

## 微細ラティスコーティング技術の開発 —重力落下式粉末供給手法による壁構造の評価—

前花英一<sup>\*1</sup>, 臼沢太一<sup>\*1</sup>, 石橋信治<sup>\*2</sup>, 嶋田慶太<sup>\*2</sup>, 水谷正義<sup>\*2</sup>, 厨川常元<sup>\*3</sup>

Development of a fine lattice coating system:

Evaluation of printed wall structures by powder supply method with gravity fall

Hidekazu MAEHANA, Taichi USUZAWA, Shinji ISHIBASHI, Keita SHIMADA,  
Masayoshi MIZUTANI and Tsunemoto KURIYAGAWA

本研究は、レーザを用いた金属 3D プリント技術を基盤とした、機能を有する多孔質構造をバルク材表面に付与する、微細ラティスコーティング技術の開発を目的とする。本報では新たな粉末供給手法である重力落下式供給法を提案し、これを用いて微細ラティス構造の土台となる壁構造の造形を行うことで、その積層過程における最上層の表面プロファイルについて考察した。その結果、積層過程の堆積状態によって堆積層が一定値を超えるとレーザ走査による造形体表面が平滑となることを明らかにした。また本供給手法で造形した壁構造は、直立状態で 0.4 mm の高さまで造形することが可能となり、重力落下式供給手法を用いたレーザ走査による造形の有効性を示した。

Key words: powder gravity fall, fine lattice coating, pure titanium powder, pulse laser, high speed camera

### 1. 緒言

金属材料表面に微細なテクスチャを形成することによって、濡れ性や潤滑性、生体親和性などの機能が、その表面に発現することが知られている<sup>1)2)</sup>。ただし、これまでの機能創生加工技術は、除去加工による平面的な表面テクスチャによるものがほとんどであったが、機能を生み出す構造を 3 次元構造に置き換えることができれば、より効果的な機能を発現できるのではないかと筆者らは考えている。機能をもつ 3 次元構造としては、多孔質（ポーラス）構造が有名であり、ポーラス金属は吸音性、熱交換機能、衝撃吸収性などの機能性材料<sup>3)</sup>として活用されている。このような金属多孔質構造の製造法には、発泡溶融法や粉末冶金法などがあるが、これらによって得られる多孔質構造の気孔や支柱の配列は不規則であり、それらの大きさの制御は困難である。

一方、近年注目されている金属 3D プリントであれば、その積層造形手法により、規則性のある多孔質構造を自由なデザインで作り出すことができる<sup>4)</sup>。その一例が図 1 に示すラティス構造であり、このような多孔質な部分と、緻密な部分の両方を併せもった部品を作り出すことも可能である。例えば、生体内に埋入される歯科インプラント、人工関節などは、多孔質内

部の骨成長による生物学的固定性が求められるため、このような金属 3D プリントによる製造に注目が集まっている<sup>6)7)</sup>。

ただし、金属 3D プリント技術で造形した製品内部には、意図しない気孔であるポロシティの残留といった大きな課題<sup>8)</sup>があり、厳密に言えば、緻密性が要求される部位がある製品を作り出すことはできない。この課題を解消するための手法は、いくつか提案されているが、大掛かりな後工程を用いずに、これを完全に無くすことは難しく、市販のバルク材ほどの緻密な金属組織を作り出すことができない。そのため、金属 3D プリントで製造された部品については、ポロシティを起因とする疲労破壊と、表面に現れる気孔について考慮しておく必要がある。

以上の課題をふまえ、筆者らは表面の高機能化と、製品としての強度の問題を同時に解決する手法として、緻密材料（バルク材）をベース材として用い、例えば歯科インプラントのねじ山高さ（約 0.5 mm）程度のごく薄い多孔質構造（機能を担う）を、その表面に積層造形するという革新的な手法を提案す

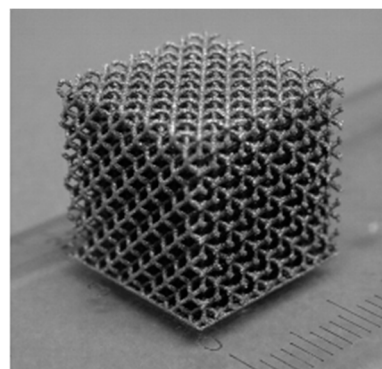


図 1 PBF 法で得られた 12 mm 角の立方ラティス構造<sup>5)</sup>

<sup>\*1</sup> コマツNTC株式会社: 〒939-1595 富山県南砺市野尻641  
Komatsu NTC Ltd.

<sup>\*2</sup> 東北大学大学院工学研究科: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01  
Graduate School of Engineering, Tohoku University

<sup>\*3</sup> 東北大学大学院医工学研究科: 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01  
Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University  
(学会受付日: 2019年 5月 22日)  
(採録決定日: 2019年 8月 8日)

る。この概念の造形手法を筆者らは微細ラティスコーティングと呼称している。

本報では、既存の金属3Dプリンタ技術を参考にして、微細ラティスコーティング実現のための新たな粉末供給方法について説明し、これを提案している。さらに、この供給方法によってラティス構造の土台となる、壁構造の造形に取り組み、その積層過程における最上層のプロファイルの変化についてまとめている。

## 2. ラティスコーティング技術の開発

現在、代表的なレーザー金属3Dプリンタ手法として、粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion : PBF法)および、指向エネルギー堆積法(Direct Energy Deposition : DED法)がある<sup>8)</sup>。これらは共に、制御可能なレーザーによって目的の位置に溶融プールを形成し、そこに金属粉末が接近することで、溶融プールに取り込まれ一体化する。その後、レーザーが離れることで自然冷却し、凝固によって任意の形状を得る。

これらの造形手法の差異は、粉末の供給手法による。例えばレーザーによる溶融プールに対して、粉末の供給量が多すぎた場合、ボーリング欠陥と呼ばれる大きな球状の塊が発生し、造形品質を著しく悪化させる<sup>9)</sup>。このことから、溶融プールへの粉末供給は、目的の位置に粉末を輸送し、配置させると同時に、その供給量を厳密に制御する必要がある。このためPBF法では、ローラやブレードを用いたスキージング(Squeezing)工程によって、所定の堆積厚に制御しながら、金属粉末は平坦な粉末床として充填する。DED法では、ロボット先端に装着されたトーチから不活性キャリアガスとともに金属粉末は噴射され、溶融プールに投入しており、キャリアガスの設定などで、その供給量の安定に努めている。

この供給方法の違いにより、形成できる構造体にも差異が生じる。PBF法では造形に使われなかった粒子も、造形が完了するまで、基本的にはその場を保持する。このため、これらの粒子が足場となって、上の層で形成した溶融プールの重量や金属蒸気などの反発力も支持することがある程度可能である。これによって、オーバーハング構造や梁構造のように真下に空洞がある構造も造形可能であり、内部に複雑な空洞をもつラティス構造を作り出すことができる。それに対してDED法では、トーチから噴射するキャリアガスおよび、酸化防止のためのシールドガスは0.1 m/s以上の流速を有して<sup>10)</sup>おり、前述した足場となる粒子を留まらせることができない。このため形成できるオーバーハング構造は限定的である<sup>11)</sup>。

その一方、PBF法では、平坦な基準プレート上に造形を行うことが前提であり、最終的にはこのプレートを切り離す必要がある。その点においてDED法は曲面をもつようなバルク材上にも造形が可能であり、バルク材自体も製品の一部分とすることができるという利点がある。

以上のことから、バルク材上に多孔質構造を造形するという、筆者らが掲げる微細ラティスコーティング技術については、これらの手法では実現できず、新たな手法が必要となる。前述したとおり、オーバーハング構造を形成するには、溶融プールを支える足場が必須である<sup>12)</sup>。3Dプリンタでは、この支持

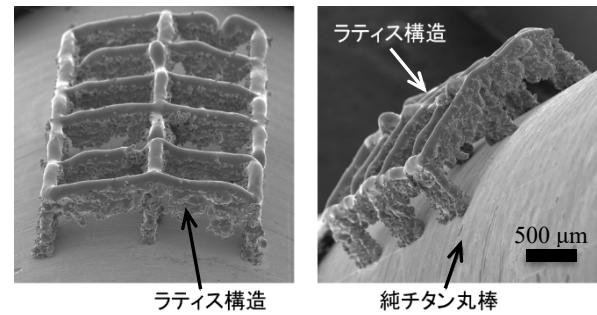


図2 重力落下式粉末供給による造形例

表1 供試材の化学成分

	化学成分(ppm max.)				
	Fe	O	C	H	Ti
Ti粉末	50	1300	200	1300	残部
Ti基材	2000	1500	800	1500	残部

のためサポート体を造形することも行われているが、造形後にこの多孔質内部から大きいサイズのサポート体取り除くことは現実的でなく、微小な粉末粒子が支持体となるべきである。

そこで、微量な粉末を脈動なく搬送できる高精度粉末供給器を用いることを考えた。本装置から真下に排出される粉末は、重力および、それによる空気抵抗以外の外力を可能な限り抑えた形で落下し、バルク材上に堆積する。さらにバルク材を等速運動すれば、その表面に均一な堆積層を作ることができる。堆積した粉末はその摩擦力や分子間力によって比較的緩やかな曲面においても、その場を維持することが可能である。この重力落下式粉末供給法とレーザー照射によって、造形した事例が図2である。同図は、バルク材として純チタン製の直径6 mmの丸棒を用いており、その表面に高さ約0.6 mmの簡単なラティス構造を形成している。なおPBF法で形成される構造よりも歪ではあるが、多孔質構造として必要な横穴が形成できることを確認できている。このような薄い多孔質構造を自由曲面にコーティングできる技術が、筆者らが掲げる微細ラティスコーティング技術である。

## 3. 実験方法

### 3.1 供試材

本研究では、歯科インプラントを具体的なニーズと定め、生体親和性の高い純チタンを素材として採用した。ラティス体となる純チタン粉末に関しては、ガスアトマイズ法によって得られた高品質の粉末粒子であるが、さらにこれをふるい分けによって粒度分布を25～38 μmとすることで、供給時の流動性を向上させている。基材は板厚2 mmの純チタン2種熱間圧延材で、本報ではフライス仕上げされた平坦な表面の試験片で評価を行った。粉末および基材の化学成分については表1に示す。

### 3.2 レーザ発振器とレーザー条件

レーザー発振器およびレーザーの集光特性を表2に示す。微細ラティスコーティングの適応先としては薄い板金材も想定し

表 2 レーザ発振器および集光特性

波長	1064 nm
最大発振出力	500 W CW ファイバーレーザー
ビーム強度	ガウシアン分布
スポット径	φ16.5 μm
焦点位置	粉末堆積層上面
レンズ焦点距離	100 mm

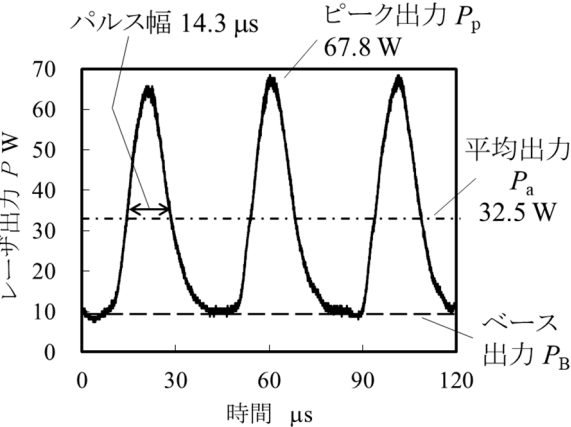


図 3 パルス波形<sup>5)</sup>

ている。このため、レーザーによる熱影響による被コーティング板材の寸法精度変化を可能な限り抑制したい。そこで、筆者らの前報<sup>5)</sup>を参考にした 14.3 μs パルス幅で平均出力 32.5 W のパルスレーザー(図 3)を採用することとした。さらに走査速度は 100 mm/s とすることで、造形幅が細く、熱影響範囲が極めて狭い造形が可能になる。

3. 3 高精度粉末供給器

図 4 に供給装置の概要を示す。モータに連結した縦型のスクリーウの先端は 4 枚刃のフラットエンドミルを模した構造となっており、これの回転によって粉末が運搬される。さらにスクリーウの先端には、それとほぼ密接した形で薄平板が配置しており、薄平板に設けられた幅 0.2 mm のスリットを通過した粉末だけが、シュートを通じて真下に落下し基材上に堆積する。スクリーウは、そのらせん溝に入り込んだ粉末を、持ち上げる方向に回転しているため、スリットを通過できなかった粉末はスリットに押し込まれることがなく、上方へ排出される。これによってスリットとスクリーウ間での粉末の圧縮が抑制され、粉末づまりによる供給量の脈動を低減させた。

図 5 は本供給器による 0.1 秒間あたりの供給量の変化を、再現性 0.1 mg の音叉式分析てんびんを用いて 0.1 s 毎に測定した結果であり、スクリーウの回転速度によってまとめている。同図より、供給開始直後の 1 秒間を取り除けば、スクリーウ回転速度 24 min<sup>-1</sup> の設定において、0.1 秒間あたり約 1.0 mg の脈動の小さい粉末供給が可能となる。

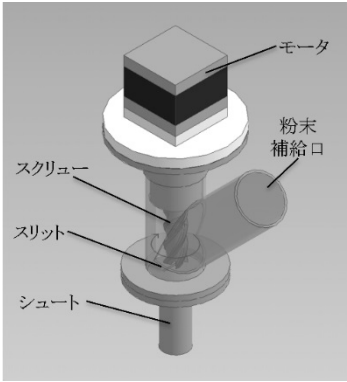


図 4 高精度粉末供給器

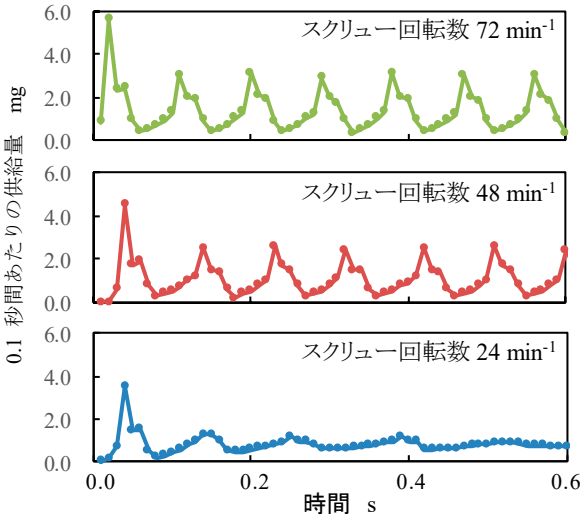


図 5 粉末供給器の 0.1 秒間あたりの供給量の変化

3. 4 実験装置および加工プロセス

実験装置は図 6 に示すように、4 つのステーションによって成り立っている。造形を施す基材は、造形ステージに固定されており、これが繰り返し精度±1 μm のリニアサーボモータによって各ステーション間を移動する。造形の流れとしては、まず高精度粉末供給ステーションにて、真上に設置された粉末供給器から適量粉末を落下させ、同時に造形ステージを等速運動させることで、基材上に均一な堆積層を作る。次に、3 次元プロファイル測定ステーションに移動し、形成した堆積層を、高さ方向の繰返し精度 0.2 μm の能力を持つレーザー 2 次元プロファイル検出器によって測定する。この際も、造形ステージは 16.0 mm/s の等速運動しているため、堆積層の 3 次元プロファイルの取得および、その評価が可能である。

その後、レーザー造形ステーションに移動するが、レーザー溶融時のチタンの酸化反応を抑制するために、基材を覆う形で造形ステージにチャンバを手動で設置し、その内部をアルゴンガスに置換させる必要がある。チャンバにはガスの流入口と排出口があり、堆積させた粉末を動かないように、1.0 L/min 以下の流速でガスを流入し続け、この状態を 30 秒以上維持することで、低酸素環境を作っている。チャンバの上面には、ガルバノスキャナの走査範囲をカバーするファイバーレーザー用の透過窓が付属している。なお、チャンバ側方には加工状態を高速度カメラにて撮影できる観察窓と、カメラ用の照明窓が相対する位置に設置されている。



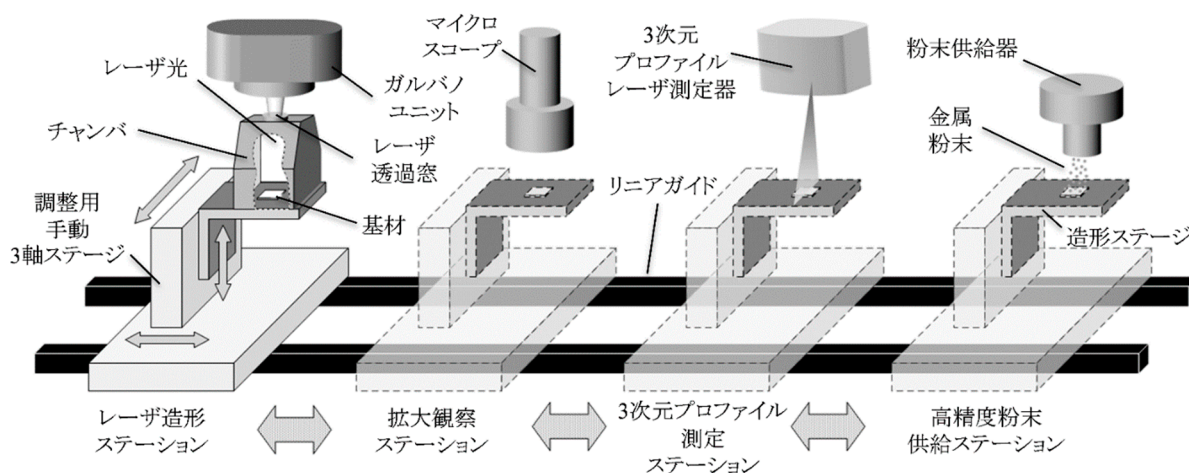


図6 実験装置の構成

レーザー造形完了後、拡大観察ステーションにてマイクロスコープによる造形状態を判定し、1層分の造形が完了する。なお、次層の造形を行うためにチャンバを取り外す必要がある。以上の動作を繰り返すことで、3次元造形を行う。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 重力落下式粉末供給による壁構造の造形

PBF法において、1層あたりの粉末の堆積厚は造形品質に大きく影響を与える要素であると言われている。そこでまず、本報で採用した、造形の微細性に優れたレーザー条件を用いて、堆積厚の影響を調査した。1層あたりの粉末堆積厚が50  $\mu\text{m}$ 、75  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ となるように、先端がフラットなブレードを用いて、スキージングを施して粉末床を形成した。この粉末床に直線造形を行い、これを5層分積層することで、壁構造を造形した。この造形断面を図7に示す。同図より堆積厚が厚い条件ほど、1層あたりの造形高さが高くなる傾向があり、造形効率については有利ではあるが、1層ごとに丸みをおびた輪郭となりやすく、層間部分はいくびれとなってしまう。また、堆積厚が厚い条件ほど大きなポロシティが発生しやすくなることも確認された。

本結果と造形効率を考慮して、重力落下式粉末供給による堆積層においても、その堆積厚が50  $\mu\text{m}$ 程度になるような供給条件の調整が必要であると考えた。そこで図5の粉末供給量の脈動が小さい24  $\text{min}^{-1}$ の条件のもとで、堆積層中央付近の厚さ平均が50  $\mu\text{m}$ になる造形ステージ移動速度を調べた。その結果、30  $\text{mm/s}$ の移動速度を得ることができ、これらの条件を基準として、基材上に幅が約6  $\text{mm}$ で、長さが約20  $\text{mm}$ の粉末堆積層を形成した。さらに、この堆積層の断面中央を狙って堆積方向と平行に、10  $\text{mm}$ の長さのレーザーを走査させ、1層分の造形体を形成した。図8の3Dプロファイルは、この粉末堆積層において表面性状が比較的均一な5  $\text{mm}$ の区間を選択したものであり、それと同位置に形成された造形体も併せて示している。なお、造形体の3Dプロファイルは周囲の粉末粒子を刷毛によって取り除いた状態のものである。さらに、選択した領域の造形体稜線部の2Dプロファイルと、

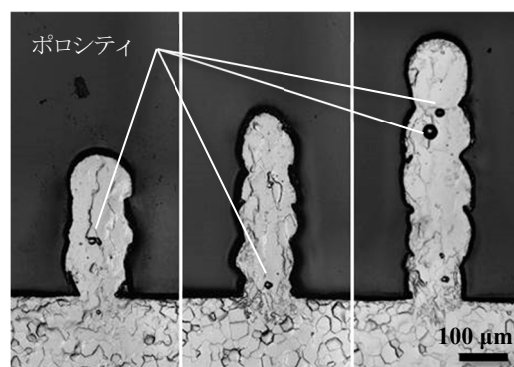


図7 スキージング手法を用いて造形した各堆積厚設定の壁構造断面

それと同位置の造形前の粉末堆積層の2Dプロファイルも併せて示す。

厚さ50  $\mu\text{m}$ を狙い値とし、スキージング操作によっても堆積層を形成し、同様にレーザー走査によって形成された造形体についても調査した。このスキージングの結果を図9に示す。これらの画像により、重力落下式においても、レーザー走査によって造形体を形成することが可能なことが確認できたが、スキージングによって形成された造形体の方が、プロファイルの高低差が少ない。また、短時間に多量の粒子が溶融プールに合流することで発生する、ボーリング欠陥の頻度についても、スキージングを施したもののほうが少ないことが確認できた。このような1層目の造形体の凹凸は、造形前の堆積層の表面性状に起因すると考えられるが、本報においてはその関連性の十分な解明に至っていないため、引き続き検討する予定である。

次に、重力落下式供給による積層について調査した。ここで、加工直後の造形体に目を向けると、レーザー照射によって飛散した粒子や、蒸気流によって引き寄せた粒子が、造形体の上に接合せずに付着している場合があり、造形体の正確なプロファイル測定ができない。また、これがスキージング手法であれば、次層においてこの粒子はブレードによって最適な位置に移動させられるが、本手法では、付着粒子の上にさら

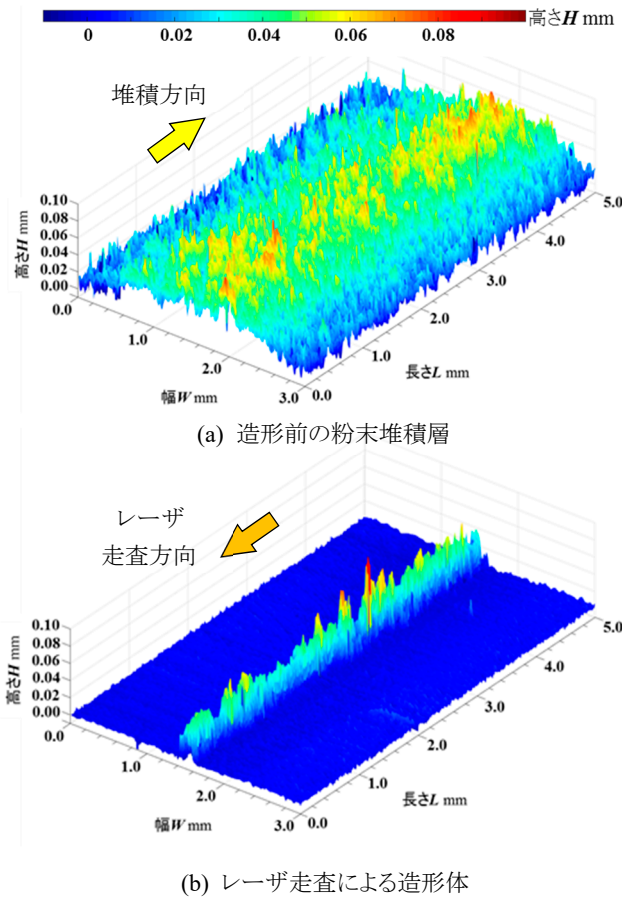


図 8 重力落下式供給による造形

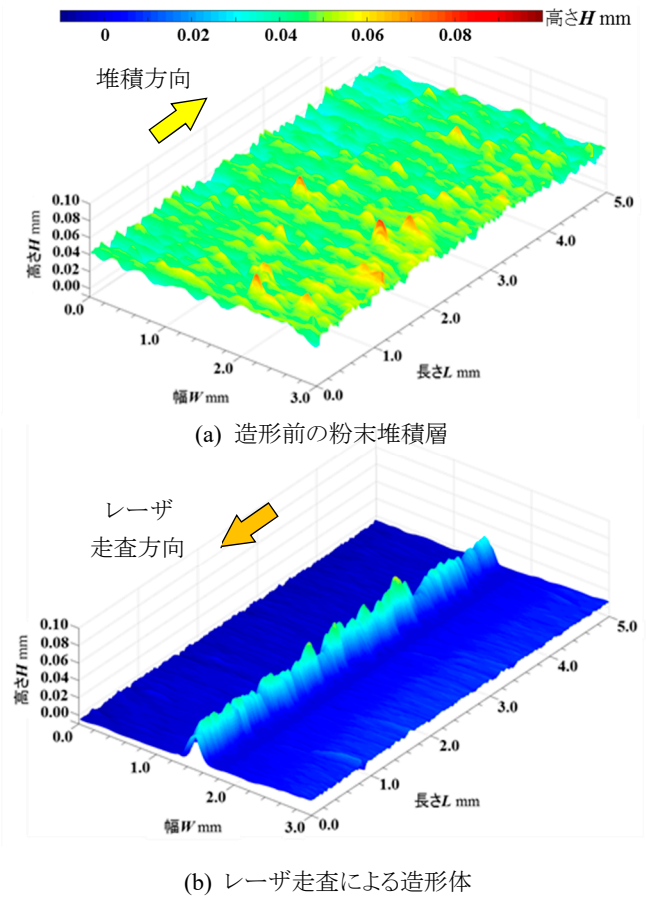


図 9 スキーミング手法による造形

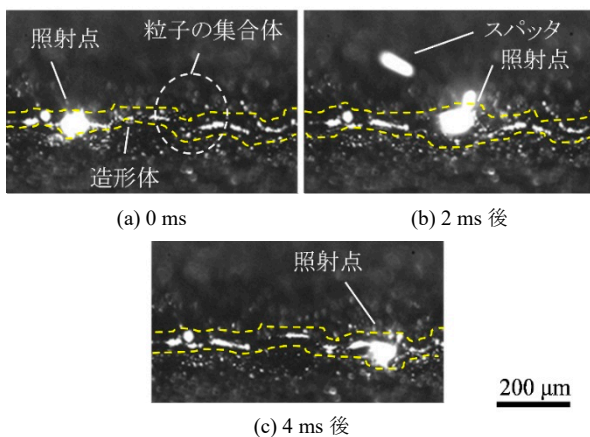


図 10 2 次加工による粒子の除去

に粉末を供給するため、付着粒子分が堆積厚のばらつきの原因となってしまふ。そこで、付着粒子の除去を目的として、造形と同一条件のレーザーで、再度造形体表面を走査することとした。この 2 次加工による造形体の時間変化を、高速度カメラで撮影したものを図 10 に示す。同図より造形体上に付着している粒子の集合体が、ねらいどおりレーザー射線と干渉することで、スパッタとして発光しつつ弾き飛ばされるのが確認された。

この 2 次加工をプロセスに含めて、重力落下式供給による 7 層分の積層造形を行い、図 11 に示す約 0.4 mm の高さをもつ垂直な壁構造を造形した。また、重力落下式供給による壁構造断面を示したのが図 12 である。本図において造形幅約 120  $\mu\text{m}$  の垂直な壁構造が形成されており、その内部には図



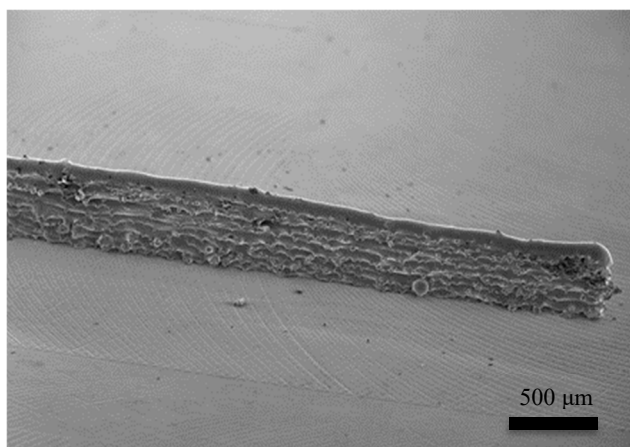


図 11 重力落下式粉末供給による壁構造の造形

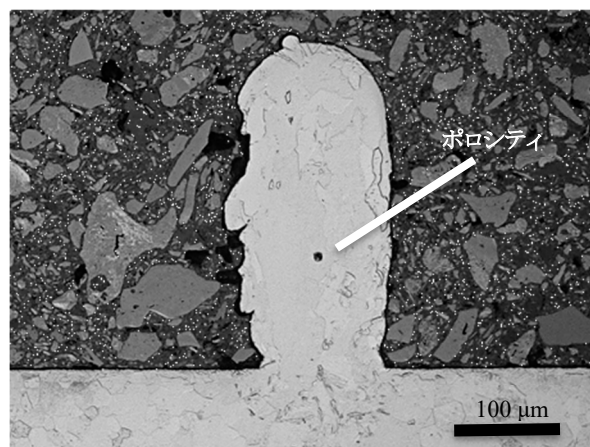


図 12 重力落下式供給法を用いて造形した壁構造断面

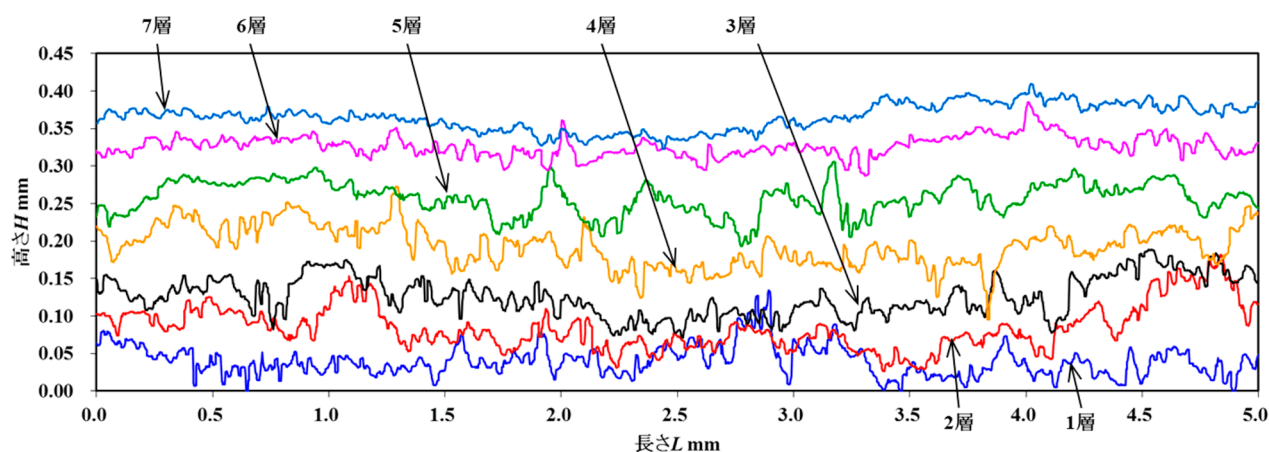


図 13 重力落下式積層造形による各層の2Dプロファイル(長手方向)

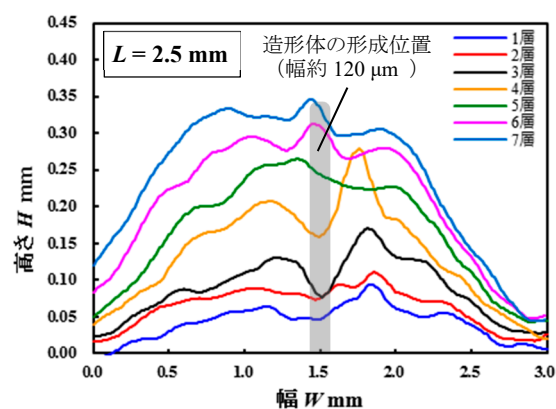


図 14 積層造形後の2Dプロファイル(断面)

7 のスキージング手法を用いた壁構造よりも比較的に小さいポロシティがいくつか確認された。図 13 は、図 11 における 1 層ごとの造形体表層の稜線長手方向の同一領域を、2D プロファイルで 7 層分まとめたものであり、粉末供給条件は図 8 で採用したものと同一である。図 13 の各層のプロファイルから、下層においては供給粉末の堆積厚より大きな段差が不規則に発生することはあるが、それがその上層で拡大することはほとんどなく順次積層されていき、第 7 層の基材からの高低差のばらつきは約 50  $\mu\text{m}$  となった。また、表面性状に注目すると、第 6 層、7 層はその下の層に比べ、大きな突起は低減される傾向があることが確認できた。

#### 4.2 上位層における段差の緩和

重力落下式では、場所によらず均一に粉末が堆積することを想定しているため、下層に段差があれば、それを引き継いだ形で造形されていくはずである。しかしながら、図 13 をみれば、この影響はそれほど大きくない。この原因を調査するために、図 13 の  $L = 2.5 \text{ mm}$  における断面を 2D プロファイルとして抜き出したものを図 14 に示す。図 14 の  $W = 1.5 \text{ mm}$  部分がレーザーの狙い位置であり、紙面に対して垂直にレーザーを走査している。これにより、この位置を中心に全幅約 120  $\mu\text{m}$  の造形体が形成される。なお図 14 は、各層の積層造形中のプロファイルであるため、造形体およびその周囲の粉末堆積状態も明示されており、この堆積の傾向を明確にするために各プロファイルにはスムージング処理を施している。このプロファイルより層が増加するごとに、第 4 層の  $W = 1.7 \text{ mm}$  付近を除き、ほぼ全域で増加している。しかし、第 3、4 層をみると、造形体の位置 ( $W = 1.5 \text{ mm}$ ) には窪みが生じているのに対して、第 6、7 層については逆に突起となっており、これらの造形現象に違いがあることが考えられる。

第 3、4 層において段差が拡大しない原因について考察する。図 15 は第 4 層および第 6 層のレーザー照射前後の断面 2D プロファイルをまとめたものである。第 4 層の照射前後のプロファイルに注目すると、レーザー照射前は中央にピークのある山なり形状である。この中央位置にレーザーを照射したあとのプ

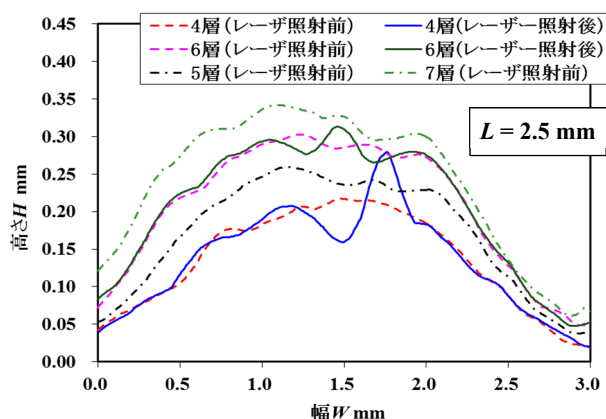


図 15 レーザ照射前後のプロファイルの比較(断面)

ロファイルでは、照射前のプロファイルに対して中央位置に約  $50\ \mu\text{m}$  の深さの窪みが生じており、その位置に造形体が形成されている。この窪みは PBF 法でも指摘されている<sup>13)</sup>粉末のかさ密度に起因するものや、造形中の粒子の飛散などが原因と考えられる。また、粉末が堆積しているのみの位置である  $W = 1.7\ \text{mm}$  には大きなピークができています。これは、いくつかの粒子が熔融、一体化したことによる大きな塊(ポーリング)が粉末層上に残留したものであると考えており、その発生原因については後述する。

その後の、第 5 層の粉末供給(図 15 の第 5 層レーザー照射前のプロファイル)によって、窪みは埋められ、ポーリングによるピークはその滑り落ちなどにより解消され、再びなだらかな堆積層となる。この第 5 層の堆積層と、第 4 層の造形体について長手稜線の 2D プロファイルを示したものが図 16 である。同図をみても、粉末供給による堆積によって細かな凹凸が解消されていることが分かる。これらのことから、重力落下式供給によって、粉末粒子はそのまま真下に落下するだけでなく、造形体の表面性状や既にある粉末層の堆積状態に影響を受けて、堆積することが推察され、これが、下層部で生じた段差が拡大しない原因の 1 つだと考えられる。なお、本報では粉末供給の時間あたりの量については注目したが、粉末粒子の落下による運動量および、それによる堆積層などへの衝突についても、重要であることが示唆されている。

#### 4. 3 高速度カメラ像による各層の造形挙動

次に図 13 の下層部において、頻繁に発生する突起の原因と、これが第 6, 7 層で抑制される原因について考察する。図 15 のレーザー照射位置( $W = 1.5\ \text{mm}$ )において、第 6 層の造形体と、第 7 層の粉末堆積層のプロファイルの差は、粒子 1 粒程しかなく、ほぼ堆積粒子が存在していない。これは、採用した粉末は流動性が高く、安息角は小さいが、堆積層の高さが増えるにつれて、堆積層の斜面を滑り落ちる粒子が増えるためだと考えられる。しかし、図 13 や図 14 の結果より、第 7 層のレーザー走査によって、造形体が成長していることが確認できる。これについて、第 7 層における造形中の高速度カメラ像である図 17 によって説明する。同図 (a)より、レーザー走査前でありながら、第 6 層で作られた造形体が見えており、この上に供給したはずの粉末粒子は、造形体上にほとんど乗っていないことが確認できる。造形体上をレーザーが走査すると、造形体表

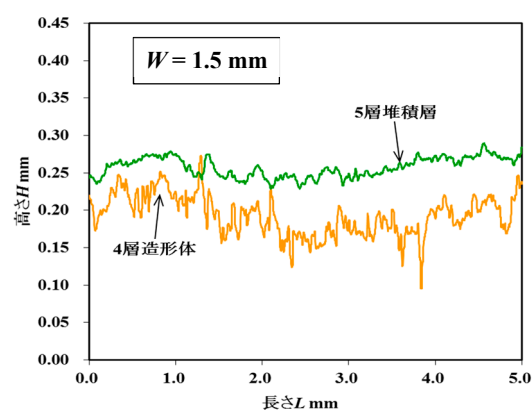


図 16 第 4 層造形体と第 5 層堆積層のプロファイル(長手)

層に熔融プールが形成される。この熔融プールから発生した金属蒸気は、周囲の粉末粒子を引き寄せる効果があることが知られている<sup>14) 15)</sup>。図 17 においても、熔融プール進行方向の粒子よりも、その側方の粒子が多く引き寄せられ、熔融プールに合流し、造形体の成長に繋がっている。

一方、第 4 層における造形中の高速度カメラ像である図 18 をみると、第 3 層の造形体上に粒子が堆積しているのが確認できる。図 18 と同様に、走査ライン側方から引き寄せられた粒子についても第 4 層の造形に利用されるが、第 4 層の造形の主体は、第 3 層の造形体上の粒子、つまり進行方向に堆積した粒子である。この堆積粒子に熔融プールが近づくと、そのまま熔融プールに取り込まれる場合と、前方に傾斜した金属蒸気によって、弾き飛ばされる場合がある。この金属蒸気の傾斜は、第 3 層の造形体が下り勾配の場合、より起こりやすい。この前方に傾斜した金属蒸気の高いエネルギーによって、曝された粒子は弾かれると同時に、加熱され、発光し、液滴のように振る舞う。このような粒子どうしが接触することで一体化し、 $50 \sim 200\ \mu\text{m}$  ほどの大きな塊(ポーリング)となる。このポーリングはその質量により、遠くに飛ばされず、進行方向のレーザー走査ライン上に付着する。あるいはライン沿いに堆積する。図 14 および図 15 における第 4 層の  $W = 1.7\ \text{mm}$  付近で高いピークとなっているのは、この塊によるものと考えている。また、金属蒸気によって弾かれた粒子は、周囲の粒子も巻き込んで飛散していくこともあるため、図 18 は図 17 に比べスパッタ量は圧倒的に多く、進行方向の粒子が喪失してしまうことも多くある。これらが複合的に働くため、下層部の造形体の表層は大きな凹凸が形成されやすい。

以上のことから、第 4 層と第 7 層の表面性状の違いは、その下層で形成された造形体の表面性状と、その周囲の粉末堆積層の状態によるものと推察される。これによって、意図的に第 7 層のような堆積状態を作り出し、平滑な表面性状を作り出せることも期待できる。

#### 5. 結 言

機能を有する多孔質構造を、バルク材表面に付与する技術として、微細ラティスコーティング技術を提案し、その実現のために、重力落下式粉末供給を利用したプロセスを開発した。また、同プロセスにより多孔質構造(ラティス構造)のベ-

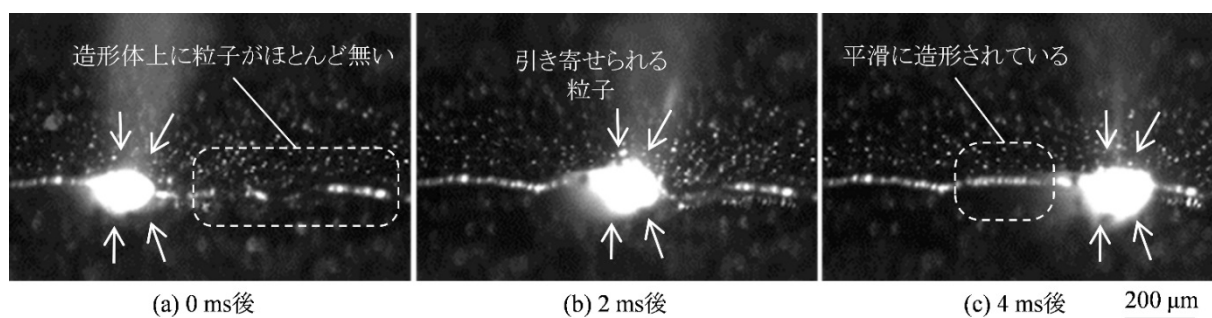


図 17 第 7 層における造形中の溶融プールおよび周囲の粉末の挙動

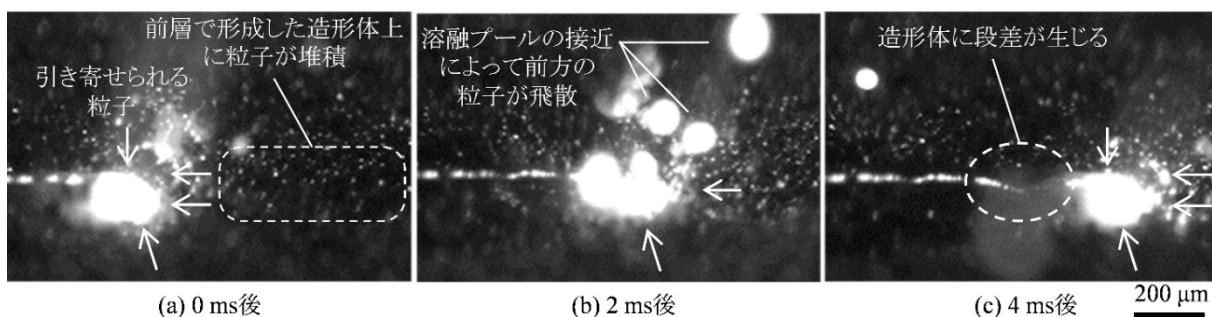


図 18 第 4 層における造形中の溶融プールおよび周囲の粉末の挙動

スとなる壁構造を造形した際の、各層表面におけるプロファイル(表面性状)に注目して詳細な評価を行った。

その結果、下層部では凹凸が大きいプロファイルを形成するが、層が増加するにつれて、これが緩和され、6 層を超えた辺りから平滑な表面性状が得られることが明らかとなった。これは、下層部と上層部で、造形体の表面性状と、供給された粉末の堆積状態が異なり、それによって、造形中の溶融プールと、造形の素となる周囲の粉末粒子の挙動に差異が生じるためだと考えられる。

さらに、本手法によって作られた壁構造は、直立した形で 0.4mm の高さまで造形することが確認でき、重力落下式供給法における造形の有効性が確認できた。

## 6. 参考文献

- 1) N. Moronuki: Surface Functions Brought by Surface Micro Structures, Morikita Publishing Co., Ltd., (2011) 32 (in Japanese).
- 2) K. Shimada, T. Hirai, M. Mizutani and T. Kuriyagawa: Fabrication of Functional Surface by Ultrasonic-assisted Cutting, Journal of Japan Society for Abrasive Technology, 62, 1, (2018) 39 (in Japanese).
- 3) 中嶋 英雄: ポーラス材料学 多孔質が創る新機能性材料, 内田老鶴圃, (2016) 235.
- 4) 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) 161.
- 5) H. Maehana et al: The Creation of Fine Structure by Laser Additive Manufacturing of Metal, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 62, 10, (2018) 527 (in Japanese).
- 6) K. Yamamoto: Biomaterials for Artificial Hip Joints, Medical View Co., Ltd., (2017) 126 (in Japanese).
- 7) M. Yoshinari: Materials of Dental Implant Q&A Volume1, Material, Ishiyaku Publishers, inc., (2017) 59 (in Japanese).
- 8) M. Zhang et al: Competing Influence of Porosity and Microstructure on the Fatigue Property of Laser Powder Bed Fusion Stainless Steel 316L, Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, (2017) 365.
- 9) I. Yadroitsev et al: Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders, Journal of Materials Processing Technology, 210, (2010) 1624.
- 10) GTV Verschleißschutz GmbH: Technical Description GTV Multi-jet Nozzle PN 6625, (2018).
- 11) 岡田 直忠: レーザメタルデポジション法の実際, 金属, 88, 10, (2018) 827.
- 12) H. Chen et al: Improving Additive Manufacturing Processability of Hard-to-process Overhanging Structure by Selective Laser Melting, Journal of Materials Processing Technology, 250, (2017) 99.
- 13) 千葉 晶彦: 電子ビーム積層造形(パウダーヘッド法)の実際, 金属, 88, 10, (2018) 818.
- 14) M. Manyalibo et al: Denudation of Metal Powder Layers in Laser Powder Bed Fusion Processes, Acta Materialia, 114, (2016) 33.
- 15) S. Ly, A. M. Rubenchik et al: Metal Vapor Micro-jet Controls Material Redistribution in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing, Scientific Reports, 7, 4085 (2017).