



金属3Dプリンタの最近の開発動向と将来展望

Recent Trend and Prospects for Metal Additive Manufacturing

京極 秀樹 近畿大学
Hideki Kyogoku 次世代基盤技術研究所
特任教授

1 はじめに

積層造形 (Additive Manufacturing : AM)、とりわけ金属積層造形における装置開発さらにはソフトウェア開発の進展は目覚ましく、これに伴って航空宇宙分野、医療分野、エネルギー・産業機器分野、さらには自動車分野の部品製造へと適用されてきており、“ものづくり”におけるキーテクノロジーの一つとなっている。Wohlers レポート¹⁾によれば、ここ数年金属積層造形装置 (以後、金属3Dプリンタと記述) の販売台数は急速に伸びてきており、2017年は約1800台、2018年は約2300台と報告されている。工作機械に比べれば、台数は非常に少ないが、今後とも大きな伸びが予測されている。

装置の造形方式に関しては、従来の金属3Dプリンタは、粉末床溶融 (以後、パウダーベッドと記述) 方式と指向性エネルギー堆積 (以後、デポジションと記述) 方式が主流で、製品としては航空宇宙分野におけるジェットエンジンの燃料噴射ノズルやブレードなどが実用化されてきている。今後製品の量産化に向けて装置のシステム化が行われてきているとともに、製品の品質を担保する必要があることからモニタリング・フィードバック技術の研究開発が進められている。技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM) では、国家プロジェクトを平成26年度から平成30年度までの5年間実施し、パウダーベッド方式とデポジション方式の国産の装置開発を行い、ユーザー造形による高付加価値製品の製造も可能となり、装置販売を開始している^{2,3)}。

最近ではバインダージェット方式の装置が開発されてきており、これまでの金属粉末射出成形 (MIM) プロセスに似ていることから、自動車などの小物部品の大量生産への適用が期待されている。また、装置が低コストであることから、材料押し出し方式の装置開発も行われており、試作製品などへの適用も進むものと予測される^{4,5)}。

本報告では、金属積層造形技術の最近の動向について、装

置並びにソフトウェア開発の観点から紹介するとともに、次世代3D積層造形技術への展望について述べる。

2 最近の開発動向

2.1 金属3Dプリンタ開発の動向^{4,5)}

金属3Dプリンタに利用されている方式は、ASTM及びISOにより規定された7つのカテゴリーのうち、主に (1) パウダーベッド (PBF) 方式と (2) デポジション (DED) 方式である。図1に金属3Dプリンタの性能の変遷を示す。両方式においては、装置の大型化・高速化が進んでいるとともに、装置の高機能化および専用機化・システム化が進んできている。

パウダーベッド方式では、装置の大型化・高速造形に対するユーザーからのニーズが高いことから、GE Additive社では、従来の方式と異なる工作機械でも適用されているガントリー方式の装置が開発されており、1300 mm×1300 mmの大造形面積を有する装置の発売が2020年に予定されている。また、各社とも500 mm×500 mm程度の造形面積を有する大型

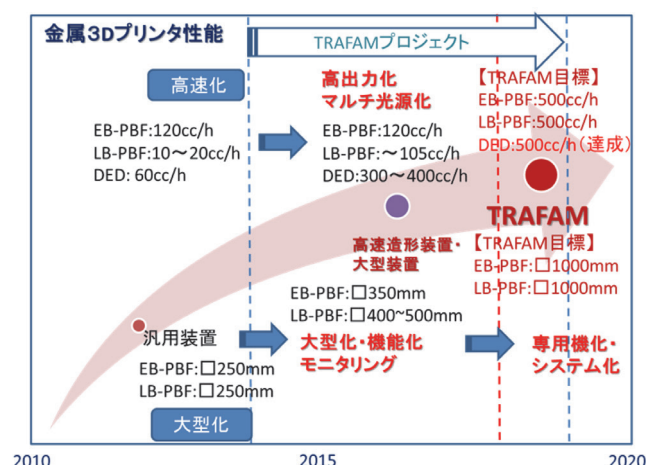


図1 金属3Dプリンタの性能の変遷

の装置開発を行っている。TRAFAMプロジェクトにおいては、目標の1000 mm×1000 mmに対して600 mm×600 mmの造形面積を有するレーザービーム方式と500 mm×500 mmの造形面積を有する電子ビーム方式の装置開発を行っている。高速造形への要求に対しては、レーザー出力を700 Wから1 kWの高出力レーザーとして、レーザーを4台搭載するなどのマルチ化により対応している。また、本技術が航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野における実用部品への適用が可能となってきたことから、装置の自動化・モジュール化が進んでおり、装置を複数台並べた自動化ラインへの対応が始まっている。粉末の供給はもちろんのこと、製品の取出し・粉末処理・搬送まで自動化されたシステムとなってきた。

デポジション方式の装置は、単純形状で大型製品に向いているとともに、パウダーベッド方式より高速での造形が可能である。しかし、製品の精度や品質には課題があったことから、製品の高精度化・高品質化のために高性能ノズルの開発や5軸CAMソフトの開発が行われ、従来より高品質の造形品の製造が可能となっている。TRAFAMプロジェクトでは、高性能ノズルの開発と併せて、デポジション造形用のマルチマテリアルに対応した5軸CAMソフトを開発しており、製品の大幅な品質向上と高機能化を図っている。

金属積層造形技術は、現状では航空宇宙分野の製品への適用が主流となっているため、とりわけ製品の品質の安定化および品質保証が重要な課題となっている。この解決策として、造形後のX線CTなどによる製品検査はもちろんのこと、モニタリング技術とシミュレーション技術の開発が行われている。パウダーベッド方式の商用機では、一層毎のパウダーベッドの状況をモニタリングすることは行われているが、リアルタイムでのモニタリングではなく、機構上の困難さからフィードバック技術は実現されていないのが現状である。一方、デポジション方式では、ノズルが移動することからリアルタイムでのモニタリング・フィードバックが可能であるため、TRAFAMプロジェクトでは、デポジション方式におけるモニタリング・フィードバック技術を開発している。三菱重工工作機械(株)の装置では、メルトプールの形状処理を行うことによりフィードバック制御を実現している³⁾。本開発では、メルトプールのモニタリングを行い、フィードバック制御を行うことにより安定したメルトプールを形成できることから安定した造形が可能となり、品質の安定化および品質保証ができる。

2.2 材料開発の動向

2.2.1 金属粉末製造技術の開発⁶⁾

金属積層造形に利用される粉末は、従来から行われている製造方法により製造され、主にガスアトマイズ法が利用され

ている。パウダーベッド方式では、特に流動性(Flowability)や拡がり性(Spreadability)が重要であることから、球状粉末が利用されることが多い。球状粉末を製造する方法として、プラズマアトマイズ法や遠心力アトマイズ法が利用されているが、粒径が大きくなることと併せて、粉末中のガスボアが少ないことから電子ビームパウダーベッド方式での利用が多い。

通常利用される粉末の粒径は、一般的には次のとおりである。

- ・レーザーパウダーベッド方式：15～45 μm
- ・電子ビームパウダーベッド方式：45～105 μm
- ・デポジション方式：45～105 μm

粉末特性は装置のリコート機構に依存することと併せて、造形条件との関係も大きいことから、装置に対応した特性を有する粉末の供給が必要となるため、粉末が指定されていることが多い。

最近では、粉末の利用が増加したことから併せて、粉末製造技術や分級技術の開発、さらには中国メーカーなどの参入も顕著となってきており、粉末の価格も下がってきている。また、次項で述べるように、機能材料の開発も盛んに行われるようになってきている。

2.2.2 材料開発

材料開発に関しては、ステンレス鋼、工具鋼、インコネル、チタン合金、アルミニウム合金など幅広い材質の造形が可能となっている。ステンレス鋼に関しては、SUS304、SUS316L、SUS630 など幅広い分野の製品に利用されている。工具鋼に関しては、金型を主としてマルエージング鋼(M2)や合金工具鋼(H13)が用いられている。最近では、耐熱材料・耐食材料・耐摩耗材料などAM用の材料開発が行われてきている。一例として、GKN社とボルシェ社により肌焼き鋼であるマンガンクロム鋼20MnCr5 (1.7147, DIN EN10084-2008) JIS SMnC420H相当が、ディファレンシャル・ハウジングなどの自動車用材料として検討されている⁷⁾。

インコネルに関しては、IN718を中心にIN625など耐熱材料として航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野などの製品へ利用されている。表1に示すように、溶製材に匹敵する特性が得られている。しかし、他の材料においても同様に、造形方向に対して垂直方向に造形した試験片の方が、平行方向に造形した試験片より強度が低く、伸びが高くなっている。これは、これまでも報告⁸⁾されているように、凝固組織(図2)が造形方向に伸びたためと考えられる。特に、電子ビームパウダーベッド方式では、組織の異方性が顕著に現れることから造形方向に配慮する必要がある。このように、本技術では造形方向により組織が異なることから、造形方向に対して、0°(垂直)、45°、および90°(平行)に造形す

表1 レーザーパウダーベッド方式による代表的な金属材料の機械的性質 (EOS 社のデータシートより抜粋)

材料	造形方向	造形まま			熱処理材				
		降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	硬さ	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	硬さ
IN718	水平	780±50	1060 ± 50	(27±5)	30HR C	-	-	-	-
	垂直	634±50	980±50	(32±5)		1150 ± 100	1400 ± 100	(15±3)	47HR C
AlSi10Mg	水平	270±10	460±20	(9±2)	119 ± 5	230±15	345±10	12±2	-
	垂直	240±10	460±20	(6±2)	5HBW	230±15	350±10	11±2	-
Ti-6Al-4V	水平	1140 ± 50	1290 ± 50	(7±3)	320 ± 20	1000±50	1100±40	(13.5 ± 2)	-
	垂直	1120 ± 80	1240 ± 50	(10±3)	20HV 5	1000±60	1100±40	(14.5 ± 2)	-
Maraging steel	水平	-	-	-	-	2010	2080	4	-
	垂直	-	-	-	-	2000	2080	4	-
17-4PH	水平	720	770	21	-	1200	1310	12.5	41HR C
	垂直								
SUS316L	水平	530±60	640±50	40±15	89HR B	-	-	-	-
	垂直	470±90	540±55	50±20		-	-	-	-

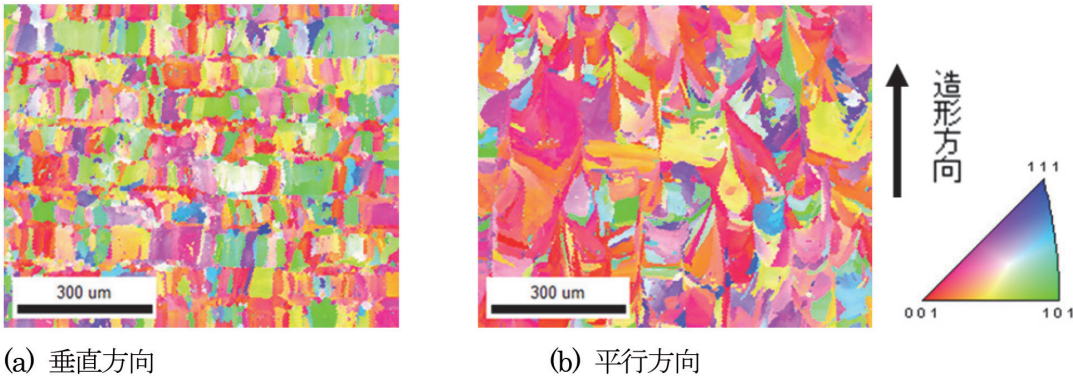


図2 レーザーパウダーベッド方式によるインコネル718合金の造形ままの組織

るように規定されている。また、高強度・耐食材料としてハイエントロピー合金が開発されている。日立金属 (株) では、CoCrFeNiTiMo 合金を開発し、IN718 熱間圧延材より強度と耐食性に優れることを確認しており、AM 用の新素材として期待される⁹⁾。

アルミニウム合金に関しては、Al-10Si-0.4Mg 合金が主流であり、表1に示すように、造形ままでは鋳造材より大幅に高い引張強度を有している。これは、図3に示すように急冷

凝固されるために結晶粒が非常に小さくなり、Hall-Petch の関係からもわかるように、強度が大幅に上昇したためである。最近では、高強度アルミニウム合金製造のために、A2024、A6061、A7075 などの造形が検討されているが、凝固割れが発生するために造形は非常に難しい。しかし、Uddin ら¹⁰⁾ は高周波加熱によりパウダーベッドを高温にすることにより A6061 合金において割れが発生しないことを報告している。また、Zhang ら¹¹⁾ は高エネルギー密度での造形に

よりA2024合金において割れが発生しないことを報告している。また、著者ら¹²⁾は高エネルギー密度での造形によりA2024合金およびA6061合金において割れが発生しないで造形が可能であることを見出している。また、Airbus社は、本技術に適用するために新たに高強度のアルミニウム合金Al-Mg-Sc合金(Scalmalloy[®])を開発しており、引張強さ520 MPa以上、伸び13%以上の引張特性を有している¹³⁾。

チタン合金に関しては、Ti-6Al-4V合金が航空宇宙分野や医療分野において高強度・高耐食性の構造部材やインプラントとして利用されており、TiAl合金は電子ビームパウダーベッド方式によりジェットエンジンのタービンプレードとして利用されている。

2.3 製品例

本技術の製品への適用例としては、これまでもよく紹介されているように航空宇宙分野におけるGE社のジェットエンジンの燃料噴射ノズルやタービンプレードが有名であるが、そのほかAirbus社のバイオニックデザインによるアルミニウム合金製軽量化部品など多くの製品に利用されてきている。上述したように、Airbus社が開発した高強度のアルミニウム合金AlMgSc合金(Scalmalloy[®])は、溶接性、耐食性などに優れることから航空宇宙分野だけでなく、自動車分野などにおける構造部材や熱交換器などへの適用も行われている。

医療分野においては、以前からインプラントに幅広く適用されており、Ti-6Al-4V合金やCoCrMo合金が利用されてきている。

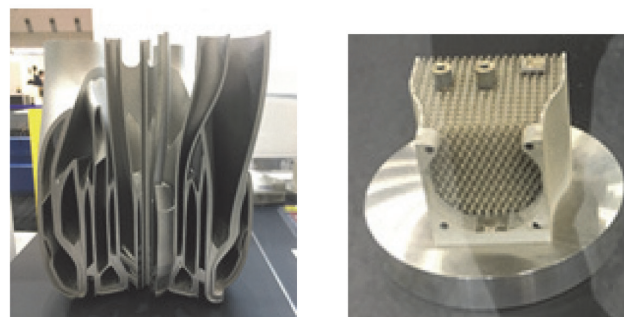
エネルギー・産業機器分野においては、Siemens社がガスタービンのタービンプレードへの適用を図っており、内部冷却を改良するなど機能検証用試作品として製造しているとともに、ガスタービン用バーナーは複数部品を統合した設計となっており、製造時間を90%削減している¹⁴⁾。また、図4に

示すように冷却管や熱交換器への適用は、設計を大幅に変更して高効率の性能を得ることができるために、今後の適用が進む製品のひとつであると予測される。

自動車分野においては、従来よりシリンダブロックやエンジン回りのアルミニウム合金の試作品が造形されている。上述したように、合金鋼の利用も検討されており、図5に示したディファレンシャル・ハウジングではトポロジー最適化により13%の軽量化が図れていることなどから、小ロットの部品への適用も進むものと思われる⁷⁾。

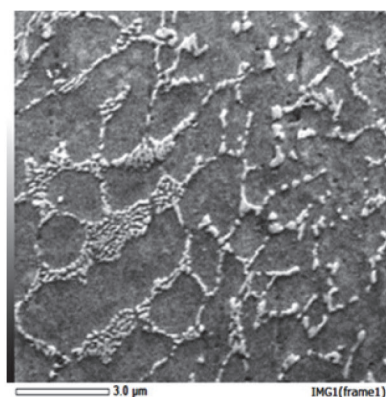
3 今後の展開^{5,15,16)}

AM技術、とりわけ金属積層造形は、将来的にも“ものづくり”における重要な加工法の一つであることから、航空宇宙分野はもちろんのことエネルギー・産業機器分野、さらには自動車分野へと適用されてきており、今後ますます適用範囲は拡大していくものと予測される。これは、本技術がデジタル・マニファクチャリング技術であることから、“ものづく

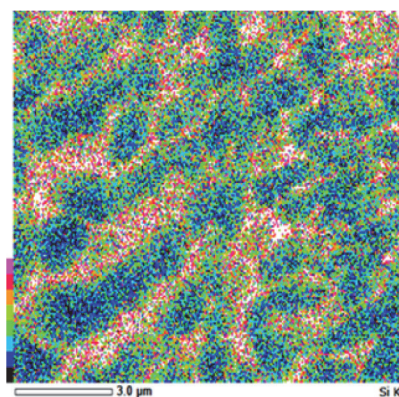


(a) 冷却管 (b) 熱交換器

図4 エネルギー・産業機器分野における製品例(TRUMPF社の好意による)



(a) SEM



(b) Si

図3 レーザーパウダーベッド方式によるAl-10Si-0.4Mg合金の造形ままの組織

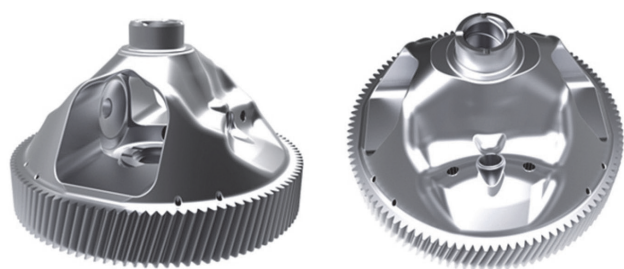


図5 自動車分野における製品例(ディファレンシャル・ハウジング) (GKN社の好意による)

り”において設計手法と併せて、製造工程も変革できるためでもある。このような状況の中、欧米を中心にサイバー・フィジカル型システムの構築が検討されている。フィジカル空間における重要な技術であるモニタリング・フィードバック技術に関しては、インプロセスによる欠陥検出技術、高精度・高速処理可能な画像処理技術、これに伴うフィードバック技術の開発が課題となっている。これに対して、サイバー空間におけるシミュレーション技術に関しては、粉体レベルにおけるマイクロ溶融凝固シミュレーション、組織予測シミュレーションおよび熱変形予測シミュレーションの開発を体系的に開発することと併せて、シミュレーションに使用する材料物性値のデータベース化とデータの高速処理及び高精度化のための技術開発が実施されてきている。

このように、デジタル・ツインを見据えた“ものづくり”が検討されてきており、AM技術を含めた“ものづくり”が大きく変化するものと予測される。

4 おわりに

「金属3Dプリンタの課題と将来展望」と題して2015年に寄稿させて頂いた時に比べて、最近の本技術の動きは非常に速く、装置開発をはじめ、ソフトウェアなどの進歩は目覚ましいことから、5年前には試作品であった製品が実用製品として利用され始めている。また、適用材料も、従来から利用されてきた材料に加えて、高機能化した材料開発も行われてきており、ますます適用範囲が拡大すると予測される。本稿では、シミュレーション開発については紙面の関係でほとんど触れなかったが、最近ではCADからシミュレーションを行って造形条件の最適化を行った後、造形を行うソフトウェアも開発されており、3Dプリンタの特徴を活かす素地が形成されつつある。我が国においても、本技術のさらなる導入を促進していくとともに、装置を含めたハードウェアの開発と併せてソフトウェアの開発についても、我が国がその技術を保有しておくことは極めて重要である。併せて、装置の導

入を行ったとしても、AM技術に関わる人材育成がなされていなければ本技術を活かすことはできない。このため人材育成は海外においても急務となっており、我が国においても喫緊の課題であることから、その態勢づくりが必要である。

なお、本内容の一部は、経済産業省並びに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果得られたものである。ここに、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) Wohlers Report 2019, Wohlers Associates, (2019)
- 2) 京極秀樹, 千葉晶彦, 橋谷道明, 君島孝尚: 工業材料, 67 (2019), 16.
- 3) 第5回シンポジウム講演集, 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構編, (2019)
- 4) 京極秀樹: 機械設計, 62 (2018), 12.
- 5) 京極秀樹: 日本機械学会誌, 122 (2019), 4.
- 6) 奥村鉄平, 関本光一郎: 電気製鋼, 89 (2018), 13.
- 7) M.Kluge, G.Kotthoff, C.Cavallini and S.Hoeges: Proceedings of 16th International CTI Symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives, Berlin, (2017)
- 8) 例えば, M.E.Aydinoez, F.Brenne, M.Schper, C.Schaak, W.Tillmann, J.Nellesen and T.Nienendorf: Mater. Sci. Eng. A, 669 (2016), 246.
- 9) 桑原孝介, 尾越周平, 大坪靖彦, 陳美伝, 藤枝正: まてりあ, 57 (2018), 328.
- 10) S.Z.Uddin, D.Espalin, J.Mireles, P.Morton, C.Terrazas, S.Collins, L.E.Murr and R.Wicker: Proceedings of SFF symposium 2017, (2017), 214.
- 11) H.Zhang, H.Zhu, T.Qi, Z.Hu and X.Zeng: Mater. Sci. Eng. A, 656 (2016), 47.
- 12) H.Kyogoku, K.Yamamoto, T.-T.Ikeshoji, K.Nakamura and M.Yonehara: Mater. Sci. Forum, 941 (2018), 1300.
- 13) <https://apworks.de/en/scalmalloy/>
- 14) <https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>
- 15) T.DebRoy, W.Zhang, J.Turnerr and S.S.Babu: Scr. Mater., 135 (2017), 119.
- 16) C.L.Knapp, T.Mukherjee, J.S.Zuback, H.L.Wei, T.A.Palmer, A.De and T.DebRoy: Acta Mater., 135 (2017), 390.

(2019年8月20日受付)