レーザーによる AM(アディティブ・マニファクチャリング)技術

京 極 秀 樹^{a,*}

^a 近畿大学 次世代基盤技術研究所(〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺1番)

Laser-based Additive Manufacturing Technology

Hideki KYOGOKU^{a,*}

^a Fundamental Technology for Next Generation Research Institute, Kindai University (1, Takaya-Umenobe, Higashihiroshima, Hiroshima 739-2116)

Keywords : Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, Laser, Directed Energy Deposition, Process Parameter, Density, Surface Roughness, Mechanical Properties

1. はじめに¹⁾

アディティブ・マニファクチャリング(以後、本稿ではAMと記述)(付加製造)あるいは3Dプリンティングと呼ばれる技術は、最近の装置、粉末およびソフトウェア開発の急速な進歩により、新たな加工技術として利用されてきている。とりわけ、金属AM技術は航空宇宙分野さらにはエネルギー・産業機器分野において重要な加工法の一つとしてその地位を確立してきている。Wohlers Report 2019²⁾によっても、このところ本技術による装置および関連製品の生産額は金属・樹脂を含めて大幅な伸びが見られ、金属用3Dプリンタについても、2018年には世界で約2,300台が導入されている。

3Dプリンタの始まりは、名古屋市工業研究所の小玉による紫外線硬化樹脂を使った光造形といわれており、同氏は特許出願したものの、審査請求を行わなかった。我が国では多くのメーカーが光造形による装置開発を行ったが、最終的にはシーメット社のみが事業を継続してきた。これに対して、アメリカでは、1986年にC. Hullが基本特許を取得し、3Dシステムズ社を設立して光造形装置を製品化し、現在の3Dプリンタの礎を作った。金属の3Dプリンタについては、テキサス大学オースティン校でDeckardが研究開発を行い、その後J. J. Beamanらがレーザーパウダーベッド方式の装置開発を行い、1992年にベンチャー企業として設立されたDTM社から発売した。一方、実用的な装置としては、ドイツのEOS社が1994年にパウダーベッド方式の装置を発売して以来改良を進め、現在でも最も多くの金属3Dプリンタを販売している。最近では、中国など多くの装置メーカーが参入してきており、新たな装置開発を積極的に行っている。我が国における金属3Dプリンタの開発は、2003年に(株)松浦機械製作所と松下電工(株)(現在、パナソニック(株))が、金属光造形装置としてレーザーを熱源として造形しながら、切削も同時に行うハイブリッド型の装置を開発したのが、最初であった。その後、金属3Dプリンタを開発するメーカーは数社の

とどまっていたことから、2014年度に経済産業省が研究開発母体として「技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構(通称、TRAFAM)」を設置して、5年間のプロジェクトで「次世代型産業用3Dプリンタ開発」を実施し、レーザーと電子ビームを熱源とした粉末床溶融結合(パウダーベッド)と指向性エネルギー堆積(デポジション)方式の5機種の装置開発を行い、販売を開始している³⁾。

AM技術の特徴は、従来の鋳造や鍛造などの加工法では成形できない三次元複雑形状品を一体造形できることにある。これにより、軽量かつ高強度、高冷却能などの高機能製品を製造できる。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、IoTとの整合性がよく、インダストリー4.0といった生産システムの変革のために極めて重要な技術として認識されている。このため、欧米においては、搬送装置やロボットなどと組み合わせたシステムが構築されており、今後のスマート・ファクトリーの実現へ向けて動き出している。

金属材料に対応するAMの方式は、粉末床溶融結合(PBF)と指向性エネルギー堆積(DED)であるが、最近、結合剤噴射(BJT)と材料押出(MEX)も注目を浴びている。PBF方式とDED方式の装置開発については、後述する。最近、BJT法が自動車用部品の大量生産用の方式として注目されてきている。これは、ドイツの自動車メーカーのフォルクスワーゲン社、GKN社とヒューレットパッカード社が自動車用部品を対象としたBJT方式による装置開発を開始したことに端を発していると思われる。また、MEX法では、金属材料だけではなく、炭素繊維を含んだ樹脂材料への適用が進んできており、装置が安価なことから販売が加速している。

材料開発についてみると、従来からAM材料として利用されているステンレス鋼、ニッケル基超合金、鋳造用アルミニウム合金、チタン合金などの材料に加えて、これまで造形が難しかった高強度アルミニウム合金、純銅など新たな材料への展開も急速に進んできている。

本稿では、レーザーを熱源としたAM技術の最近の動向、とりわけ積層造形装置および材料開発の状況と併せて造形条件と造形体の表面性状との関係について、我々の研究内容も含めて紹介する。

2. AM 技術

2. 1 種類と特徴

AM技術については、従来ラピッドプロトタイピング (Rapid Prototyping; RP)と呼ばれていたが、2009年にASTM F42委員会が設立され、同委員会において、7つのカテゴリに分類され、ISOにおいても共同規格として制定された。これを受けて、表1に示すように、2020年3月にJIS B 9441⁴⁾により名称等が規定された。このうち、本稿で対象としている主な金属材料と造形方式について、多くの金属がPBF法およびDED法だけでなく、BJT法によっても造形可能となってきた。以下、これらのうち、レーザーを熱源としたPBFおよびDED法の開発動向について述べる。

2. 2 粉末床溶融結合(PBF)⁵⁾

PBF法は、粉末をブレードあるいはローラーなどでならし、できたパウダーベッド(粉末床)をレーザーあるいは電子ビームで焼結・溶融する工程を繰り返しながら積層造形する方法で、次のような特徴を有している。

- ①高密度・高強度製品の製造が可能(ほぼ真密度で、機械的性質は溶製材に匹敵)
- ②高精度複雑形状品の製造が可能(精度：50～100 μm, 表面粗さ：～5 μm)

適用例としては、航空宇宙部品(タービンプレード、噴射ノズル等)、自動車用試作品、インプラント等医療用部品、エネルギー機器部品(タービンプレード等)など幅広い分野で使用されている。

このように高品質製品の製造が可能となったのは、ファイバーレーザーの開発が非常に大きな役目を果たしたといえる。黎明期には、CO₂レーザーが使用されていたが、長時間安定して連続発振することが難しく、ビーム径も大きいことからメルトプール(溶融池)が広いため、トラック(メルトプール痕)に粉末が多く付着してしまう状況であった。これに対して、2005年頃からファイバーレーザーが実用化し始め、細いビーム径のレーザーを長時間安定して発信できるようになったた

め、高品質の製品の造形が可能となった。加えて、図1に示すように、ファイバーレーザーの波長は1070 μm程度であることから、CO₂レーザーでは吸収率の関係で、造形が難しかったアルミニウム材料に関しても造形が可能となった。純銅については、ファイバーレーザーでも吸収率が非常に低いことから造形が難しいため、最近では吸収率の高いグリーンレーザーやブルーレーザーが使用され始めている。図2に、純銅の造形例を示す。今後の自動車の電動化などを考えた場合には、純銅の利用は非常に多くなることから、今後の利用が増えていくと予測される。

PBF法の装置の動向をみると、図3に示すように、航空宇宙分野やエネルギー機器分野などの大型製品に利用されることが多いことから、装置の大型化・高速化のためにレーザーの高出力化とマルチ光源化が進んできている。また、これに伴って装置のカスタム化も行われてきている。さらに、品質を担保するために、モニタリング装置を搭載した装置開発も

図1 レーザーと波長の関係⁵⁾

図2 グリーンレーザー造形による純銅などの製品例 (Formnext 2019にて：TRUMPF社の好意による)

表1 AM技術の分類(JIS B 9441による)⁴⁾

用語	定義	対応英語
結合剤噴射, バインダージェット	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合するプロセス	binder jetting (BJT)
指向性エネルギー堆積法	集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させるプロセス	directed energy deposition (DED)
材料押出	ノズル又はオリフィスから材料を押出し、選択的に供給するプロセス	material extrusion (MEX)
材料噴射, マテリアルジェット	造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス	material jetting (MJT)
粉末床溶融結合、パウダー ベッドフュージョン	熱エネルギーを利用して粉末床を選択的に溶融凝固するプロセス	powder bed fusion (PBF)
シート積層	シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成するプロセス	sheet lamination (SHL)
液槽光重合	容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化するプロセス	vat photopolymerization (VPP)

図3 金属3Dプリンタの開発の変遷

行われており、装置の高機能化が進んできている。

2.3 指向性エネルギー堆積 (DED)

粉末やワイヤーなどを供給しながら、レーザーあるいは電子ビームで溶融し、溶融物を堆積させながら積層造形する方法である。最近では、アーク放電(WAAM)やコールドスプレーによる方式もある。本法は、次のような特徴を有している。

- ①高速・大型化が可能
- ②多色材料・傾斜材料の製造が可能
- ③補修が可能

適用例として、従来は補修用として利用されていたが、最近では大型で単純形状の航空宇宙分野や産業用機器分野への適用が考えられている。

レーザーを熱源としたDED方式の装置は多く開発されており、TRAFAM プロジェクト³⁾で開発した三菱重工工作機械(株)の装置では、モニタリング・フィードバック機能を装着可能となっている。また、DMG 森精機(株)のように、切削と組み合わせたハイブリッド型の装置開発も数社で行われている。

3. 材料開発の動向⁶⁾

3.1 粉末製造技術と粉末特性

金属積層造形においては、粉末特性は、PBF方式においてはパウダーベッドの特性に影響を及ぼし、さらには溶融凝固現象にも影響を及ぼす。このため、AM用金属粉末の特性については、粉末の流動性がよく、充填性の高い粉末が必要であることから、真球の粉末が好まれる(図4)。しかし、粉末

(a) Ti64 粉末

(b) AlSi10Mg 粉末

図4 AM用金属粉末の例⁶⁾

特性は、装置のリコート機構や粉末供給機構などに依存するため、装置にあった粉末を選択する必要がある¹⁾。また、装置によって粉末粒径や粒度分布が異なり、レーザー(LB-PBF679)の場合には、粒径は15~45 μm の範囲で、粉末供給方式によっても異なるが、ある程度の粒度分布を持つものに対して、電子ビーム(EB-PBF)の場合には、粒径は45~105 μm の範囲で、粒度分布が狭い方がよい。DED方式の場合にも、ノズルの機構により異なるが、粒径は45~105 μm の範囲で、粒度分布が狭い方がよい。

AM用粉末の製造には、ガスアトマイズ法が最もよく利用されるが、真球で内部にガスを含まない粉末を必要とするEB-PBFの場合にはプラズマアトマイズ法が用いられることが多い。また、遠心力アトマイズ法のうち、ディスクアトマイズ法や真球で高純度の粉末を得る方法としてプラズマ回転電極法が利用されている。

3.2 材料特性

AM用金属材料については、このところ急速に適用可能な材種が増えてきている。従来から使用されているステンレス鋼、ニッケル基超合金、アルミニウム合金、チタン合金、工具鋼などの材料に加えて、熱交換器や自動車の電動化などに対応するための純銅や銅合金、航空宇宙分野の軽量化などに対応するための高強度アルミニウム合金などへ適用されてきており、さらに適用可能な材種も増えていくと予測される。表2に、代表的な材料の機械的性質並びに表面粗さについて示す⁷⁾。この表からもわかるように、適切な造形条件下では、造形体の機械的性質は総じて鋳造材より優れており、溶製材に匹敵する強度が得られる。ここには示していないが、疲労強度については細かな欠陥を有することから、溶製材より劣ることが多く、熱間静水圧成形(HIP)処理により溶製材に匹敵する特性が得られることが報告⁸⁾されている。以下、代表的な材料について紹介する。

ステンレス鋼については、AMでは最も一般的に使用される材料の一つでSUS316L、17-4PHを中心に、LB-PBFによる非常に幅広い分野の製品に適用されている。

ニッケル基超合金は、AM材料の中で航空宇宙用部品の材料として主要な材料であり、高温での耐食性・耐クリープ性・強度に優れた材料であることから、ガスタービンプレード、航空機エンジン部品などへ適用されている。中でもAMへの適用が進んでいるインコネル718 (IN718)合金については、LB-PBFによる適用事例が多い。その他、IN625やIN939、さらにはRene80、ハステロイなどが実用化されている。

アルミニウム合金については、上述したようにファイバーレーザーの適用により造形が可能になった材料である。現状では、ほとんどがAl-10Si-0.4Mg (AlSi10Mg)合金で、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。しかし、最近では軽量・高強度化への要望が強くなり、高強度アルミニウム合金であるA2024、A6061、A7075やエアバス社によって開発されたScalmalloy[®] (Al-4.4Mg-0.75Sc-0.3Mn-0.3Zr)などが、粉末材料の開発により可能となってきている。

チタンおよびチタン合金については、インプラントなどの医療用と航空宇宙用部品の材料として利用されており、LB-

表2 LB-PBF 方式による AM 材料の機械的性質の例⁷⁾

材料	姿勢 (°)	引張強さ (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ	表面粗さ Ra (μm)	表面粗さ Rz (μm)
AlSi10Mg (AS)	0	473±15	305±2	7±2	10±2	128HV5	6±2	44±2
	45	479±15	290±5	6±2	7±2			
	90	482±15	276±5	5±2	7±2			
CoCr28Mo6	0	1296±13	824±31	13±2	10±4	385HV10	16±3	99±13
	90	1177±32	639±31	23±4	19±3			
H13 (AS)	0	1244±106	987±39	2±2	—			
	90	1369±86	—	1±2	—			
17-4PH (AS)	0	987±22	517±27	26±2	56±2	226HV10	9±2	60±10
	90	931±45	506±25	28±2	56±8			
316L (AS)	0	642±15	513±17	38±5	67±1	204HV10	12±1	79±4
	45	648±15	549±18	41±5	68±1			
	90	582±15	491±6	49±5	72±1			
IN718 (AS)	0	1098±10	764±14	27±5	39±3	303HV10	6±2	47±5
	90	1027±10	684±6	29±5	40±5			
TiAl6V4 ELI (Grade 23) (AS)	0	1281±7	1076±30	8±1	19±3	362HV10	12±1	76±6
	90	1289±17	1170±26	9±1	29±7			

PBF および EB-PBF による Ti-6Al-4V (Ti64) 合金の利用がほとんどである。Ti64 については、酸素を嫌うことから EB-PBF による造形が行われることが多いが、最近では、低酸素チャンバーの LB-PBF 装置も開発されており、LB-PBF による造形も増えてくるものと思われる。また、耐熱材料である TiAl 合金は、LB-PBF では造形が難しく、EB-PBF による航空機エンジンのタービンプレードへの適用が予定されている。

工具鋼については、レーザー DED による肉盛りや造形と切削を両方備えたハイブリッド型の LB-PBF 装置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いる。工具鋼は炭素量が高いために割れが発生しやすいことから、主に M2 に利用が限られてきていたが、最近では高温での予備加熱などによって金型用工具鋼 H13 (SKD61 相当) や他の特殊工具鋼についても、LB-PBF により造形が可能となっている。

純銅および銅合金については、熱交換器などへの適用が要望されていたが、最近では自動車の電動化が進む中で要望も高くなり、このところ PBF および DED による造形が注目を集めている。従来から EB-PBF 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、LB-PBF での造形が要望されていた。著者ら⁹⁾は、TRAFAM のプロジェクトにおいて、高出力の 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純銅の造形を実施し、画像処理による空隙率では 0.1% の高密度の造形体を作製している。最近、純銅に対して吸収率の高い波長を有するグリーンレーザーを用いた装置を、TRUMPF 社が開発しており、図 2 に示したように純銅製品が造形されている。また、大阪大学接合科学研究所によりブルーレーザーによる造形装置も開発されている。

また、最近機能材料の一つとして、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が注目されており、本合金の今後の応用が期待される。また、耐熱・耐食材料など多くの機能材料が注目を浴びており、マテリアルズ・インテグレーション(MI)技術の開発と相まって、新材料の開発がますます促進されるものと予測される。

4. 造形条件と表面性状の関係

4. 1 LB-PBF プロセス

金属材料の造形に最もよく適用されている LB-PBF プロセスを図 5 に示す。最終製品の品質を担保するためには、粉末特性、粉末積層プロセス、造形プロセスにおける多くのパラメータを制御する必要がある。Mani ら¹⁰⁾は、PBF におけるリアルタイムモニタリングおよび制御のためにプロセスパラメータ、モニタリングのための物理量および製品特性の関係性を検討している。Vock ら¹¹⁾は、粉末の品質がプロセスおよび最終製品の特性に及ぼす影響について、(1)粉末特性、(2)バルク粉末挙動、(3)インプロセスにおける挙動および(4)製品特性の 4 段階のレベルに分けて論じている。これらの報告を考慮して LB-PBF プロセスを大別すると、図 5 に示すように、(1)粉末自体の特性とこれに伴うバルク粉末(粉末の集合体)の特性、(2)粉末積層プロセスにおけるパウダーベッドの特性、(3)熔融凝固現象となり、これらのプロセスにかかわる多くのパラメータが最終製品の品質に影響する。

粉末特性とバルク粉末特性の関係においては、粉末の粒径

図5 LB-PBF プロセスにおける製品品質に及ぼす主なパラメータ

や形状および粒度分布がバルク粉末の流動性や拡がり性に影響を及ぼす。次に、粉末積層のプロセスにおいては、バルク粉末の特性とリコート速度やブレード形状などのリコート条件がパウダーベッドの特性（かさ密度や表面粗さ）に影響を及ぼす。さらに、レーザー照射による溶融凝固現象には、パウダーベッドの特性とレーザー出力や走査速度などのレーザー照射条件が関係する。このように多くのパラメータの影響を受けながら最終的な製品の品質である密度、表面粗さや機械的性質などが決まることから、高品質の造形体を得るには、このような多くのパラメータを管理する必要がある。しかし、通常装置に対応した粉末が指定されていることが多いため、(1)粉末および(2)粉末積層に関わるパラメータを意識することは少なく、加えて(3)溶融凝固現象に関わるパラメータもレシピとして決められていることが多い。レシピのない造形に関しては、レーザー出力や走査速度をパラメータとしたプロセスマップがよく利用される。しかし、実操業においては不慮の原因による現象が発生することから、モニタリング技術が開発されており、造形各層毎の造形状況や温度分布などの画像を取り込むことができる装置が多くなっている。最近では、モニタリング・フィードバック制御技術の開発が試みられているが、DEDに比較してPBFの場合には上述したように物理現象が非常に複雑であることから、フィードバック制御はまだ実用化されていない。

4.2 レーザー照射による溶融凝固現象¹²⁾

溶融凝固現象を知ることは、最終製品の品質に大きな影響を与えることから、非常に重要である。レーザー照射による溶融凝固現象については、これまで多くの研究がなされてきており、モニタリング技術とシミュレーション技術の両面から検討が進められている。アメリカ国立標準技術研究所(NIST)¹³⁾やローレンスリバモア国立研究所(LLNL)^{14)~17)}などが、テストベンチを開発して、高速度カメラやサーモビューワにより溶融池（メルトプール）の観察を詳細に行うとともに、溶融凝固シミュレーションと組合せて、欠陥の発生状況等を明らかにしてきている。著者ら¹²⁾も、TRAFAMプロジェクトにおいて、高速度カメラとサーモビューワを搭載したテストベンチを開発して、溶融凝固現象について解明している。

LLNLのグループの研究によれば、図6(a)に示すように、レーザーが照射されると急速に加熱されることから、金属蒸

気であるプルームあるいはヒュームが発生する¹⁵⁾。一方、レーザーを吸収した粉末は溶融してメルトプールの形成し、発生した金属蒸気による反跳力(recoil pressure)を受ける。プルームは高速で発生することから、メルトプールの溶融金属を吹き飛ばしてスパッタを発生させるとともに、通常窒素ガスあるいはアルゴンガス雰囲気中で造形されることから、ガス流を発生させてトラック周辺の粉末を吹き飛ばしてはぎ取ってしまう¹⁶⁾。図6(b)に示すように、真空中に近い状態ではガス流がないために、スパッタの発生や反跳力の発生も少ない。この状態は、電子ビームパウダーベッド方式の溶融凝固現象に近い。著者らによる高速度カメラによる溶融凝固現象の例を、図7に示す。これからわかるように、エネルギー密度が小さい場合には、メルトプールが不安定となり、凝固時にトラックの幅が均一ではなくなる。適切なエネルギー密度の場合には、メルトプールが安定となりスパッタの発生も少なく、凝固時にトラック幅はほぼ均一となる。エネルギー密度が高い場合には、メルトプールが大きく揺動し、ガスの巻き込みやスパッタの発生が多くなる。このため、凝固時のトラック幅は広く、不均一となる。このような溶融凝固現象の違いが、造形体の表面性状と併せて密度や欠陥の発生にも大きな影響を与える。

また、レーザー照射によって、メルトプールにおいてマランゴニ対流が起きる。マランゴニ対流は、表面張力の差により発生し、メルトプールを攪拌する。このような高速でのメルトプールの動きにより、凝固組織は鋳造組織と大きく異なり、場合によっては微細な等軸晶になりやすい。さらに、メルトプールの内部の状況を明らかにするため、Caltaら¹⁸⁾とMartinら¹⁹⁾は、高分解能X線によりレーザー照射時の溶融凝固現象を観察し、キーホールやボアの発生状況を明らかに

(a) ガス雰囲気の場合

(b) 真空の場合

(a) 低エネルギー密度

(b) 最適エネルギー密度

(c) 高エネルギー密度

図6 パウダーベッドにおけるレーザー照射時の溶融現象(文献16を参考として作成)

図7 パウダーベッドにおけるレーザー照射時の溶融凝固現象の高速度カメラによる画像

図8 レーザー出力と走査速度の影響に対する表面性状をパラメータとしたプロセスマップ(IN718)

している。また、Zhao ら²⁰⁾やCunningham ら²¹⁾も、高出力高分解能 X 線を利用して Ti-6Al-4V 粉末の溶融現象をリアルタイムで観察し、キーホールの形成やスパッタの発生過程などのレーザー照射時における溶融凝固形態を明らかにしている。

4. 3 造形条件と表面性状の関係

レーザー照射による溶融凝固プロセスにおける主要パラメータは、次のとおりである。

- ・レーザー出力 (P)
- ・走査速度 (v)
- ・ハッチピッチ (h)
- ・積層厚さ (t)

これらのパラメータのうち、レーザー出力と走査速度は、溶融凝固現象に最も影響が大きいパラメータであるため、図8に示すようなプロセスマップが作成され、適正なレーザー出力と走査速度の造形条件の領域(プロセスウィンドウ)が決定される。その後、ハッチピッチや積層厚さが検討され、最適な造形パラメータが決定される。また、これらを統合したパラメータとして、式(1)に示す(体積)エネルギー密度(単位体積当たりに投入されるエネルギー) E (J/mm³)がよく利用され、 P はレーザー出力(W), v は走査速度(mm/s), h はハッチピッチ(mm)および t は積層厚さ(mm)である¹⁾。

$$E = P/vht \dots\dots\dots (1)$$

このパラメータも、造形条件を決定する際によく利用される。

IN718 合金のプロセスマップ(図8)上に表面状態を示す SEM 写真と三次元光学プロファイラ(Zygo Newview9000)による表面性状の3D画像と測定結果を示す。表面性状測定結果(3D画像)の上部の数値はエネルギー密度の値で、下部の左側の数値はSa(算術平均高さ)、右側の数値はSq(二乗平均平方根高さ)である。上述したように、A領域においては、レーザー出力が高くなるとキーホール(keyhole)が生じ、走査速度が遅い場合には、エネルギー密度が高くなるため、メルトプールが揺動してスパッタの発生も多くなり、内部に欠陥が生じやすかつ表面にもスパッタが付着しやすくなる。

表面状態を見ても、スパッタの付着が多いことがわかる。表面3D画像からは、表面全体が大きくうねっていることがわかれるとともに、Sa: 18.8 μm, Sq: 180.2 μmで凹凸が大きいことがわかる。B領域の中央部が適正な造形条件領域である。メルトプールが安定した、溶接という熱伝導モードにあたるため、表面状態を見ると、ほぼ均一幅のトラックが形成されており、スパッタもほとんど見られないことがわかる。表面3D画像からも、表面全体がなめらかでスパッタも少ないことがわかる。数値的に見ても、Sa: 10.6 μmで造形ままの表面としては、表面粗さに優れている。Sq: 153.0 μmでA領域に比べて大幅に凹凸が小さいことがわかる。C領域のように、レーザー出力が低くなると、パウダーベッドが溶融しなくなるため、溶融不良欠陥(lack of fusion)を発生する。表面状態を見ると、トラック幅は不均一で、ボーリング現象によるボール状の状況も見られる。表面3D画像からは、表面全体で凹凸が激しいことがわかる。数値的にみると、Sa: 25.0 μm, Sq: 141.3 μmで凹凸が大きいことがわかる。また、D領域のように、レーザー出力及び走査速度とも大きい場合には、メルトプールが不安定となりボーリング現象を発生し、溶融不良欠陥を発生しやすくなる。表面状況を見ると、トラック幅が広く、不安定となっており、表面3D画像からは、表面全体がうねっていることがわかる。数値的にみると、Sa: 12.0 μmで全体的に滑らかな表面であるが、Sq: 169.8 μmで凹凸が大きいことがわかる。

このように、造形条件により表面性状は大きく変化するとともに、密度さらには内部欠陥の状況も大きく影響を受ける。このため、表面粗さに優れるとともに、密度が高く欠陥の発生しにくい適切な造形条件を見出すためには、レーザー出力と走査速度を変化させて適正な領域を検討する必要がある。最終的には、ハッチピッチと積層厚さも影響するため、併せて検討して最適造形条件を決定する。

5. おわりに

最近のAM技術の発展は目覚ましく、積層造形装置(いわゆる3Dプリンタ)および材料開発、さらにはシミュレーション技術の開発など、欧米をはじめ中国などが国を挙げて研究開発に力を注いでいる。我が国においても、2014年度から5年間で経済産業省およびNEDOのプロジェクトにおいて、「次世代産業用3Dプリンタ開発事業」が実施され、5機種の装置開発が行われ、販売を開始している。また、SIPにおいてもAM技術に関するプロジェクトが実施された。しかしながら、欧米や中国の活性度は非常に高く、我が国はかなり遅れを取っていると言わざるを得ない。AM技術は次世代の“ものづくり”を変革する技術として研究開発が実施されており、将来のスマート・ファクトリーにおける重要な加工技術の一つとして導入が促進されている。このような欧米や中国の動きに追いつくためには、AM技術を理解して設計並びに生産に繋げていく必要があることから、人材育成は極めて重要である。

おわりに、本稿がAM技術の理解のために、少しでも読者の皆様の参考となれば幸いである。

謝 辞

本稿の一部は、経済産業省平成 26 年度産業技術研究開発 (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 プリント技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発)) 及び平成 27 年度産業技術研究開発 (次世代型産業用三次元造形システム技術開発) の委託研究によるものである。ここに深謝の意を表する。

(Received August 9, 2020)

文 献

- 1) 京極秀樹, 池庄司敏孝; 図解金属積層造形のきそ, (日刊工業新聞社, 2017).
- 2) Wohlers Report 2019 (Wohlers Associates Inc., 2019).
- 3) TRAFAM編; ひらめきを形に! 設計が変わる新しいモノづくり 第5回シンポジウム講演集, (2019).
- 4) JIS B 9441:2020, 付加製造(AM)一用語及び基本的概念, (日本規格協会, 2020).
- 5) TRAFAM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).
- 6) 京極秀樹; 工業材料, **68**, (7), 16 (2020).
- 7) https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/Metal_Powder_1912_02_Web.pdf
- 8) H. Masuo, Y. Tanaka, S. Morokoshi, H. Yagura, T. Uchida, Y. Yamamoto, Y. Murakami; *Int. J. Fatigue*, **117**, 163 (2018).
- 9) K. Imai, T. Ikeshoji, Y. Sugitani, H. Kyogoku; *Bull. JSME Mechanical Engineering J.*, **7**, (2), 19-00272 (2020).
- 10) M. Mani, B. M. Lane, M. A. Donmez, S. C. Feng, S. P. Moylan, R. R. Fesperman Jr.; *Int. J. Prod. Res.*, (2015). <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8036>.
- 11) S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback; *Progress in Additive Manufacturing*, **4**, 383 (2019).
- 12) H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji; *Mechanical Engineering Reviews*, **7**, 19-00182 (2020).
- 13) B. Lane, S. Mekhontsev, S. Grantham, M. Vlasea, J. Whiting, H. Yeung, J. Fox, C. Zarobila, J. Neira, M. McGlaulin, L. Hanssen, S. Moylan, M. A. Donmez, J. Rice; *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, p.1145 (2016).
- 14) W. E. King, H. D. Barth, V. M. Castillo, G. F. Gallegos, J. W. Gibbs, D. E. Hahn, C. Kamath, A. M. Rubenchik; *J. Materials Processing Technology*, **214**, 2915 (2014).
- 15) S. A. Khairallah, A. T. Anderson, A. Rubenchik, W. E. King; *Acta Materialia*, **108**, 36 (2016).
- 16) M. J. Matthews, G. Guss, S. A. Khairallah, A. M. Rubenchik, P. J. Depond, W. E. King; *Acta Materialia*, **114**, 33 (2016).
- 17) S. Ly, A. M. Rubenchik, S. A. Khairallah, G. Guss, M. J. Matthews; *Scientific Reports*, **7**, 4085 (2017).
- 18) N. P. Calta, J. Wang, A. M. Kiss, A. A. Martin, P. J. Depond, G. M. Guss, V. Thampy, A. Y. Fong, J. N. Weker, K. H. Stone, C. J. Tassone, M. J. Kramer, M. F. Toney, A. Van Buuren, M. J. Matthews; *Review of Scientific Instruments*, **89**, 055101 (2018).
- 19) A. A. Martin, N. P. Calta, S. A. Khairallah, J. Wang, P. J. Depond, A. Y. Fong, V. Thampy, G. M. Guss, A. M. Kiss, K. H. Stone, C. J. Tassone, J. Nelson Weker, M. F. Toney, T. van Buuren, M. J. Matthews; *Nature Communications*, **10**, 1987 (2019).
- 20) C. Zhao, K. Fezzaa, R. W. Cunningham, H. Wen, F. De Carlo, L. Chen, A. D. Rollett, T. Sun; *Scientific Reports*, **7**, 3602 (2018).
- 21) R. Cunningham, C. Zhao, N. Parab, C. Kantzos, J. Pauza, K. Fezzaa, T. Sun, A. D. Rollett; *Science*, **363**, 849 (2019).