金属三次元積層造形法の最新動向*

Recent Advance of Metal Additive Manufacturing

清水 透** 中野 禪** 萩原 正*** 佐藤直子**

Toru SHIMIZU, Shizuka NAKANO, Masashi HAGIWARA and Naoko SATO

Key words additive manufacturing, 3D printing, metal, laser electron beam

1. はじめに

3D プリンティングブームの始まりが、オバマ大統領の教書演説とすれば、すでに2年以上が経っている。このブームは、三次元造形が光造形 (Stereo Lithography) として初めて世に現れたときの第一次ブーム、溶融積層法 (Fused Deposition Molding)、インクジェットプリンティング (Material Jet Printing) 等の新しい造形法が登場した 90 年代末の第二次ブームに続く、第三次のブームと認識されているが、まだ、そのブームは下火になる気配はない。それゆえ、今度こそ持続したものづくり技術の革新になることへの期待は深まっている。ここでは、まず、3D 積層造形技術、特に金属の造形技術がどのように発展してきたかを振り返り、実用的な金属造形の最新動向へつなげてみたい。

2. 3D 造形装置の進歩 (RP から AM へ)

3D 造形技術はステレオリソグラフィが登場したところから最近まで、ラピッドプロトタイプ (RP: Rapid Prototype) 技術とよばれていた。しかし、実際の 3D 造形装置は夕方帰宅時に装置を ON にして朝職場に戻ると出来上がるというかなりゆっくりした造形機械であり、Rapid とは程遠いともいわれていた。その結果、紆余曲折を経てのことと思うが、2009 年に ASTM の 3D 積層に関する委員会 (F42) において、切削・研削などの除去加工に対して、アディティブマニュファクチャリング (AM: Additive Manufacturing) という言葉が採用された。それ以降、RP のかわりに AM という言葉が使われるようになる。

3D Systems から、光硬化性樹脂にレーザー光を照射して硬化させながら積層する光造形装置 (Stereo Lithography) が市場に登場したのは 1987 年である。この

造形法の登場に多くの人がインパクトをうけ、加工技術の未来を感じた。その後、日本国内では同様の装置が数多く開発・発売されることとなる。実は、3D systems の設立者、Charles Hull 氏が光造形の特許申請を行う以前に、名古屋市工業研究所の小玉氏により光造形装置の特許が申請されていた。しかし、その特許は審査請求されていなかったため公知の事実として取り扱われることとなった¹⁾²⁾。結果として国内では大手からベンチャーまでさまざまな企業が造形装置開発に参画する。その後、光造形装置は第二次ブームで登場する 3D 造形装置 (MJP: Material Jet Printing や FDM: Fused Deposition Method) に中心的地位を徐々に奪われていく。そして、MJP 方式の Z-corporation や FDM 方式の Stratasys の装置が世界を席巻し、日本の 3D 造形装置会社は淘汰される³⁾。

3. 金属やセラミックスの 3D 造形

初期の 3D 造形では樹脂の造形が中心であったが、徐々に金属やセラミックスでの 3D 積層造形も試みられるようになってきた。最初に試みられた方法は樹脂中に金属粉やセラミックスや金属粉を分散させて、造形後に、脱脂、焼結するという MIM (Metal Injection Molding)、あるいは CIM (Ceramics Injection Molding) に近い方法である。MIM、CIM では樹脂と金属、セラミックスが混ざったコンパウンドを射出成型により成形する。そのコンパウンドの造形を光造形や FDM などの 3D 造形で行う⁴⁾⁵⁾。しかし、この方法は脱脂、焼結というプロセスが必要であり、非効率なため、実用機として製品化までに至っていない。研究室レベルでは、セラミックスによるフォトリソ結晶⁶⁾、チタンによる人工骨の試作⁷⁾などが行われている。

3D 積層造形手法の一つとして SLS (Selective Laser Sintering) と呼ばれる技術がある。この方法は、樹脂の粉末床にレーザーを走査し、焼結・溶融させて固め、それを積層して造形する方法である。米国の DTM はテキサス大学オースティン校の大学ベンチャーとして設立された企業であるが、大学で開発されたこの手法を 1992 年に製品化している。また、ドイツの EOS から 1994 年同様な装

*原稿受付 平成 26 年 10 月 6 日

**産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門難加工材成型研究グループ (茨城県つくば市並木 1-2-1)

***株式会社アスペクト LS 事業部 (東京都稲城市東長沼 3104-1-101)

置を開発し、販売を開始した。これらの装置は金属粉の造形も可能と謳っていたが、実際に金属粉同士を焼結しているわけではなく、粒子表面にコーティングされている樹脂により粉末を結合していた。また、金型の造形も SLS により成形した後、溶融した銅やブロンズを含浸処理する方法であった。一方、SLS においてレーザーの出力を上げ、金属粉を実際に焼結し、さらには溶かしてしまおうという方向も追及された。このような試みは、国内では大阪大学小坂田研究室で試みられ、このプロセスを SLM (Selective Laser Melting) と呼んでいる⁸⁾⁹⁾。しかし、当時、この方法はレーザーパワーの不足などから、成形密度の向上、表面性状、精度の確保が難しかった。

同様に、金属粉末を溶融して造形するコンセプトのもとに、レーザーを用いながら、SLM と異なる手法も開発されている。その一つが DED (Directed Energy Deposition) と呼ばれる手法である¹⁰⁾。この方法は、レーザー溶接による肉盛り溶接を自動化した方法と理解してもらえばよい。Sandia National Lab. が中心になって開発した手法であり、90 年代に LENS Project として産業応用が追求された。この手法は北米を中心に研究されている手法であるが、日本国内においては、最近まで、あまり注目されていない。

また、1997 年に設立されたスウェーデン、ARCAM において電子ビームを用いた 3D 造形装置 (Electron Beam Molding) が開発された。電子ビームの浸透深さはレーザーより深いといわれ、この装置では容易に高密度の製品の造形が可能である。

再び話題は SLM に戻るが、SLM と除去加工を組み合わせ、SLM の欠点を補うというアイデアがある¹¹⁾。2001 年に松下電工が培ってきた SLM 技術に松浦機械の切削技術をハイブリッドした装置が、科学技術振興事業団の地域結集型研究事業により開発される。この装置は金型造形を目指した装置であり、内部の密度が不十分でも金型表面部分を高密度で仕上げ、表面の精度は切削加工で確保するというコンセプトで開発された。一方、SLM の造形もチタンやアルミニウムといった成形が困難な材料へと広がる。このような造形を行う場合、不活性な雰囲気や高真空での造形作業が必要となる。国内では熊本大学 (現在は九州大学) 三浦研究室でのチタン造形^{12)~14)}、近畿大学京極研究室でのアルミニウム造形¹⁵⁾などの先駆的研究が試みられる。この間、画期的な出来事が起こる。ファイバーレーザーの登場である。高出力化されたレーザーを採用することにより、SLM 造形製品の造形速度、密度は一挙に向上する。現在の SLM 装置の活況はファイバーレーザーの登場によるといっても過言ではない。このような高密度の金属造形の造形が可能な SLM 装置会社のほとんどが EOS, Concept Laser, Renishaw, SLM Solutions, Phenix Systems などのヨーロッパの企業である。これは、EOS を中心にこの技術の未来を信じ、継続的に研究開発を続けてきた結果といえる。ちなみに、Phenix Systems はフ

(a) SLM (Selective Laser Melting)

(b) EBM (Electron Beam Melting)

(c) DED (Directed Energy Deposition)

図 1 金属三次元積層造形の中心手法

表 1 SLM による金属積層造形装置とその性能^{16)~20)}

メーカー装置	EOS M280	SLM SLM280HL	Concept Laser M2	3D Systems ProX300
光源/出力	Fiber/200, 400	Fiber/400, 1000	Fiber/200, 400	Fiber/500
ビーム径 (μm)	100~	70~120	50~200	—
走査速度 (m/s)	~7	~12	~7	—
積層ピッチ (μm)	20	20~75	20	—
積層速度 (cm^3/h)	20	20~35	2~20	—
造形サイズ (mm)	250×250×325	280×280×350	250×250×280	250×250×350

ランスの Grand Ecoles からのベンチャー企業であるが、最近 3D Systems に買収されている。表 1 に各社の装置の仕様を示す¹⁶⁾。

以上のような、金属三次元造形装置の開発の歴史より、現在、その中心造形技術は、図 1 (a) SLM (Selective Laser Melting), (b) EBM (Electron Beam Melting), (c) DED (Directed Energy Deposition) の 3 方式となる。これらの方式はすべて、金属粉末から造形する手法である。

4. NEDO プロジェクトによる SLM 装置の開発^{21)~24)}

4.1 開発の概要

株式会社アスペクトと産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門は、2010 年から NEDO の委託事業「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」において、ファイバーレーザーを搭載し造形環境を高真空にした金属粉末積層造形装置の研究開発を進めてきた。既存の SLM 装置は、材料が溶融した際の酸化防止のために、窒素ガスやアルゴンガスなどの不活性ガスを造形チャンバ内に注入して造形している。しかし、単に造形チャンバ内に不活性ガスを注入しただけでは酸素を完全に排除することは困難であり、造形品の品質のばらつきや、粉末材料のリサイクル性を悪くしているという問題点などがあることが指摘されていた。そこで造形環境を高真空にする方式を選択した。造形環境を高真空構造にすることにより、1) 酸化や窒化の防止効果、2) 材料表面に付着している水分や不純物の除去、3) 造形品質の安定化、4) 粉末材料のリサイクル性向上、5) 不活性ガスの消費量が非常削減のメリットがある。一方、1) 装置の製作コスト高、2) 材料の造形チャンバ内での蒸着、というデメリットもある。

4.2 装置の概要

高真空型金属粉末積層造形装置の、基礎実験をするための小型プラットフォーム（造形テーブルサイズ 150×150 mm、造形深さ 200 mm）と、実用サイズプラットフォーム（造形テーブルサイズ 300×300 mm、造形深さ 400 mm）の 2 機種を開発した。装置の概略の構成は以下の通りである。装置上部には古河電気工業株式会社が本プロジェクトで新規に開発した基本波 700 W QCW (Quasi Continuous Wave) ファイバーレーザーと、レーザー走査用として日本製デジタル方式ガルバノミラースキャナから成る光学系ユニットが設置されている。真空チャンバ内部

表 2 小型プラットフォームの仕様

機械本体	
有効ワークエリア	X: 120×Y: 120×Z: 200 mm
造形ステージサイズ	X: 150×Y: 150 mm (レーザービーム最大照射範囲 X: 135×Y: 135 mm)
最小積層ピッチ	0.05 mm
造形室構造	真空構造（真空圧 10^{-2} Pa 以下） 真空ポンプは、ロータリポンプ（粗引き）とターボ分子ポンプ（本引き）の 2 種類を使用
材料酸化防止、真空開放機構	不活性ガス（アルゴンガス）充填（酸素濃度センサ付き）
造形ステージ駆動機構	AC サーボモーターボールネジ駆動方式
粉末積層機構	片持ち構造ブレードリコータ（ローラリコータ搭載可）
粉末材料供給方式	非交換カートリッジ方式
材料加熱	真空用近赤外線クォーツヒータ
レーザー光学系	
搭載レーザー	プロジェクト新規開発品 QCW ファイバーレーザー
レーザービーム走査	ガルバノミラー方式（近赤外線仕様、リニアトランスレータ付き）

には金属粉末を準備しておく粉末供給槽（フィード）、フィードから造形テーブルに金属粉末を敷く粉末積層機構（リコータ）、造形テーブルおよびフィードを上下に精密に位置決めする駆動機構が配置されている。最大の特長は造形環境を高真空とするために、小型機は 400 L/sec、実用サイズでは 700 L/sec の排気量をもつターボ分子ポンプ（TMP）を搭載していることである。RP（ロータリーポンプ）による粗引きと TMP による本引きにより、小型機では 15 分、実用サイズでは 30 分以下で成形真空度 1.0×10^{-2} Pa 以下を達成している。表 2 に小型プラットフォームの基本的な仕様、図 2 に小型プラットフォームの外観を示す。

4.3 造形特性

小型プラットフォームでの密度向上実験について報告する。初期の実験では粒径 150 μm 以下の 6-4 チタン合金粉末を使用した。粒径が大きいため当初の積層厚さは 0.2 mm とし、密度評価用試験片として 10 mm×8 mm×1 mm 程度の直方体を造形した。層状の構造かつ各表面層は十分に溶融しているものの、内部の粒子が残っている状態がはっきり見られた。密度は 2.4~3.1 g/cm³ 程度で、6-4 チタンの密度を 4.37 g/cm³ とすると 55~71% 程度の相対

図2 小型プラットフォームの外観

(a) 粗粉による製品

(b) 微粉 (>45 μm) による製品

図3 小型プラットフォーム造形製品の断面 (Ti6Al4V)

密度である (図3 (a)). 次に $75\mu\text{m}$ 以下の材料を使用して造形実験を行った. 粒径が小さくなったことにより, 積層厚さを 0.12mm まで薄くすることができた. $75\mu\text{m}$ 以下の材料による造形物は, 密度が $2.9\sim 3.6\text{ g/cm}^3$ で相対密度が $66\sim 82\%$ へと向上した. さらに $45\mu\text{m}$ 以下の材料を使用することにより, 積層厚さを 0.1mm まで薄くでき, 密度が $3.5\sim 4.0\text{ g/cm}^3$ で相対密度が $80\sim 91\%$ まで向上する. その後, 走査線間隔, 走査速度等の造形条件の適切化を図ることにより, 積層厚さを 0.06mm まで薄くすることができ, 密度が 4.4 g/cm^3 , 相対密度が 99.2% の造形物を得ることができる (図3 (b)). また, 図4に同条件下で得られた自由形状の造形品の写真を示す.

5. 今後の開発と動向

SLMを中心とした金属三次元造形技術は完成した技術ではないが, 新しい製造技術としての期待は極めて大きい. 特にその期待は, 欧州で大きく, ドイツ Fraunhofer では傘下の各研究機関を連携して, 実用化を進めている. イギリスにおいても原料金属粉を重点に開発研究を進めている. ベルギーでは積層装置の開発企業は存在しないものの, Leuven Catholic 大学を中心に研究が進められており, 大学からのスピンアウト企業である Materialise は造形用ソフトウェア開発の中心的企業である. 造形用ソフトウエ

図4 小型プラットフォームによる造形製品例 (Ti6Al4V)

表3 TRAFAMでの技術目標²⁵⁾

	熱源	造形サイズ (mm)	造形速度 (cc/h)	精度 (μm)
タイプ I	EB	大型 (1000×1000×600)	500	50
タイプ II	EB	小型 (300×300×600)	500	20
タイプ III	LB	大型 (1000×1000×600)	500	20
タイプ IV	LB	小型 (300×300×300)	500	20

ア Magics は多くの積層造形装置に利用されている. このような状況のなかで, 日本においても, 世界水準からの遅れを取り戻すべく, 経済産業省が音頭を取り, 平成 26 年度より技術研究組合 (TRAFAM) がスタートとした²⁵⁾. 研究開発には, 素材開発, レーザー開発, 電子ビーム装置開発, 装置開発を含め, 多数の企業が参画する. 計画においては, 表3のように SLM, EBM, DED の各装置の低価格化, 高速化, 大型化をめざした研究開発を行う.

6. ま と め

マスコミにおいて, 三次元積層造形が日本発の技術であることが喧伝されることがある. 確かに世界で最初に三次元積層造形に関する特許出願をしたのは日本人であるが, 最初の製品化を実現し, 事業化を進めたのは 3D systems であるし, 現在も, 革新的三次元造形の要素技術を抱える企業を呑み込み, 成長中である. 一方, 日本では, 多数の企業が光造形にかかわったが, 現在ではほとんどが淘汰されている. 日本という国のイノベーション戦略に本質的な問題があるのだろうか. 今後も, 十分な分析が必要かと思う. 金属三次元造形では, 国内でもいくつかの大学研究室等で先駆的な仕事を行っている. はたして, われわれはその成果を十分に生かしているであろうか. 金属積層造形に関しては, 今年度より TRAFAM がたちあがり, 目標に向けての開発研究に邁進する. 現在の欧, 米に遅れてしまった現状を打開することを期待する.

参 考 文 献

- 1) 小玉秀男: 特願昭 55-48210.
- 2) <http://www.thagiwara.jp/rp/rp-history/kitaguchi.html> (参照 2014-10-5)
- 3) Wohlers Report 2012 Part6: Global Reports, (2012) 155.
- 4) 単学伝, 高木太郎, 柳沢一向, 中嶋尚正: 光造形法を応用したセラミック微小構造体の製法 (第1報): 製法の提案と光造形実験, 精密工学会誌, **61** (1995) 420.
- 5) T. Shimizu, S. Fuchizawa, M. Nose, S. Nakayama and K. Hiizumi:

- Fabrication of Metallic Parts Using FDM, Proceedings of Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing, (2002) 248.
- 6) 桐原聡秀, 宮本禁欽生: 光造形法の機能性セラミックス創成への応用, セラミックス, **38**, 5 (2003) 348.
 - 7) T. Shimizu, S. Okada and S. Fuchizawa: Rapid Prototype of Titanium Parts Using FDM Process, Proceedings of 3rd Material Processing for Properties and Performance, (2005) 65.
 - 8) 阿部史江, 小坂田宏造: レーザプロトタイプング—金属粉末のレーザによる部分熔融 3次元造形法—, 塑性と加工, **42** (2001) 393.
 - 9) K. Osakada and M. Shiomi: Flexible Manufacturing of Metallic Products by Selective Laser Melting of Powders, International Journal of Machine Tools & Manufacture, **46** (2006) 1188.
 - 10) B. Capshaw: Improved Performance for Motorsports Applications through Laser Powder Deposition Technology, Proceedings of the 2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing, D. Keicher, J. Sears and J.E. Smugeresky ed., Metal Powder Industries Federation, (2002) 69.
 - 11) F. Klocke and U. Clemens: Rapid Tooling Combining Laser Generating and High Speed Milling, Proc. of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, (1996) 211.
 - 12) 三浦秀士, 前田浩幸, 竹増光家, 上村誠, 大津雅亮: レーザによるチタン粉末積層造形技術の構築, 粉体および粉末冶金, **53** (2006) 740.
 - 13) 三浦秀士, 永田優, 石橋秀基, 上村誠, 大津雅亮: レーザによるチタン粉末積層造形技術の構築—第2報, 粉体および粉末冶金, **54** (2007) 707.
 - 14) 三浦秀志, 長田稔子, 石橋秀基, 大川内健太, 上村誠, 藤田誠, 有本伸弘: レーザによるチタン粉末積層造形技術の構築—第3報—, 粉体および粉末冶金, **55** (2008) 738.
 - 15) 京極秀樹: 最近のレーザ積層造形技術の開発動向, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, **1** (2010) 69.
 - 16) 京極秀樹: 3D プリンタとは, 3D プリンタの可能性, 日本ガスタービン学会, **42**, 5 (2014) 433.
 - 17) http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280 (参照 2014-10-5)
 - 18) http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_en (参照 2014-10-5)
 - 19) <http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html> (参照 2014-10-5)
 - 20) <http://cweb.canon.jp/3dsystems/lineup/px/spec.html> (参照 2014-10-5)
 - 21) 中野静, 佐藤直子, 清水透: 金属積層造形の量産加工展開, 日本ガスタービン学会, **42**, 5 (2014) 433.
 - 22) N. Sato, S. Nakano, T. Shimizu, K. Matsuzaki, M. Hagiwara and M. Sassa: Microstructure of Titanium Alloy Prepared by Selective

- Laser Melting in Vacuum, Proceedings of TMS2014, (2014).
- 23) T. Shimizu, S. Nakano, K. Matsuzaki, M. Sassa, Y. Horiba and M. Hagiwara: Selective Laser Melting of Titanium Alloy Parts and Forming Atmosphere Effect for the Products, Proceedings of PM2012, (2012).
 - 24) S. Nakano, M. Sassa, M. Hagiwara, Y. Horiba, T. Shimizu, N. Sato and K. Matsuzaki: Novel Laser Melting Solution for Metal Additive Manufacturing Using Vacuum and Quasi Continuous Wave laser, Proceedings of the 7th Int. Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2013) 419.
 - 25) 大胡田稔: 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 プリンタ技術開発について～, 素形材, **55**, 7 (2014) 54.

清水 透

1979 年名古屋大学工学部金属・鉄鋼学科卒業。通商産業省工業技術院機械技術研究所入所 (2001 年産業技術総合研究所へ改組)。専門分野は塑性加工, 粉末冶金, 現在は多孔質材料, 金属三次元積層技術の研究に従事。

中野 禪

1989 年電気通信大学大学院機械工学専攻修士課程修了, 2003 年博士 (工学)。通商産業省工業技術院機械技術研究所入所 (2001 年産業技術総合研究所へ改組)。専門分野は, 製造技術。現在, 微細プレス加工技術の高度化, ミニマルファブによる高効率半導体製造技術開発, 積層造形技術開発に従事。

萩原 正

1983 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業, 東洋電機製造株式会社入社, ドラステム本部に配属, 二次元精密プリンタおよび光造形装置開発業務に従事。2000 年より株式会社アスペクト, 技術担当取締役。専門分野は三次元積層造形, NEDO 委託事業「次世代素材等レーザ加工技術開発プロジェクト」に参画。

佐藤直子

2013 年九州大学大学院工学府材料物性工学専攻博士課程修了, 工学博士。独立行政法人産業技術総合研究所入所。専門分野は金属材料。現在は金属積層造形技術の研究に従事。