

論文

金属粉末積層造形における モデル形状に対する条件データベースの構築

藤巻 研吾^{*1)} 横山 幸雄^{*1)} 小金井 誠司^{*1)} 千葉 浩行^{*1)} 大久保 智^{*1)}

Construction of condition database for model shapes used in metal additive manufacturing

Kengo Fujimaki^{*1)}, Yokoyama Yukio^{*1)}, Koganei Seiji^{*1)}, Chiba Hiroyuki^{*1)}, Okubo Satoshi^{*1)}

Metal AM (Additive Manufacturing) using metal powder as a raw material can produce prototype parts of a higher strength compared to conventional AM using plastic materials. A drop in the quality of a part shape manufactured by metal AM is caused by three major factors - collapse of overhanging shapes, warping of thin shapes, and impact of the support piece for securing the manufacturing part to the build plate. Metal AM is a relatively new technology and know-how for practical use is still lacking. In this paper, we built a database for the manufacturing quality of model shapes produced using metal AM. In the experiments, we used a powder bed fusion metal AM system that uses the stainless steel metal powder 17-4PH (equivalent to JIS SUS630). The research results of this paper serve to advance the quality and reliability of manufacturing services using metal AM.

キーワード：付加製造，金属 3D プリンター，粉末床溶融結合，ステンレス鋼，造形品質

Keywords : Additive manufacturing, Metal 3D printer, Powder bed fusion, Stainless steel, Manufacturing quality

1. はじめに

都内中小企業への 3D デジタルものづくり支援を強化するため、新たに金属粉末積層造形装置(金属 3D プリンター)を導入した。本装置は粉末床溶融結合法⁽¹⁾と呼ばれる方式を採用しており、図 1 に示すように薄く敷かれた材料粉末をレーザー光で溶融させて結合させ、それを繰り返して積層していくことで、立体的な部品を造形することができる。材料として金属粉末を使用することで強度のある部品を作ることが可能であり、試作した部品で製品の動作テストを行うなど、プラスチックの粉末積層造形装置では困難であった高度な試作支援が実現できる。

一方で金属粉末積層造形は、積層方向に対して下向きの面を有するオーバーハング形状が崩れて造形不良が発生する、造形時に生じる残留応力に起因した造形品の反りが発生し精度が低下する、造形品をビルドプレートに固定していたサポートを後工程で除去する必要があるなど、多くの制約が存在する。

よって、金属粉末積層造形を用いて質の高い円滑な試作支援を行うため、以下に示す 3 点について詳細なデータを収集して条件データベースを構築することを目指して研究を行った。

- (1) オーバーハング角度と造形品質
- (2) 造形品の厚みと反り
- (3) サポートの特性

2. オーバーハング角度と造形品質

2.1 実験方法 材料としてステンレス鋼 17-4PH (SUS630 相当) を用い、装置メーカーから提供された表 1 に示す標準条件において、図 2 に示すオーバーハング部分を持った形状をテストピースとして造形した。オーバーハング角度は、下向きの水平面の場合を 0°、垂直面の場合を 90°としている。テストピースのオーバーハング部分の幅は設計値で 10 mm である。各オーバーハング角度のテスト

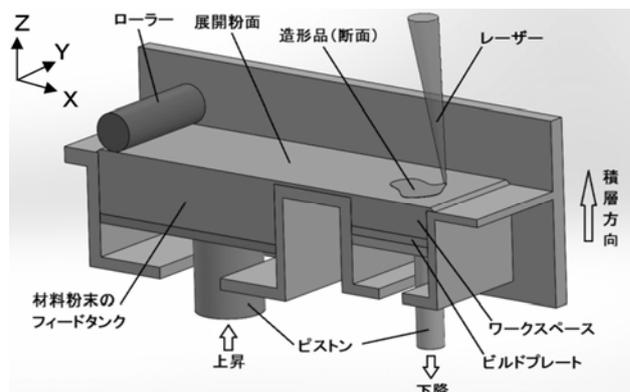


図 1. 造形の仕組み

表 1. 造形条件

条件項目	パラメータ
材料	ステンレス鋼 17-4PH
積層ピッチ	40 μm
レーザー波長	1070 nm
レーザー出力	150 W
レーザー走査速度	1200 mm/s
ハッチ間隔	60 μm
パターン	ヘキサゴン
雰囲気	窒素ガス
酸素濃度	1000 ppm



図 2. オーバーハングのテストピースの形状

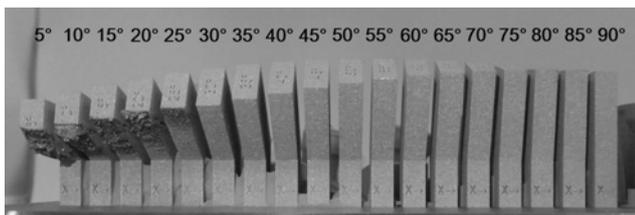


図 3. オーバーハングのテストピースの造形結果

ピースについて、それぞれ表面粗さおよび寸法を測定し、造形品質の状態のデータを収集した。表面粗さ測定は表面粗さ・輪郭形状測定機（小坂研究所製 SEF580-M50）、寸法測定はデジタルノギスを用いて行った。

2.2 実験結果と考察 造形したテストピースの外観を図 3 に示す。5°～90° まで 5° 間隔でオーバーハング角度を設定したテストピースが並んでおり、左側になるほどオーバーハング角度が小さくなっている。この結果、20° 以下のオーバーハング角度においては目視で確認できるほどオーバーハング部分に大きな崩れが発生しており、25° のオーバーハング角度においても上層部分でわずかな崩れが発生していることがわかった。これはオーバーハング角度が小さくなり 1 層あたりのオーバーハング量（X-Y 面の方向に突き出す量）が長くなったことで積層状態が不安定になったことが原因と考えられる。以上の結果から、崩れが発生せずに造形できるオーバーハング角度は 30° 以上であることが明らかになった。

さらに造形の状態を詳しく調べるためオーバーハング部分の表面粗さおよび設計値 10 mm の部分の寸法を測定した結果を図 4 および図 5 に示す。X と Y の方向は図 1 に示したようにビルドプレートの面上で、ローラーが移動する方向を X、それと垂直の方向を Y としている。図 4 よりオー

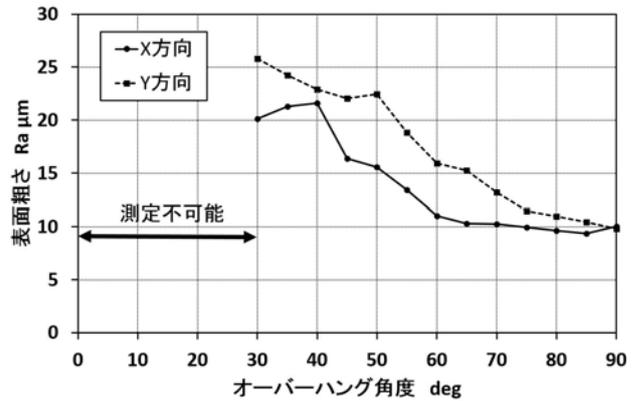


図 4. オーバーハング角度と表面粗さの関係

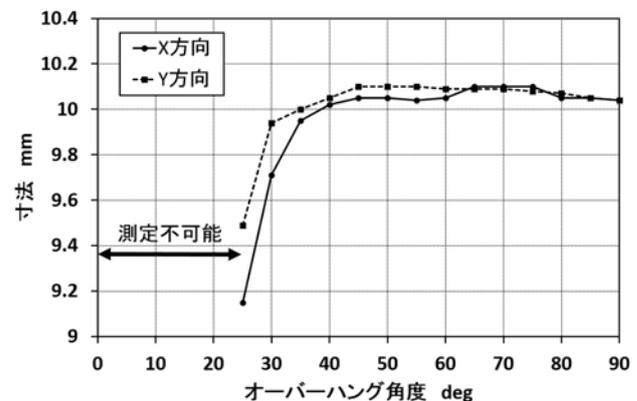


図 5. オーバーハング角度と寸法の関係

バーハング角度が小さくなるにつれて表面粗さが Ra 10 μm 程度から Ra 20 μm を超えるまで緩やかに上昇していることがわかった。一方、図 5 よりオーバーハング部分の寸法についてはオーバーハング角度が大きい場合はおおむね一定であるが、オーバーハング角度が 40° 以下になると急激に寸法が減少し、精度が低下することがわかった。オーバーハング角度が 30° 以上では目視確認できる崩れは発生していないものが、オーバーハング角度が小さくなるほど表面粗さが増加している。特に安定した高い寸法を求める場合はオーバーハング角度を 45° 以上とする必要があることがわかった。

3. 造形品の厚みと反り

3.1 実験方法 図 6 に示すように X 方向に 10 mm、Y 方向に 60 mm の大きさで Z 方向の厚みをそれぞれ変えたテストピースを造形し、残留応力による反りを測定した。造形は同様に表 1 の条件において行った。測定は表面粗さ・輪郭形状測定機を使用し、50 mm の長さに対する反りを評価した。反りの値は測定した輪郭曲線のうち、両端に対する中心部分の高さの最大値としている。反りがあるワークの場合、評価する長さが大きくなれば反りの絶対値も大きくなるが、現時点での造形支援事業では本実験と同じく 50 mm 程度の手のひらサイズの造形品のニーズが多い。ビルド

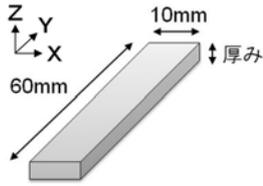


図 6. 反りのテストピース

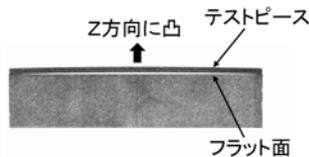


図 7. 反りの様子 (厚み 1.5 mm)

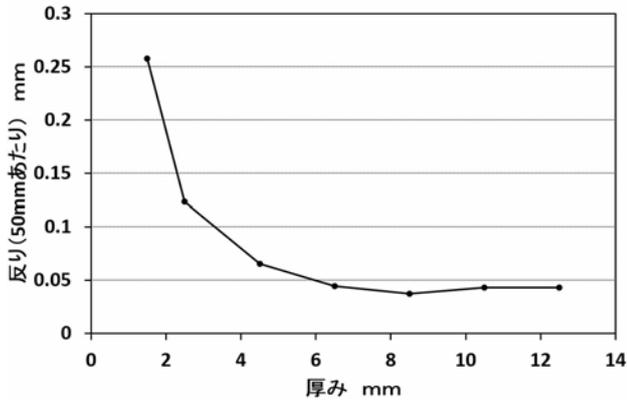


図 8. 厚みと反りの関係

プレートからのテストピースの切り離しにはワイヤー放電加工機を用いている。ワイヤー放電加工による熱影響でテストピースに反りが発生する可能性があるが、残留応力がないことがわかっているワークを 1 mm の厚みで切断して反りを測定してほぼゼロであることを事前に確認している。よって、1 mm 以上の厚みであればワイヤー放電加工による実験結果への影響は無視することができる。

3.2 実験結果と考察 造形およびビルドプレートからの切り離しを行った厚み 1.5 mm のテストピースを X 方向から観察した様子を図 7 に示す。この結果から造形したままの状態では Z 方向に凸の向きで反りが生じることがわかる。Z 方向に凸の向きを正として 1.5~12.5 mm の厚みのテストピースの反りをそれぞれ測定した結果を図 8 に示す。この結果からいずれの厚みでも Z 方向に凸の向きで反りが生じるが、厚みが大きくなるほど反りは小さくなることがわかった。これはいずれの厚みでも残留応力は生じているが、厚みが大きくなったことで曲げに対する剛性が大きくなったことが原因と考えられる。この結果から長さ 50 mm の造形品でおよそ 4 mm 以上の厚みがあれば、金属粉末積層造形に期待される目標精度である 0.1 mm に収まることが明らかになった。

4. サポートの特性

4.1 実験方法 サポートが必要になる基本的な形状である直径 20 mm の球をテストピースとして、同様に表 1 の条件で造形を行った。図 9 に示すように球の最下部とビルドプレートの間が 10 mm になるようにレイアウトし、その間にサポートを付加した。代表的なサポートとしてコーンサポートとグリッドサポートの 2 種類を使用した。コーンサポートは、Z 方向にピン形状を多数配置して造形品を固定

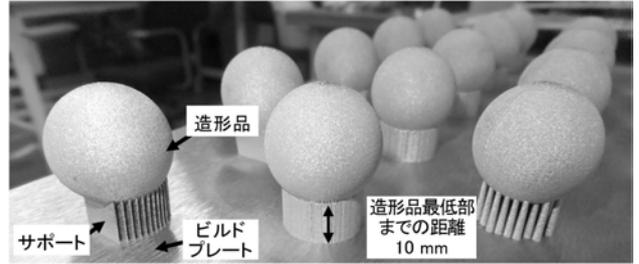
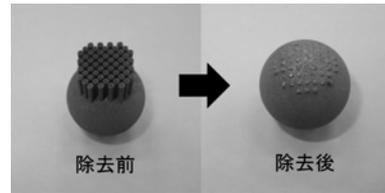
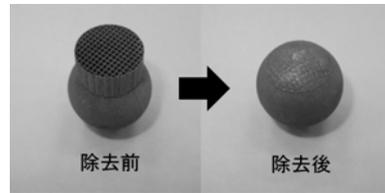


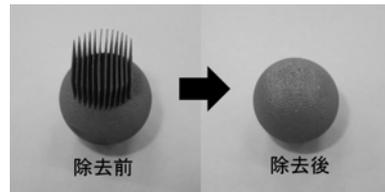
図 9. サポートのテストピース



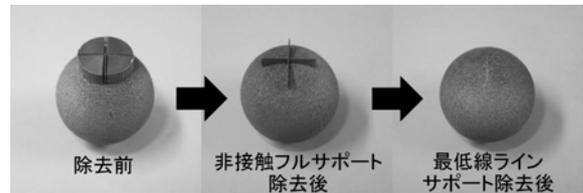
(a) コーンサポート



(b) グリッドサポート



(c) 平行ラインサポート



(d) 組み合わせサポート

図 10. 各種サポートの除去前後の比較

するサポートであり、ピンはそれぞれ独立しているため 1 本ずつ個別に切断して外すことができる。グリッドサポートは、2 方向のクロスハッチの薄いブレードの上に造形品を固定するサポートであり、サポートが取れやすいように造形品に接する部分はミシン目のような歯が付いている。

さらに上記 2 種類に加えて、除去が容易と考えられる試験的なサポートとして、平行ラインサポートおよび組み合わせサポート（最低線ラインサポート+非接触フルサポート）をテストした。平行ラインサポートはグリッドサポートのような 2 方向クロスハッチブレードではなく、1 方向のみの平行ラインのブレードを配置したサポートである。ブレードの向きとローラーの移動する方向を一致させることで粉敷きの荷重に耐えることができ、かつ各ブレードは独立しているため除去が容易であると考えられる。組み合わ

表 2. 各種サポートの特性

サポートの種類	除去性	除去後の表面状態	形状の安定性
コーン	○	×	○
グリッド	△～×	○	○
平行ライン	○	○	○～△
組み合わせ	○	○	○

○：良好 △：やや不良 ×：不良

せサポートは、造形物の最低部分を十字のラインサポートで固定しており、それだけでは粉吹き荷重に耐えられないため他の部分を 0.2 mm の隙間を設けて造形品と非接触にしたフルサポートで支える構造をしている。フルサポートは非接触のためビルドプレートから切り離れた段階で自然に外れ、その後十字のラインサポートを外すのみでよく、サポート除去が容易である。

4.2 実験結果と考察 コーンサポート、グリッドサポートおよび平行ラインサポート、組み合わせサポートを用いた場合の実験結果を図 10 にそれぞれ示す。コーンサポートは根元をニッパーなどで切断することで除去可能であったが、図 10 (a) のようにサポート除去後の面が粗く、最終的にヤスリなどの処理が必要となることがわかった。グリッドサポートは、図 10 (b) のように形状の歪みもなく安定しており、除去後の面も良好であるが、造形物に強固に付いているため万力で押し潰すなどの方法で除去する必要がある。造形品の形状によってはフライス盤などによる機械加工が必要な場合も考えられる。図 10 (c) に示す平行ラインサポートは、除去性および除去後の表面ともに良好でありスループット向上が期待できる。しかし、サポート自体にあまり剛性がないため、複数造形したもののうち形状に歪みが発生しているものがあり、形状の安定性に問題が生じる可能性が確認された。組み合わせサポートは、図 10 (d) に示すように除去は極めて容易で除去後の面も良好であり、かつ形状の歪みもなく安定しており優れたサポートであることが明らかになった。しかし、サポートの構造が複雑であり、モデルの形状によっては取り付けられない場合があることに注意が必要である。上記の各サポートの定性的な特徴をまとめると表 2 のようになる。

5. まとめ

上記したように金属粉末積層造形で問題となるオーバーハング角度と造形品質、造形品の厚みと反り、サポートの特性の 3 点について各種実験を行い、データベースを構築した。本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) オーバーハング角度と造形品質

- ・ 30° 未満のオーバーハング角度においてオーバーハング部分に崩れにより造形不良が発生する。
- ・ 崩れが生じないオーバーハング角度であっても、オーバーハング角度が小さくなるほど表面粗さが増大し、特に 45° 未満になると寸法精度が急激に低下する。

(2) 造形品の厚みと反り

- ・ 造形品の反りは Z 方向に凸の向きに発生する。
- ・ 厚みが 4 mm 以上であれば 50 mm の長さに対して 0.1 mm 以内の反りの大きさに収まる。

(3) サポートの特性

- ・ コーンサポートはニッパーによる手作業の除去が可能であるが除去後の表面が粗く、グリッドサポートは強固で手作業での除去が難しい。
- ・ 平行ラインサポートは、除去も容易で除去後の面の良好であるが、形状に歪みが発生する可能性がある。
- ・ 最低線ラインサポートと非接触フルサポートを組み合わせることで、除去性および除去後の表面が良好で、かつ形状の歪みを生じることなく造形が可能である。
(平成 28 年 6 月 30 日受付, 平成 28 年 7 月 19 日再受付)

文 献

- (1) 清水透, 中野禅, 萩原正, 佐藤直子:「金属三次元積層造形法の最新動向」, 精密工学会誌, Vol.80, No.12, pp.1066-1070 (2014)
- (2) 新野俊樹:「金属の付加製造技術の最新動向と期待」, 型技術, Vol.29, No.2, pp.18-23 (2014)