

■ レビュー ■

Additive Manufacturing技術の最新動向

京極 秀樹*1, 池庄司 敏孝*2, 米原 牧子*3

The Recent Trend on Additive Manufacturing Technology: A Review

Hideki KYOGOKU*1, Toshi-Taka IKESHOJI*2, Makiko YONEHARA*3

The recent trend on Additive Manufacturing technology is reviewed. Additive manufacturing (AM) technology has been dramatically attracting attention as a breakthrough technology in advanced manufacturing. The recent trend of the development of metal 3D printers and the recent research activities are introduced. Recently, new-type metal 3D printers are developed using not only powder bed fusion and directed energy deposition but also binder jetting and materials extrusion. And 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, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Binder Jetting, Materials Extrusion, TRAFAM Project

1. はじめに⁽¹⁾

アディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing, 以下 AM と記述する) 技術における, ここ数年の進展は目覚ましいものがある. とりわけ, 金属 AM 技術は, 装置, 金属粉末さらにはソフトウェアの性能向上により航空宇宙分野においては必須の加工技術となってきた. この分野においては, GE 社が牽引役を務めており, 2010 年より AM 技術の導入を検討し始め, 最近では航空機エンジン部品等へ適用を始めている. このようなプロセスの中で, 2016 年には唯一の電子ビームパウダーベッド方式の装置メーカーである ARCAM 社と世界第 2 位のレーザパウダーベッド方式の Concept Laser 社を傘下に収め, 2017 年には Formnext 2017 において世界最大級の造形サイズ 1m×1m の β 機を展示するなど, 装置開発にも積極的に取り組んでいる. そのほか, ミシュラン社のベンチャー企業である AddUp 社が新たにレーザパウダーベッド方式の装置を開発するなど, この分野における動きは目覚ましいものがある. パウダーベッド方式の装置と併せて, デポジション方式の装置に関しては, 欧米や中国ではかなり導入が進んでいる. また, 2016 年あたりからバインダージェティング方式の装置開発も進められており, ExOne 社, ヘガネス社が積極的に動いている. RICOH 社もバインダージェティング

方式の装置開発の研究を進めている. さらに, 2017 年より Markforged 社が金属粉末を樹脂フィラメントに混合して造形する材料押出し方式の装置開発を行っている. このように, これまで主流であったパウダーベッド方式とデポジション方式だけでなく, バインダージェティング方式や材料押出し方式など製品に応じた造形方式の装置開発が活発化してきている.

2017 年 10 月の EuroPM2017 での会長の挨拶では, 2016 年に新規導入された金属 3D プリンタは 1000 台程度, 稼働装置は 3500 台程度であると予測されるとのことであった. これに伴って, AM 関連の粉末生産量は, 2015 年に 700 トンであったものが, 2023 年には 4700 トンに伸びるとの予測が示された. また, プレナリー講演では, イタリアのガスタービンメーカーである GE Baker Hughes 社のからの報告があり, HIP とバインダージェティング(BJ), レーザパウダーベッド(L-PBF)方式, 電子ビームパウダーベッド(E-PBF)方式(EBM), デポジション技術を組み合わせた開発を行っており, 2025 年までにインコネル合金を中心とした造形に L-PBF 装置を 50 台, ステンレス鋼とセラミックスを中心とした造形に BJ 装置を 30 台導入予定であるとの報告がなされた.

このような中, 我が国においても, 2017 年には大手企業を中心にかかなりの台数の金属 3D プリンタの導入が行

原稿受付 2018 年 5 月 1 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

*2 近畿大学次世代基盤技術研究所 准教授

*3 近畿大学次世代基盤技術研究所 研究員

連絡先: 京極秀樹 (研究代表者)

われていると予測される。

一方、学協会における研究発表も活発に行われており、ここ数年の間に発表件数が大幅に伸びてきている。AMに関する国際会議としては最も古くからテキサス大学オースティン校で開催されている SFF シンポジウム 2017 においては、約 500 件の発表が行われ、この分野における研究の活性度が非常に高いことが伺える。欧米や中国などにおける他の国際会議においても発表件数は大幅に増えてきており、論文数も急激に増加してきている。これは、海外においては、America Makes のプロジェクト、EU のプロジェクトをはじめ、多くのプロジェクトが動いており、着々と成果が出始めているとともに、大学や研究機関の拠点化が進んできていることに起因している。我が国においても、2014 年度より、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（以後、TRAFAM と記す）を設置して開始された経済産業省「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産業用 3D プリンタ技術開発」^{(2),(3)}と内閣府による府省連携の SIP プログラム 24 テーマが実施され、成果が出始めているが、欧米や中国に比べて圧倒的に研究者が少ないことから、学会における研究発表件数や論文数も少ないのが現状である。

本稿では、2017 年におけるレーザーを用いた最近の AM 技術の動向を中心に述べるとともに、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研究開発状況についても紹介する。

2. AM技術の最新動向

ここでは、2017 年を中心に金属 3D プリンタ開発の状況について述べる。金属 3D プリンタに利用されている造形方式は、上述したように主として(1)粉末床熔融

(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。)方式であるが、最近ではバインダージェティング方式、材料押出し方式やマテリアルージェティング方式の装置開発も行われ始めている。以下に、最近の動向について紹介する。

(1)パウダーベッド(PBF)方式

パウダーベッド方式における光源には、レーザーと電子ビームがあるが、電子ビームについては ARCAM 社が独占状態で、GE 社の買収により大型化に向けての新たな動きが出てきている。一方、レーザー利用した装置開発のトレンドは、次の通り、

- 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

など多重光源化が進められている。大型化については、2016 年には、

- ③ 250×250mm から 500×500mm 以上への造形エリアの大型化

であったが、2017 年には GE 社による 1000×1000mm の造形エリア、SLM Solutions 社による SLM800 の開発など、さらに大型化が進んでいる。

一方、小型精密造形への展開も進んでおり、従来から 3D Systems 社の装置や新たに AddUp 社の装置などがこれにあたる。AddUp 社の装置では、粉末積層にはローラー方式を採用しており、粉末は 6~8 μm の粒径のものを使用しているため、図 1 に示すように、精密かつ薄肉部品、微細な貫通穴の造形も可能としている。このため、自動車精密部品への適用を検討している。

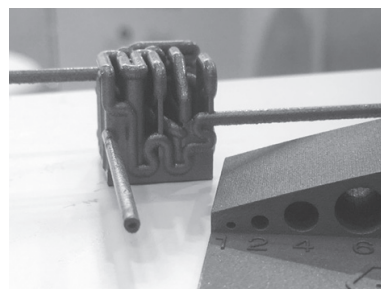


図 1 精密部品の例 (AddUp 社の好意による : 3D Printing2018 展示会にて)

(2)デポジション(DED)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。我が国においても、海外製のデポジション方式の装置の導入が可能となり、Optomec 社のレーザーによるパウダーデポジション方式や Sciaky 社の電子ビームによるワイヤー供給方式などが注目される。また、2017 年秋に TRAFAM による開発装置も、東芝機械並びに三菱重工工作機械により上市され、高速で高精度の造形体の作製が可能となっており、今後さらに開発が進んでいくものと予測される。

(3)バインダージェティング(BJ)方式

バインダージェティング方式の装置開発も ExOne 社やヘガネス社により行われている。我が国では、RICOH 社⁽¹⁾も研究開発を進めている。この方法は、ExOne 社の報告によると密度はステンレス鋼で相対密度 98% 程度までで、金属粉末射出成形(MIM)法と同程度のものが得られているが、材質には制限されるものと思われる。しかし、MIM 法より大型かつ複雑形状の製品の造形が可能で、大量生産も可能であるため、材質と形状を絞れば今後の展

開が期待できる。

(4)材料押出し方式

Markforged 社が開発した材料押出し方式を利用した装置で、MIM と同様に脱バインダ後に焼結を行う方式で、ADAM(Atomic Diffusion Additive Manufacturing)という名称の造形法である。MIM ではできない内部複雑構造もある程度可能で、図 2 に示すように MIM より大物の製品造形が可能であるが、MIM と同様に密度は 97%程度である。

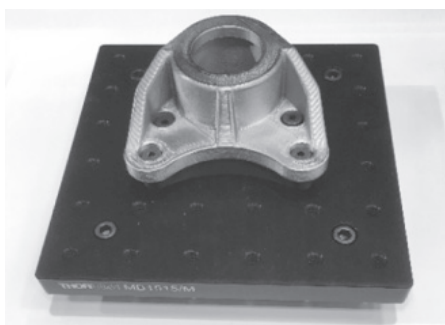


図 2 ADAM 法による造形品の例 (Markforged 社の好意による：3D Printing2018 展示会にて)

3. 研究開発状況

研究開発のトレンドについて、SFF シンポジウム 2017 の研究発表⁴⁾から見ると、次のような点が挙げられる。

(1)品質保証のためのモニタリング技術の開発

- ・テストベンチを利用した in-situ モニタリング技術の進歩、特に画像処理技術の向上
- ・SLM 及び DED 装置を利用した ex-situ モニタリング技術の開発

(2)高密度化のための L-PBF 及び DED におけるスキャン方法の検討やモデリングといった基礎的研究

(3)高機能化のための L-PBF マルチマテリアル装置の開発

(4)高機能化のための AM 技術と切削技術を融合したハイブリッド装置の研究開発

(5)実用化に向けての材料特性評価

- ・インコネル、チタン合金、アルミニウム合金、ステンレス鋼などの疲労強度や破壊靱性評価

(6)材料開発

- ・アルミニウム合金における高強度合金(A2024, A6061, A7075)の開発
 - ・形状記憶合金、タングステンといった機能材料開発
- これらの研究発表のうち興味深い内容を紹介しておく。

(1)品質保証のためのモニタリング技術の開発に関しては、多くの発表が行われている。

ペンシルベニア州立大学からは、DED におけるメルト

プールの形状を指標としたモニタリング・フィードバック制御に関する報告がなされた。メルトプールから発生するブルームの検出による制御が重要であることが強調された。

ミシガン大学のグループからは、L-PBF におけるスパッタの発生は製品の欠陥につながることから、種々の造形パラメータとスパッタの関係を高速度カメラのデータから解析し、その発生の原因を究明した報告がなされた。ヘリオット・ワット大学のグループからは、高速度カメラの観察により、50W・0.1m/s でスパッタが前方向に、100W・0.5m/s で上方向に、200W・1m/s で後ろ方向に飛ぶことが観察され、速度によりスパッタの方向が変わること、また高出力になるほどヒュームの高さが高くなることも報告された。このように、スパッタは製品の欠陥発生の原因の一つであり、このような知見は造形条件を検討する上で重要である。

ローレンス・リバモア国立研究所からは、400W ファ이버レーザーを搭載したテストベッドを利用した表面状況のモニタリングに関する研究が報告され、OCT 法によるスキャンパターンと表面粗さ並びに変形状況をモニタリングした内容であった。特に、リアルタイムでのキーホール状況の観察は欠陥発生の原因を知るために有効であることが示された。

また、テストベッドに高速高エネルギーX線カメラを取り付けて、パウダーベッドにレーザーを照射した際の挙動について真空度を変えて観察した結果、

- ・ $P=1\text{atm}$ では、ガスによる上昇気流がみられ粉末が舞い上がる
- ・ $P=0.05\text{atm}$ では、ガスによる上昇気流と下降気流が発生し粉末の挙動が複雑となる
- ・ $P=10^{-4}\text{atm}$ では、スパッタと粉末が散乱する

現象が発生することが報告された。

以上のように、テストベンチを利用した in-situ モニタリングからレーザー照射時の熔融凝固現象の解明による欠陥発生の原因が明らかとなっており、品質保証のために重要な知見を与えている。

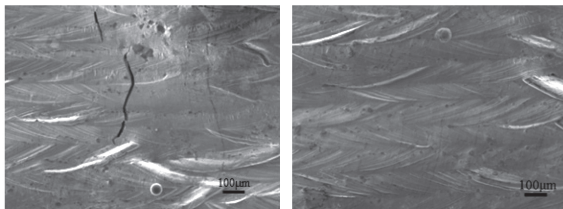
(6)材料開発においては、高強度アルミニウム合金の開発がホットな話題である。これは、高強度アルミニウム合金では、熔融凝固時に凝固割れを伴いために、造形が難しいとされているためである。

Fraunhofer 研究所と RWTHAachen 大学が開発した Aconity3D 社の AconityOne により、A6061 合金の L-PBF 造形に関する研究で、相対密度 98.7%でクラックフリーの合金が得られたとの報告であった。これは、通常の装置では難しい予備加熱温度を高周波加熱により高温造形しているためと考えられる。また、中国のグルー

プからは、A7075 合金の造形に関して、レーザー出力 200W、走査速度 150mm/s で相対密度 99%のクラックのない造形体が得られたと報告された。

高強度アルミニウム合金 A2024, A6061, A7075 などの合金では凝固割れ(solidification crack) (あるいは高温割れ(hot tearing))が発生するため、AM 技術の適用が難しいことが報告されている。これらの合金における凝固割れは、凝固開始(液相線)と凝固終了(固相線)までの温度差が大きいことから、結晶粒界での偏析が起りやすく、また結晶粒の成長により液相の供給が難しくなるためといわれている。クラック発生を防止するためには、上述のように造形時に高温に保持していく方法と Zhang ら⁶⁾が報告しているように、高エネルギー密度での造形を行う方法が考えられる。

著者らの研究においても、A2024 及び A6061 においては、図 3(a)に示すように一般的に適用されている造形条件では、クラックが発生することを確認している。一般的に利用されている装置では高温保持は難しいことから、高エネルギー密度状況下でのクラック発生への影響を調査した。その結果、エネルギー密度 500 J/mm³という高エネルギー密度の場合にクラック発生しにくいことがわかった。



(a) クラック発生 (b) クラック発生なし

図 3 A6061 合金造形体の表面状況

4. 次世代型産業用 3D プリント技術開発プロジェクトにおける研究成果⁶⁾

3D 造形技術研究センターでは、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構(TRAFAAM)による(平成 26 年度～30 年度)「次世代産業用 3D プリント技術開発プロジェクト」を実施している。本プロジェクトにおける基礎技術である溶融凝固機構の解明、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おり、その一部を紹介する。

(1)溶融凝固機構の解明

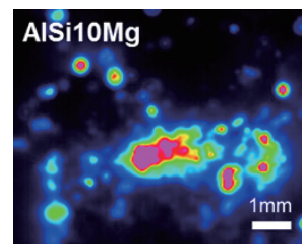
金属積層造形においては、溶融凝固機構を明らかにしておくことは、造形体の品質を安定化するためにも非常に重要なことである。このため、本プロジェクトで開発した要素技術研究機に高速度カメラとサーモビューワを設置して、溶融凝固現象の解明を行っている。2016 年度

は、Al-10Si-0.4Mg (AlSi10Mg と記述) 及び純銅を中心に高速度カメラとサーモビューワにより検討した。

AlSi10Mg の観測例を図 4 に示す。AlSi10Mg については、インコネル 718 のような紡錘形のマルトプールが観察されず、スパッタリングも多いことから、造形体に欠陥が発生しやすいことがわかった。



(a) 高速度カメラによる溶融凝固状況



(b) マルトプール近傍の温度分布

図 4 高速ビデオ及びサーモビューワによる溶融凝固現象の観測結果

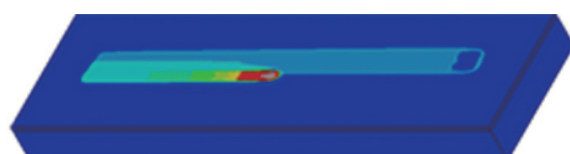
また、溶融凝固シミュレーションソフトウェアを開発した。ここでは、インコネル 718 を対象として粉体の熱伝導率を Kunii-Smith モデルを導入し、かつ、粉体の溶融凝固による密度、エンタルピー、熱伝導率の温度依存性を加味した過渡伝熱解析を行った結果、SLM 造形過程におけるレーザー照射部近傍の温度分布を予測することができた。この結果は、図 5 に示すように、サーモビューワによる測定結果とよく一致した。

純銅の結果については、紙面の都合上著者らの報告⁷⁾を参照願いたい。

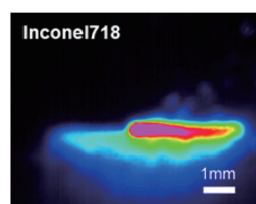
(2)熱変形予測シミュレーション

金属積層造形では、溶融凝固現象を伴うことから熱変形が生じるため、できる限り熱変形のない造形条件を検討する必要がある。しかし、現状では試行錯誤によるところが多いため、熱変形予測シミュレーション技術の開発は重要となっている。当センターでは、汎用ソフトウェアを用いて単純形状の造形体に対する解析技術を開発している。2016 年度には、熱弾塑性解析のうち、全体に一樣に固有ひずみを与える方法による熱変形予測シミュレーションの精度を検討した。ここでは、この方法を一樣冷却弾塑性解析法と呼ぶ。結果として、一樣冷却弾塑性解析法でも実造形物との寸法比較で 3%程度の誤差に収まることが確認されたので、この方法を用いて、サポ

ート構造の付加方法による熱変形と残留応力の変化を検討した。解析結果の例を図6に示す。



(a) 伝熱シミュレーション結果



(b) サーモビューワ測定例

図5 伝熱シミュレーション結果とサーモビューワによる測定結果の比較

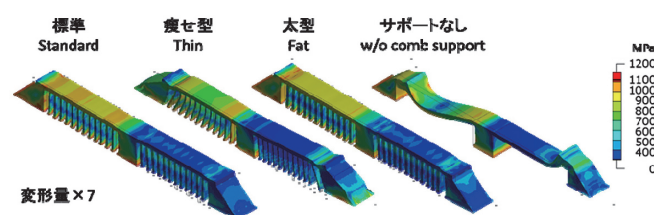


図6 櫛型試験片のサポート形状と造形後の変形解析結果

(3)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、ニッケル基超合金、アルミニウム合金及び純銅に関する最適造形条件の検討を行い、組織及び機械的性質について調査している。

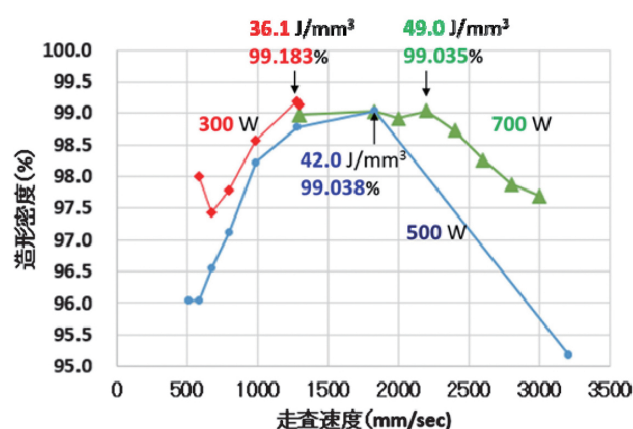


図7 AlSi10Mg合金の各出力における走査速度に対する密度の変化

AlSi10Mg合金の高出力・高速造形条件を検討した例について述べる。レーザー出力及び走査速度が造形体密度に及ぼす影響について検討した結果を図7に示す。これから、造形物の相対密度が最大となる走査速度はレーザー出力の違いによって異なることがわかる。また、レーザー出力が低いほど造形体の相対密度が最大となる走査速度は遅くなり、レーザー出力が高いほど造形体の相対密度が最大となる走査速度は速くなっていることがわかる。レーザー出力700 Wでは、走査速度2200 mm/sでも高密度の造形体が得られている。このように、レーザー出力を高出力にすることにより、高速化が可能なことがわかった。

5. おわりに

上述したように、AM技術における世界の動きをみると、ここ数年の急速な3Dプリンタの性能およびAM技術の向上により、本技術の高付加価値製品への適用は目覚ましいものがある。また、熔融凝固現象の解明やシミュレーション技術の開発などの基礎的な研究開発も各国のプロジェクトの進行とともに急速に進んでいる。本稿では、その一端を紹介した。本稿が読者の皆様の参考となれば幸いである。

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ならびに研究室の院生諸君に謝意を表する。

参考文献

- (1) 京極秀樹, 池庄司敏孝, 米原牧子, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, 8, (2017), pp.179-183
- (2) H. Kyogoku, Metal Additive Manufacturing, Autumn/Fall 2015, 1, (2015), pp.31-39
- (3) 京極秀樹, 千葉晶彦, 橋谷道明, 君島孝尚, 岡本繁樹, 松田均, レーザ加工学会誌, 25, (2018), pp.6-11
- (4) Proceedings of SFF Symposium 2017, Austin, TX. (2017)
- (5) H. Zhang, H. Zhu, T. Qi, Z. Hu, X. Zeng, Materials Science & Engineering A, 656(2016), pp.47-54
- (6) 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, (2017)
- (7) T.-T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, K. Imai, H. Kyogoku, Journal of Minerals, Metals and Materials Society, Vol.70, (2018), pp.396-400