

# 金属 3D プリント造形物の高品質化に関する研究（第 3 報）

寺澤章裕・鈴木大介・萩原義人・米山陽・坂本智明・古屋雅章・八代浩二  
緑川哲史\*1・田中隆三\*1・岩尾翔太\*1・市村誠\*1

## Study on Quality Improvement of Metal Powder Bed Fusion Models (3rd Report)

Akihiro TERASAWA, Daisuke SUZUKI, Yoshihito HAGIHARA, Akira YONEYAMA, Chiaki SAKAMOTO,  
Masaaki FURUYA, Koji YATSUSHIRO,  
Tetsushi MIDORIKAWA\*1, Ryuzo TANAKA\*1, Shota IWAO\*1 and Makoto ICHIMURA\*1

### 要 約

金属積層造形は、高強度の材料で自由度が高い製品が造形できることから、航空・医療など様々な分野で注目を集めている。これらの分野では、高品質な造形品が要求されることが多いが、金属積層造形では、金属材料の熔融と積層の繰り返しによって造形をするため、表面粗さの悪化や形状の崩れ、造形時に発生する応力に起因する変形等の問題が生じており、造形物の高品質化のためには、これらの問題解決が早急に求められている。しかし、金属積層造形は、新たな製造技術で、造形パラメータが多い一方で、公開されている造形パラメータに関する情報が少ないのも現状である。そこで、第 1 報及び第 2 報では、造形物の高品質化を目的として、造形条件と造形物の表面粗さ・残留応力との関係性を調査した。本報では、レーザー照射条件と内部空隙の関係について調査を行い、造形物アンダーカット面近傍のみをレーザー走査速度を高速にして造形することで、アンダーカット面の表面粗さの改善と、内部空隙の少ない造形方法を実現することができた。

### 1. 緒 言

3D モデルデータから立体的な部材を製造するために材料を結合させる AM (Additive Manufacturing: 付加製造) 技術は近年急速な技術進展を遂げるとともに、大きな注目が寄せられている。なかでも、金属を原料とする積層造形技術は、切削や鋳造に代表される従来の加工技術では実現できない内部構造を有するような製品や、トポロジー最適化手法により、最適化されたような構造体を造形することが可能であることから、航空機部品や医療分野など様々な分野において活用が期待されている<sup>1)</sup>。

金属積層造形技術には、(1) 金属ワイヤーや粉末の造形用材料を供給しながら高エネルギービームやプラズママークを照射し造形を行う指向性エネルギー堆積法 (DED: Directed Energy Deposition)、(2) 造形プラットフォームと呼ばれる平らな金属板の上に金属粉末を敷き詰めた層 (粉末床) に、造形物の 2 次元スライスデータに沿ってレーザーまたは電子ビームを照射することで金属粉末を熔融させ、1 層分の造形が終了すると造形プラットフォームを 1 層分下降させ、再び熔融を繰り返すことで造形を行う粉末床熔融結合法 (PBF: Powder Bed

Fusion) がある。現在の主流となっているのは、PBF 方式でレーザーを熱源とする方式である<sup>2)</sup>。

いずれの手法においても、金属原料に高エネルギーを導入し、非常に短時間での熔融、凝固 (焼結) 過程を繰り返し積層していくため、積層ピッチや余剰硬化による表面粗さの悪化、また造形時に発生する応力によって造形物の変形等が生じるなど、高品質な造形を行う際の課題となっている。

前報までにおいて、余剰硬化に起因する凸状付着物がアンダーカット面下部に付着することで、アンダーカット面の表面粗さが悪化することを確認し<sup>3)</sup>、その解決方法として、造形時のレーザーエネルギーを抑制 (レーザー走査速度を高速に) することで、余剰硬化が低減されてアンダーカット面の表面粗さが改善されることを確認した<sup>4)</sup>。また、レーザーエネルギーを抑制することで、応力に関しても低減できることが確認できている<sup>4)</sup>。

本報においては、レーザーエネルギーを抑制することで懸念される内部空隙に関する評価を実施し、アンダーカット面の表面粗さとの関係性について調査を行った。また、その結果を踏まえて、アンダーカット面近傍のみを抑制したレーザーエネルギーで造形する手法を提案し、アンダーカット面の表面粗さの低減を試みた。

\*1 株式会社松浦機械製作所

## 2. 実験方法

### 2-1 内部空隙の評価

アンダーカット面を有する金属積層造形物について、造形条件の違いによる造形物の内部空隙の発生状況について調査を行った。造形物は造形後、ベースプレートから切断して、熱硬化性樹脂に埋め込み、断面研磨を行い観察用試料とした。また、観察には測定顕微鏡（株）ミツトヨ MF-B2010D）を使用した。

図1に観察対象とした造形物の概略図を示す。造形物は、9 mm 角の角柱の上部にアンダーカット面を有する形状とした。また、アンダーカット面の造形角度は、図に示すように、ベースプレートの法線とアンダーカット面のなす角度（以降、造形角度と呼称）で定義することとし、造形角度  $60^\circ$  の造形物を造形し、評価した。

表1に造形物造形条件を示す。造形機は、（株）松浦機械製作所の LUMEX Avance-25 を用い、造形材料は、SUS316L を使用した。ここで、レーザの走査パターンは、2次元スライスデータ内部を5 mm 幅の帯状に分割して塗りつぶす走査（Raster scan）の後、2次元スライスデータの輪郭をなぞる走査（Vector scan）を造形層ごとに行う方式とし、表1に示す4条件で造形を行った。

### 2-2 内部空隙を考慮したアンダーカット面の表面粗さの改善

#### (1) 造形実験

造形物の内部空隙が少なく、かつアンダーカット面の表面粗さの改善が期待できる造形方法として、造形物内部は空隙の発生が少ない推奨のレーザ走査条件で、アンダーカット面近傍はレーザエネルギーを抑制する（高速のレーザ走査）条件により造形を行った。

図2に造形物の断面概略図を示す。造形物の造形角度は、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  の3水準を選定した。そして、図に示すように、造形物をアンダーカット面近傍の表面層部分と、造形物内部の二つの領域に分割して、それぞれに造形条件を割り当てることにした。アンダーカット面近傍はレーザ走査速度  $1400 \text{ mm/sec}$  で、その他の部分は  $700 \text{ mm/sec}$  の造形条件を割り当てた。また、アンダーカット面近傍の領域は、アンダーカット面の法線方向に  $0.4 \text{ mm}$  から  $2.0 \text{ mm}$  まで  $0.4 \text{ mm}$  ごとに5種類の表面層厚みを有する造形物を造形した。なお、その他の造形条件は、2-1と同様である。

#### (2) アンダーカット面の表面粗さ測定

造形終了後、造形物をベースプレートから切断し、表面粗さ測定を行った。表面粗さ測定には、表面粗さ輪廓形状測定機（株）小坂研究所 Surfcoorder DSF1000型）を用いて、カットオフ値  $2.5 \text{ mm}$ 、評価長さ  $5 \text{ mm}$  として、アンダーカット面を積層方向に3箇所（面中央

付近と両端付近）トレースし、算術平均粗さ（Ra）及び最大高さ粗さ（Rz）の平均値を算出した。

## 3. 結果および考察

### 3-1 内部空隙の評価

いずれの造形物も大きな形状の崩れなどを生じることなく造形することができた。図3に造形物をベースプレートから切断した後、熱硬化性樹脂に埋め込み、研磨して作製した観察用試料を示す。

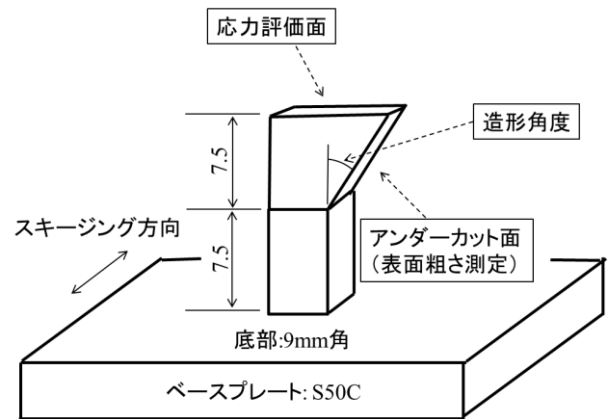


図1 造形物概略図

表1 内部空隙評価用造形物の造形条件

アンダーカット角度 (deg)	60			
金属粉末材料	SUS316L			
レーザスポット径(mm)	0.2			
レーザパワー(W)	320			
走査ピッチ(mm)	0.12			
積層ピッチ(mm)	0.05			
Raster scan 速度 (mm/sec)	700	900	1100	1400
Vector scan 速度 (mm/sec)	1400	1800	2200	2800

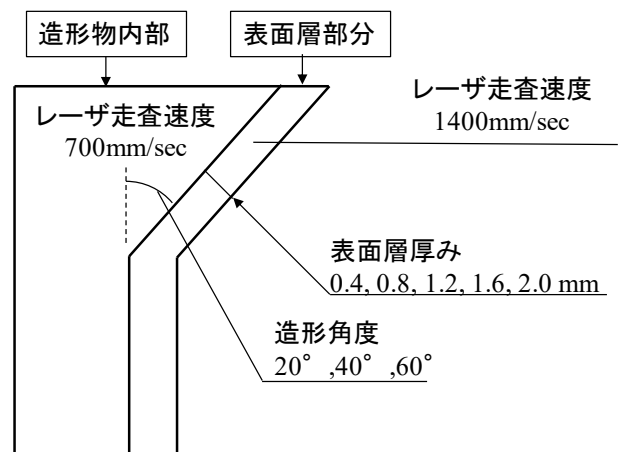


図2 造形物断面概略図（側面図）

図4にレーザ走査速度ごとの各観察用試料の測定顕微鏡観察結果を示す。観察はアンダーカット面近傍と、アンダーカット面から離れた造形物内部の2箇所について実施した。観察写真中の黒い斑点が空隙を示しているが、造形物内部の観察では、レーザ走査速度が高速になるに従って、空隙も多くなっていることが確認できる。一方で、アンダーカット面近傍は、レーザ走査速度が高速になっても空隙の発生が少ない傾向が確認できた。

空隙の発生要因としては、通常金属積層造形では、造形物上部にレーザによって投入された熔融金属の熱量は、主に熔融層下部の造形物を通してベースプレートに伝達されることで、熔融金属が冷却され、凝固して形状が形成されるが、造形時に投入されるレーザエネルギーが不足すると、金属材料の熔融が不十分な領域が生じて、その結果空隙が発生すると考えられる。その反面、アンダーカット面近傍では、熔融層下部が、熱伝導率が悪い粉体材料であるため、熱量が蓄積されやすく、弱いレーザエネルギー（高速なレーザ走査速度）においても、金属材料を熔融するのに足りる熱量を与えることが可能となり、空隙が少ない造形が行えたものと推測できる。

### 3-2 内部空隙を考慮したアンダーカット面表面粗さの改善

いずれの造形物も大きな形状の崩れなどを生じることなく造形することができた。その後、造形物をベースプレートから切断し、アンダーカット面の表面粗さ測定を行った。

図5にアンダーカット面の表面層厚みと Ra の関係を、図6にアンダーカット面の表面層厚みと Rz の関係を示す。横軸は、アンダーカット面の表面層厚みを、縦軸は、表面粗さの値を造形角度毎に示している。造形角度が  $20^\circ$ 、 $40^\circ$  の造形物では、アンダーカット面の表面層厚みが  $0.4\text{ mm}$  から  $2.0\text{ mm}$  までほぼ一定の表面粗さの値を示している。この値は、前報において報告した、造形物全体を  $1400\text{ mm/sec}$  のレーザ走査速度で造形した時の表面粗さの値とほぼ同じ表面粗さであった。一方で、造形角度  $60^\circ$  の造形物では、表面層厚みが  $1.6\text{ mm}$  以上の領域では、前報で報告した造形物全体を  $1400\text{ mm/sec}$  で造形した時と同程度の表面粗さの値を示しているが、表面層厚みが  $1.6\text{ mm}$  未満の領域では、造形物全体を  $1400\text{ mm/sec}$  で造形した時の表面粗さよりも値が悪い結果となった。このことから、造形角度が大きい造形物については、アンダーカット面の表面粗さを改善するには、より厚い表面層厚みが必要であるといえる。この理由は、造形角度が大きい造形物ほど、アンダーカット面近傍の熱伝達が悪いいため、アンダーカット面下部に余剰硬化による凸状付着物が発生しやすく、より広い領域を低エネ

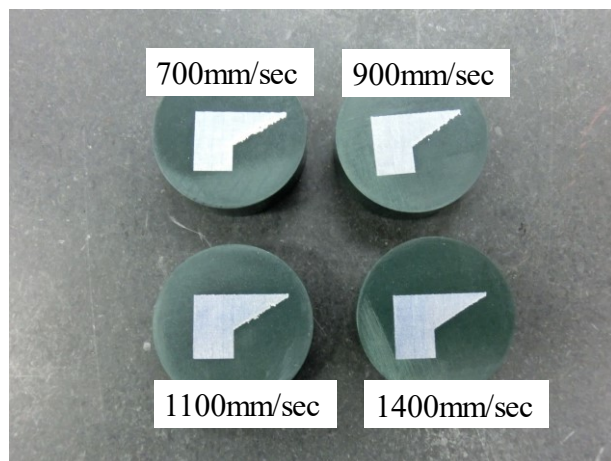
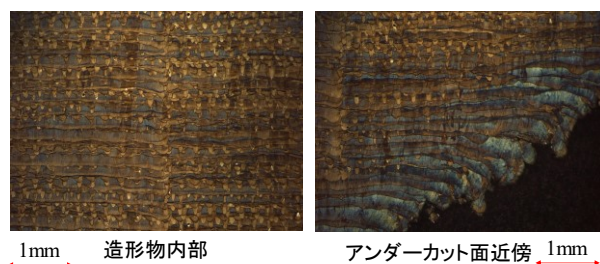
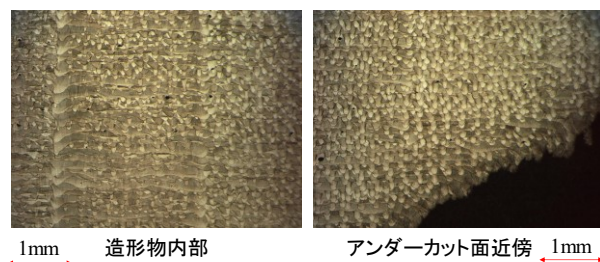


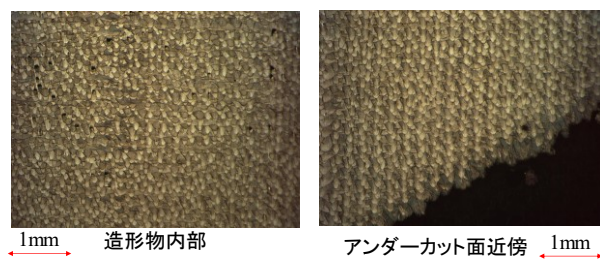
図3 造形物断面観察試料



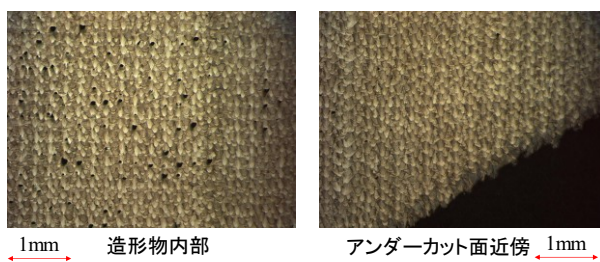
(a)レーザ走査速度 700 mm/sec



(b)レーザ走査速度 900 mm/sec



(c)レーザ走査速度 1100 mm/sec



(d)レーザ走査速度 1400 mm/sec

図4 造形物断面観察結果

ルギで造形する必要があるためであると考えられる。

以上のことから、アンダーカット面を有する造形物を造形するには、アンダーカット面近傍のレーザ走査速度を造形物内部よりも高速にして造形することで、アンダーカット面の表面粗さの改善が期待でき、かつ内部空隙の少ない造形物の造形が可能となることを確認することができた。また、レーザ走査速度を高速にする領域の表面層の厚みは、造形角度が  $40^\circ$  以下であれば  $0.4\text{ mm}$  程度、造形角度  $60^\circ$  の造形物においては  $1.6\text{ mm}$  程度であることも確認することができた。

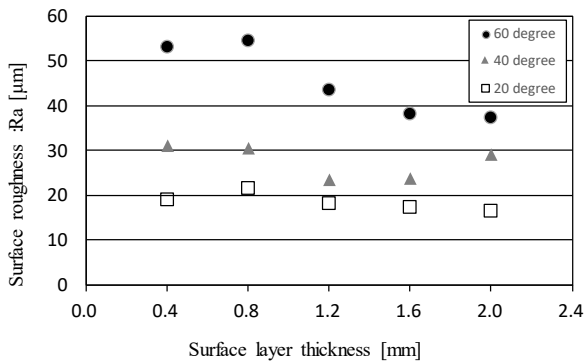


図5 アンダーカット面の表面層厚みと表面粗さ(Ra)

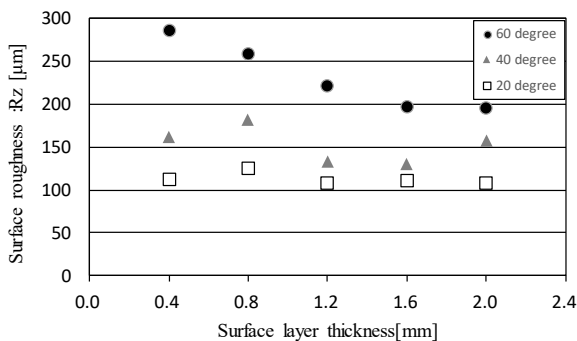


図6 アンダーカット面の表面層厚みと表面粗さ(Rz)

#### 4. 結言

(1) 造形角度  $60^\circ$  の造形物について、レーザ走査速度を  $700\text{ mm/sec}$  から  $1400\text{ mm/sec}$  までの造形条件で造形した造形物の断面観察を行った結果、レーザ走査速度を高速にした造形条件 ( $1100\text{ mm/sec}$  以上) において、内部空隙が確認されたが、アンダーカット面近傍では、内部空隙の発生は抑制されていることが確認できた。

(2) 造形物をアンダーカット面近傍とその他の部分に分割し、アンダーカット面近傍のみをレーザ走査速度を高速条件 ( $1400\text{ mm/sec}$ ) で、その他の部分を通常条件 ( $700\text{ mm/sec}$ ) で造形する方法を提案し、造形物のアンダーカット面の表面粗さを評価した。その結果、造形角

度  $40^\circ$  以下の造形物では、 $0.4\text{ mm}$  程度の表面層の厚みを、造形角度が大きい  $60^\circ$  の造形物では、 $1.6\text{ mm}$  程度の表面層の厚みを設定することで、表面粗さを改善し、かつ内部空隙が少ない造形物の造形が可能であることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) Yuichiro Koizumi, Akihiko Chiba, Naoyuki Nomura and Takayoshi Nakano : Fundamentals of metal 3D Printing Technologies, Materia Japan, Vol. 56, No. 12, pp.686-690 (2017) .
- 2) 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) , pp.61 (2017)
- 3) 寺澤章裕, 鈴木大介, 萩原義人, 米山陽, 古屋雅章, 緑川哲史, 田中隆三, 岩尾翔太 : 金属 3D プリント造形物の高品質化に関する研究, 山梨県産業技術センター研究報告, No.1, pp.35-38 (2018)
- 4) 寺澤章裕, 鈴木大介, 萩原義人, 米山陽, 坂本智明, 古屋雅章, 八代浩二, 緑川哲史, 田中隆三, 岩尾翔太, 市村誠 : 金属 3D プリント造形物の高品質化に関する研究 (第 2 報) , 山梨県産業技術センター研究報告, No.2, pp.21-25 (2019)