

Additive Manufacturing技術の最新動向

(粉末特性のパウダーベッドおよび最終製品の品質への影響)

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 ~Influence of Powder Characteristics on Powder Bed Properties and Final Products Quality~

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

Additive manufacturing (AM) technology has been utilized as promising material process because of enabling of the integrated manufacture of complex-shaped products with addition of new functions. In particular, the utilization of laser beam powder bed fusion (PBF-LB) has been expanded in industrial fields such as the aerospace, medical, and energy fields. The assurance of the quality of final products requires control of various process parameters in powder characteristics, powder recoating process, and building process by laser radiation. This paper reviews the influence of powder characteristics on the powder bed properties such as powder bed density and surface morphology, also the influence of the powder bed properties on the quality of final products including our researches.

Keywords: Additive Manufacturing, Laser, Powder Bed Fusion, Powder characteristics, Powder bed properties, Surface morphology, TRAFAM Project

1. はじめに

アディティブ・マニュファクチャリング (Additive Manufacturing, 以下 AM と記述する) 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, 経済産業省が掲げる Connected Industries を見据えると, 極めて重要な技術の一つである。アメリカでは, AM 向けの Digital Twin への動きが加速しており^①, 学会においてもその報告が出始めている。また, オーストラリアも Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)が AM 用 Digital Twin 開発に向けて動き出している^②。このように, 本技術の重要性は世界的にもますます増してきている。これに呼応するように, Wohler Report 2019^③によれば, 引き続き 3D プリンタの販売台数ならびに関連分野の生産額は急速に伸びてきており, 図 1 に示すように 2019 年の世界における金属 3D プリンタは, 2018 年度の約 1800 台から約 2300 台へと伸びてきている。図 2 に, AM 用すべての 3D プリンタのシェアを示す。これからわかるように,

樹脂用の 3D プリンタの割合が圧倒的に高く, 金属用は EOS 社の 2.4%程度が最高である状況に変わりはないが, このところ Markforged 社の伸びが大きいとともに, Desktop 社の割合も多くなってきている。これは, 材料押出法と結合剤噴射, いわゆるバインダージェットティングの伸びが大きくなってきているためと考えられる。後述するが, このような伸びは展示会においても学会発表においても非常に存在感を増してきている。これは, 自動車分野への適用などが期待されているためと考えられる。

また, AM 向けの材料開発も盛んに行われており, 樹脂はもちろんのこと, 金属材料についても従来のステンレス鋼, ニッケル基超合金, アルミニウム合金, チタン合金さらには工具鋼などはもちろんのこと, それぞれの材料系で新たな材種が追加されてきているとともに, 純銅や銅合金, ハイエントロピー合金, 高融点材料など非常に幅広くなってきていることが伺える。

展示会における動向をみると, 昨年 11 月のフランクフルトで開催された AM では最大の展示会である

原稿受付 2020 年 5 月 1 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

連絡先: 京極 秀樹 (研究代表者)

Formnext 2019 では、出展社数約 850 社、参加者数約 34,500 人で、年々急増していることから、AM 分野への関心がますます高くなっていることがわかる。金属材料に対応する AM の方式は、粉末床溶融結合（PBF）法と指向性エネルギー堆積（DED）法が主であったが、このところ結合剤噴射（BJT）法と材料押出（MEX）法も注目を浴びてきている。PBF 法の装置の動向をみると、SLM Solutions 社、GE Additive 社、3DSystems 社、AddUp 社など各社とも装置の大型化を行っているとともに、3DSystems 社のチャンバー方式による低酸化化、TRUMPF 社のグリーンレーザの搭載、Velo3D 社のサポートレス造形など高機能化を図った装置開発などが注目される。DED 法の装置については、粉末ではなくワイヤー供給方式の装置、熱源もレーザや電子ビームだけではなく、アーク放電やコールドスプレーによる装置開発や三菱重工工作機械のようなモニタリング・フィードバック制御機能の開発などが注目される。BJT 法の装置については、ExOne 社や Digital Metal 社さらには Desktop Metal 社の装置と併せて、新たに HP 社と GE Additive 社が参入してきており、研究発表の増加と併せて今後の利用が大いに注目される。また、MEX 法の装置については、Markforged 社が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を精力的に進めている。

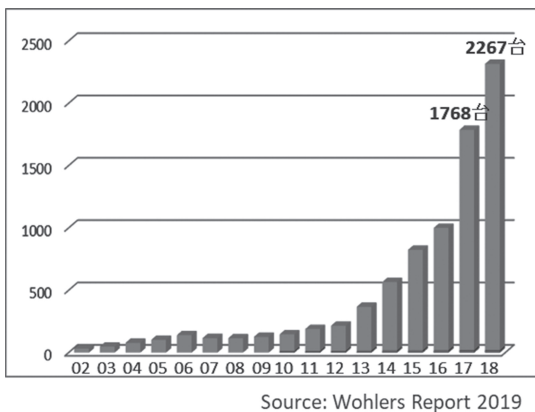


図1 金属 3D プリンタの販売台数^③

AM 用の材料粉末についてみると、大手粉末メーカーや我が国の粉末メーカーも加えて、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、純銅や銅合金、高強度アルミニウム合金、さらには Ta 及び Nb 系などの幅広い粉末を扱っている。製品については、高強度アルミ合金である A2024、A6061、A7075 などと併せて、多くの純銅あるいは銅合金製品の展示が行われていたことが注目され、構造材料から医療材料などの機能材

料の分野まで広がっていることが伺える。

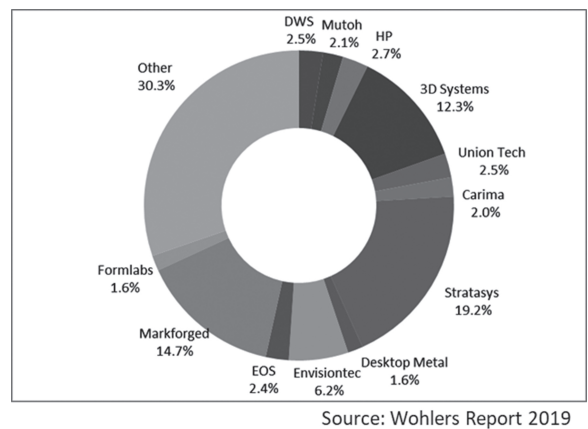


図2 AM 装置の各社のシェア^③

一方、学会の動きをみると、毎年報告しているようにアメリカ・オースティンで開催された SFF2019 シンポジウムにおいては、600 件以上の講演と 700 名以上の参加があり、アメリカを中心とした研究の裾野が大きく広がっており、また若手研究者の参加も多く、NSF からの支援も取り付けており、我が国とますます差がつくと思われる。特別セッションのテーマとして、

- (1) バインダージェット技術の開発
- (2) 機械学習や AI を利用したインプロセスでの欠陥検出技術の開発
- (3) 設計技術の開発
- (4) 切削と AM を中心としたハイブリッド AM 技術の開発
- (5) アεροゾルスプレーによる AM 技術の開発

が取り上げられていた。造形方式は、パウダーベッド方式やデポジション方式が成熟してきており、大量生産が可能で自動車分野への適用が期待されているバインダージェット方式へ関心が移っている。これは、20 年以上前から利用されてきているアεροゾルスプレー方式にも言えることで、セラミック分野などへの適用が期待されている。また、実用化へ向けて、設計に関する考え方の転換とハイブリッド AM 技術開発が重要な技術となってきているといえる。

その他、GE Research と GE Additive は、新たにジェットエンジン GE9X の大型部品用の開発のためにローター式のガントリタイプ装置の開発 (Rotary DMLM : Saturn1.0) を行っている。対象は、直径 1 m 以上のファンケースで、LPBF 方式より高速での造形が可能で、粉末量が削減できるとのことである。おそらく、内部での使用となる専用機であると予測されるが、新たな方式の

装置開発についても、我が国でも国の支援を検討していくことが必要である。また、AM による設計 DfAM (Design for AM) に関する基調講演とセミナーも実施され、ますます AM の適用が加速されるものと予測される。

本稿では、今回は最近のレーザパウダーベッド造形における粉末特性とパウダーベッド特性の関係に関する研究開発状況を、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成果も交えて紹介する。

2. JIS 規格の制定

AM 技術については、表 1 に示すように、2020 年 3 月に JIS B 9441⁽⁴⁾により名称等が規定された。上述したように、金属材料に対応する AM の方式は、粉末床溶融結合 (PBF) 法と指向性エネルギー堆積 (DED) 法が主に用いられているが、最近結合剤噴射 (BJT) 法と材料押出 (MEX) 法も注目を浴びてきている。

表 1 AM 技術の分類 (JIS B 9441 による)⁽⁴⁾

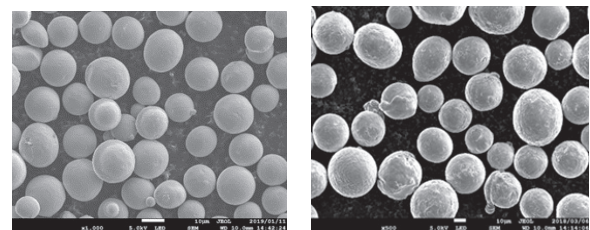
用語	定義	対応英語
結合剤噴射、バインダージェット	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合するプロセス	binder jetting (BJT)
指向性エネルギー堆積法	集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させるプロセス	directed energy deposition (DED)
材料押出	ノズル又はオリフィスから材料を押し出し、選択的に供給するプロセス	material extrusion (MEX)
材料噴射、マテリアルジェット	造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス	material jetting (MJT)
粉末床溶融結合、パウダーベッドフュージョン	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)

3. 粉末の製造法と特性

3.1 粉末の製造法

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ている。TRAFAM プロジェクト⁽⁵⁾では、粉末に関わる研究開発も実施し、図 3(a)に示すように、大同特殊鋼(株)ではレビテーション溶解・ガスアトマイズ装置により円形度の高い Ti-6Al-4V 合金粉末を製造する技術を開発し、プラズマアトマイズ粉末に匹敵する球状粉末を製造している。本粉末を用いて、レーザ粉末床溶融結合 (PBF-LB) 法により相対密度 99.9%以上、表面粗さ Sa 約 5 μm で、高強度の造形体を得ている。一方で、真球で内部にガスを含まない粉末を必要とする電子ビーム粉末床溶融結合 (PBF-EB) 法の場合には、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。図 3(b)に示すように、東洋アルミニウム(株)では、TRAFAM プロジェクトで開発した遠心力アトマイズ法により円形度の高い AlSi10Mg 球状粉末の製造法を確立している。この粉末を用いて、PBF-LB 法により造形を行った結果、従来のガスアトマイズ法で製造した異形状の粉末より、造形条件の幅が大幅に広がり、相対密度もほぼ 100%の造形体を得ることができた。

図 3(a)に示すように、大同特殊鋼(株)では、TRAFAM プロジェクトで開発した遠心力アトマイズ法により円形度の高い Ti-6Al-4V 合金粉末を製造する技術を開発し、プラズマアトマイズ粉末に匹敵する球状粉末を製造している。本粉末を用いて、レーザ粉末床溶融結合 (PBF-LB) 法により相対密度 99.9%以上、表面粗さ Sa 約 5 μm で、高強度の造形体を得ている。一方で、真球で内部にガスを含まない粉末を必要とする電子ビーム粉末床溶融結合 (PBF-EB) 法の場合には、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。図 3(b)に示すように、東洋アルミニウム(株)では、TRAFAM プロジェクトで開発した遠心力アトマイズ法により円形度の高い AlSi10Mg 球状粉末の製造法を確立している。この粉末を用いて、PBF-LB 法により造形を行った結果、従来のガスアトマイズ法で製造した異形状の粉末より、造形条件の幅が大幅に広がり、相対密度もほぼ 100%の造形体を得ることができた。



(a) Ti64 粉末 (b) AlSi10Mg 粉末

図 3 AM 用金属粉末の例⁽⁵⁾

3.2 AM 粉末に求められる特性

一般に利用される粉末については、粉末の粒度分布が広く、真球であるほど充填性が高くなる。しかし、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。併せて PBF 方式の装置においては、粉末供給機構やブレード形状を含めたリコータ機構により適正な流動性などの粉末特性は異なることから、装置にあった粉末特性とする必要がある⁽⁶⁾。また、粉末の粒径及び粒度分布については、通常レーザ (PBF-LB) の場合には、粒径は 15~45μm 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のに対して、電子ビーム (PBF-EB) の場合には、粒径は 45~105μm の範囲で、粒度分布が狭い方がよい⁽⁶⁾。

4. 最終製品の品質に及ぼす粉末特性の影響

AM による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因子を制御する必要がある。Bourell ら⁽⁷⁾は、PBF における製品品質に及ぼす粉末特性の影響に関する特性要因図として示しており、非常に多くの粉末に関わる因子が関わっている。これまでの研究では、昨年報告⁽⁸⁾したように、溶融凝固現象に関わる研究は非常に多くなされている⁽⁹⁾が、粉末特性が粉末床 (パウダーベッド) に及ぼす影響についての報告は、シミュレーションによる研究は多くあるが実験的な研究報告は非常に少ない。

Moges ら⁽¹⁰⁾は、PBF におけるシミュレーションのモデルの精度とパラメータの確かさを向上させるために AM

プロセスを物理現象によって5段階、すなわち(1)粉末積層、(2)粉末床へのレーザー照射、(3)溶融池の形成、(4)熱の散逸による溶融池の凝固、及び(5)残留応力の発生に分類している。このうち粉末床に関わるパラメータとして、粉末の大きさと形状、粒度分布(PSD)、積層厚さ及びリコート形状を挙げている。この中で、リコート速度が粉末床の表面性状やかさ密度(粉末層密度)に影響し、これらのパラメータが粉末床の溶融現象に関わってくると述べている。

さらに、Vockら⁽¹¹⁾は、粉末の品質がプロセス及び最終製品の特性に及ぼす影響について、4段階のレベル、すなわち、粉末特性、バルク粉末挙動、インプロセスにおける挙動、製品特性に分けて論じており、これらを体系化することは挑戦的であると述べている。粉末特性とバルク粉末挙動の関連について、(1)流動性、(2)粒度分布(PSD)、(3)性状の視点でまとめている。第3レベルのインプロセスにおいては、粉末特性とリコート時の粉末挙動の関係を検討することが重要である。しかし、シミュレーションによる報告は多くあるが、実験と併せた報告は少ない⁽¹²⁾。このため、粉末およびバルク粉末特性のリコート挙動への影響を体系的に検討するためには、粉末積層装置を用いて系統的に研究を実施し、最終製品への影響を検討する必要があると提言している。

図4に示すように、AMプロセスにおいては最終製品の品質に及ぼすパラメータは非常に多く、粉末特性はもちろんのこと、粉末床の特性、レーザー照射条件が最終製品の品質に大きく関わってくる。

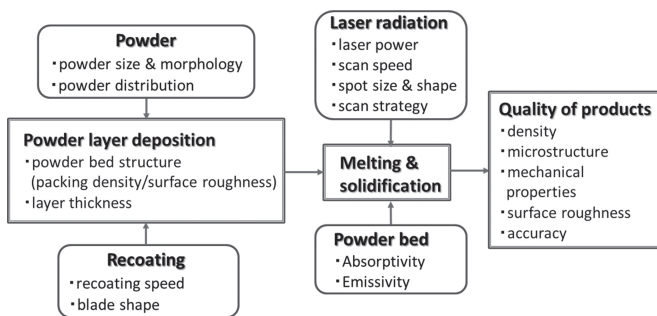


図4 PBFにおける製品品質に及ぼす粉末特性及びレーザー照射条件の影響(参考: Mogesら⁽¹⁰⁾)

4.1 粉末特性の評価法

粉末特性のうち粉末の大きさや形状、粒度分布がバルク粉末の流動性に影響を与え、流動性やリコート条件が粉末床の性状に影響を及ぼす。流動性を表す指標として、図5(a)に示すようにHall flowmeterによる流動度(Flow rate (s/50g))の指標がよく用いられるが、Spieringsら

⁽¹³⁾は、Hall flow試験は他の試験よりAMには適しているが、AM粉末全体に対しては最適な指標ではないと結論づけている。また、Hall flow試験により得られる粉末の山の角度である安息角(angle of repose (°): AOR)も用いられる。

一方、最近では、図5(b)に示すようなパウダーレオメータによる動的指標によりバルク粉末の特性が評価されている。よく使用される、Freeman Technology社FT4 Powder Rheometerによるパラメータのうち、BFE(basic flow energy)は下向きのブレードの動きに対して微量の粉末が流動するための流動エネルギーで、SE(specific energy)は上向きのブレードに対する流動エネルギーである。SI(stability index)は粉末の安定性の評価に使用される。FRI(flow rate index)は流動速度の変化に対する感受性である。FF(flow function)は通常は流動性のランク付けに用いられる^{(14),(15)}。パウダーレオメータによる動的指標については、多くの報告^{(11),(16)}がなされている。Vocksら⁽¹¹⁾の報告では、FT4におけるSI、SE、CBD(conditioned bulk density)は粉末床形成中の挙動と関連付けられると述べている。Clytonら⁽¹⁶⁾は、SEにより粉末床の均一性を評価できると報告している。また、粉体流動性測定装置(Mercury Scientific Inc.: Revolution powder analyzer)によるAvalance角による評価もよく行われており、Snowら⁽¹⁷⁾は、Avalanche angle(雪崩角)とspreadability(拡がり性)との関係はほとんどないと報告している。

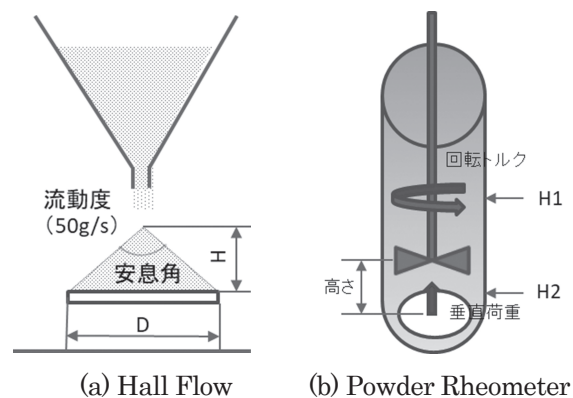


図5 粉末特性の測定法の例

4.2 粉末特性が粉末床特性に及ぼす影響

PBFにおける溶融凝固現象に影響を及ぼす粉末床の特性として、粉末層密度(powder layer density)あるいは粉末床密度(powder bed density: PBD)や積層厚さ、さらには重要な因子として粉末床表面性状が挙げられる。粉末特性と粉末層密度の関係については、多くの報告がある。Jacobら⁽¹⁸⁾は、17-4PHステンレス鋼粉末を用いて、

特殊な容器を使用して粉末層密度を計測し、 4.68g/cm^3 の値を得ており、これはバルク材の約60%となることを見出している。Aliら⁽¹⁹⁾は、粉末層かさ密度を測定するために、紫外線硬化樹脂を利用して粉末床の各リコート面のかさ密度を μX 線CTを用いて精度よく測定し、リコータの移動により粒度分布が変化して、かさ密度はリコートに伴って低下するとともに、造形体の表面粗さと密度も低下すると報告している。

DEM (Discrete Element Method) シミュレーションを用いて、粉末特性やリコート速度が粉末床の平坦度やかさ密度などに及ぼす影響についての報告は多くある。Parteliら⁽²⁰⁾は、DEMに基づく数値シミュレーションにより、ローラーによるリコート現象を取り扱い、PSDによる粉末床の表面粗さとかさ密度の関係を明らかにしている。Haeriら⁽²¹⁾は、DEMシミュレーションと形状の異なる樹脂粉末を用いて、解析と実験の両面から検討を行い、ブレードよりローラーの方が表面品質に優れ、リコート速度が速くなると表面粗さが悪くなり、かさ密度も低下することを見出している。Meierら⁽²²⁾は、DEMシミュレーションにより、Ti-6Al-4Vプラズマアトマイズ粉末を模した形状で、リコート時におけるかさ密度と表面性状に与える影響を検討している。その結果、粉末の形状(凝集性は増加)が小さくなれば、かさ密度の低下や表面性状が悪化することを見出している。Dasaiら⁽²³⁾は、表面性状についてDEMシミュレーションと機械学習を用いてプロセスマップを作成し、リコータ速度と拡がり性のパラメータの関係を明らかにしている。

4.3 粉末床特性が最終製品品質に及ぼす影響

上述したように、粉末床の特性、すなわち粉末床のかさ密度や表面性状が溶融凝固現象に大きな影響を及ぼし、最終的に製品の品質に影響を及ぼす。Mindtら⁽²⁴⁾は、数値シミュレーションにより、粉末のリコートによる粉末床の欠陥、凝固現象による欠陥及び熱変形について検討し、実験結果とよく一致すると報告している。しかし、コーティングモデルにおいては、PSD及び粉末のサイズに関して、メルトプールモデルにおいては、最大の造形速度における空隙率や表面粗さを低下させるためのプロセスパラメータを最適化する必要があるなどの検討課題があると述べている。また、Vockら⁽¹¹⁾が述べているように、最終製品の品質に大きく影響する粉末床の性状に関しては、実験的な報告はほとんど報告されていない。

Jacobsら⁽²⁵⁾は、PBFにおける粉末粒径とPSDが粉末床密度(PBD)に及ぼす影響を実験的に検討しており、広い粒度分布の粉末が細かい粉末の割合が多い粉末より高いPBDとなることを見出している。加えて、彼らは、ハードブレードのリコータによるリコート時における粉

末の偏析挙動とともに、有効積層厚さ(effective layer thickness)と粉末特性の関係を明らかにし、この結果はPBFにおけるパラメータの設定、粉末材料の選択、あるいは造形プラットフォームの部品設計に有効であると述べている。Snowら⁽¹⁷⁾は、専用のリコート装置を開発して粉末特性と粉末供給量、リコート速度、粉末のAvalanche angle(雪崩角)の速度変化を分散分析して、粉末の拡がり性への影響を検討しているが、表面性状への影響については明らかにしていない。

このように、粉末床の表面性状は、最終製品の密度、表面粗さや機械的性質などの品質に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、粉末特性やリコート速度、さらにはリコータのブレードの形状や材質などが粉末床の表面性状に及ぼす影響については、実験的に検討されていない。

4.4 粉末床表面性状の測定法の提案

当センターでは、TRAFAMプロジェクトの中で、図6に示すような表面性状測定装置を設計・製作し、粉末床の表面性状を数値化した。本研究で使用した測定装置は、粉末をリコートするリコート装置(テストベンチ)と表面性状を測定するレイヤー表面測定装置から構成されている。装置の主な仕様は、次のとおりである。

- ①リコート速度：30~40,000 mm/min
- ②造形面積：150 mm×150 mm
- ③ブレード：ステンレス鋼製

また、プロジェクトで開発したレイヤー表面測定装置(以後、測定装置と記述)を用いてパウダーベッド表面性状を定量化した。測定原理はパターン投影法である。本法は、レーザプロジェクターにより二次元パターンを被検物に投影し、別の角度の受光カメラでその画像データを取得し、二次元パターンの変形量から三角測量の原理により三次元形状(点群)データを算出する方法である。

本装置により、リコート後の粉末床表面の測定を行った結果、高さ分解能 $\pm 30\mu\text{m}$ で測定できることがわかった。粉末特性とリコート速度が各種粉末の表面性状に及ぼす影響について検討した結果、リコート速度の増加とともに、表面性状は悪化し、あわせて粉末特性の影響を受けることがわかった。

5. おわりに

本稿では、最近のPBF-LB造形における粉末特性が粉末床特性や最終製品の品質に及ぼす影響に関する研究開発状況をレビューするとともに、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成果も交えて紹介した。紙面の都合上、文献の数をかなり制限したが、読者の皆様の参考となれば幸いである。

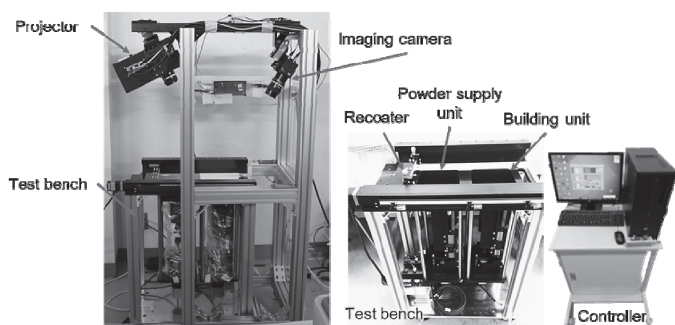


図6 パウダーベッド表面性状測定システム

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) J. Thilmany, “Digital world spawns identical twins”, *Mechanical Engineering*, 139(10) (2017), 32-37.
- (2) D. Gunasegaram, T. Murphy, “Towards a true digital twin for the metal additive manufacturing process”, *Metal Additive Manufacturing*, 5(3) (2019), 185-191.
- (3) Wohlers Report 2019, Wohlers Associates Inc., (2019).
- (4) 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).
- (5) TRAFAM, 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, 横浜, (2019.9).
- (6) 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).
- (7) 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.
- (8) 京極 秀樹, 池庄司 敏孝, 近畿大学次世代基盤技術研究所, 10(2019) 69-74.
- (9) H. Kyogoku, T.-T. Ikeshoji, “A review of metal additive manufacturing technologies: Mechanism of defects formation and simulation of melting and solidification phenomena in laser powder bed fusion process”, *Mechanical Engineering Reviews*, 7(1) (2020) 19-00182.
- (10) T. Moges, G. Ameta, P. Witherell, “A review of model inaccuracy and parameter uncertainty in laser powder bed fusion models and simulation”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2019) 040801.
- (11) S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, T. Weißgärber, B. Kieback, “Powders for powder bed fusion: a review”, *Progress in Additive Manufacturing*, 4(2019), 383-397.
- (12) S. Haeri, Y. Wang, O. Ghita, J. Sun, “Discrete

- element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing”, *Powder Technology*, 306 (2016) 45-54.
- (13) A.B. Spierings, M. Voegtlin, T. Bauer, K. Wegener, “Powder flowability characterization methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. *Progress Additive Manufacturing*, (2015) 1-12.
- (14) <https://www.freemantech.co.uk/powder-testing/ft4-powder-rheometer-powder-flow-tester/shear-testing>.
- (15) W.B. James, “ASTM committee B09 workshop on powder characterization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 55(2019) 44-55.
- (16) J. Clayton, D. Millington-Smith, B. Armstrong, “The application of powder rheology in additive manufacturing”, *JOM*, 67(2015) 544-548.
- (17) Z. Snow, R. Martukanitz, S. Joshi, “On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 28 (2019) 78-86.
- (18) G. Jacob, A. Donmez, J. Slotwinski, S. Moylan, “Measurement of powder bed density in powder bed fusion additive manufacturing processes”, *Measurement Science Technology*, 27(2016) 115601.
- (19) U. Ali, Y. Mahmoodkhani, S.I. Shahabad, R. Esmaeilzadeh, F. Liravi, E. Sheydaei, K.Y. Huang, E. Marzbanrad, M. Vlasea, E. Toyserkani, “On the measurement of relative powder-bed compaction density in powder-bed additive manufacturing processes”, *Materials and Design*, 155 (2018) 495-501.
- (20) E. J.R. Parteli, T. Pöschel, “Particle-based simulation of powder application in additive manufacturing”, *Powder Technology*, 288 (2016) 96-102.
- (21) S. Haeri, “Optimisation of blade type spreaders for powder bed preparation in Additive Manufacturing using DEM simulations”, *Powder Technology*, 321 (2017) 94-104.
- (22) C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W. A. Wall, A.J. Hart, “Critical influences of particle size and adhesion on the powder layer uniformity in metal additive manufacturing”, *J. Materials Processing Tech.*, 266 (2019) 484-501.
- (23) P.S. Desai and C.F. Higgs III, “Spreading process maps for powder-bed additive manufacturing derived from physics model-based machine learning”, *Metals*, 9(2019), 1176; doi:10.3390/met9111176.
- (24) H.-W. Mindt, O. Desmaison, M. Megahed, A. Peralta, and J. Neumann, “Modeling of powder bed manufacturing defects”, *J. Materials Engineering and Performance*, 27(2018), 32-43.
- (25) G. Jacob, C.U. Brown, A. Donmez, “The influence of spreading metal powders with different particle size distributions on the powder bed density in laser-based powder bed fusion processes” NIST Advanced Manufacturing Series 100-17, March 2018.