も各社とも進んできている。この分野においても、自動車開発期間の短縮と試作品のコストダウンのための装置導入が進行している。

我が国においては、金型への適用が多く行われてきており、複雑な配置をした冷却水管を有し、深溝、高いリブを有する高機能金型の作製が行われている。これらはハイブリッド型のパウダーベッド方式で切削機能を有する装置にとって有効な適用分野である。

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プリンタ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）」^{(10),(13)-(15)}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（平成26～30年度）「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）」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(TRAFAM)による「次世代産業用3Dプリンタ技術開発プロジェクト」の実施

(2) 経済産業省「地域イノベーション協創プログラム補助金」（3Dプリンタ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）による共同研究（平成27年度4社）及び人材育成事業（共同研究内での人材育成及びセミナー実施）

5.2 次世代型産業用3Dプリンタ技術開発の状況

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熔融凝固機構の解明、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。その一部を紹介する。

(1) 熔融凝固機構の解明

金属積層造形においては、熔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おいては、高速度カメラとサーモビューワを設置できるようになっている。図3に析出硬化型ステンレス鋼における高速度カメラによる測定結果の例を示す。これから、メルトプールの状況、トラックの状況、凝固時間などがわかる。また、サーモビューワにより温度分布についても測定可能となっている。これらのデータを用いて、プロセスマップの最適化、シミュレーションへの適用などが可能となっている。

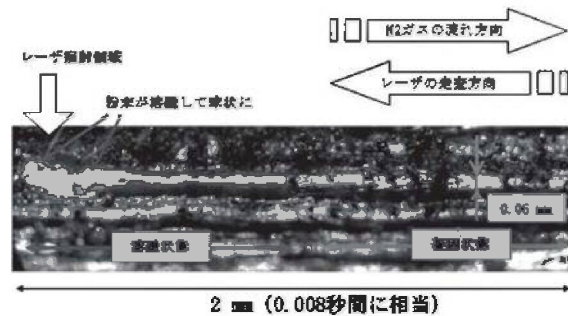


図3. 高速ビデオによる測定結果（SUS630）の例

(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、プロセスマップの作成を行っている。また、最適条件下での造形を行い、材料特性を検討している。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。

インコネル718の例を以下に示す。粉末は、プロジェクト参加の粉末メーカーのものを使用している。粉末のSEM写真を図4に示す。造形体については、図2に示し

たもので、これらの試験片から引張試験片を作製して、引張試験を行った例を図5に示す。これからわかるように、引張強さ1100 MPa程度の高強度が得られ、伸びも20%以上と高延性の造形体が得られている。



図4. インコネル718粉末のSEM写真

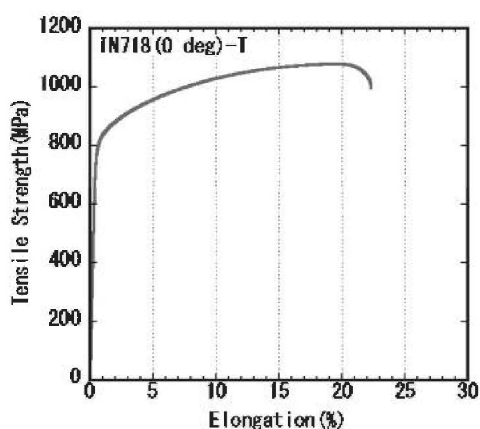


図5. インコネル718造形体の応力-ひずみ曲線

5. おわりに

我が国にいても、このところ金属3Dプリンタが導入されてきており、今後さらに導入が進むものと予測される。本センターにおいて、現在国家プロジェクトで開発した要素技術研究機による研究開発とSLM Solutions社製SLM280HLを導入して共同研究あるいは人材育成を行っている経験から、導入時には、次の点を注意しておくことが重要である。

(1) 対象製品（ターゲット）を明確にしておくこと

自社試作品・製品、他社試作品・製品に関わらず対象製品を明確にしておくことが重要である。各社の装置は、カタログ上の性能は同じように見えるが、実際はそれぞれ特徴があるため、製品の形状や大きさ、材質などの対象製品に合った装置選択が重要である。

(2) AM技術導入への事前対応をしておくこと

金属3Dプリンタによる造形には多くの因子が関係するため、事前に樹脂用3Dプリンタを導入して、3DCADの習得、サポート等を含めた設計手法など基礎的な技術を習得した人材の育成が重要である。

また、本技術の活用のためには、トポロジー最適化、構造解析、熱・流体解析などシミュレーション技術の導入は不可欠で、設計技術の変革を行っておくことが重要である。

(3) その他

3Dプリンタ導入時に注意しておくこととして、

- ① 粉末回収・処理装置など周辺機器の検討
- ② メンテナンスへの対応状況

③ 金属粉末、ベースプレートなどの購入への対応など、十分に検討しておくことが重要である。

本技術は、次世代の“ものづくり”においては、核となる技術の一つであり、本技術の普及により新たな高機能製品を開発していくことが、我が国に“ものづくり”技術を残すためのキーテクノロジーである。このためには、技術開発はもちろんのこと、本技術を理解した設計者・技術者の育成が重要であり、本研究センターの使命であると考えている。

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に謝意を表す。

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, 1, (2010), pp.69-76.
- (2) Wohlers report 2015, (2015), 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, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, 6, (2015), pp.179-183.
- (6) 京極秀樹, 83, (2014), pp.250-253.
- (7) 京極秀樹, レーザー研究, 42, (2014), pp.831-835.
- (8) 京極秀樹, 3Dプリンタの材料技術の開発動向と市場展開, (シーエムシー・リサーチ, 2015), pp.91-107.
- (9) 京極秀樹, 機械技術, 63, (2015-9), pp.68-72.
- (10) H. Kyogoku, Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015, 1, (2015), pp.31-39.
- (11) 京極秀樹, 型技術, 31, (2016-2), pp.18-23.
- (12) <http://www.eos.info/material-m> (2016.5.2 現在)
- (13) <https://trafam.or.jp/> (2016.3.24 現在)
- (14) 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, (2015).
- (15) 京極秀樹, 計測と制御, 54, (2015), pp.386-391.