

Additive Manufacturing技術の最新動向

～AM 用金属材料開発の現状～

京極 秀樹^{*1}, 池庄司 敏孝^{*2}, 米原 牧子^{*3}

Recent Trends on Additive Manufacturing Technology: A Review ～Development of Metallic Materials for AM～

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

Additive manufacturing (AM), in particular metal AM, is extensively applied to manufacture complex-shaped products that are difficult to do using other metal processes in various fields such as aerospace, medical, automotive and energy. Recently, powder bed fusion (PBF) and directed energy deposition (DED) processes as well as binder jetting (BJT) and material extrusion (MEX) processes have been applied to manufacture metallic products. Additionally, the improvement of the performance of metal 3D printer and the technology of powder production has led to development of new materials for AM; for instance, high-strength aluminum alloy, pure copper, high-entropy alloy, and high heat-resistance alloy such as tungsten. This paper reviews the recent trends of development of metallic materials for AM including the results of our researches.

Keywords: Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Binder Jetting, Material Extrusion, Metallic Materials, Process Map, Mechanical Properties

1. はじめに⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

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) 技術は, 従来の加工法では難しい形状の製品ができることと併せて, 新たな機能を付加できるため, “ものづくり” における新たな加工技術としてますますその重要性が高まってきている。加えて, AM 技術はデジタル・マニファクチャリング技術であることから, 今後のデジタル社会におけるキーテクノロジーの一つとなってきた⁽¹⁾。このような中, このたびのコロナ禍において, サプライチェーンの寸断を機に 3D プリンタは再度大きな注目を集めており, 2020 年 6 月の NEDO の資料⁽⁶⁾「コロナ禍後の社会変化とイノベーション像」でも述べられているように, AM 技術は “ものづくり” におけるデジタル化を推進する中で重要な位置づけにあり, その重要性が高まっている。

金属 3D プリンタの開発状況を見ると, ここ数年で装置の高機能化が加速しており, 粉末床熔融結合 (PBF) および指向性エネルギー堆積 (DED) 方式の装置だけで

なく, 結合剤噴射 (BJT) 方式や材料押出 (MEX) 方式の装置開発も盛んに行われており, 対象製品に対応した方式の装置開発が行われている。また, 金属 3D プリンタの主要なレーザ PBF (PBF-LB) 方式の装置においても, 今後の製品の量産化を見越して装置のモジュール化・システム化が行われているとともに, 品質保証のためのモニタリング・フィードバック機能の開発が進められている。

一方, 製品についてみると, PBF 方式の装置による航空宇宙分野の代表的な例として, 2020 年 10 月に GE Aviation 社が開発した Boeing777 用の GE9X エンジンが FAA (米国連邦航空局) に認証され, このエンジンには 300 個以上の AM 部品が使用されていると報じられている⁽⁷⁾。さらに, 2021 年 2 月に火星に降り立った火星探査車 “パーシビアランス” にも AM 製品が使用されるなど宇宙分野においても, 今後の利用が急速に進んでいくものと予測される。このように, 航空宇宙分野においては, PBF 方式の装置による製品として, ジェットエンジ

原稿受付 2021 年 5 月 14 日

^{*1} 近畿大学 次世代基盤技術研究所 特任教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)

^{*2} 近畿大学 次世代基盤技術研究所 特任准教授, ^{*3} 近畿大学 次世代基盤技術研究所 研究員

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

ンの燃料噴射ノズルやブレード、エネルギー・産業機器分野においてはガスタービンのブレードなどが着実に実用化されてきている。また、自動車分野においては、BMW社のミュンヘン工場において、2019年に金属、樹脂を含めて30万個の部品を製造したと報告されている⁽⁸⁾。その他、欧州の自動車メーカーを中心にAM技術による製品の適用が進められており、今後の自動車の電動化によりさらに加速するものと予測される。

このように、幅広い分野においてAM製品は多くの分野において使用され始めており、新たなAM用の材料開発も盛んに行われてきている。また、AM技術を利用した組織制御による金属材料の高機能化に関する研究⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾も行われているとともに、マテリアル・インフォマティクス(MI)による新たな材料開発も行われている⁽¹²⁾。

本稿では、最近のAM用金属材料の開発状況について、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成果も交えて紹介する。

2. 金属材料へ適用されるAM技術

AM技術の7つのカテゴリーについては、2020年3月にJIS B 9441⁽¹³⁾により名称等が規定された。金属材料に対するAM方式は、主にPBF方式とDED方式であるが、Roland Bergerの2019年の報告⁽¹⁴⁾によると、8割がPBF方式で、2割がDED方式である。最近、自動車部品などへの大量生産向けの装置としてBJT方式の装置が注目されてきており、またMEX方式の装置もフィラメント方式の3Dプリンタと同様の感覚で使用できることから試作品やジグなどを中心に造形できるため急速に売り上げを伸ばしてきている。しかしながら、BJT方式およびMEX方式とも脱バインダおよび焼結工程が必要となるため、バインダの選択とこれに対する脱バインダの方法などまだ課題は残っている。最近BJT方式に関する報告も多く発表されてきており、Liら⁽¹⁵⁾のレビューによれば、83の研究報告のうちステンレス鋼を中心とした鉄系45%、ニッケル基合金16%、チタン合金11%、銅11%となっており、相対密度がほぼ100%となる報告もなされており、BJT方式による材料開発も大きく進展していることが伺える。また、MEX方式においても、BJT方式と同様の材料については可能となってきているが、フィラメントを利用するため、現状では対象材料が限定されている。最近、ペレットを熔融する方式の装置開発も行われており⁽¹⁶⁾、今後の材料開発への展開が期待される。

3. AM用金属材料の開発動向

AM用金属材料の開発は、従来から使用されているステンレス鋼、アルミニウム合金、チタン合金、ニッケル

基超合金、工具鋼など多くの材料の造形が可能となってきている。レーザを熱源としたPBF(PBF-LB)装置による代表的な材料の機械的性質および表面粗さの例を表1に示す⁽¹⁷⁾。これからわかるように、機械的性質は鍛造材より優れ、鍛造材劣っている。これは、造形ままでは、微細なポアが存在するために、特に延性に影響を与えるとともに、疲労強度には大きく影響する⁽¹⁸⁾。

AM用の材料開発については、これまでBourellら⁽¹⁹⁾、Debroyら⁽²⁰⁾、Liら⁽¹¹⁾、Körner⁽²¹⁾、国内の材料開発の状況を中心に著者も⁽⁴⁾レビューしている。以下に、これらによる材料開発に関するトピックスと併せて、当研究センターで実施した研究成果を含めて紹介する。

表1 主な金属材料の機械的性質 (SLM Solutions 社材料データシートより)

	姿勢 (°)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ
AlSi10Mg (AS)	0	473±15	305±2	7±2	10±2	128HV5
	45	479±15	290±5	6±2	7±2	
	90	482±15	276±5	5±2	7±2	
AlSi10Mg (HT)	0	257±10	152±5	12±5	46±4	84HV5
	45	265±10	155±4	12±5	37±2	
	90	264±10	150±6	11±5	37±2	
H13 (AS)	0	1244±106	987±39	2±2	-	
	90	1360±86	-	1±2	-	
H13 (HT)	0	1719±239	1528±32	4±2	14±5	
	90	1720±99	-	9±2	16±5	
17-4PH (AS)	0	987±22	517±27	26±2	56±2	226HV10
	90	931±45	506±25	28±2	56±8	
17-4PH (HT)	0	1359±9	1024±11	16±2	27±10	352HV10
	90	1308±88	1091±27	14±6	26±17	
316L (AS)	0	642±15	513±17	38±5	67±1	204HV10
	45	648±15	549±18	41±5	68±1	
	90	582±15	491±6	49±5	72±1	
316L (HT)	0	596±15	348±9	46±5	65±3	169HV10
	45	598±15	359±9	51±5	62±4	
	90	539±15	345±4	58±5	67±4	
IN718 (AS)	0	1098±10	764±14	27±5	39±3	303HV10
	90	1027±10	684±6	29±5	40±5	
IN718 (HT)	0	1507±15	1281±32	9±5	17±2	470HV10
	90	1412±86	1225±68	11±5	25±6	
TiAl6V4 ELI(Grade 23)(AS)	0	1281±7	1076±30	8±1	19±3	362HV10
	90	1289±17	1170±26	9±1	29±7	
TiAl6V4 ELI(Grade 23)(HT)	0	956±5	851±12	13±1	47±3	307HV10
	90	960±4	887±12	14±1	50±2	
TiAl6V4 ELI(Grade 23)(HIP)	0	962±2	821±21	14±1	42±3	316HV10
	90	1002±7	935±12	14±1	41±4	

3.1 ステンレス鋼

ステンレス鋼は、AMにおいては代表的な材料で古くから使用されてきている。中でもPBF-LBによるSUS316Lは耐食性に優れることから幅広い分野において適用されている。また、SUS630(17-4PH)もステンレス鋼の中では高強度材料であるため耐食・高強度材料として利用されている。加えて、BJTやMEXによるSUS316Lも限定的であるが、現在主要な材料として利用されている。これらの方式は、金属粉末射出成形(MIM)

と同様に脱バインダ・焼結を伴うため、MIM用の粉末が使用されておりMIM法による材料と同様な機械的性質が得られている。

組織制御に関するPBF-LBに関する研究についてみると、Wangら⁽²²⁾は、強度と延性を両立するステンレス鋼の開発に関する報告を行っている。また、Sunら⁽²³⁾は、SUS316Lにおいてメルトプール(熔融池)の形状を制御することにより2つの結晶方位の整合性をとることで層状の特異組織の創成を行っており、高降伏応力化ならびに耐食性の向上を図っている。このように組織制御を行うことにより同じ材質でも新たな機能を付加できるのがAM技術の特徴でもある。

3.2 アルミニウム合金⁽²⁴⁾

アルミニウム合金はPBF-LB方式で造形されることが多く、自動車用部品の試作品をはじめ、航空機用部品、熱交換器など幅広い分野で利用されている。現状では、そのほとんどがAl-10Si-0.4Mg (AlSi10Mg)合金で、その他、 casting material である Al-7Si-0.4Mg (AC4CH)⁽²⁵⁾、従来高温割れにより造形が難しかった高強度アルミニウム合金 A2024⁽²⁶⁾、A6061、A7075⁽²⁷⁾、Al-9Si-3Cu-0.3Mg や Scalmalloy® (Al-4.4Mg-0.75Sc-0.3Mn-0.3Zr)⁽²⁸⁾ など高強度・高耐食性の幅広い材料が開発されている。

著者ら⁽²⁹⁾は、AlSi10Mg非球状粉末(ガスアトマイズ粉末)とTRAFAMプロジェクトで東洋アルミニウム(株)が開発した球状粉末(遠心アトマイズ粉末)を用いて、図1に示すPBF-LBによるプロセスマップを作成した結果、球状粉末の方が、高密度の造形が可能な領域が広くなり、相対密度100%の造形体が得られることを報告している。Scalmalloy®は、Airbus社の関連会社であるAPWORKS社により開発されたAl-Mg-Sc合金で機械的性質はA7075に匹敵し、疲労強度も非常に高いことが報告されている⁽²⁸⁾。本合金については、組成を変えることにより高耐食性や高強度合金とすることが可能であり、現在も材料開発進められている。

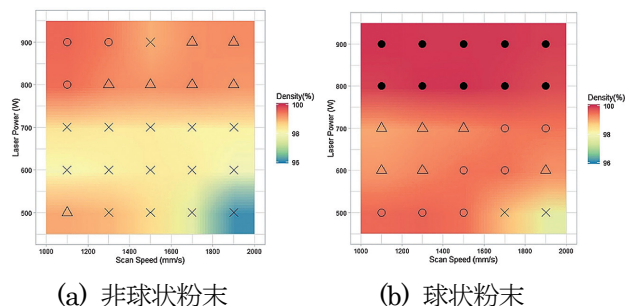


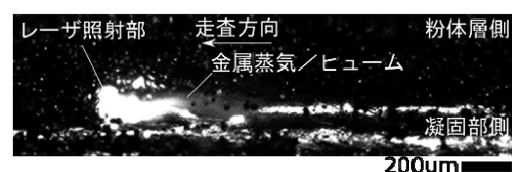
図1 AlSi10Mg非球状粉末(ガスアトマイズ粉末)と球状粉末(遠心アトマイズ粉末)のPBF-LBによるプロセスマップ⁽²⁹⁾

3.3 ニッケル基超合金

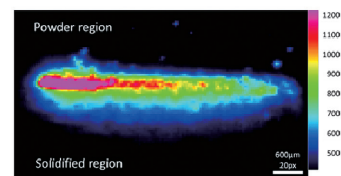
ニッケル基超合金は、高温での耐食性・耐クリープ性・強度に優れる材料であることから、PBFやDEDによるガスタービンプレード、航空機エンジン部品などへの適用が進んでおり、多くの研究報告がなされている。その中でもインコネル718 (IN718)合金については、高温割れが発生しにくいことからPBF-LBによる適用事例が非常に多い。その他、IN625など幅広い合金の適用も可能となってきている。

著者ら⁽³⁰⁾もIN718合金を対象として、高速度カメラとサーモビューワを用いた熔融凝固現象の解明、造形条件の検討並びに造形体の機械的性質についての報告を行っている。図2に高速度カメラとサーモビューワによる熔融凝固現象の状況を示す⁽³¹⁾。このようなメルトプール(熔融池)の現象を考慮することでより精度の高い造形条件を明らかにすることができる。図3にプロセスマップを作成して得られた最適造形条件による各積層方向に対する引張試験片およびその引張試験結果を表2に示す⁽³⁰⁾。これから積層方向により引張特性が異なることがわかる。これは積層方向すなわち熱流の方向に対して結晶粒が成長しやすいことから異方性が生じるためである。このように、造形体の組織についても十分に検討しておくことが重要である。

また、Zhaoら⁽³²⁾は、ガスアトマイズ粉末とプラズマ回転電極(PREP)IN718粉末を用いてPBF-EBによる熔融凝固現象の違いを実験並びにシミュレーションにより検討している。その結果、円形度が高くかつ粉末中にガスポアを含まないPREP粉末では、プロセスマップにおけるプロセスウィンドウが広くなり、樹枝状間におけるボイドの発生を防止できると報告している。



(a) 高速度カメラによる熔融凝固現象



(b) サーモビューワ画像

図2 熔融凝固現象(IN718) (レーザー出力: 292 W, 走査速度: 610 mm/s, スポット径: φ0.1 mm, ハッチピッチ: 0.15 mm, 積層厚さ: 0.05 mm)⁽³¹⁾。

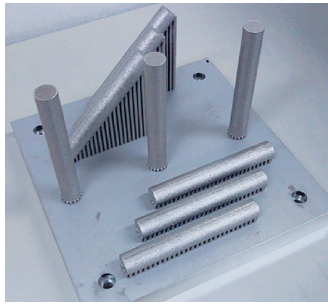


図3 IN718の引張試験片用丸棒造形体
(積層方向: 0°, 45°, 90°)⁽³⁰⁾

表2 IN718造形体の機械的性質⁽³⁰⁾

	0°	45°	90°
0.2% 耐力 (MPa)	748	676	594
引張強さ (MPa)	1038	929	953
伸び (%)	21.9	21.1	22.1
絞り (%)	31.5	22.4	34.7

3.4 チタン合金

チタン合金については、PBFによる研究報告が非常に多く、医療用、航空宇宙用としてTi-6Al-4V (Ti64)合金の適用がほとんどである。Ti64については、酸素を嫌うことからPBF-EBによる造形が行われることが多いが、低酸素チャンバーのPBF-LB装置も増えておりPBF-LBによる造形も多く行われている。また、PBF-EBによるTiAl合金の研究も多く行われており⁽³³⁾、航空機エンジンのタービンブレードへ適用されている。また、医療用材料としてTi-Cr合金、Ti-15Mo-5Zr-3Al合金、Ti-48Al-2Cr-2Nb合金などの医療用低弾性材料の開発が行われている⁽³³⁾。さらに、最近4Dプリンティングとして注目されている形状記憶合金の一つであるNiTiなどが医療分野や航空宇宙分野においても注目されている⁽³⁴⁾。

Ti64合金については、著者ら⁽³⁵⁾はTRAFAMプロジェクトにおいて大同特殊鋼により開発された円形度の高い微細なガスアトマイズ粉末を用いて造形条件の検討と併せて、造形体の特性評価を行った。その結果、プラズマアトマイズ粉末の結果と比較すると、プラズマアトマイズ粉末の造形体と同等の特性を示した。このように、円形度が高く微細なガスアトマイズTi64合金粉末を用いることにより高密度(99.94%)、表面粗さ(S_a : 5 μm) (図4)および引張特性に優れた造形体が得られることがわかった。このように、上述のアルミニウム合金やニッケル基超合金の場合と同様に粉末の特性は造形体の品質に大きな影響を及ぼす。

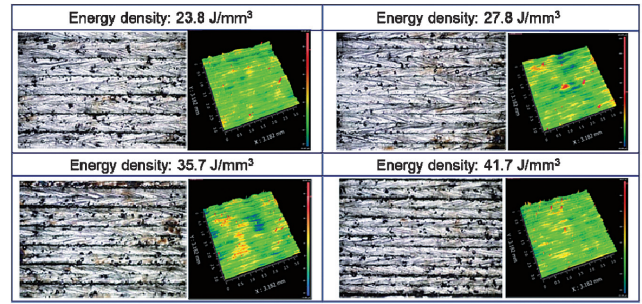


図4 円形度の高い微細なTi64合金粉末を用いて各種エネルギー密度で作製した造形体の表面性状⁽³⁵⁾

3.5 工具鋼

工具鋼については、DEDによる肉盛りやPBF-LBによるマルエージング鋼M2合金の金型への適用が進んでおり、多くの研究も行われている。工具鋼H13合金(SKD61相当)についてもコンフォーマル金型への適用がなされており、PBF-LBにより造形が可能となっている。その他、マルテンサイト系マルエージング鋼M300なども使用されている。著者ら⁽³⁶⁾は、PBF-LB装置による高出力・高速度の条件でH13を対象として、造形パラメータの最適化について検討するとともに、図5に示すように造形体の組織に関して詳細な検討を行っている。図5に示すように、結晶粒の形状は積層方向により異なり熱流の方向である積層方向に伸びているところがある。また、マルテンサイト相(bcc)とオーステナイト相(fcc)の割合は積層方向断面でfcc相が多く観察され、積層方向により大きく異なることがわかった。

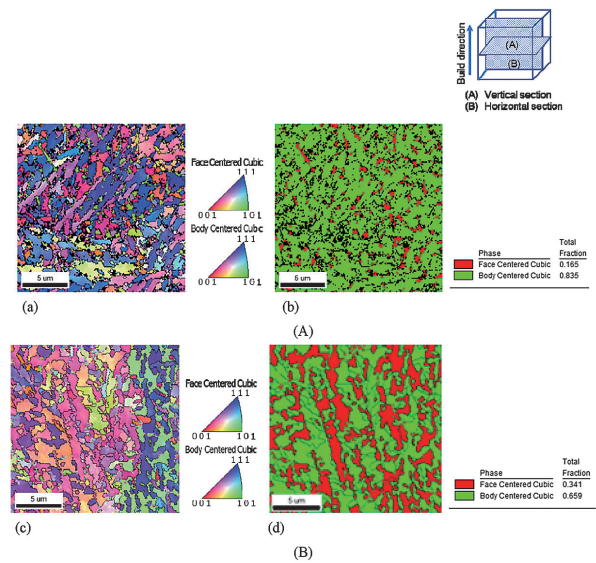
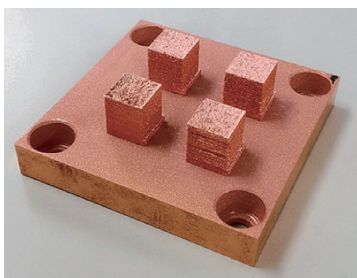


図5 H13工具鋼のPBF-LBによる400Wレーザによる組織のEBSD解析結果(A:積層方向に対して垂直面の(a)IPFマップおよび(b)相分布画像、B:積層方向に対して平行面の(c)IPFマップおよび(d)相分布画像)⁽³⁶⁾

3.6 純銅および銅合金

純銅については、自動車の電動化が急速に進められていることからPBFおよびDED方式による造形が注目を集めている。これまでPBF-EBでは造形が可能であったが、微細複雑形状の造形や表面粗さに課題がありPBF-LBでの造形が望まれていた。著者ら^{(37),(38)}は、TRAFAMプロジェクトにおいて福田金属箔粉工業(株)と共同で、1kWシングルモードファイバーレーザを搭載した装置により溶融凝固シミュレーションと併せて詳細な造形条件の検討を行った。その結果、レーザ出力800W、走査速度300mm/s、ハッチピッチ0.1mmの条件で、図6に示すように相対密度約97%高密度の造形体を可能にした。図6(d)からわかるように、最適造形条件においては、内部にはほとんど欠陥は見られない。画像組織による密度では99.9%の組織が得られた。このような密度の差は、純銅では熱伝導率が非常に高いために造形体の外部は冷却速度が非常に速く、大きな欠陥が発生していたためと考えられる。このように、高出力のレーザを使用することにより高密度の造形体を作製できた。一方、Trumpf社はグリーンレーザを搭載した装置による純銅製品の造形を可能にしており、装置販売を開始している。加えて、最近BJTやMEX方式による造形も可能となっており、今後純銅への適用が加速するものと予測される。

銅合金については、ロケットの燃焼チャンバーの冷却部などに使用されているCu-Cr-Zr合金やCu-Cr-Nb合金⁽³⁹⁾、Cu-Sn合金⁽⁴⁰⁾、Cu-Cr合金⁽²⁵⁾などの造形が行われているが、現状ではまだ適用事例が少ない。



(a) キューブ造形体



図6 PBF-LBによる純銅の造形体および断面組織⁽³⁸⁾

3.7 その他機能材料

最近、5種類以上の元素を含んだ高強度・高耐食性な

どを有するハイエントロピー合金(HEA)が注目を浴びている。日立金属(株)では $Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1}$ HEAの粉末開発を行い、IN718より強度・耐食性に優れた合金開発を行っている⁽⁴¹⁾。また、最近では軽金属元素を含むHEAも注目されており、本合金の今後の応用が期待される⁽⁴²⁾。

また、AM用として高融点材料の造形も可能となっており、高融点金属のタングステンが原子炉用材料などとして利用されてきている⁽⁴³⁾。加えて高融点金属で高い耐食性、耐熱性、生体適合性等を有するタンタル、ニオブが注目されている。高耐食性・生体適合性に優れることから次世代医療用インプラントや高温・高耐食性に優れることから航空宇宙用として利用され始めており、今後の応用が期待されている。

その他、最近では、マテリアルズ・インフォマティクスを利用した研究が海外で盛んに行われており、我が国においても府省連携プロジェクト(SIP)によるマテリアルズインテグレーション(MI)技術の三次元積層造形への展開するためのプロジェクト⁽⁴²⁾が物質・材料研究機構(NIMS)を中心に行われている。このなかでは、Ni合金やTiAl合金の三次元積層造形プロセスの開発が実施されており、プロセスの最適化、MIによる最適合金設計、組織予測や強度予測などを可能とする研究開発が実施されている。このように、MIはAM分野における材料選択や新材料開発への応用が期待されている。

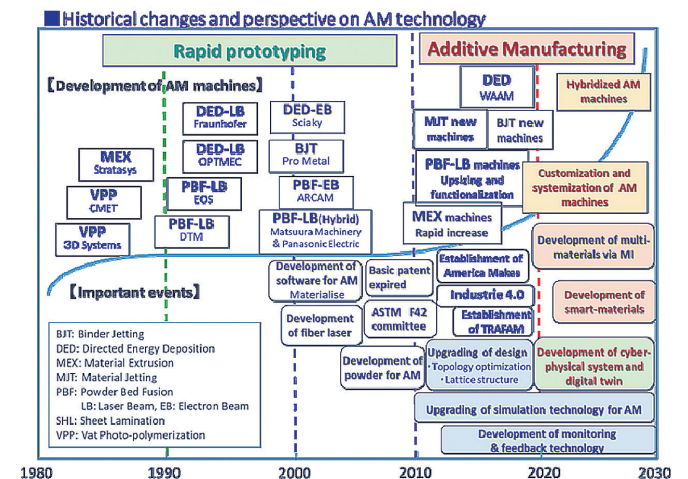


図7 AM技術の変遷と今後の展開⁽⁴⁵⁾

4. おわりに

本稿では、最近のAM技術による金属材料の開発状況について、著者らの研究成果も含めて述べてきた。ここ数年、上述したように従来からの材料に加えて新たな材料の開発は急速に進んできている。これは、昨年の研究

所報告のレビュー⁽⁴⁴⁾でも述べたように、最近の装置の性能と粉末製造技術の大幅な性能向上に負うところが大きい。このように、材料開発はさらに進歩していき、図 7 に示すように、マルチマテリアル化やスマートマテリアル化に進んでいくと予測される⁽⁴⁵⁾。本稿では、金属材料のみを扱ってきたが、最近では、プラスチック材料はもちろんのこと、複合材料、セラミックス材料をはじめとして多くの材料の造形が可能となってきた。

上述したように、AM 技術はデジタル・マニュファクチャリング技術であることから今後の“スマート・ファクトリー”において、ますます重要な加工技術として発展していき、これに伴って材料開発も進んでいくものと予測される。

本稿が、読者の皆様の参考となれば幸いである。

謝辞

なお、本報告の一部は、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。また、本稿作成に当たりご協力頂いた研究室の院生諸君に謝意を表す。

参考文献

- (1) 京極秀樹：日本機械学会誌, 122(2019) 4-7.
- (2) 京極秀樹：ふえらむ, 24(2019) 697-701.
- (3) 京極秀樹：機械技術, 68(14)(2020) 16-19.
- (4) 京極秀樹：型技術, 35(8)(2020) 18-22.
- (5) 京極秀樹：工業材料, 68(7)(2020) 16-22.
- (6) <https://www.nedo.go.jp/content/100919493.pdf>.
- (7) https://www.mpif.org/News/FocusPM/TabId/979/ArtMID/3883/ArticleID/439/GE-Aviation%e2%80%99s-GE9X-Engine-Achieves-FAA-Certification.aspx?utm_source=Informz&utm_medium=newsletter&utm_campaign=Informz&_zs=16gXb&_zl=gOOH2.
- (8) <https://www.metal-am.com/bmw-group-opens-its-new-additive-manufacturing-campus/>.
- (9) 中野貴由, 石本卓也：ふえらむ, 24(2019) 687-696.
- (10) 千葉晶彦：萩原恒夫監修, 3D プリンタ用新規材料開発, NTS, (2021) 233-247.
- (11) N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, J. Blackburn, J. Mater. Sci. Technol. 35 (2019) 242-269.
- (12) 渡邊誠：溶接技術, 68(1), (2020), 59-64.
- (13) 日本工業規格 付加製造 (AM) - 用語及び基本的概念, 日本規格協会, (2020).
- (14) https://www.addmag.de/sites/default/files/2019-11/Roland%20Berger_Additive_Manufacturing_2019.pdf.
- (15) M. Li, W. Du, A. Elwany, Z. Pei, C. Ma : J. Manuf. Sci. Eng., 142 (2020) 090801.
- (16) <https://slab.jp/>
- (17) <https://www.slm-solutions.com/en/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>
- (18) H. Masuo, Y. Tanaka, S. Morokoshi, H. Yagura, T. Uchida, Y. Yamamoto, Y. Murakami: Int. J. Fatigue, 117 (2018) 163-179.
- (19) D. Bourell, J. P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A. M. Beese, A. Clare, “Materials for additive manufacturing”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 66 (2017) 659-681.
- (20) T. Debroy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Prog. Mater. Sci. 92(2018), 112-224.
- (21) C. Körner, Int. Materials Reviews, 61 (2016), 361-377.
- (22) Y.M. Wang, et al. : Nature Mater., 17 (2018) 63-70.
- (23) S.H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa, T. Nakano : Scr. Mater., 159 (2019) 89-93.
- (24) 橋詰良樹：工業材料, 67(6)(2019), 22-26.
- (25) 木村貴広, 内田壮平, 中本貴之：鑄造工学, 91 (2019) 618-622.
- (26) H. Zhang, H. Zhu, T. Qi, Z. Hu, X. Zeng : Mater. Sci. Eng. A, 656(2016) 47-54.
- (27) S.Y. Zhou, Y. Su, H. Wang, J. Enz, T. Ebel, M. Yan : Addit. Manuf., 36 (2020) 101458.
- (28) 石神健太, 橋詰良樹, 村上勇夫, 木村貴広, 中本貴之：粉体および粉末冶金, 68 (2021) 129-132.
- (29) 加藤千佳, 池庄司敏孝, 米原牧子, 秋山聡太郎, 村上勇夫, 橋詰良樹, 京極秀樹：軽金属, 70 (2020) 475-482.
- (30) Y. Tachibana, T.-T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, H. Kyogoku: Materials Science Forum, 941(2018), 1574-1578
- (31) 京極秀樹, 池庄司敏孝：軽金属溶接, 56 (2018) 1-8.
- (32) Y. Zhao, K. Aoyagi, Y. Daino, K. Yamanaka, A. Chiba : Addit. Manuf., 34 (2020) 101277.
- (33) 中野貴由：機械技術, 67(12), (2019), 21-27.
- (34) A.Y. Lee, J. An, C.K. Chua: Engineering, 3 (2017) 663-674.
- (35) 中村和也, 池庄司敏孝, 関本光一郎, 奥村鉄平, 京極秀樹：粉体および粉末冶金, 67 (2020) 424-430.
- (36) M. Yonehara, T.-T. Ikeshoji, T. Nagahama, T. Mizoguchi, M. Tano, T. Yoshimi, H. Kyogoku : J. Adv. Manuf. Technol. 110 (2020) 427-437.
- (37) T.-T. Ikeshoji, K. Nakamura, M. Yonehara, K. Imai, H. Kyogoku: JOM, 70 (2018), 396-400.
- (38) K. Imai, T.-T. Ikeshoji, Y. Sugitani, H. Kyogoku: Bull. JSME Mech. Eng. J., 7(2) (2020), 19-00272.
- (39) R.P. Minneci, E.A. Lass, J.R. Bunn, H. Choo, C.J. Rawn : Int. Mater. Rev. (2020), <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1821485>.
- (40) 杉谷雄史：工業材料, 67(6)(2019), 27-31.
- (41) 桑原孝介, 尾越周平, 大坪靖彦, 陳美伝, 藤枝正：日本ガスタービン学会誌, 46(3), (2018), 26-31.
- (42) 當代光陽, 永瀬丈嗣, 中野貴由：軽金属, 70 (2020), 14-23.
- (43) D. Wang, C. Yu, X. Zhou, J. Ma, W. Liu, Z. Shen : Appl. Sci., 7 (2017), 430; doi:10.3390/app7040430.
- (44) 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, 11 (2020) 65-70.
- (45) 京極秀樹：機械技術, 68(14)(2020), 16-19.