3Dプリンターの開発動向

京極 秀樹^{1,2}

¹近畿大学 工学部ロボティクス学科 (〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺1番)

²技術研究組合次世代3D造形技術総合開発機構 (TRAFAM) (〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-6-1)

Recent Trend in Development of 3D Printer

Hideki KYOGOKU^{1,2}

¹Faculty of Engineering, Kinki University, 1 Takaya-Umenobe, Higashihiroshima, Hiroshima 739-2116

²TRAFAM, 1-6-1 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0005

(Received August 3, 2014)

Additive Manufacturing (AM) is attracting attention as a breakthrough technology in advanced manufacturing. In this paper, we describe the present state of the development of 3D printers for metals. AM technology, however, has issues that must be resolved: product accuracy, surface roughness, building volume, build-up rate, and so on. A national project, which was launched by the Japanese government in April 2014, is dedicated to the development of innovative 3D printers with electron beam and laser beam systems as well as the development of powder bed fusion and directed energy deposition processes. We introduced our ambitious objectives and the project's potential.

Key Words: Additive manufacturing, Laser sintering, Electron beam, Fabrication conditions, Mechanical properties

1. はじめに¹⁻⁵⁾

最近までRP(Rapid Prototyping), RM(Rapid Manufacturing)等の名称で呼ばれてきた三次元造形(3D)技術は、2009年のASTM(American Society for Testing and Materials)F42委員会において、これらの技術を総称してAM(Additive Manufacturing)と呼ぶことが決定された。

本技術の最大の特徴は、

- ①従来の切削加工をはじめとする他の加工技術では不可能な形状の製品の作製が可能であるが、その他、
 - ②製品機能の統合化・個性化が可能
 - ③ニーズへの素早い対応が可能
- などの多くの利点を有するために、切削加工、鋳造などに次ぐ革新的な加工法として認識されてきた。AM技術は上述の理由により、ものづくりにおける設計・製造の考え方を変革してきつつある。

AM技術は、1980年代に光硬化樹脂を用いた光造形技術から端を発しているといわれており、金属材料については、テキサス大学オースティン校で開発された選択的レーザー焼結(Selective Laser Sintering: SLS)法による積層造形技術が最初である⁶⁾。金属材料を対象とした積層造形技術については、2000年代に入り、Fraunhofer ILT研究所などを中心にレーザー光源の開発が着実になされるとともに、装置における粉末積層技術や粉末製造技術

の改善などが行われ、2008年に各社揃ってファイバレーザを搭載した金属積層造形装置が開発され、製品の高密度化、高強度化が図られるようになった。この頃から、アメリカでは2020年を睨んだロードマップの作成、ASTM F42委員会の立ち上げなどが行われた。その後、オバマ大統領が、2012年に製造業の復活のための核となる戦略としてAM(Additive Manufacturing)技術開発ならびに人材教育に10億ドルを投資することを発表し、NAMII(National Additive Manufacturing Innovation Institute)、現在のAmerica Makesを設立して以来、我が国をはじめ世界中で本技術に対する注目度が急速に高まり、ドイツ、イギリスなどにおいても国家戦略を策定・実施してきている。ドイツFraunhofer ILT研究所を中心としたヨーロッパ諸国では、すでに2006年にFANTASIA(Flexible and near-net-shape generative manufacturing chains and repair techniques for complex shaped aero engine parts)プロジェクトにより航空機部品のLMD(Laser Metal Deposition)およびSLM(Selective Laser Melting)技術開発を実施し、多くの成果を得ている⁷⁾。

このような背景のもと、我が国においても三次元積層造形技術、いわゆるAM技術が新たな加工法として注目されるようになってきた。2013年度には、経済産業省がこのようなAM技術、いわゆる3Dプリンターへの関心の高まりに呼応して「新ものづくり研究会」の立ち上げ、さ

らには、「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プリンター技術開発—」の中で、金属製品を対象とした国家プロジェクトを2014年度に開始した。詳細は、後述する。

本稿では、金属3Dプリンターの現状と課題について述べるとともに、国家プロジェクトの内容についてもその概要を紹介する。

2. 3Dプリンターの現状と課題

2.1 3Dプリンターの現状

AM技術は、ASTM F 42委員会により、Table 1に示すカテゴリーに分類されており、そのほかの規格についても、ISOとともに規格化が進められている。

(1) 粉末床溶融方式

レーザー焼結(SLS)あるいは溶融(Selective Laser Melting: SLM)と呼ばれている方法で、樹脂粉末及び金属粉末の積層造形に利用されている。Fig. 1に選択的レーザー積層造形法の模式図を示す。本法では、CADデータをSTLファイルに変換して、ガルバノスキャナーを介してレーザーを照射して、敷き詰めた粉末を焼結あ

Table 1 Additive manufacturing categories⁸⁾.

Category	Description
Binder Jetting	Liquid bonding agent selectively deposited to join powder
Material Jetting	Droplets of build materials selectively deposited
Powder Bed Fusion	Thermal energy selectively fused regions of powder bed
Directed Energy Deposition	Focused thermal energy melts materials as deposited
Sheet Lamination	Sheet of material bonded together
Vat Photopolymerization	Liquid photopolymer selectively cured by light activation
Material Extrusion	Material selectively dispensed through nozzle or orifice

Fig. 1 Powder bed fusion.

るいは溶融する工程を繰り返すことにより積層造形を行う方法である。本法では、金属においては、ほぼ真密度の造形体ができるようになっており、精度も50～100 μm程度である。

最近の金属粉末を対象としたレーザー積層造形装置の特徴は、高出力のファイバレーザーを搭載し、レーザーの高出力化が進んでいるとともに、多重光源化も行われている。代表的な金属粉末積層造形装置の仕様をTable 2に示す。各社とも200 Wから400 Wのファイバレーザーを搭載する装置を開発している。SLM Solutions社では、高速化のために400 Wと1 kWの2つのレーザーを搭載した装置を開発しており、造形速度の高速化が図られてきている。金属レーザー積層造形装置については、海外メーカーでEOS社(ドイツ)、Concept Laser社(ドイツ)、SLM Solutions社(ドイツ)、Renishaw社(英国)、Phoenix社(フランス)(2013年、3D Systems社(アメリカ))などがある。我が国では、(株)松浦機械製作所の装置があり、切削機能を有している。これにより、高精度・高機能金型の作製が可能となっている。

一般的には、Table 2に示すように造形サイズ□250 mmが主流ではあるが、例えば、歯科用材料や宝飾品のような小物の製作に関しては、各社から小型装置が開発されている。これに対して、超大型装置では、Concept Laser社がFraunhofer ILT研究所およびDimler社と共同開発した超大型自動車試作品用装置が開発されており、大型化への傾向も見られる。なお、最近の装置の標準的な仕様をまとめると、次のとおりである。

- ・レーザー(ファイバレーザー：200～400 W)
- ・造形速度(～20 cm³/h)
- ・造形精度(～50 μm)
- ・造形精度(～50 μm)
- ・造形サイズ(250×250×300 mm程度)

また、電子ビームを光源とした積層造形装置は、ARCAM社(スウェーデン)が唯一開発しており、当然のことながら真空での造形となるため、酸化が問題となる

Table 2 Specifications of metal 3D printers.[†]

Machine	EOS M280	SLM SLM280HL	Concept Laser M2	3D Systems ProX300
Laser type	Fiber laser	Fiber laser	Fiber laser	Fiber laser
Power (W)	200 or 400	400/1000	200 or 400	500
Spot size (μm)	100～	70～120	50～200	—
Scan speed (m/s)	～7	～15	～7	—
Layer thickness (μm)	20～	20～75	20～80	10～100
Build speed (cm ³ /h)	20	20～35	2～20	—

[†] 装置の仕様については、以下のホームページによる。

- 1) http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280 (2013.12.20現在)
- 2) http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_en (2013.12.20現在)
- 3) <http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html> (2013.12.20現在)
- 4) <http://cweb.canon.jp/3dsystems/lineup/px/spec.html> (2014.7.4現在)

Fig. 2 Direct energy deposition.

チタンおよびチタン合金を中心としたインプラントや航空・宇宙部品の製造などに利用され、急速に利用が拡大してきている。

(2) 溶融堆積方式

Fig. 2に示すように、粉末をレーザーあるいは電子ビームで溶融し、溶融物を堆積させながら積層造形する方法である。Sandia国立研究所の開発したLENS®法、Fraunhofer ILT研究所で開発されたレーザー金属堆積(Laser Metal Deposition: LMD)法などがあり、実用機も販売されている。最近では、高精度や大型の製品の作製も可能となってきている。

本法は、補修用として利用されているが、最近では積層造形用としても利用され始めている。本法の特徴は、精度や表面粗さは劣るものの、単層ではなく多層や傾斜材料の積層造形も可能であり、アスペクト比の大きい製品の製造、部分的な修復などが可能である。最近では、真密度で複雑形状・大型品の作製が可能となっており、アルミニウム合金、ステンレス鋼、工具鋼、チタン合金などの材種にも対応できるようになっている。また、切削加工との複合化を図った装置開発も行われている。製品例としては、ブレード、ハウジング、金型など幅広い分野の製品の製造が可能となってきている。製品例として、インコネル合金のジェットエンジン用タービンブレードの例をFig. 3に示しておく。

2.2 造形体の特性

現在、積層造形により造形される金属材料は、装置の性能向上により多種多様となってきている。金属製品に対応できる材種としては、従来はステンレス鋼、銅合金が中心であったが、最近では、高速度工具鋼、生体材料

Fig. 3 Turbine blade of latest generation with internal conformal cooling channels to improve performance of jet engines (By the courtesy of SLM Solutions GmbH).

Table 3 Mechanical properties of SLMed metal and alloys used for implant applications (Referred by SLM Solutions Data Sheet).

Metal or Alloy	0.2% Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)	Surface roughness Rz (μm)
Ti	> 180	> 290	> 20	—	36 ± 4
Ti-6Al-4V	> 865	> 972	> 10	37.3	36 ± 4
Co-Cr-Mo (ASTM F75)	> 835	> 1050	—	35	29 ± 4
316L	525 ± 30	625 ± 30	—	237 ± 4HV	38 ± 4
15-5PH	1050 ± 30	1100 ± 50	16 ± 4	32 ± 3	14 ± 2
H13	—	1730	—	54	34 ± 4
Al-12Si	211	409	5	105 HB	34 ± 4

用コバルトクロム合金、さらには航空宇宙用として利用されている耐熱・耐食用インコネル合金、チタン合金、アルミニウム合金など幅広い材質の製造が可能となっている。その例として、レーザー積層造形による造形体の機械的性質および表面粗さの値をTable 3に示す。これからもわかるように、溶製材に匹敵する特性が得られるようになってきている。

疲労強度は重要であるが、十分に検討されているわけではない。とりわけ、電子ビームでは従来の溶製材とは組織が異なることが報告されており、組織との関連も含めて詳細な検討が必要である。

2.3 3Dプリンターの課題

(1) ハードウェア

金属粉末を対象とした積層層造形装置については、上述したように、さらなる高速化、高精度化および大型化が求められている。現状では、製品化されている装置の造型サイズは□250 mmが標準であるため、適用製品が限定されることから、大型化への要望がある。大型化に際しては、多光源化が必要となり、これに伴って高速化も要求される。このためには、レーザーや電子ビームの高出力化も重要である。製品精度については、レーザー光源の高品質化や照射パターンの最適化が必要となる。表面粗さについても、 casting品以上のものが求められてきており、さらなる微細粉末を利用可能な積層技術の開発などが必要となる。

溶融堆積方式の装置においては、精度や表面粗さの問題があり、これが改善されれば、さらなる応用範囲が進むものと考えられる。また、樹脂材料においては実現されてきている多種類の樹脂に対応した、多色化に対する要求も求められてきている。金属材料においても、今後多色化に対する研究開発が促進されるものと考えられる。

(2) ソフトウェア^{9,10)}

積層造形においては、一般的にCADデータから形状データをSTLデータに変換して、CAD上で3Dモデリングを行った後、スライスデータを作成して、レーザーや電子ビームを操作して造形する。この際に、STLデータ

の精度が問題となっており、高精度化のための取り組みが行われている。また、STLデータは座標値のみであるため、ASTM F42委員会では、AMFフォーマットの提案を行っており、今後このフォーマットへの変換も必要である。

また、本技術の最大の特徴は、従来法では不可能であった三次元複雑形状で、かつ表面および内部構造をまで考慮した製品の製造ができる点である。すなわち、位相最適化法などのシミュレーションにより設計された製品の作製や人体などの複雑な3次元形状をCTなどで読み取り、データ変換を施すことによりインプラントを作製できるなど、従来の加工法では不可能な形状の製品を加工できる。切削加工においては、基本的に表面データを扱うが、三次元積層造形法では、表面および内部構造の両方を取り扱うことができるため、表面へのテクスチャの付与が可能であり、内部をメッシュ構造やラティス構造、さらには傾斜構造にすることも可能である。現在、盛んにこのような内部構造や表面テクスチャの記述に対応できるソフトウェアの開発が行われており、今後も重要な課題である。

(3) 金属粉末

金属粉末については、装置メーカーが粉末を指定することが多く、このため材質的にも制限される場合が多いことから、ユーザーの要求にあった仕様となっていない点が問題となっている。しかし、欧州においては、いち早くAM用粉末の開発を行っており、昨年(2013年)AS9120(航空宇宙)の認証を受けた粉末製造メーカーもある。

金属粉末の粒径、粒度分布などの特性と造形条件の関連性については十分に把握されているとは言えず、また装置の仕様に依存する点も多い。このため、粉末特性と造形条件を考慮した最適条件を示すプロセスマップ、いわゆるレシピの作成が重要である。この際には、熔融凝固解析等も行っておくことが重要である。

3. 次世代型産業用3Dプリンター技術開発

3.1 事業の背景および目的

上述した「新ものづくり研究会」報告書¹¹⁾にもあるように、新たなものづくりのための設計・製造プロセスの革新は、我が国におけるものづくりにおいて極めて重要である。

このため、我が国においても、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、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、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体材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える三次元積層造形システムを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指すことを目的として、技術研究組合次世代3D造形技術総合開発機構(通称、TRAFAM)が設立され、国

家プロジェクトとして経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」が2014年度より5年計画で開始された。

3.2 開発目標

次世代型産業用3Dプリンター技術開発プロジェクトの目標は、世界最高水準の三次元積層造形装置を開発することで、装置の高速化、高精度化、大型化さらには複層化を目指すものである。光源には、電子ビームとレーザービームの2種類を採用して、Table 4に示すような目標を達成するものである。

3.3 事業内容

国家プロジェクトで求められている技術開発内容は、次のとおりである。

(1) 電子ビーム及びレーザービーム共通

- ①異種金属を傾斜構造で積層することを可能とする。
- ②装置で使用する積層造形用の制御ソフト等を開発する。
- ③粒径50 μm 以下の金属粉体の使用を可能とする。

(2) 電子ビーム

- ①電子ビームの出力は5 kW以上、ビーム径は100 μm 以下。
- ②電子ビームコラム陰極の耐久時間は1,000時間以上。
- ③加工室の真空度は 1×10^{-2} Pa以下。

(3) レーザービーム

- ①レーザーの出力2 kW以上。
- ②高速パルス駆動技術の開発。
- ③ガルバノミラーの高速化、数台対応技術開発。

(4) 金属等粉末開発及び粉末修飾技術開発

- ①金属粉末の粒径分布の狭幅化、微細化技術の開発。
- ②鉄系、銅系、ニッケル系、チタン系、コバルト系等3Dプリンター用金属粉末の製造技術の確立。
- ③高温耐熱合金、耐食合金などの新合金材料を、当該産業用3Dプリンターにおいて使用できる技術の確立。
- ④金属粉末の高品質及び低コスト化技術の開発。
- ⑤防錆等粉末修飾技術及び傾斜材料用粉末製造技術の確立。
- ⑥チタン系及び新材料合金を除く各種金属粉体について

Table 4 Objectives of the national project.

Type	Source type	Build chamber size (mm)	Build speed (cc/h)	Accuracy (μm)
Type I	EB	Large-sized (1000 × 1000 × 600)	500	50
Type II	EB	Middle-sized (300 × 300 × 600)	500	20
Type III	LB	Large-sized (1000 × 1000 × 600)	500	20
Type IV (Deposition type)	LB	Middle-sized (300 × 300 × 300)	500	20

ては、粒径20 μm 以下のものを使用できるよう実用化開発する。

- (5) 周辺技術(高機能複合部材の開発、後加工、未使用粉末の回収等技術)開発
 - ①爆発防止等、装置の安全性対応技術の開発。
 - ②造形物の自動搬出・ブラスト、粉体自動供給、金属粉体分離、不要粉体自動回収機構等周辺装置の開発。
 - ③造形物の精度向上に資する最適な後処理加工技術の開発。
 - ④高機能複合部材の開発及び積層条件等の検討。
 - ⑤粉末の高性能分級技術の検討。

3.4 3D積層造形技術開発

上記技術開発課題を解決し、開発目標を達成するために、TRAFAMにおいて、次の3Dプリンター開発、金属粉末開発および制御ソフトウェア開発を行う。本プロジェクトにおいては、光源を電子ビームとレーザービームの2種類として、つぎのような技術開発を行っている。なお、レーザービーム方式では、粉末床溶融方式と溶融堆積方式の2種類の装置開発を行っている。

- (1) 電子ビーム方式3D積層造形装置技術開発
 - ①要素技術研究開発
 - ②複層電子ビーム3Dプリンター開発
 - ③大型高速電子ビーム3Dプリンター開発
- (2) レーザービーム方式3D積層造形装置技術開発
 - ①要素技術開発
 - ②複層レーザービーム3Dプリンター開発
 - ③大型高速レーザービーム3Dプリンター開発
- (3) 金属粉末開発および粉末修飾技術開発
 - ①新アトマイズ法による高融点・高活性金属粉末製造技術の開発
 - ②気体流による遠心分離方式金属粉末分離機構の開発
 - ③高機能粉末製造のための粉末修飾技術の開発
- (4) 3Dプリンター制御ソフトウェア開発
 - ①各種フォーマットにおけるデータ処理ソフトウェアの開発
 - ②加工条件設定・最適パス生成技術の開発

4. おわりに

金属AM技術のここ数年の進展は目覚ましく、レー

ザー性能の向上、ソフトウェアの開発などによる装置の高機能化、粉末製造技術の向上などにより自動車、航空宇宙分野から医療分野までの新たな加工技術として、認識されてきた。しかしながら、その核となる金属3Dプリンターの性能については、ユーザーからみると不満足な点も多く、造形品の高精度化および造形速度の高速化が可能だけでなく、操作性に優れたソフトウェアを搭載した装置開発が求められている。また、金属粉末の材質においてもその種類は増えてきているが、今後はAM技術に相応しい材料設計を行っていく必要もある。

このような背景のもと、2014年度より開始された経済産業省の国家プロジェクトでは、世界最高水準の次世代型産業用3Dプリンターの開発を目標としている。本プロジェクトにおいて、我が国の企業に相応しい装置開発がされれば、ものづくりにおける設計・製造技術の革新がなされるものと期待される。このためには、ユーザー側の本技術に対する理解とものづくりにおける設計・製造技術の変革が行われなければならない。また、これを実現していくためには、今後人材育成を含めた国としての施策が重要である。

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 **5** (2014) 139.
- 2) 京極 秀樹：溶接学会誌 **83** (2014) 250.
- 3) 京極 秀樹：型技術 **25** (2010) 23.
- 4) 新野 俊樹：型技術 **25** (2010) 18.
- 5) 丸谷 洋二ほか：積層造形技術資料集 (オプトロニクス社, 2002).
- 6) J. J. Beaman, J. W. Barlow, D. L. Bourell, R. H. Crawford, H. L. Marcus, and K. P. McAlea: *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing* (Kluwer Academic Publishers, 1997), p.23.
- 7) A. Gasser, G. Backes, I. Kelbassa, A. Weisheit, and K. Wissenbach: *Laser Material Processing* (2010) 58.
- 8) Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM Standard F2792-12a (2012).
- 9) E. Dhoole: *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications* edited by I. Gibson (John Wiley & Sons, 2005).
- 10) I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker: *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* – (Springer, 2010).
- 11) 経済産業省「新ものづくり研究会」報告書(平成26年2月), (2014).