

金属 3D プリント造形物の高品質化に関する研究（第 2 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 (2nd 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ため、航空・医療など様々な製造現場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・積層の繰り返しによって造形をするため、表面粗さの増加や形状の崩れ、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いる。金属積層造形物の高品質化のためには、これらの問題解決が求められているが、金属積層造形は、新たな製造技術であり、公開されている造形パラメータなどのデータも多くはない。そこで、本報では、造形物の応力評価方法の検討を実施し、造形物の応力を安定して評価できる条件について検討した。また、造形物の高品質化を目的にレーザー照射条件（スキャン速度）を変化させて造形を行ったところ、標準条件よりもスキャン速度を高速化する領域で、表面粗さの改善及び応力の低減を確認した。

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において活用が期待されている¹⁾。

金属積層造形技術は、(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ア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 PBF の主流となっているのは、

レーザーを熱源とする SLS 方式 (Selected Laser Sintering) である²⁾。

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増加、また造形時に発生する応力によって造形物の変形等が発生し、高品質の造形を行う際には問題となる。

本研究では、SLS 方式の金属 3D プリントにおける造形物の高品質化を目的とし、(1) アンダーカット面の表面粗さの向上と、(2) 残留応力に起因する変形量を低減するための研究を実施している。

前報では、アンダーカット面の表面粗さに関しては、造形角度ごとに表面粗さを評価し、アンダーカット角度が大きくなると、余剰硬化によって凸状の付着物がアンダーカット面下部に付着し、表面粗さが悪化することを確認した³⁾。また、造形物の応力に関しては、造形物形状やレーザー走査方法等が、応力値に影響を与えている点を確認した³⁾。

本報では、前報に続き造形物の応力評価方法を検討し、安定した応力評価を行うための条件を検討するとともに、アンダーカット面の表面粗さの改善及び造形物応力を低減するための造形条件の検討を行った。

*1 株式会社松浦機械製作所

2. 実験方法

2-1 応力評価条件の検討

(1) 供試材および造形物

金属原料として、SUS316L 粉末を実験に供し、造形は（株）松浦機械製作所の LUMEX Avance-25 により行った。応力評価用造形物の造形は、帯状分割走査にて行った。ここでの帯状分割走査とは、2次元スライスデータに 5 mm 幅で走査されたレーザを、レーザ走査方向と直交方向に連続的に移動させながら照射する手法である。

造形物の形状は直径 20 mm、高さ 5 mm の円柱形状とし、板厚 10 mm の S50C ベースプレート上に造形を行った。造形条件の一覧を表 1 に示す。造形中の槽内は、酸素濃度 3 %以下になるように窒素置換されており、造形中のベースプレートは約 50℃に保たれるよう制御を行った。

(2) 応力測定方法

造形物の応力評価は、X 線応力測定法 ($\sin^2\phi$ 法) により行った。X 線応力測定は、（株）リガク AutoMATE を使用し、 ϕ 一定法にて行った。表 2 に基本的な測定条件を示す。なお、本報においては、前報³⁾に続き、測定方向による影響について精査を進めるとともに、測定スポット径（コリメータ径）の影響についても検討を行った。

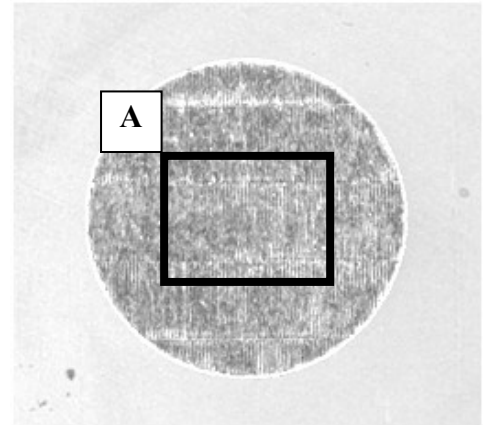
造形物における応力測定は造形まま面について行い、測定箇所は、円柱形状の径中心である。なお、積層造形時は、造形 1 層ごとに造形パス（レーザ走査パス）が 90 度ずつ回転しながら造形されるため、本測定においては、造形パスに対して図 1 に示すような直交座標系を定義し、X 方向、Y 方向の応力測定を実施した。なお、以降の本文中では応力値の前に +、- を付加し、“+”を付加したものを引張応力、“-”を付加したものを圧縮応力として表記する。

表 1 造形条件

レーザスポット径, mm	0.2
レーザ出力, W	320
レーザ走査速度, mm/s	700

表 2 X 線応力測定条件

測定方法	ϕ 一定法
回折面	γ Fe311
管球	Cr-V
管電圧, kV	40
管電流, mA	40
揺動, deg	3
X 線の応力定数 K, MPa	-355.59



A 部拡大（模式図）

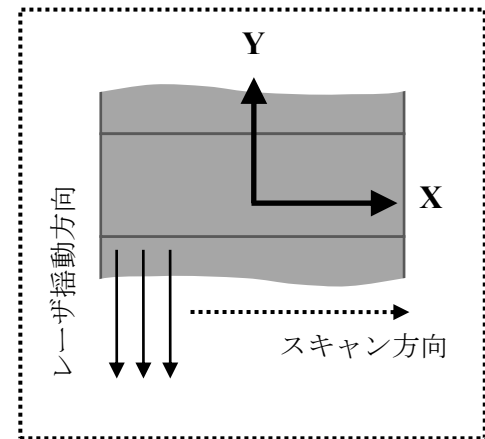


図 1 造形時のレーザ走査パス

2-2 アンダーカット面の表面粗さの改善及び造形物応力

(1) 造形物について

図 2 に粗さ・応力評価用造形物の概略図を示す。造形物は、9 mm 角の角柱の上部アンダーカット部分を想定した形状とした。アンダーカット部の角度は、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、アンダーカット角度と呼称）で定義し、アンダーカット角度を 20°、40°、60° の 3 条件を設定した。なお、造形の際、スキージング方向（粉体材料を敷き詰める機構の稼働方向）と造形物のアンダーカットを有する面の方向の組み合わせによっては、造形物の変形によってスキージング機構が干渉し、造形が途中で停止してしまうことがあったため、図 2 に示すようにアンダーカットを有する面とスキージング方向が直交するように造形物を配置して造形を行った。

(2) 造形条件について

アンダーカット面を有する形状の造形では、通常の積層造形時とは異なり、造形下面が金属粉末になるため、造形下面に造形物が配置される場合に比べ熱エネルギーが蓄積される傾向にあると考えられる。これにより、アン

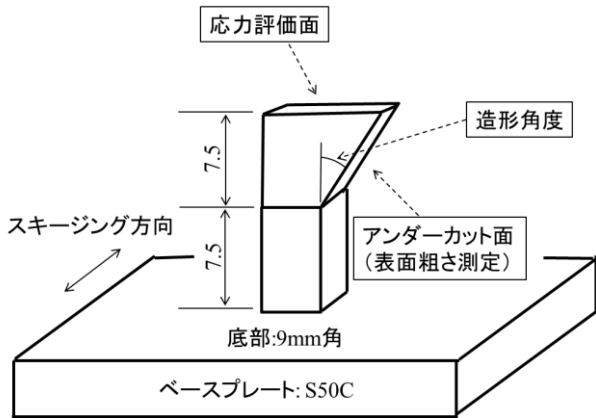


図2 粗さ・応力評価用造形物の概略図

表3 造形条件一覧

アンダーカット角度 (deg)	20,40,60			
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			
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

アンダーカット面の下部に存在する粉末材料が必要以上に溶融し、造形物に固着（余剰硬化）することで表面粗さが悪化することを前報³⁾で報告した。そこで、この余剰硬化を抑制するために、熱エネルギーを抑制した条件で造形することで、アンダーカット面表面粗さを改善することを試みた。単位時間あたりに造形物に投入される熱エネルギーを抑制する方法としては、レーザ出力を抑える方法や、レーザ出力は変えずに、レーザ走査速度を高速化する方法等が主として考えられるが、本研究では制御の安定性や容易さを考慮して、レーザ走査速度を変化させて造形することとした。

造形条件の一覧を表3に示す。造形は、2-1で造形を行った応力評価用造形物と同様に、(株)松浦機械製作所のLUMEX Avance-25を使用した。レーザ走査パスは、帯状分割走査によって、2次元スライスデータ内部を塗りつぶすようにレーザを走査する“Raster scan”と、スライスデータ最外周部を沿うように走査する“Vector scan”の2つの造形パスによって造形を行った。本実験に供した造形物は、造形機メーカー推奨条件である Raster scan 速度 700 mm/sec を基準とし、Raster scan 速度を 1400 mm/sec まで4段階に変化させて造形を行った。また、Vector scan 速度は、推奨条件では Raster scan 速度

の2倍に設定されているため、これに順じ各条件の Raster scan 速度に応じたスキャン速度を設定した。

(3) アンダーカット面表面粗さ測定

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。表面粗さの評価には表面粗さ輪郭形状測定機（株）小坂研究所 Surfcoorder DSF1000型）を用いて、カットオフ値 2.5 mm，評価長さ 5 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。

(4) 応力評価

造形物の応力は、X線応力測定法によって行った。測定箇所は図2に示すとおり、造形物上面にて行い、後述する安定した応力測定条件にて行った。

3. 結果および考察

3-1 応力評価方法及び条件の検討

図3に、コリメータ径 4.0 mm，および 0.5 mm による、同一箇所の繰り返し測定による応力測定結果を示す。

コリメータ径 0.5 mm における測定では、レーザ揺動方向およびレーザスキャン方向（以降では、揺動方向を“Y方向”，スキャン方向を“X方向”と表記する）ともに、測定毎のばらつきが大きく、かつ X 方向では +100~+200 MPa，Y 方向では +200~+300 MPa と、測定方向によって比較的大きな差が見られる結果となった。

コリメータ径 4.0 mm における測定では、コリメータ径 0.5 mm の測定で見られたような、測定方向による差が減少し、測定値はいずれの方向も +400 MPa 前後で推移する結果となった。また、繰り返しの測定における測定値は、X 方向で約 80 MPa 前後の範囲で推移していたのに対し、Y 方向では約 40 MPa 以内で推移しており、Y 方向で安定した測定が行えることが判明した。なお、詳細は割愛するが、コリメータ径 1.0 mm における検討においても、同様に X 方向よりも Y 方向の測定結果が安定していた。

コリメータ径が大で測定値が安定したのは、造形物の結晶粒径の影響によるものと考えられる。一方、X 方向よりも Y 方向の測定値が安定したのは、測定方向と造形パスの配置に関係した現象であると考えている。すなわち、X 方向における測定では、多数の微細な造形パス（造形幅約 0.3 mm）が測定方向と直交するように配置されているため、隣接する造形パスとの境界部における引張や圧縮などの残留応力や、これら残留応力が部分的に相殺しあうなど、複雑な応力配置になっていると考えられるが、Y 方向では測定方向と同一方向に造形パスが配置されるため、X 方向よりも比較的造形パス間

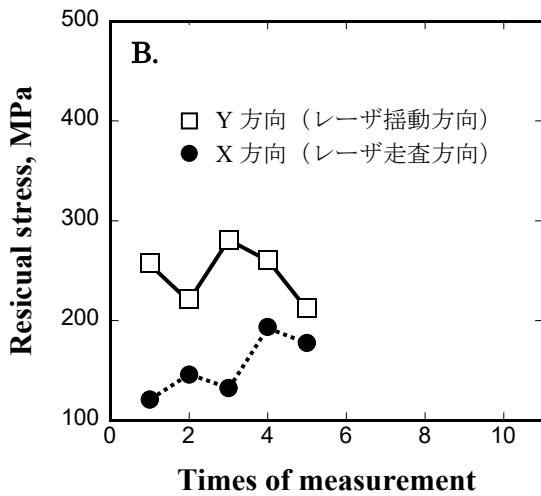
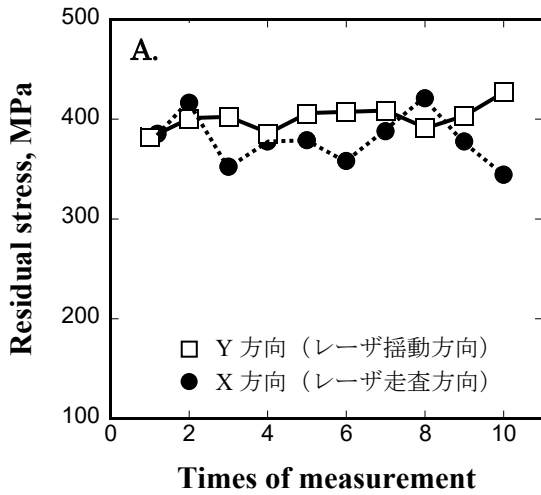


図3 同一箇所を繰り返し測定による応力測定結果
A. コリメータ径 4.0mm, B. コリメータ径 0.5mm

の影響を受けにくく、これにより測定値が安定したものとする。

これらのことから、金属積層造形物の造形まま面に対し、 $\sin^2\psi$ 法により安定的な応力評価を行うためには、測定領域を広く設定するとともに、レーザ走査方向に沿うよう測定方向を設定することが望ましいと思われる。

3-2 アンダーカット面の表面粗さの改善及び造形物応力の低減

いずれの条件の造形物も、大きな形状の崩れなく造形することができた。造形物のアンダーカット部の評価は、応力評価を行った後、ベースプレートから切断し、表面粗さ測定により行った。図4に Raster scan 速度と Ra の関係を、図5は Raster scan 速度と Rz の関係を示す。図横軸は、Raster scan 速度を、図縦軸を表面粗さの値をアンダーカット角度毎に示す。いずれのアンダーカット角度においても、メーカー推奨条件よりも熱エネルギーが小さい (Raster scan 速度が速い) 条件において、表面粗さ

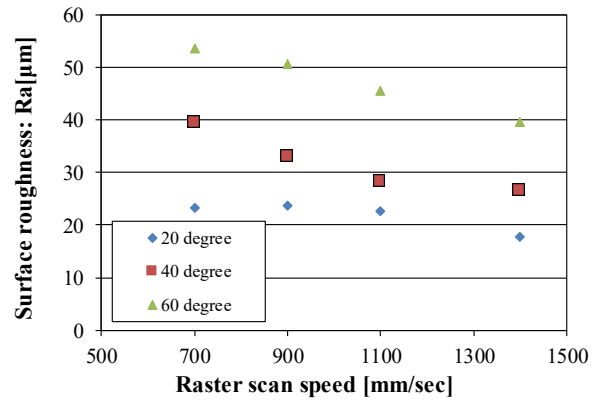


図4 Raster scan 速度と表面粗さ (Ra) の関係

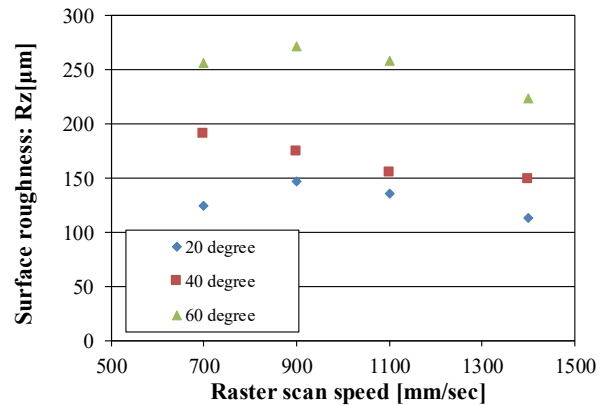


図5 Raster scan 速度と表面粗さ (Rz) の関係

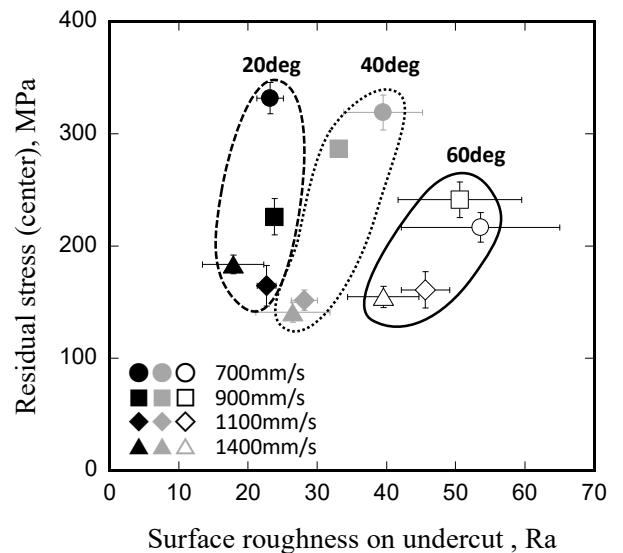


図6 アンダーカット面の表面粗さ Ra と造形物上面応力との関係

が改善した。これは、入熱量の減少により、余剰硬化が抑制された結果であると考えられる。

図 6 に表面粗さ Ra と造形物の造形まま面の応力の相関を示す。なお、ここに示した造形物の応力測定は、表 2 (2-1 参照) に示した条件を基本とし、3-1 で述べた安定した応力測定ができると考えられる、①Y 方向での測定、②コリメータ径 4.0 mm にて行った結果である。

入熱量を減少させるような条件、すなわち Raster scan 速度が増加するほど、造形物応力は低下し、この傾向はアンダーカット角度 60° に比べ 20°、40° で顕著であった。アンダーカット角度 40° の造形物に注目すると、Raster scan 速度 700 mm/sec と 1400 mm/sec を比較した場合、造形物の応力はおおよそ 1/2 に低下した。

これらの結果から、アンダーカット面の表面粗さの改善、および造形物に発生する応力を低減するためには、熱エネルギーを抑制する条件下で造形を行うことが有効と考えられる。なお、熱エネルギーを抑制した造形物の製品強度、ならびに造形密度については今後詳細に検証を行う必要がある。

4. 結 言

(1) X 線応力測定によって、造形物の応力評価条件を検討した。その結果、①測定径 (コリメータ径) 4 mm、②帯状分割走査による造形において、揺動方向に沿った測定をすることで、比較的安定した応力評価が行えることを確認した。

(2) 造形物の高品質化を目的に、レーザ照射条件 (走査速度) の検討を行った。その結果、走査速度を高速にして、入熱量を抑制することで、余剰硬化が低減されて、表面粗さが向上するとともに、応力も低減することを確認した。

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) , p. 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)