

# 金属積層造形品の表面粗さに及ぼすレーザー照射条件の影響

戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 飯野 潔

## Effect of Laser Irradiation Conditions to Surface Roughness of Metallic AM Products.

Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Kiyoshi IINO

### 抄 録

金属粉末を用いたAM造形技術において、造形条件が製作物の空隙や機械的性質、寸法精度に与える影響について多くの報告が見られる。しかし、金属AM造形物の表面粗さに関する研究報告はあまり見られない。そこで、本研究では、レーザー光を用いた粉末床溶融結合（LB-PBF）方式による金属AM造形物の表面粗さに及ぼすレーザー照射条件の影響を調べた。実験では、レーザーの集光径、走査速度、走査間隔、走査オフセット、走査経路を変えて試験片を積層造形し、その外形寸法と表面粗さを測定した。外形寸法計測の結果、レーザー照射による熱影響範囲を推定する実験式を明らかにした。表面粗さ測定の結果、造形物の表面粗さはレーザー照射による熱影響幅と輪郭走査経路の影響を受け、これらの条件を適切に選定することにより、造形表面の平均粗さを10 $\mu$ m以下で造形できることを明らかにした。

**キーワード**：金属3D造形，マルエージング鋼，表面粗さ，レーザー照射条件，輪郭走査経路

### Abstract

In metal AM technology, there are many reports on the effects of manufacturing conditions on the porosity, mechanical properties, and dimensional accuracy of products. However, there are few reports on the surface roughness of metal AM products. This study investigated the effect of laser irradiation conditions on the surface roughness of metal AM products in laser beam-powder bed fusion (LB-PBF). Specimens with different laser diameters, scanning speeds, scanning pitch, scanning path offsets, and scanning path strategies were prepared and measured the external dimensions and surface roughness. As a result of the external dimension measurement, the empirical formula for estimating the heat effect range due to laser irradiation was clarified. As a result of the surface roughness measurement, it was found that the surface roughness was affected by the thermal influence width of the laser and the outline scanning path. The average roughness of the product was 10  $\mu$ m or less by adjusting the laser scan conditions and the outline scanning path.

**KEY-WORDS** : Metal 3D-Printing, Maraging Steel, Surface Roughness, Conditions of Laser Irradiation, Outline Path

## 1. はじめに

金属AM（Additive Manufacturing）方式の一つである粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion, 以下「PBF」という）は、金属粉末を水平に敷き詰めた上面にレーザー光線あるいは電子線を選択的に照射して所用の断面形状を溶融固化し、これを積み重ねることで実体を製作する加工法である<sup>1,2)</sup>。レーザー光を用いるPBF造形では、レーザー集光径

を小さく絞り、高いエネルギー密度でレーザー照射することで、瞬時に材料を昇温し、金属粉末の溶解と既造形材との溶接を行う。このときの金属粉末下層の既造形材の溶融量は、レーザー照射による入熱量に依存するため、内部欠陥の少ない良好品質の造形物を製作するには、造形時のレーザー照射条件を造形金属材料の特質に合わせて適切に制御する必要がある。当场でも、これまでにいくつかの金属粉末材料を対象に造形試験を実施し、PBF造形におけるレーザー照射条件

事業名：連携協定活用型研究 ほか

課題名：積層造形技術の迅速性・複雑形状造形の優位性を活かしたCO<sub>2</sub>生成反応容器の最適設計に関する研究（H30～）

と造形物の金属組織や機械的性質との関係について知見を得た<sup>3~5)</sup>。

これからの金属AM応用展開として、航空宇宙関連分野における部品製作などへの利用が期待されている<sup>6)</sup>。航空宇宙関連の製品や部品に求められる機能としては、第一に軽量化が挙げられるが、流体を扱うことが想定される部品では造形物の表面粗度が重要な評価対象となる可能性が高い。

金属AM造形におけるレーザー照射条件が造形物の金属組織、機械的性質へ及ぼす影響に関する研究報告は多く見られるが、金属AM造形物の寸法精度や表面粗度に関する研究報告例は極めて少なく、金属AM造形物の表面粗さに関しては、積層造形法の特徴から理論的に考察した報告<sup>7)</sup>や内部構造の特定の部位に着目した報告例<sup>8)</sup>が見られるものの、造形物の外観表面性状に関して実際の造形試験に基づく報告例はみられない。

本報では、金属AM造形（PBF）法で製作した試料の寸法と表面粗さの計測結果から、レーザー照射条件が金属AM造形物の寸法精度、表面粗度へ及ぼす影響について調査したので報告する。

## 2. 金属AM造形における表面粗さ形成メカニズム

本研究の前提として、レーザー光によるPBF造形法における造形物製作過程とその表面粗さ形成メカニズムの考え方について概説する。

レーザー光によるPBF造形法では、造形層ごとに所定断面形状をハッチング走査で塗りつぶすようにレーザー光を照射した後、断面形状の輪郭に倣って単線レーザー光を照射して一層分の造形を終了する。ハッチング走査は、レーザー集光径と同等の走査間隔を設定し、所定の幅の中で折り返すようにレーザー光を照射するもので、最上層の金属粉末を面状に熔融・堆積していくプロセスに用いられる。通常、ハッチング走査の軌跡は矩形で構成されるので、断面形状の外周は、レーザー集光径あるいはハッチング走査間隔に従った矩形段

差を有する形状になっている。一般に造形物を製作するための各水平断面の輪郭形状は曲線が多いので、所望の造形物形状を得るために、この矩形段差を滑らかに補間する目的で造形断面形状の輪郭を単線レーザー照射するプロセスを追加する。

図1は、造形層ごとの本体ハッチング走査を終えた後、輪郭走査による造形状態を示す模式図である。図中の $\phi D$ は輪郭走査時のレーザー集光径、 $d$ は一層ごとの積み増し厚さ、 $c$ は造形物の設計形状に対する基準寸法となる境界と輪郭走査経路とのオフセット量、 $s$ は輪郭レーザー照射の熱影響によって形成される輪郭形成領域の厚さを示す。

輪郭端部にレーザー光を照射すると、その一部は既に所定断面のレーザー光ハッチング走査等で熔融・堆積処理を終えた部位（以下「既成層」という）と、もう一部は未熔融の金属粉末が敷かれている部位を加熱する。すなわち、輪郭レーザー照射によって投入された熱量は、既成層の再熔融と輪郭端部付近の金属粉末を熔融または半熔融した金属粉末の融着に消費される。このとき、既成層と金属粉末層とで見かけの熱容量や熱伝導率が異なり<sup>9)</sup>、既成層側よりも金属粉末層側の方が昇温し易い。図1に示す「熱影響を受ける粒子」の量や輪郭形成領域の厚さは、輪郭走査におけるレーザー光照射熱量の大小と、輪郭走査パスの既成層端部との位置関係により変化する。最外殻の未熔融金属粉末がその形状を保ったまま融着すると、造形物の表面粗さをより粗くすることが推定される。すなわち、造形物最外殻形成時の輪郭レーザー照射において、半熔融融着する金属粉末の量を減らすことにより造形物表面粗さの改善効果が期待できると考える。

以上の仮説を踏まえ、レーザーPBF造形におけるレーザー照射条件が造形物の表面粗さに及ぼす影響を調べる実験を行った。

## 3. 実験方法

試験片は、(株)松浦機械製作所製金属粉末光造形複合加工装置（図2、LUMEX Avance-25）により、金属粉末材料にマルチージェング鋼粉末（粒径30~50 $\mu$ m）を使用して製作した。

試験片の形状・寸法は、図3に示すように、外形寸法を10mm $\times$ 20mm、肉厚3mmの口の字矩形形状とした。試験片の造形は、125 $\times$ 125 $\times$ t20mmの鋼製基板（ベースプレート）上に、最初の1mmの高さまでを後で切り離すためのサポート部とし、その上方向に12mmの高さで積層造形した。積層造形一層当たりの高さを0.05mmとし、各層の断面をレーザーハッチング照射した後、図4の輪郭パス#1で示すように設計矩形寸法の外側全周に $c = 0 \sim 0.06$ mm オフセットした走査経路を設定して単線レーザー照射を行った。また、試験片の下方約半分に対応する6.25mmの高さまでは、図4の輪郭パス#2で示すように、輪郭パス#1のさらに外側に所定の距離だけオフセットした走査経路を設定して再度単線レーザー

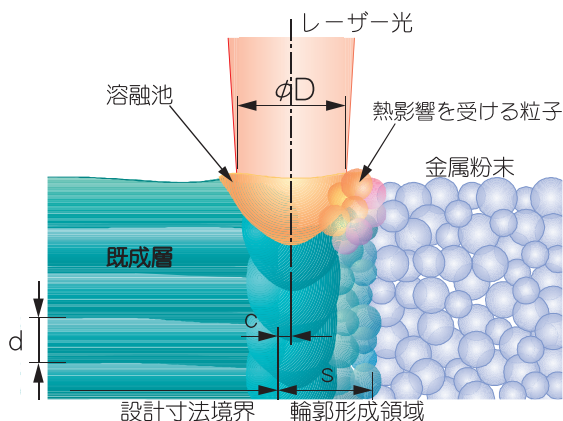


図1 造形表面粗さ形成メカニズムの模式図

照射を行った。輪郭パス#2の設計寸法からのオフセット量は、試験片の手前長辺（以下「-Y面」という）から右辺にかけて図4のaで示す間隔を空けた経路と、奥手長辺（以下「+Y面」という）から左辺にかけて同図bで示す間隔を空けた経路とを設定した。

試験片の造形は、図5に示すように、横4個×縦4列を等間隔に配列し、金属粉末材料を上面に敷き詰める操作（リコート）の際、試験片上面角辺へのリコーターブレードの衝突を緩和させるために、粉末のリコート方向に対して、長手方向を右回りに30°傾けて配置した。各試験片には、便宜上、図5の座標系に対して「#yx」の様式で試料番号を付与した。

各試験片の造形に用いたレーザー照射条件を表1に示す。レーザー出力 $P$ は、試験片本体造形、輪郭照射ともに160Wとした。試験片本体の造形に関するレーザー照射条件は、レーザー集光径 $D$ を0.15~0.30mmに変化させ、これに合わせてレーザーハッチング走査間隔 $e$ を調整した。レーザー光走査速度 $v$ は、次式で計算されるレーザー光与熱密度 $q$ が概ね $5 \text{ J/mm}^2$ になるように設定した。

$$q = \frac{P}{ev} \quad (\text{式1})$$

輪郭パス#1のレーザー照射条件は、レーザー集光径 $D_1$ を試験片本体造形と同じ条件とし、レーザー走査速度 $v$ は、次式で計算される単線レーザー光与熱密度 $q_s$ が概ね $4 \text{ J/mm}^2$ となるように設定した。

$$q_s = \frac{P}{vD} \quad (\text{式2})$$

輪郭パス#2のレーザー照射条件は、レーザー集光径 $D_2$ を輪郭パス#1照射径の3分の2とし、レーザー走査速度 $v$ は、単線レーザー光与熱密度（式2） $q_s$ が概ね $2.5 \text{ J/mm}^2$ となるように設定した。

図4のa, bで示した輪郭パス#2の本体造形輪郭からのオフセット量は、同図cで示す輪郭パス#1のオフセット量と輪郭レーザー集光径とを考慮して表1に示す数値を設定した。

造形した試験片の表面粗さの測定は、(株)ミットヨ製表面粗さ計（SV-648型）を用い、-Y面と+Y面について輪郭パス#1のみのレーザー照射で積層造形した試験片の上半分の面（以下「上部位面」という）と、輪郭パス#2のレーザー照射を追加して造形した試験片の下半分の面（以下「下部位面」という）に対してそれぞれ3回の粗さ測定を行い、最大粗さ $R_z$ 、平均粗さ $R_a$ の平均値を求めた。

試験片表面粗さの測定に先立って、輪郭走査のレーザー照射条件と輪郭形成領域厚さとの関係を知るため、試験片の寸法計測を行った。試験片寸法の測定は、各試験片の上部位面と下部位面に対して試験片長辺方向と短辺方向の外形幅をマイクロメータでそれぞれに対して3回計測し、その平均値を求めた。



図2 金属粉末積層造形装置の外観  
(株)松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25)

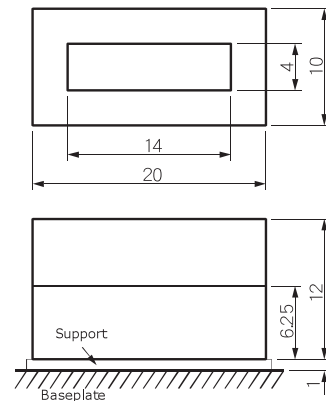


図3 試験片造形寸法

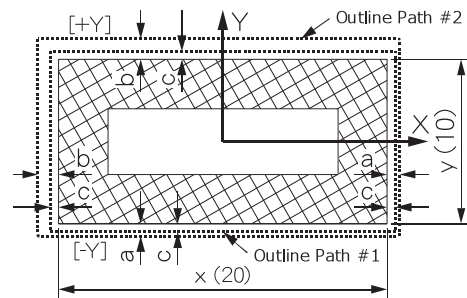


図4 輪郭レーザー照射パス

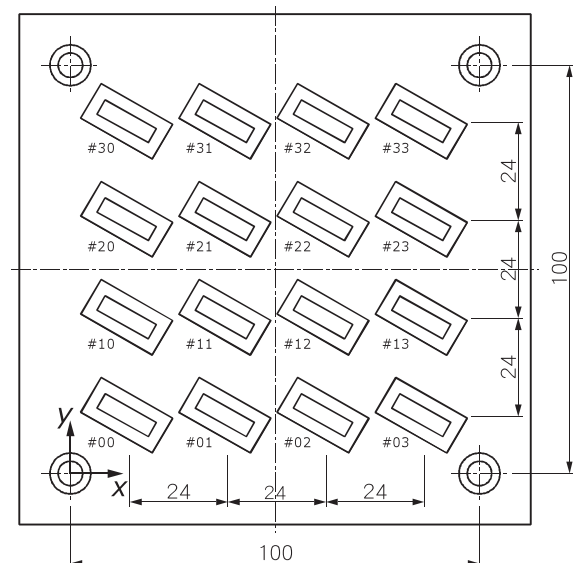


図5 試験片造形配置図

表 1 試験片造形に用いたレーザー照射条件

試料番号	試験片本体造形				輪郭パス#1			輪郭パス#2			
	出力 P[W]	集光径 D[mm]	走査速度 v[mm/s]	走査間隔 e[mm]	集光径 D <sub>1</sub> [mm]	走査速度 v <sub>1</sub> [mm/s]	オフセット c [mm]	集光径 D <sub>2</sub> [mm]	走査速度 v <sub>2</sub> [mm/s]	オフセット a [mm]	オフセット b [mm]
#00	160	0.30	128	0.25	0.30	133	0.00	0.20	320	0.05	0.08
#01							0.02			0.12	0.15
#02							0.04			0.19	0.22
#03							0.06			0.26	0.29
#10		0.24	160	0.20	0.24	167	0.00	0.16	400	0.04	0.06
#11							0.02			0.10	0.12
#12							0.04			0.16	0.18
#13							0.06			0.22	0.24
#20		0.18	213	0.15	0.18	222	0.00	0.12	533	0.03	0.05
#21							0.02			0.08	0.10
#22							0.04			0.13	0.15
#23							0.06			0.18	0.20
#30		0.15	320	0.10	0.15	267	0.00	0.10	640	0.02	0.03
#31							0.02			0.06	0.07
#32							0.04			0.10	0.11
#33							0.06			0.14	0.15

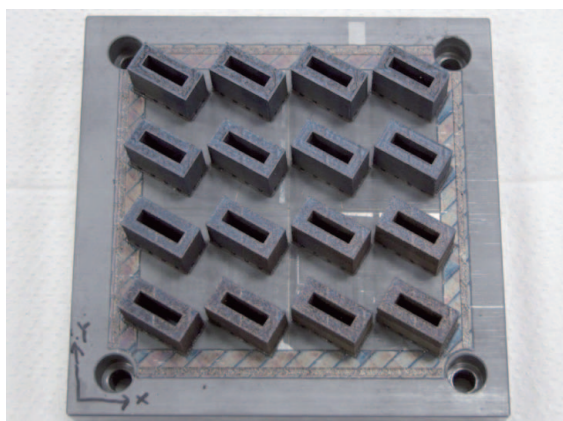


図 6 造形試験片の外観

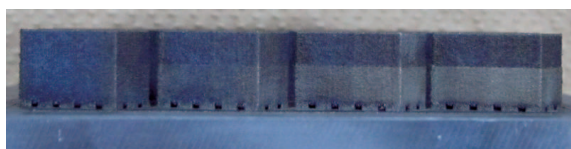


図 7 造形試験片の側面写真

表 2 試験片の外形寸法測定結果

試料番号	輪郭パス#1		輪郭パス#2	
	短辺[mm]	長辺[mm]	短辺[mm]	長辺[mm]
#00	10.517	20.466	10.575	20.505
#01	10.653	20.711	10.706	20.692
#02	10.724	20.759	10.863	20.876
#03	10.738	20.682	10.795	20.919
#10	10.459	20.413	10.489	20.377
#11	10.568	20.532	10.557	20.634
#12	10.608	20.587	10.603	20.773
#13	10.663	20.748	10.697	20.684
#20	10.276	20.268	10.293	20.367
#21	10.415	20.517	10.404	20.399
#22	10.475	20.558	10.499	20.489
#23	10.542	20.480	10.584	20.534
#30	10.269	20.245	10.289	20.264
#31	10.344	20.348	10.343	20.376
#32	10.395	20.384	10.440	20.456
#33	10.436	20.455	10.504	20.604

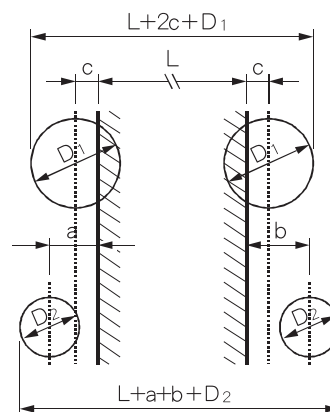


図 8 レーザー集光径・輪郭パスと造形寸法の関係

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 試験片外形寸法計測とレーザー照射条件の影響

レーザー照射条件を変えて製作した試験片の外観を図 6 に示す。また、図 7 に試料番号 #0x 側から見た側面の外観を示す。この写真で各試験片中断に上下に領域を分ける線が見えるが、これは輪郭走査条件の違いによる上部位面と下部位面の分岐線である。

試験片を鋼製基板から切り離した後、各試験片の上部位面と下部位面のそれぞれに対して長辺と短辺の外形寸法を測定した。計測結果を表 2 に示す。

試験片の外形寸法計測面は、積層断面を鉛直方向に積み上げて形成した面であるから、その外形寸法は積層断面の最外

周輪郭レーザー照射経路と単線レーザー照射による輪郭形成領域の厚さで決定される。寸法測定における両端面の輪郭走査経路間の距離とレーザー集光径とから推測される外形寸法は、レーザー集光径とその照射によって溶融・溶着する線幅

が等しいと仮定した場合、上部位面の外形寸法 $M_1$ と下部位面の外形寸法 $M_2$ は、図8に示すように、基準寸法 $L$ 、輪郭パス#1のオフセット量 $c$ 、輪郭パス#2のオフセット量 $a, b$ 、レーザー集光径 $D_1, D_2$ から、それぞれ、

$$M_1 = L + 2c + D_1 \quad (式3)$$

$$M_2 = L + a + b + D_2 \quad (式4)$$

として計算できる。

本試験では、表1に示した実験条件により、上部位面の最外周のオフセット量は、図5で示した試験片配列のX方向の向き（試料番号の1桁目の数値）にしたがって大きくし、下部位面の最外周のオフセット量は各段の比較において試験片配列のY方向の向き（試料番号の2桁目の数値）にしたがって相対的に小さくした。一方、輪郭走査のレーザー集光径は、試験片配列のY方向の向きにしたがって小さくなるように設定した。外形寸法の実測値は、これら造形条件の違いで予測される寸法変化傾向と一致した。

試験片の外形寸法計測値を分析したところ、造形条件と外形寸法実測値の関係性について、長辺(x方向)、短辺(y方向)で傾向が大きく異なることを確認したので、寸法計測面の広い試験片短辺幅( $L=10\text{mm}$ )の計測値について以下の考察を進める。

前出の式3、式4で算出した試験片の外形寸法推測値（以下「理論寸法」という） $y_t$ と、試験片Y方向の外形寸法実

測値 $y_e$ を比較すると、いずれの計測においても理論寸法より実測値の方が大きくなった。実験に使用した造形装置のレーザー集光径の値は、アルマイト処理後黒色に着色したアルミニウム板表面に、出力160W、走査速度1,500mm/sでレーザー光を照射し、その溶融幅の実測値に基づいて設定する。これに対し、実験には熱特性の異なる鋼材を用いたこと、レーザー照射のエネルギー密度が異なることにより、実験条件に設定したレーザー集光径の値よりも造形時の溶融造形線幅が大きくなったと推定する。

理論寸法と実測値の差分を分析すると、上部位面、下部位面いずれについても、造形時のレーザー集光径が大きいほど寸法実測値と理論寸法との乖離が大きくなる傾向が認められた。これは、レーザー集光径が輪郭形成領域の厚さに強く影響していると考えられたので、最外周の輪郭パス幅に対する寸法実測値 $y_e$ の増分 $\Delta y$ を以下の式で求め、輪郭照射レーザー集光径との関係を図9のグラフに整理した。

$$\text{上部位面； } \Delta y = y_e - (L + 2c) \quad (式5)$$

$$\text{下部位面； } \Delta y = y_e - (L + a + b) \quad (式6)$$

輪郭パス#1、輪郭パス#2ともにレーザー集光径 $D$ と $\Delta y$ との間に比例関係が認められ、それぞれの比例定数は、輪郭パス#1で $k_1=2.019$ 、輪郭パス#2で $k_2=1.839$ であった。これらは試験片の外形を造形する際に、装置が定義するレーザー集光径に対して、マルエージング鋼に所定の熱エネルギーを与えた場合に用いるべき補正係数 $k_1, k_2$ とみることができるので、式3、式4の集光径 $D_1, D_2$ にこれらの係数を掛けて補正した理論寸法 $y_a$ と実測寸法 $y_e$ の関係をプロットすると、図10に示すように、実測値との乖離は小さくなった。これにより、輪郭走査のレーザー照射条件による輪郭形成領域の厚さを推定する手がかりを得た。

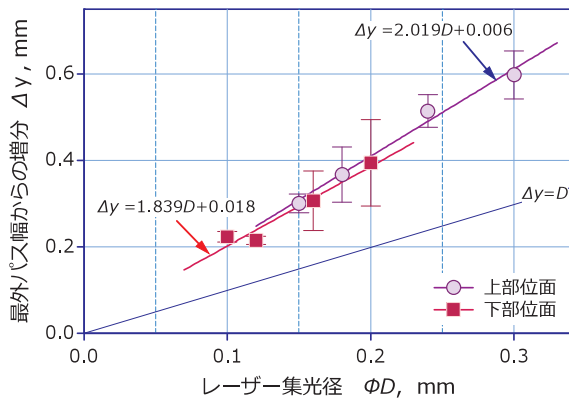


図9 パス幅に対する寸法増分とレーザー集光径との関係

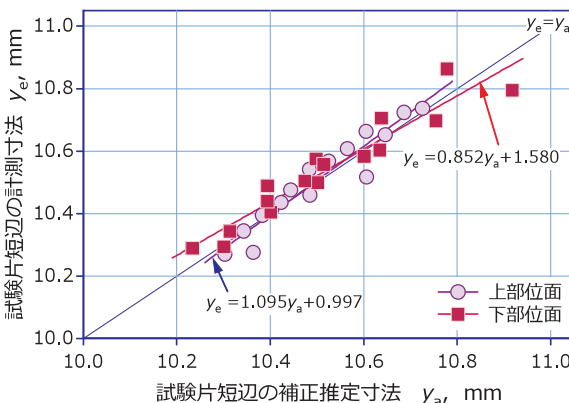


図10 集光径を補正した寸法推定理論値との比較

#### 4.2 試験片表面粗さ計測とレーザー照射条件の影響

レーザー照射条件を変えて積層造形した試験片の上部位面と下部位面の表面粗さを、それぞれ-Y面、+Y面に対して計測した結果を表3に示す。平均粗さ $R_a$ と最大粗さ $R_z$ の計測値の間に強い相関関係（比例定数6.936、相関係数 $R=0.951$ ）が認められたので、以下、実質的な造形物表面の滑らかさを表す平均粗さ $R_a$ について考察を進めることとする。

表面粗さは、輪郭走査のレーザー集光径を小さく絞るほど表面粗さが小さくなる傾向が認められる。さらに測定結果を注視すると、表面粗さの数値が-Y面と+Y面で変化傾向が分かっているようなので、測定面の-Y面と+Y面で層別し、輪郭照射レーザー集光径ごとに平均粗さ測定値の平均とばらつき（標準偏差）を整理した（図11）。特に輪郭レーザー集光径を大きく設定した試料番号#0x、#1xの試験片において、上部位面、下部位面ともに-Y面の方が集光径の大きさに応じて表面粗さが明確に粗くなっていることが判

表3 試験片の表面粗さ測定結果

計測部位		輪郭パス#1		輪郭パス#2	
試験片	測定面	Ra[μm]	Rz[μm]	Ra[μm]	Rz[μm]
#00	-Y面	20.91	160.47	27.64	187.44
	+Y面	18.02	127.77	17.23	138.57
#01	-Y面	28.01	173.38	25.49	162.54
	+Y面	21.31	165.07	16.12	132.97
#02	-Y面	31.80	203.51	16.83	118.35
	+Y面	26.49	177.18	14.73	100.47
#03	-Y面	33.87	213.04	24.01	173.25
	+Y面	23.67	166.56	12.16	79.39
#10	-Y面	20.50	157.46	20.35	124.61
	+Y面	13.93	105.36	13.05	102.28
#11	-Y面	22.51	176.15	18.15	127.80
	+Y面	18.09	120.86	11.84	87.02
#12	-Y面	27.11	167.17	9.91	83.15
	+Y面	20.02	141.66	9.47	76.39
#13	-Y面	29.59	168.41	8.68	86.01
	+Y面	20.86	133.85	7.94	62.83
#20	-Y面	9.27	73.10	12.60	84.61
	+Y面	9.60	76.90	11.38	84.25
#21	-Y面	9.45	68.48	10.21	86.76
	+Y面	10.42	75.16	11.29	77.02
#22	-Y面	10.95	108.00	9.42	75.55
	+Y面	11.60	90.87	9.89	71.45
#23	-Y面	9.01	74.64	8.81	75.02
	+Y面	9.05	74.64	6.88	50.58
#30	-Y面	7.35	58.40	7.41	55.55
	+Y面	8.72	69.87	11.10	80.93
#31	-Y面	8.08	63.90	6.92	54.47
	+Y面	7.58	61.97	9.34	76.48
#32	-Y面	8.26	63.65	8.57	82.29
	+Y面	8.56	66.73	11.66	79.90
#33	-Y面	7.49	60.54	9.48	70.01
	+Y面	6.78	58.56	8.76	68.54

た。この原因を精査するため、-Y面と+Y面とで輪郭走査パスのオフセットが等しい条件とした上部位面について、輪郭パス#1のオフセットと表面粗さの関係を整理した(図12)。特にレーザー集光径の大きい試料番号#0x, #1xにおいて、オフセット量の増大とともに表面粗さが大きくなる傾向が認められた。これは、前出の図1の模式図で想定した造形物の表面粗さ形成メカニズムにおいて、輪郭オフセットが大きくなるにつれて輪郭レーザー照射時の熱投入量が既成層よりも金属粉末側に多くなることによって表面粗さが大きくなるという仮説に沿った結果である。

図11, 図12に示す試料番号#0x, #1xの上部位面表面粗さの比較において、-Y面の方が+Y面より粗くなった原因の一つとして試験片の配置条件の影響が考えられる。試験片の作製では鋼製基板の中心をレーザー光制御系中心位置に合わせて設置した。実験に使用した装置は鋼製基板表面から上に約700mmの位置にレーザー制御用のミラーが設けられ、これを中心にレーザー光の照射位置を制御する。図5に示したとおり、試料番号#0x, #1xの試験片製作時のY軸方向配置はレーザー照射中心から離れているため、レーザー照射の角度は、Y軸方向成分について試料番号#0xで約 $2.94 \pm 0.41^\circ$ ,

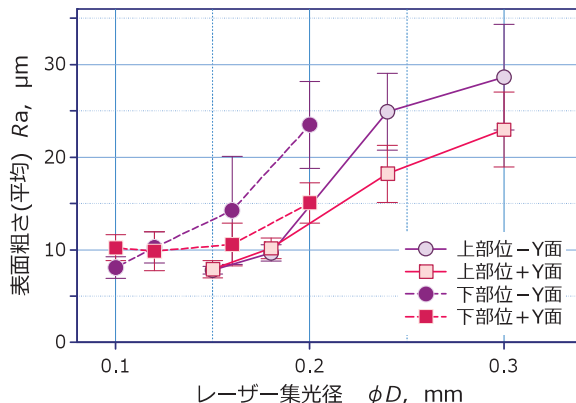


図11 輪郭造形のレーザー集光径と平均粗さとの関係

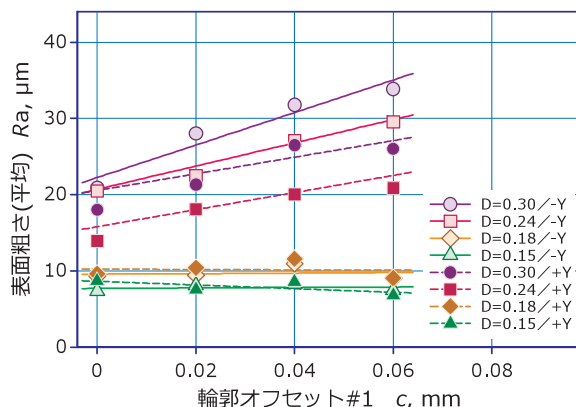


図12 輪郭パスのオフセット量と平均粗さとの関係

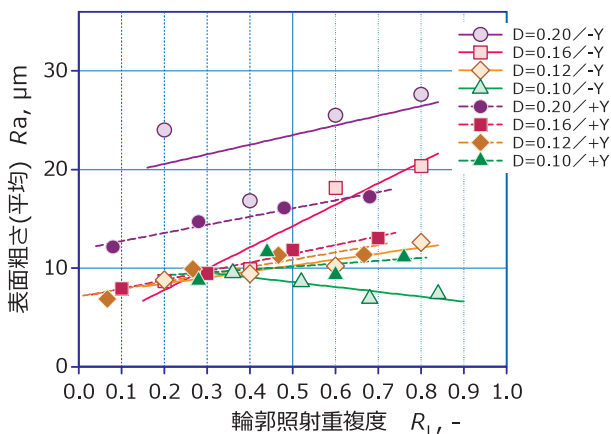


図13 試験片表面の平均粗さと最大粗さとの相関関係

試料番号#1xで約 $0.98 \pm 0.41^\circ$ の振幅が存在する。この振幅に加えて、-Y面は造形本体から金属粉末の向きに、+Y面は逆に金属粉末から造形本体の向きにレーザー光が照射されることになる。このレーザー照射条件の違いで金属粉末面への熱投入量が変化することにより、+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが大きくなったと考える。

試験配置が鋼製基板中心より+Yの向きに配置された試料番号#2x, #3xについては、レーザー照射の振れ角が試料番号#0x, #1xとは逆になるので、+Y面表面粗さより-Y

面表面粗さが小さくなる想定となるが、実験条件でレーザー集光径を小さく設定したことから、顕著な差異は認められなかった。

一方、下部位面は、輪郭造形におけるレーザー走査経路の位置関係が上部位面に比べてかなり複雑であるから、輪郭パス#1と輪郭パス#2との熱影響幅重複度に着目し、輪郭パス照射のレーザー集光径  $D_1$ 、 $D_2$  輪郭パス#1と輪郭パス#2とのオフセット量差分  $\Delta c$  により、レーザー照射範囲の重複度を以下の式で定義し、これと表面粗さとの関係を図13に整理した。

$$R_1 = \frac{D_1 + D_2 - 2\Delta c}{D_1 + D_2} \quad (\text{式7})$$

下部位面の表面粗さも輪郭照射時のレーザー集光径の影響を強く受けることに加えて、造形時の試験片配置条件により、試料番号#0x、#1xでは相対的に+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが大きくなった。特に、輪郭造形時のレーザー集光径  $D_2 = 0.1\text{mm}$  とした試料番号#3xの試験片では、+Y面表面粗さより-Y面表面粗さが小さくなったことは、前述のレーザー照射振れ角の違いで説明できる。

輪郭照射時のレーザー集光径について、いずれの試験条件においても、重複度が大きくなるにしたがって表面粗さが大きくなる傾向が認められ、輪郭照射時のレーザー集光径を大きく設定した場合は、輪郭パス#1と輪郭パス#2との間に集光径の10~20%を重複させる程度の距離を設けることで表面粗さを小さくする効果が得られるということがわかった。ただし、レーザー集光径を最も絞った試料番号#3xの-Y面のみは例外で、輪郭パス#1と輪郭パス#2を近づけた方が表面粗さは小さくなった。試料番号#3xの-Y面は、レーザー照射中心側を向いており、レーザー照射の振れ角の影響が強く影響したものと考える。

以上の実験結果から、マルエージング鋼による造形におい

て、集光径を0.15 mm以下に絞り、造形物の輪郭に対して0.02~0.06 mm程度の適当なオフセット間隔を設定し、 $2.5\text{J}/\text{mm}^2$ の与熱量で輪郭レーザー照射を行うことにより、造形試料表面の平均粗さを $10\mu\text{m}$ 以下にすることができた。

図14に代表的な試験片表面のSEM写真を示す。図14-a)は表面粗さが大きく計測された試料番号#03-Y面の上下部位の表面状態、図14-b)は表面粗さが小さく計測された試料番号#30-Y面の上下部位の表面状態を撮影したものである。表面粗さが小さく計測された試料番号#30の-Y面では、原料粉末の粒径 $20\sim 40\mu\text{m}$ の粒が試料表面に多く付着しているのが観察されるのに対して、表面粗さが大きく計測された試料番号#03の-Y面では、原料粉末粒径の粒のほかに粉末どうしが融着して生成されたと思われる $50\sim 100\mu\text{m}$ の大きな粒も散見される。このことは、輪郭照射の熱投入量や既成層端部と輪郭走査パスの位置関係による輪郭形成領域の厚さの違いから推測して、輪郭レーザー照射条件の違いが造形物表面の金属粉末の溶融状態に影響し、各層断面の輪郭造形時の金属粉末面への熱影響範囲が広いほど完全に溶融しない金属原料粉末が造形物表面に多く溶着して表面粗さを形成すると当初の仮説を裏付ける結果となった。

## 5. まとめ

金属AM法の一つであるレーザーPBF方式による積層造形物表面の粗さについて、その形成メカニズムの仮説に基づいて、輪郭照射におけるレーザー集光径とレーザー光走査経路の条件の違いに着目し、これらの造形物表面粗さへの影響を調べた。

実験の結果から、金属粉末積層造形物の表面粗さは、輪郭レーザー照射におけるレーザー集光径、輪郭走査経路のオフセット設計の影響に加えて、造形時の配置に伴うレーザー照射角度の影響を受けることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 山口修一ほか：「産業用3Dプリンターの最新技術・材料・応用事例」, シーエムシー出版 (2015.5)
- 2) 前田寿彦：「レーザー焼結型AMシステムのマニュファクチャリングへの活用について」, 素形材 Vol.53 No.2 (2012)
- 3) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形における製造品質に及ぼす熱線照射条件の影響」, 日本 Casting 工学会第165回全国講演大会 (2014.10)
- 4) 戸羽篤也・平野繁樹：「金属粉末積層造形による多孔質金属材料の熱伝導率に及ぼす空隙率の影響」, 日本機械学会2014年度年次大会 (2014.9)
- 5) 戸羽篤也・鈴木逸人・平野繁樹, 長船康裕, 葛西勝明・

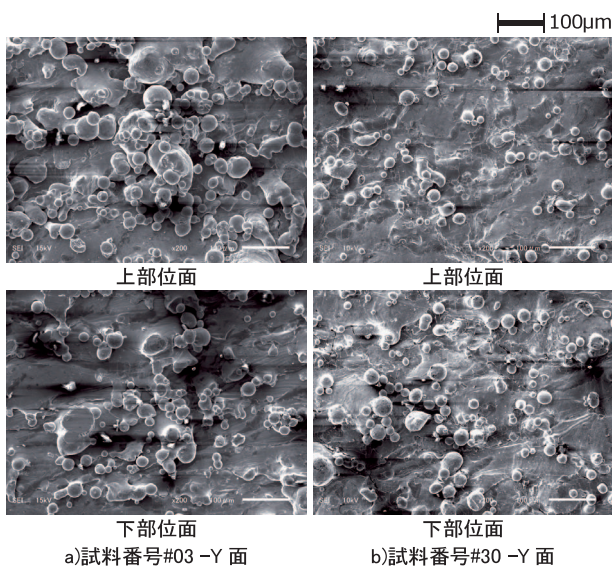


図14 代表的な試験片表面のSEM写真

葛西健央：「3D積層造形法で製作したマルエージング鋼材の金属組織」，北海道立総合研究機構工業試験場報告No.316，pp.69～76（2017.8）

- 6) 池田博英・升岡 正「宇宙開発における金属Additive Manufacturing技術の活用」，精密工学会誌Vol.82 No.7，pp.639～642（2016）
- 7) 榎原弘之「日本におけるAdditive Manufacturingの概要とこれからの課題」，計測と制御Vol.54，No.6，pp.381～385（2015）
- 8) 寺澤章裕ら「金属積層造形物の総計条件が造形物アンダーカット部表面粗さに及ぼす影響」，2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集G65，pp.511～512（2019）
- 9) 池庄司敏孝「レーザ積層造形における溶融・凝固現象」，スマートプロセス学会誌 Vol.6，No.3，pp.109～114（2017.5）