

金属積層造形技術の可能性と 技術開発動向

京 極 秀 樹*

1. はじめに

Additive Manufacturing (AM) 技術の一つである金属積層造形は、医療分野では早くからインプラントの製造に利用されてきた。これは、本技術が従来の加工法では不可能な三次元複雑形状品の製造が可能で、ラティス構造といった軽量化や種々の機能を付与できる技術であることによる。とりわけインプラントには個人個人にあった形状が必須であるため、本技術は有効な加工手段として利用されている。

最近では、装置や粉末の性能向上により高品質の製品の製造が可能となってきており、航空宇宙分野において大きな動きが出てきている。特に、GE 社はジェットエンジンの噴射ノズルを手始めにタービンブレードへの適用も視野に入れている。2016年には、電子ビーム積層造形装置の唯一のメーカーである ARCAM 社とレーザー積層造形装置メーカーである Concept Laser 社を買収して新たな装置開発に着手しており、2017年には本技術をベースとした新工場を新設した。また、工作機械の大手メーカーである DMG MORI 社は、パウダーベッド方式のレーザー積層造形装置メーカーである Realizer 社を子会社化して工作機械からいわゆる金属 3D プリンタまでを揃えた装置メーカーとなった。さらに、自動車メーカーも試作品への適用だけでなく、大量生産ではないが部品への適用を始めてきており、Tier1 の部品メーカーも動き出してきている。

このように、本技術は従来の加工法では不可能な製品を製造する重要な加工技術として認識されてきている。

本稿では、金属積層造形技術における装置開発や研究開発動向について紹介するとともに、今後の可能性についても述べる。

2. 金属積層造形技術の開発動向

(1) 積層造形技術の分類

まず、AM 技術の分類について紹介しておく。AM 技術

は、2009年に設置された ASTM F 42 委員会により、次の7つのカテゴリーに分類された。図1に各種積層造形技術の概要を示す。なお、詳細な説明は成書⁽¹⁾を参照願いたい。

(1)結合剤噴射(バインダージェットティング)、(2)材料噴射(マテリアルージェットティング)、(3)粉末床溶融(パウダーベッド)、(4)指向性エネルギー堆積(デポジション)、(5)シート積層、(6)光重合硬化(光造形)、(7)材料押し出し(熱溶融積層)

これらのうち、金属積層造形に用いられるのは、主に粉末床溶融(パウダーベッド)法と指向性エネルギー堆積(デポジション)法であるが、最近ではバインダージェットティング法やマテリアルージェットティング法も利用されてきている。

(2) 装置開発の概要

パウダーベッド方式に関しては、最近の装置開発は高速化・大型化の傾向がある。高速化・大型化に関しては、レーザー出力 500 W あるいは 1 kW のファイバーレーザーが搭載されてきており、複数台のファイバーレーザーを搭載して高速化を図ってきている。また、1 m サイズのレーザーパウダーベッド方式の装置開発が行われている。技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構(以後、TRAFAM と記す)では、電子ビームによるマルチマテリアルの造形が可能なパウダーベッド方式の装置開発を行っており、今後の用途展開も広いことから早期の開発が要望されている。Fraunhofer 研究所においては、レーザーを光源とした従来装置を改良したマルチマテリアルの造形が可能なパウダーベッド方式の装置開発が行われている。

デポジション方式の装置開発に関しても、高速化・大型化が進んでいるとともに雰囲気制御可能な装置開発が行われてきている。高性能ノズルと制御用ソフトウェアの開発もあって、この方式としては複雑三次元形状で表面粗さにも優れる装置開発が行われており、TRAFAM プロジェクトにおいても高速・高精度の造形が可能な装置開発が進んでいる。我が国の工作機械メーカーは、相次いでデポジションと切削とのハイブリッド化した装置を改良さらには開発している。

最近では、バインダージェットティング方式の装置が復活して

* 近畿大学工学部；教授(〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

The Current Status and Development of Metal Additive Manufacturing Technology; Hideki Kyogoku (Faculty of Engineering, Kindai University, Higashi-Hiroshima)

Keywords: additive manufacturing, powder bed fusion, simulation, solidification behavior, mechanical properties

2018年11月20日受理[doi:10.2320/materia.57.140]

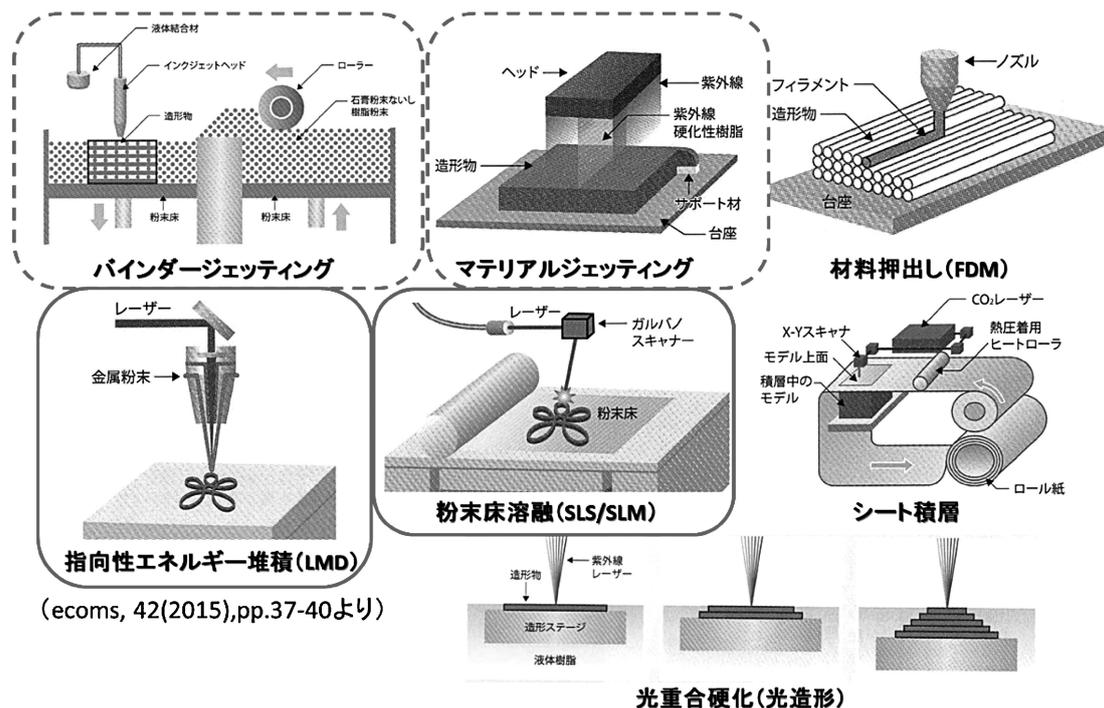


図1 AM技術における7つのカテゴリー⁽¹⁾。

きており、相対密度は98%程度で高密度の製品は製造できないものの金属射出成形法(Metal Injection Molding: MIM)レベルの密度を有する造形体は可能となってきており、量産化のための技術として期待されている。特に、欧米の企業が開発を促進してきている。

(3) 粉末開発の状況

最終的な製品の品質は装置だけでなく粉末特性にも依存する。このため、粉末の管理は非常に重要である。金属積層造形における重要な粉末特性の指標は、流動性(flowability)、拡がり性(spreadability)および充填性(packing density)である。これらを満足する粉末として、

- ① 真球度が高くサテライトのない粉末であること
- ② 粒度分布の狭い粉末であること(特に電子ビーム溶融(EBM)の場合には重要)

が求められる。

一般的に各造形方式により、次のような粒径の粉末が利用されている。

- ① レーザビームパウダーベッド方式：20~45 μm
- ② 電子ビームパウダーベッド方式：45~105 μm
- ③ デポジション方式：45~105 μm

このようなAM用金属粉末は、主に次のような方法で製造されている⁽¹⁾。

- ① ガスアトマイズ法
- ② プラズマアトマイズ法
- ③ 電極誘導溶解ガスアトマイズ法(EIGA)
- ④ プラズマ回転電極法(P-REP)
- ⑤ 遠心力アトマイズ法

これらのうち最も頻繁に利用されているのがガスアトマイズ法である。アルゴンガスまたは窒素ガスを用いて溶湯を噴

霧することにより球状粉末を大量に生産できる。粉末は球状ではあるが、表面にサテライト(微細粒子)が付きやすい。このため、真球で粒度分布の狭い粉末が製造しやすいプラズマアトマイズ法が、チタン合金などの反応性の高い金属粉末製造に利用されているが、生産性は低くコスト高になる。しかし、ガスポアをほとんど含まないために、EBM方式で利用されることが多い。そのほか、電極誘導溶解ガスアトマイズ法(EIGA)、プラズマ回転電極法(P-REP)、遠心力アトマイズ法などが利用されてきつつある。

金属粉末の特性はそれぞれの装置で機構が異なるために、その装置に相応しい粒度分布などの特性とすることが重要である。

3. 研究開発動向

最近の金属積層造形における研究開発については、高品質の製品製造が求められていることから、テストベンチを利用したモニタリング技術⁽²⁾⁽³⁾やシミュレーション開発⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾に関する研究が注目される。とりわけ、金属積層造形においては、溶融凝固現象の解明とシミュレーション技術の開発は重要な課題となっている。また、材料開発に関する研究も盛んに行われてきている。

(1) 溶融凝固現象の解明及びシミュレーション

溶融凝固現象については、ローレンス・リバモア国立研究所のグループが、高速度カメラによる撮影とシミュレーション技術の開発を行っており、レーザー照射による溶融凝固現象を明らかにしてきている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、アメリカ標準局

(NIST)もテストベッドを開発して熔融凝固現象を解析している⁽³⁾。このような現象の解明を行うことにより、最適な造形条件をより正確に見出すことができる。

著者が参画している TRAFAM のプロジェクトにおいては、当大学に設置されている図 2 に示すレーザパウダーベッド方式の要素技術研究機に高速度カメラとサーモビューワを取り付けて熔融凝固現象を観察するとともに、汎用ソフトウェアを用いたマクロ熔融凝固シミュレーションを実施している。また、プロジェクトの中では、三菱重工横浜分室を中心としたグループにより積層時の粉末状況も考慮したマイクロ熔融凝固シミュレーションをスーパーコンピュータ「京」を利用して実施している。本シミュレーションでは、二流体モデルを利用しているため、一流体モデルを利用しているローレンス・リバモア国立研究所のシミュレーションではできないスパッタリング発生予測も可能となっている⁽⁷⁾。

パウダーベッドにレーザは照射されると、図 3 に示すようにヒュームと呼ばれる金属蒸気が発生するとともに、粉末が熔融して熔融池(メルトプール)を形成する。メルトプールの中では、温度差による表面張力の差により Marangoni 対流が起こり、この対流が大きくなるとメルトプールに揺らぎが発生し、ガスの巻き込みなどが起こる。また、図 4 に示すようにガスの流動による粉末の移動やスパッタが発生してパウダーベッド上に飛散する。大きなスパッタが飛散するとリコート(粉末を敷き詰める)時の妨げとなり、欠陥の発生原因と

もなる。このような、メルトプールの状況をモニタリングすることにより、造形状況を把握できるとともに、必要に応じて欠陥原因を探る手立てとなる。図 5 に示すように、このようなメルトプールの形状は、熔融凝固モデルを検討して汎用ソフトウェアによるシミュレーションによる結果とサーモビューワによる測定結果とほぼ一致するまでになり、最適な造形条件の検討に有効な手段となるまでになってきた⁽⁶⁾。

また、図 4 からわかるように凝固が非常に速く、ステンレス鋼の場合には、4 ms 程度の時間で凝固している。これにより結晶粒が非常に小さくなり、Hall-Petch の関係により強度が向上する。AM の分野で頻繁に使用されている鋳造用の Al-10Si-0.4Mg 合金では、図 6 に示すように組織が非常に微細となり、鋳造材では引張強さは 200 MPa 程度であるが、レーザ積層造形では引張強さが 450 MPa 以上まで向上する。このように、本技術では鋳造や溶接と比べて凝固



【仕様】

- ・レーザ：1 kW シングルモードファイバーレーザ
- ・造形サイズ：250×250×180 mm

図 2 レーザパウダーベッド方式要素技術研究機。

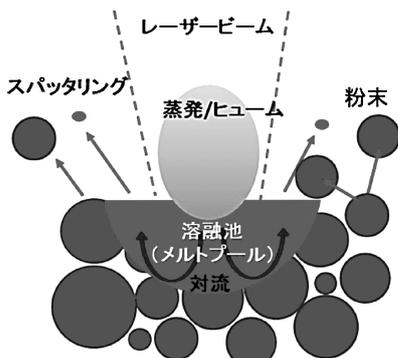


図 3 レーザ積層造形における熔融現象の模式図⁽¹⁾。

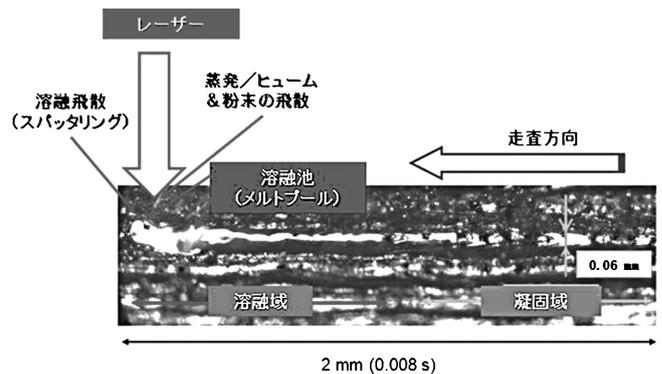


図 4 レーザ積層造形における高速度カメラによる熔融凝固現象⁽¹⁾。



図 5 新たなモデルを利用したマクロ熔融凝固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⁽⁷⁾；(a)シミュレーション結果 (b)測定結果。

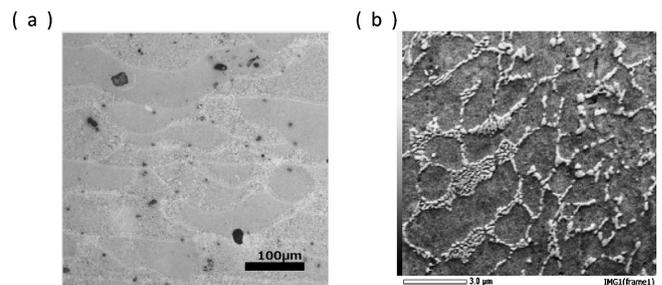


図 6 レーザ積層造形により作製した Al-10Si-0.4Mg 合金の組織；(a)光学顕微鏡写真(断面) (b)走査型電子顕微鏡写真。

表1 各種材料の機械的性質と表面粗さ⁽⁸⁾.

	AlSi10Mg	CoCrMo	Ti64	IN718	SUS316L	17-4PH
引張強さ (MPa)	397 ± 11	1101 ± 78	1286 ± 57	994 ± 40	633 ± 28	832 ± 87
0.2%耐力 (MPa)	227 ± 11	720 ± 18	1116 ± 61	702 ± 65	519 ± 25	572 ± 25
伸び (%)	6 ± 1	10 ± 4	8 ± 2	24 ± 1	30 ± 5	31 ± 2
絞り (%)	8 ± 1	11 ± 4	30 ± 10	40 ± 7	49 ± 11	55 ± 4
ヤング率 (GPa)	64 ± 10	194 ± 9	111 ± 4	166 ± 12	184 ± 20	155 ± 22
硬さ (HV)	114 ± 1	375 ± 2	384 ± 5	293 ± 3	209 ± 2	221 ± 44
表面粗さ Rz (μm)	7 ± 1	10 ± 1	12 ± 1	7 ± 2	10 ± 2	9 ± 2
表面粗さ Ra (μm)	46 ± 8	64 ± 6	70 ± 3	36 ± 8	50 ± 12	54 ± 15

速度が非常に速く凝固組織が異なるため、組織制御が可能となれば所望の特性を有する材料開発もできる。このためには、装置の改良も必要となり、製品に応じた装置開発が徐々に進められている。

(2) 材料開発に関する研究

材料開発に関する研究は盛んに行われており、表1に示すようにステンレス鋼、チタン合金、コバルトクロム合金、ニッケル基超合金、アルミニウム合金など多くの合金の製造が可能となってきた。最近では、EBMによるTiAl合金やタングステンなどの高融点材料の造形も可能となっている。アルミニウム合金に関しては、上述したAl-10Si-0.4Mg合金が主流で、高強度アルミニウム合金の製造は、凝固割れの発生により造形が難しいといわれている。Airbus社では、スカンジウムを添加したAl-Mg-Sc合金を開発しており、引張強さ570MPa、伸び13%を示しているため、航空宇宙分野や自動車分野などへの展開が始まっている。また、医療分野においても従来から適用されているTi-6Al-4V合金だけでなく、生体組織との親和性が高いMg合金やZn合金などに関する研究開発も行われている。Mg合金では、HIP処理することにより、引張強さ300MPa以上、伸び14%の材料が得られている。その他、形状記憶合金などの機能材料の開発も盛んに行われている。

また、材質的な機能性の付与だけでなく、図7に示すようなトポロジー最適化とラティス構造などの新たな構造による軽量化、断熱性などの機能性の付与は、本技術の特長である。さらには負の弾性率など、従来の材料では難しい機能の付与も可能となっており、今度の展開が期待されている。

4. 次世代3Dプリンタによる“ものづくり”⁽⁹⁾

3Dプリンタを利用した加工技術はデジタル・マニュファクチャリングを代表するものであり、IoTとの相性が非常に良い。GE社がこのような技術を中心とした新たな工場を建設しており、従来の切削などと組み合わせた新たな加工技術として認識されてきている。

このような中、CADを中心としてCAM、シミュレーション



図7 トポロジー最適化及びラティス構造体(マテリアライズ社の厚意による)。

とIoTを連携させた設計・製造統合プラットフォームの構築が行われており、今後の“ものづくり”が変革してきている。我が国においても、“Connected Industries”の構築が経済産業省を中心に推進されようとしており、新たな“ものづくり”への模索は世界的な動きとなっている。

5. おわりに

本稿で紹介したように、金属積層造形技術における研究開発は、欧米をはじめとして装置開発においても、材料開発においても活発に行われており、ここ数年で急速に進歩してきている。これに伴って、インプラントをはじめとする医療分野から、品質が極めて厳しく問われる航空宇宙分野へと適用範囲が拡大してきている。我が国においても、このような流れの中で、TRAFAMのプロジェクトでは、金属積層造形技術に関する研究開発を実施しており、装置開発、粉末開発及びソフトウェア開発が進んできている。本技術は、今後の“ものづくり”を変革する技術であることは間違えない。本稿が、本技術の理解のための参考となれば幸いである。

おわりに、本稿の一部は経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム(次世代型産業用3Dプリンタ技術開発)プロジェクトによる研究成果である。ここに、経済産業省ならびに技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(TRAFAM)の皆様へ深謝の意を表す。

文 献

- (1) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構編：設計者・技術者のための金属積層造形技術入門，ウィザップ，(2016)。
- (2) B. Lane, S. Mekhontsev, S. Grantham, M. L. Vlasea, J. Whiting, H. Yeung, J. Fox, C. Zarobila, J. Neira, M. McGlaufflin, L. Hanssen, S. Moylan, A. Donmez and J. Rice: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (CD-ROM), Austin, TX (2016)。
- (3) S. K. Everton, M. Hirscha, P. Stravroulakis, R. K. Leach and A. T. Clare: Mater. Des., **95** (2016), 431-445。
- (4) S. A. Khairallah, A. T. Anderson, A. Rubenchik and W. E. King: Acta Mater., **108** (2016), 36-45。
- (5) M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond and W. E. King: Acta Mater., **114** (2016), 33-42。
- (6) T. -T. Ikeshoji, H. Kyogoku, M. Yonehara, M. Araki and K. Nakamura: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (CD-ROM), Austin, TX (2016)。
- (7) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構編：第 3 回 シンポジウム講演集，(2017)。
- (8) SLM Solutions 社カタログ。
- (9) 京極秀樹，池庄司敏孝：図解金属 3D 積層造形のきそ，日刊工業新聞社，(2017)，178-182。



京極秀樹

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
1979年 愛媛大学大学院工学研究科修士
1989年 工学博士(東京工業大学)
1999年～近畿大学教授
2001年～2002年 テキサス大学オースティン校客員
研究員
2008年～2014年 近畿大学工学部長
2014年～現在 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術
総合開発機構プロジェクトリーダー
専門分野：材料工学，粉末冶金
◎粉末冶金分野の加工技術ならびに機能材料開発。最
近では，金属積層造形技術に関する研究開発を中心
に従事。
★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★