

■ レビュー ■

## 金属 3D プリンタの開発動向と今後の展開

### Recent Trend and Applications on Additive Manufacturing with Metal: A Review

工学部ロボティクス学科\*1 教授 京極 秀樹  
Hideki Kyogoku

In this paper, recent trend and applications on additive manufacturing with metal are reviewed. Recently, additive manufacturing technologies are paid great attention especially in the aerospace, automotive, and medical industries because of the possibility to manufacture lighter structures to reduce weight, complex high-performance parts, and so on. The classification of additive manufacturing technologies by the ASTM F42 committee is introduced, especially the powder bed fusion and direct energy deposition methods which are applied to fabricate the metal parts are explained. And also, the specification of the 3D printer for metal parts and the mechanical properties of various alloys are described. Finally, the importance of the additive manufacturing is described in the future manufacturing.

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

#### 1. はじめに<sup>(1)-(3)</sup>

金属部品の製造は、従来から切削加工による除去加工と鋳造・鍛造・塑性加工のように金型などの型を利用する成形加工を中心に行われている。これに対して、CADデータから直接製品を製造する、除去に対して付加するという意味で付加加工 (AM: Additive Manufacturing) 技術が急速に発展してきている。付加加工技術は、次章でもその歴史を述べるが、金属粉末に関する積層造形技術においては、1980年代半ばのテキサス大学オースティン校の Beaman 教授らの選択的レーザー焼結 (SLS: Selective Laser Sintering) 技術の研究に遡る。これを契機に、ドイツでも EOS 社による直接レーザー積層技術による装置が開発され、その後高出力ファイバーレーザーの開発や装置の性能向上、さらには粉末製造技術の向上により実用的な金属製品への適用が可能となってきた。

このような積層造形技術の発展の中では、2009年にテキサス大学オースティン校の Bourell 教授らが中心となりアメリカにおける積層造形技術のロードマップ<sup>(4)</sup>を作成し、さらに ASTM において F42 委員会を立ち上げ、規格化を進めたことが、2012年5月のオバマ大統領の演説に繋がっていると思われる。この中では、アメリカの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ってきた。このような背景のもと、積層造形による付加加工技術、いわゆる 3D プリンティングが新たな加工法として認識されるようになってきた。

2013年度には、経済産業省においても 3D プリンタへの関心の高まりに対応するため、「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 一次世代産業用 3D プリンタ技術開発一」の中で、金属粉末を対象とした国家プロジェクトを開始した。

本学における研究開発は、著者が 2001年8月から1年間、テキサス大学オースティン校に留学したことから始まる。当大学では、Ti-NiSMA のレーザー積層造形技術に関する研究と併せて、レーザーライティングに関する研究を実施した。帰国後に、YAG レーザを利用した積層造形技術、さらには 2006年度・2007年度に経済産業省地域新生コンソーシアム事業により、50W ファイバーレーザーを搭載した積層造形装置を開発し、アルミニウム合金の積層造形を実施した。その後、本装置により、チタン、ステンレス鋼、工具鋼などの材料に関する積層造形条件を検討してきたが、レーザーの出力が低いために、形状付与は可能であるが、高密度の積層造形体を得ることは難しいことが分かった。これらを受けて、2014年度には、

\*原稿受付 2014年5月21日

\*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

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

上記国家プロジェクトへの参加が決まり、次世代基盤技術研究所に新たに「3D造形技術研究センター」を立ち上げたところである。

本稿では、最近3Dプリンティングと呼ばれている付加工のうち金属粉末を中心とした積層造形技術の最近の開発動向と今後の展開について紹介する。

## 2. 積層造形技術の歴史<sup>(1),(5),(6)</sup>

積層造形技術は、小玉氏の積層造形技術に始まるとされており、その後Hull氏により光造形法として技術が確立され、1986年に3D Systems社を設立して以来、普及してきた。我が国でもシーメット社が光造形装置を開発するなど、初期には種々の方式の積層造形装置が開発された。同時期に樹脂を利用した溶融物堆積法が開発され、Stratasys社をはじめ多くの企業から装置が販売され、現在の3Dプリンティングと呼ばれる所以にもなっている。

しかし、当時樹脂による製品は、試作品の形状確認に留まっていたため、テキサス大学オースティン校のBeaman教授らを中心に金属粉末を用いた選択的レーザー焼結(SLS: Selective Laser Sintering)法と呼ばれる積層造形技術が開発された。1987年に当大学のベンチャー育成事業によりDTM社が設立され、装置開発が行われた。本法においては、金属粉末に樹脂を添加あるいはコーティングした粉末が用いられ、その後に溶浸という工程が必要である。その後、1989年にドイツ・EOS社が設立され、金属粉末を直接レーザー焼結する装置が開発された。これは、前者と異なり金属粉末のみを直接積層造形し、後工程を必要としない方法である。さらに、金属粉末積層造形については、2000年代に入りファイバーレーザーの高出力化や粉末の製造技術の発展に伴い、EOS社をはじめ、各社の装置の高性能化が進み、2008年頃以降の装置では、ほぼ密度100%の造形物が作製できるようになってきた。

このようなレーザービームを光源とした装置に対して、スウェーデン・ARCAM社が開発した電子ビームを利用した積層造形装置は真空での造形となるため、酸化が問題となるチタンを中心としたインプラントの製造などに利用され、急速に普及してきている。

さらには、Fraunhofer研究で開発されたレーザー金属堆積(LMD: Laser Metal Deposition)法やSandia国立研究所により開発されたLENS<sup>®</sup>法など金属溶融堆積法についても、Optmec社から装置が販売され、利用され始めている。

## 3. 積層造形技術の分類と特徴

積層造形技術は、最近までRP (Rapid Prototyping)、

RM (Rapid Manufacturing)等の名称で呼ばれてきたが、2009年のASTM F42委員会においてAM (Additive Manufacturing)と呼ぶことが決定された。

本技術の最大の特徴は、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を作製できる点である。そのほか、製品機能の統合化・個性化が可能、ニーズへの素早い対応が取れるなどの多くの利点を有するために、新たな加工法として注目されている。また、位相最適化手法を用いたシミュレーションにより形状最適化された製品の製造が、本技術により可能であることも大きな特徴である。例として、図1に示す通常の方法では作製できない軽量化冷却管や種々の構造体に関する報告がなされている。

本技術は、ASTM F42委員会により、表1に示すカテゴリなど、規格化が進められており、併せてISOにおいても規格化が進行している。以下に、金属製品に関わる積層造形技術、すなわち(1)粉末積層溶融 (Powder Bed Fusion)法と(2)粉末溶融堆積 (Directed Energy Deposition)法の概要を述べる。なお、東京大学・新野教授による訳名は(1)粉末床溶融 (Powder Bed Fusion)法と(2)指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition)となっている。

### (1)粉末積層溶融法

レーザービームおよび電子ビームによる代表的な積層造形法で、図2に示すように樹脂粉末あるいは金属粉末を焼結あるいは溶融して積層造形する方法で、選択的レーザー焼結あるいは溶融法と呼ばれている。

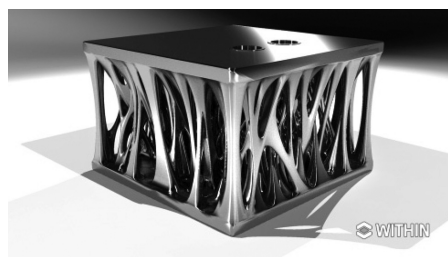


図1. 軽量化冷却管 ((株) ホワイトインパクトの好意による)

表1. ASTMによるAM技術の分類

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

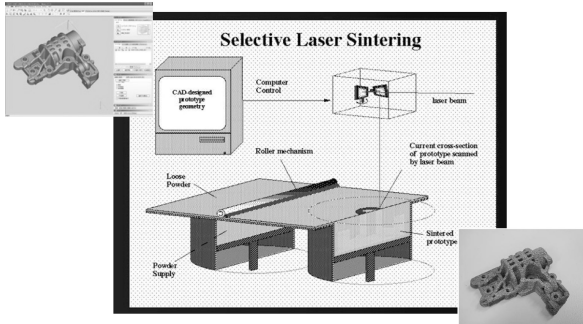


図2. 選択的レーザー焼結 (テキサス大学 Bourell 教授の好意による)

最近の代表的な金属粉末積層造形装置の仕様を表2に示す。最近の金属粉末を対象としたレーザー積層造形装置の開発は目覚ましく、レーザーには高出力のファイバーレーザーが使用されてきており、レーザーの高出力化・多重光源化が進んできている。SLM社では、高速化のために400Wと1kWの2つのレーザーを搭載した装置を開発している。また、従来の装置に比べて格段の造形物の高精度化、造形速度の高速化が進んできているとともに、図3に示すように装置の多様化が進んできている。一般的には、図に示すように造形サイズ $\square 250\text{ mm}$ が一般的ではあるが、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のに対して、大型装置では、Concept Laser社がFraunhofer研究所およびDimler社と共同開発した大型自動車試作品用装置が開発されている。なお、最近の装置の標準的な仕様は、次のとおりである。

- ・レーザー (ファイバーレーザー:200~400 W)
- ・造形速度 ( $\sim 20\text{ cm}^3/\text{h}$ )
- ・造形精度 ( $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ )
- ・造形精度 ( $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ )
- ・造形サイズ ( $250\times 250\times 300\text{ mm}$ 程度)

表2. 代表的な金属粉末積層造形装置の仕様 (各社ホームページ<sup>(7)(10)</sup>より)

メーカー	EOS	SLM	Concept Laser	Arcam
装置	M280	SLM280HL	M2	Q10
光源	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	電子ビーム
出力(W)	200または400	400/1000	200または400	3000
ビーム径( $\mu\text{m}$ )	100~	70~120	50~200	100
走査速度(m/s)	$\sim 7$	$\sim 15$	$\sim 7$	—
積層ピッチ( $\mu\text{m}$ )	20	20~75	20~80	—
積層速度( $\text{cm}^3/\text{h}$ )	20	20~35	2~20	—
造形サイズ(mm)	250x250x325	280x280x350	250x250x280	200x250x180

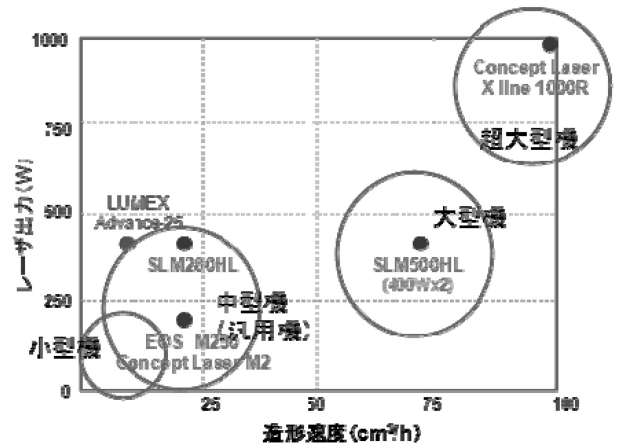


図3. 現在開発されている主な装置の分類 (各社ホームページ<sup>(7)(11)</sup>より)

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、最近では金型用マルエージング鋼、工具鋼、生体材料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があり、表3に示すように機械的性質も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。また、製品の精度や表面粗さについても、最近の装置においては大幅な向上が見られるようになってきた。現在の装置における精度については、 $50\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 程度、表面粗さとしては、材種により異なるが、 $R_a 40\text{ }\mu\text{m}$ 程度となっている。将来的には、装置の高機能化や粉末製造技術の向上により、新たな機能材料、セラミックス、傾斜材料等への展開も考えられる。

表3. 主な材料の機械的性質 (SLM Solutions社ホームページ<sup>(8)</sup>より抜粋)

材料	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び(%)	硬さ	表面粗さ $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
Ti	>290	>190	>20	-	36 ( $\pm 4$ )
Ti6Al4V	960	815	10-18	37HRC	36 ( $\pm 4$ )
Ti6Al7Nb	1185	1100	11-18	39HRC	36 ( $\pm 4$ )
316L	625	525	-	273HV	38 ( $\pm 4$ )
H13	1730	-	-	54HRC	34 ( $\pm 4$ )
Al12Si	409	211	5	105HB	34 ( $\pm 4$ )
CoCr(F75)	1050	835	11-14	39HRC	29 ( $\pm 4$ )
Inconel718	1200	950	24	-	30

製品では、タービンブレードや噴射ノズルなどの航空宇宙部品をはじめとして、自動車部品、インプラント、インテリアなど幅広い分野に利用されている。GEでは

航空機エンジンの主要部品を本技術により製造すると発表しており、航空宇宙分野への普及は加速されるものと予測される。タービンプレードや噴射ノズルなどの材質には、Ti6Al4V 合金、TiAl や IN718 などが利用されている。ヒンジやカバー類には、Al12Si 系が用いられており、最近では表面にテクスチャを施すなど、特殊な加工も行われている。

また、医療用材料としては、図 4 に示すように人工股関節、人工膝関節などの生体用インプラントや歯科用ブリッジ・クラウンなどへの適用が行われている。医療分野においては、CT や MRI のデータからシミュレーションソフトなどにより形状の最適化を図り、最終的にカスタムインプラントを作製するまでのシステム化も行われている。

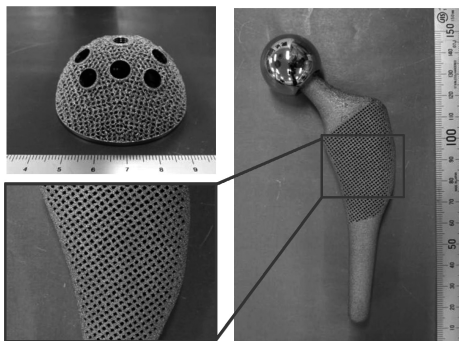
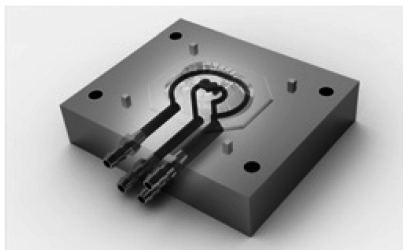


図 4. インプラントの例 (ナカシマメディカル (株) の好意による)



(a) 射出成型型



(b) 冷却水管を配置した金型

図 5. 積層造形金型の例 ((株) 松浦機械製作所の好意による)

さらに、松浦機械製作所のように切削機能も有する装置は、図 5 に示すように射出成型用金型などの金型製作に利用されており、金型内に最適な冷却水管を配置できるなど従来にはない金型の製作に威力を発揮している。

粉末積層溶融法については、電子ビームを光源とした積層造形法がある。本法においては、かなりの高温で予備加熱を行いながら積層造形を行うため、組織が一方向性を伴うことが多い。このため方向性を考慮した積層造形を行う必要がある。電子ビーム積層造形については、実用機としては唯一 ARCAM 社の装置があり、チタン系合金を中心としたインプラント、航空宇宙部品等の製造に利用されている。

#### (2)粉末溶融堆積法

本法には、Sandia 国立研究所が開発された LENS<sup>®</sup>法、Fraunhofer 研究で開発されたレーザ金属堆積 (LMD : Laser Metal Deposition) 法などがあり、金属粉末を噴射しながらレーザビームを照射して溶融金属を堆積して積層造形する方法である。本法では、表面粗さは劣るものの、多色積層造形が可能であり、アスペクト比の大きいなど製品の製造が可能である。また、真密度の複雑形状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。製品例としては、ブレード、ハウジング、金型などが Optmtec 社のホームページ<sup>(12)</sup>に挙げられており、幅広い分野の製品の製造が可能となっている。

2013 年 12 月に開催された EuroMold2013 では、新たに DMG MORI 社が、レーザ・デポジション・ウェルディングと名付けた積層造形法と 5 軸制御切削を組合せた複合機を今回はじめて展示していた。製法からして形状は制限されるが、新たな加工法として注目される。

#### 4. 研究開発動向

金属 3D プリンタの現状について述べてきたが、3D プリンタについては、製品の高精度化、造形の高速度化、さらには大型化などまだ課題は多くある。この課題を解決するための研究開発が行われている状況について、少し記述しておく。

粉末積層溶融法においては、メルトプールの溶融凝固状況、パウダーベッドの温度分布などが製品の精度や特性に大きく影響する。このため、これらのモニタリング・フィードバック制御技術の開発やこれらのデータを利用したシミュレーション技術の研究開発も重要となっている<sup>(14)</sup>。

粉末溶融堆積法においても、モニタリング・フィードバック制御やシミュレーション技術に関する研究開発が

行われている<sup>(15)</sup>。また、造形物組織の多色化や傾斜構造化に関する研究開発も行われ始めており、製品の高機能化に関する関心も高くなってきている。

## 5. まとめ

最近の積層造形技術の進歩は目覚ましく、装置の高性能化により自動車、航空宇宙分野から医療分野まで非常に重要な加工技術としての地位を確立してきている。平成 26 年 2 月に発表された経済産業省「新ものづくり研究会」報告書<sup>(13)</sup>によれば、2020 年には、世界における経済波及効果は 21.8 兆円、装置などの直接効果も 1 兆円以上と試算されている。また、Wholers レポート<sup>(16)</sup>によれば、装置販売額は 2020 年には 2012 年の 5 倍になると予測しており、今後も大きな成長が望める分野である。しかし、積層造形装置 (3D プリンタ) の性能については、ユーザからは現状ではまだ不満足な点も多く、今後は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、ユーザフレンドリーな操作性を可能とするソフトウェアを搭載した装置開発が求められている。

このような中、上述したように、2014 年度より経済産業省の国家プロジェクトが開始され、世界最高水準の次世代型産業用 3D プリンタの開発が行われている。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、我が国における設計・製造技術の革新がなされるものと期待される。

このように、現在、我が国の“ものづくり”の在り方を変革する時期にきている。このためには、NAMII のミッションにもあるように、デジタルマニファクチャリングに対応した“ものづくり技術”の革新を図るとともに、我が国における研究拠点の整備及び人材教育を推進していくことが重要であると考えられる。

## 謝辞

本稿では、(株) ホワイトインパクト、ナカシマメディカル (株) ならびに (株) 松浦機械製作所に貴重な製品の写真の提供を頂いた。ここに、深謝の意を表す。

## 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) 新野俊樹, 型技術, **25**,(2010), pp.18-22

- (3) 京極秀樹, 型技術, **25**,(2010), pp.23-27
- (4) D.L. Bourell, et al., Roadmap for Additive Manufacturing –Identifying the Future of Freeform Processing–, (2009)
- (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), pp.2-7
- (6) J. J. Beaman, et al. Solid Freeform Fabrication : A New Direction in Manufacturing, Kluwer Academic Publishers (1997), p.47
- (7) [http://www.eos.info/systems\\_solutions/metal/systems\\_equipment/eosint\\_m280](http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280) (2013.12.20 現在)
- (8) [http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_en) (2013.12.20 現在)
- (9) <http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html> (2013.12.20 現在)
- (10) <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-q10/> (2014.03.08 現在)
- (11) <http://www.matsuura.co.jp/japan/contents/products/lumex.html> (2013.12.20 現在)
- (12) <http://www.optomec.com/Additive-Manufacturing-Technology/Laser-Additive-Manufacturing> (2014.03.08 現在)
- (13) 経済産業省, 新ものづくり研究会報告書 (平成 26 年 2 月)
- (14) B. Pal et al., An Integrated Approach to Cyber-Enabled Additive Manufacturing Using Physics Based, Coupled Multi-scale Process Modeling, Proceedings of SFF Symposium 2013, Austin, (2013), 1-18
- (15) J. Beuth et al., Process Mapping for Qualification across Multiple Direct Metal Additive Manufacturing Processes, Proceedings of SFF Symposium 2013, Austin, (2013), 655-665
- (16) Wholers report 2013, (Wholers Associates, 2013)