

金属 3D プリント造形物の高品質化に関する研究

寺澤章裕・鈴木大介・萩原義人・米山陽・古屋雅章・緑川哲史*¹・田中隆三*¹・岩尾翔太*¹

Study on Quality Improvement of Metal Powder Bed Fusion Models

Akihiro TERASAWA, Daisuke SUZUKI, Yoshihito HAGIHARA, Akira YONEYAMA, Masaaki FURUYA,
Tetsushi MIDORIKAWA*¹, Ryuzo TANAKA*¹ and Shota IWAO*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。そして、これらの分野では、高品質な造形物が要求されることが多いが、金属積層造形（PBF 方式）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・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、これらの課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造形パラメータも多く、公開されている実験データも多くはない。そこで、本報では、単純形状の試験品の造形を行ない、製品形状等の違いが表面粗さや残留応力に及ぼす影響について検討を行った。その結果、造形物の形状、造形物に対する熱影響等の違いにより、表面粗さ、残留応力に影響を及ぼすことが確認された。

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。中でも、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成型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）、（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溶融結合法（PBF）があり、現在金属造形の主流となっているのはレーザーを熱源とする PBF 法である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や、造形物に付与される応力による造形物の変形等が造形物の品質に影響を与えている。

本研究では、レーザーを使用した PBF 方式の金属 3D プリントにおいて、①アンダーカット面の表面粗さ向上と、②残留応力に起因する変形量を低減することで、金属 3D プリント造形物の高品質化を目的に研究を実施している。

金属積層造形ではレーザー走査パスやレーザーパワー等の造形条件が多いが、これらの条件と造形物の品質等との関係についての報告例は多くはない。そこで、本報では、アンダーカット面の角度を変化させたサンプルを造形して、アンダーカット面の表面粗さおよび角度の設計値との差を把握した。また、変形の原因となる造形時の応力を把握するために、円柱形状の試験品の造形を行い、応力測定を実施した。

2. 実験方法

2-1 アンダーカット面の表面粗さ・形状評価

アンダーカット面を有する製品の表面粗さを評価するために、造形実験を行った。使用した金属 3D プリント（PBF 方式）は（株）松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25 で、SUS316L 粉末を供し、表 1 に示すレーザー照射条件（メーカー推奨条件）で造形をした。レーザー走査方向は、スキージング方向に平行なパターンと垂直な

*1 株式会社松浦機械製作所

パターンを交互にし、造形ピッチは 50 μm で造形した。

図 1 に造形物形状の概略図を示す。試験品は予備実験の結果から安定して造形可能でかつ表面粗さ測定に必要な長さが確保できるように 9 mm 角の断面積でストレート部とアンダーカット部の高さがそれぞれ 7.5 mm の造形品とした。また、本研究では造形角度を図 1 に示すようにベースプレートに垂直な線からのアンダーカット面の倒れ角で規定し、アンダーカット側とアンダーカット反対側をそれぞれ α 、 β と定義して、造形角度を 0° から 70° まで（造形機の仕様上の造形可能角度は $0^\circ \sim 65^\circ$ ）の造形物を造形した。

図 2 に造形時の造形物配置方法を示す。造形物は角度ごとに 2 個ずつ造形し、スキージングの際にスキージングブレードと試験品との干渉による影響が少ない方向（アンダーカット面の倒れ方向がスキージング方向と垂直）に配置して造形した。

造形終了後はベースプレートから切断して、表面粗さ輪郭形状測定機（（株）小坂研究所 Surfcoorder DSF1000 型）を用いて、アンダーカット面の表面粗さを評価した。また、造形角度の設計値との差を、表面粗さ輪郭形状測定機でトレースすることで、角度 α 、 β それぞれについて評価した。

表 1 レーザ照射条件

レーザースポット径, mm	0.2
レーザー出力, W	320
スキャンスピード, mm/s	700

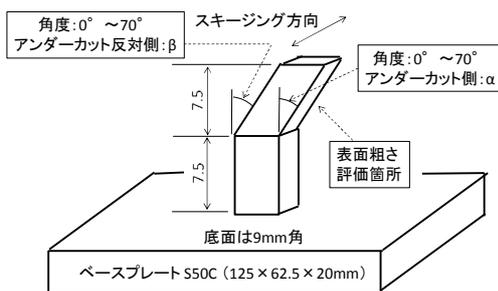


図 1 試験品形状の概略図

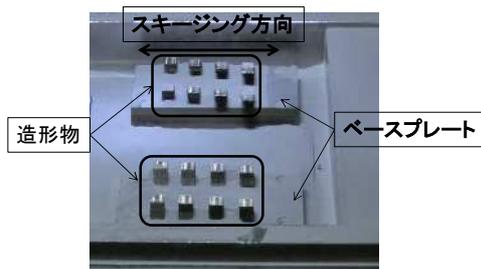


図 2 造形時の配置方法

2-2 造形物の形状変化低減化に関する検討

造形物の形状変化の主要因であると考えられる造形物の応力について検討を行うために、円柱の直径を変化させた造形物を作製し、直径の変化が表面応力に対しどのような影響を及ぼすかについて検討を行った。

金属原料はマルエージング鋼粉末を供し、試験片形状は図 3 に示すように、円柱直径 2 mm から 10 mm まで 1 mm 毎に変化させた造形物とした。造形は S50C ベースプレート上に行い、各円柱の造形高さは 8 mm である。造形は円柱形状の 2 次元スライスデータに対し、5 mm 幅で走査されたレーザを走査方向と直行方向（スキヤニング方向）に連続的に移動させながら照射する手法（帯状分割走査）にて行った。なお、主なレーザ照射条件は 2-1 に示す SUS316L（表 1）と同じである。

造形物の表面応力の測定は X 線による応力測定を行い、測定には、（株）リガク AutoMATE を使用した。表 2 に X 線応力測定条件を示す。測定スポット径は回折強度および造形物のレーザパスの影響を考慮し、 $\phi 1$ mm を選択した。

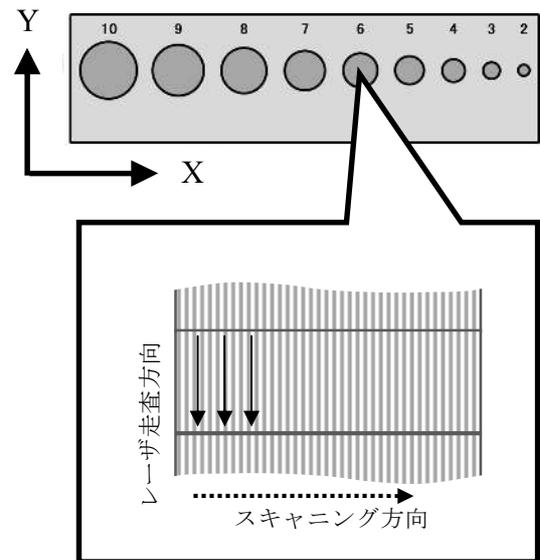


図 3 試験片形状および測定座標系

表 2 X 線応力測定条件

特性 X 線	CrK α
管電圧, kV	40
管電流, mA	40
コリメータ径, mm	1
回折角, deg	156.4
計数時間, sec	60
測定方法	並傾法
揺動, deg	2

応力測定箇所は円柱造形物の径中心とした。また、測定表面は装置に併設されている主軸にてエンドミル加工も行えるが、切削加工による影響などを排除するために、造形まま面とした。応力の測定方向はベースプレートに対して直交座標系を定義し、X方向、Y方向について実施した。また、評価面である造形物最表面は、ベースプレートに対して定義したY方向と一致するように造形パスが現れていた。(図3参照)

本文中では応力値の前に+, -を付加し, (+)表記したものを引張応力, (-)表記したものを圧縮応力と表記することにする。

なお, 2-1, 2-2の実験に供した造形物は, 酸素濃度3%になるよう窒素置換された機中において, ベースプレート温度約50℃にて造形(作成)を行った。

3. 結果および考察

3-1 アンダーカット面の表面粗さ・形状評価

図4に造形物の写真を示す。造形を試みた0°~70°の試験品について破損することなく造形が終了した。

図5にアンダーカット面の表面粗さ測定結果を示す。評価箇所は, アンダーカット面の始まりから5mm程度までの領域をカットオフ値2.5mmで, 算術平均粗さ(Ra)と最大高さ粗さ(Rz)を計測し, 造形角度ごとに記した。その結果, 造形角度の増加に伴って表面粗さも増加傾向を示し, また造形角度50°以上で, 表面粗さの悪化が顕著になった。そこで, この点を考察するため, 造形物アンダーカット面を横方向から測定顕微鏡を用いて透過光で観察し, その結果を図6に示す。黒い影の部分が造形物で, 造形角度20°と60°の造形物を観察した。造形角度が大きい60°では, 下側に大きな凸形状の余剰硬化部分が確認された。

図7に造形物傾斜角の設計値との差を示す。図横軸は設計値を, 縦軸は設計値との差を示しており, 造形角度 α , β それぞれについて差を記した。その結果, α (アンダーカット面側)において, 造形角度60°および70°で, 設計値との差が急激に大きくなる傾向を示した。

造形角度が小さい造形物では, 既存造形物を通して熱がベースプレート側に放熱されるため, 表面粗さ・角度の差共に小さく抑えられると思われる。一方, 造形角度が大きい50°~70°の造形物では, アンダーカット面の下部の造形物が少ないため, 熱が蓄積される結果, 余剰硬化部分の生成による表面粗さ悪化の要因になるとと思われる。

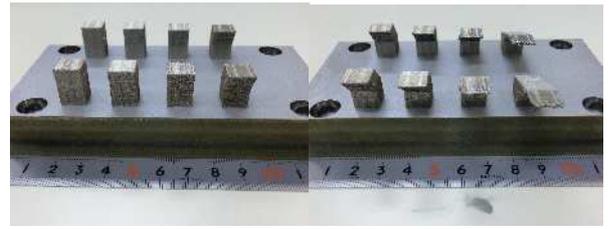


図4 造形物

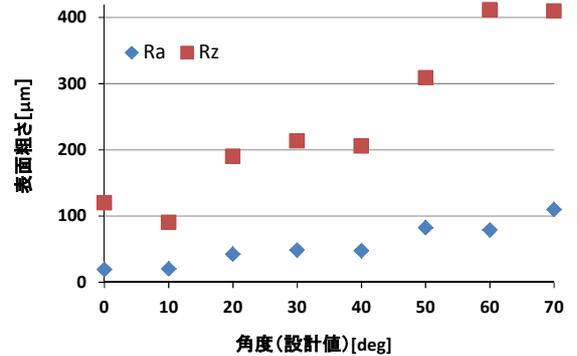


図5 アンダーカット面表面粗さ測定結果

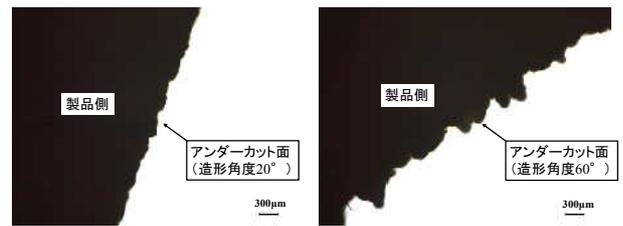


図6 アンダーカット面観察結果

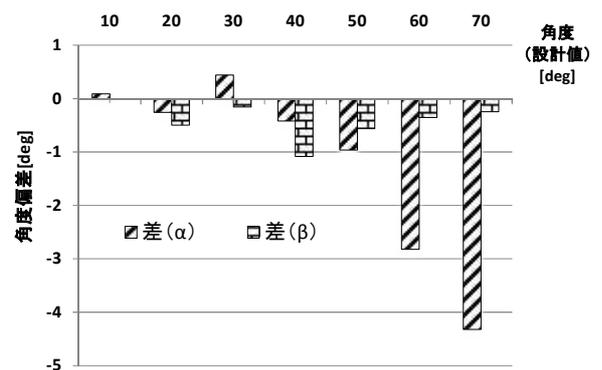


図7 造形物傾斜角の設計値との差

3-2 応力測定結果

本実験では、帯状分割走査により造形物の造形を行っている。造形物の大きさにもよるが、造形物は複数の帯状部を並べて造形されるため、帯状部には重複する部分が形成される。帯状部分の幅方向における中央部と重複部で異なる応力挙動を示すことが懸念されたが、板状試験片を用いた事前の応力測定結果からは、中央部および重複部において明確な差を認めることができなかった。

図8に各円柱直径におけるX方向およびY方向の応力測定結果を示す。円柱直径10mmでは、X方向で-9.62MPa、Y方向では-76.8MPaとX方向とY方向で大きな異方性を有することが観察された。円柱直径8mmではX方向で-40.77MPa、Y方向で-68.6MPaと円柱直径10mmに比べ異方性は低減するものの、依然としてY方向の圧縮応力が大きく観察された。この応力の異方性は円柱直径6mmでは認められなくなり、X方向、Y方向ともに約-30MPa程度であったが、円柱直径4mmでは再び異方性が出現した。円柱直径4mmのX方向における応力測定結果は、円柱直径10mmから6mmの造形物で観察されていた圧縮応力から一転して+17.59MPaの引張応力に転じたが、Y方向では-34.18MPaの圧縮応力が保たれていた。円柱直径2mmの造形物ではX、Y方向ともに大きく引張側に転じており、X方向で+134.21MPa、Y方向で+121.85MPaであった。

円柱直径の違いにより、造形物に導入される応力の挙動が異なることが観察されたのは、造形時に発生する熱による影響の他、帯状分割走査における造形パスの縦横比による影響も複合的に関与しているものと推察される。このことは、レーザ走査幅以下での造形となる円柱直径が4mm以下の造形物で引張応力が観察された点や、直径の大きな試験片で、レーザ走査方向と一致しているY方向の測定結果に比べ、スキヤニング方向のX方向の測定結果が大きく変化している点、造形パスの走査幅に近い円柱直径6mmの造形物では異方性が認められなくなった点から示唆されるものの、別途より詳細な検討を行う必要がある。

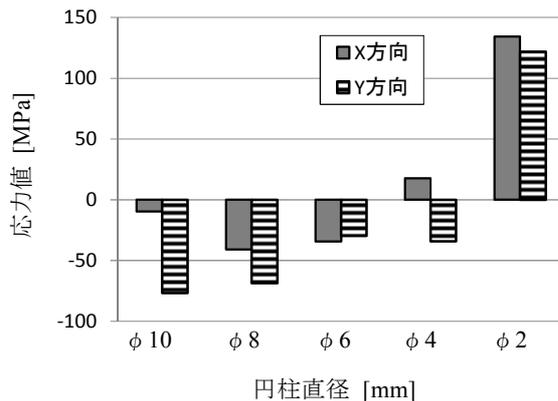


図8 各円柱直径における応力測定結果

5. 結 言

(1) 造形角度を変化させた試験品を造形して、造形角度の違いによる、表面粗さ・設計値との角度の差を評価した。造形角度が50°以上に達すると、熱の影響等を受けやすく、アンダーカット面の表面粗さおよび設計値との角度の差が共に急激に増大する傾向が確認された。

(2) 造形物変形の要因となる応力について、造形物の形状との関係を調査するために、直径を変化させた円柱形状の試験品を造形して評価した。造形物の応力は、直径が小さくなるにつれ圧縮側から引張側に変化することが判明した。また、直径が大きい造形物では測定方向に起因する異方性を有することが確認された。

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)