

## MIM応用型金属3Dプリンターの造形精度及び造形物機械的特性の調査（最終報）

生産技術室 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋  
材料技術室 吉田 浩之, 中村 昌彦, 山本 貴之

### Investigation of Modeling Accuracy and Mechanical Properties of MIM Applied Metal 3D Printer

Kazuya TOMIYAMA, Kazushige JONOUCHI, Akihiro HANAZAWA,  
Hiroyuki YOSHIDA, Masahiko NAKAMURA and Takayuki YAMAMOTO

職員の積層造形に関する技術力向上と事業者の利用促進を図るため、2018年度に導入した金属3Dプリンターの特性調査を実施してきた。本装置の特徴は材料をノズルから押し出して積層造形し、これを焼結することで金属形状を得ることにあるが、積層造形による構造内部の異方性や焼結による収縮及び熱処理状態など、確認すべき点が多い。

今回、幾何特性、機械的特性及び構造評価をまとめ、ノズルの走査パターンによる異方性が機械的特性に影響を与えるとともに、構造内部に生じる空隙の原因になることを明らかにした。

#### 1. はじめに

従来の機械加工では不可能とされる複雑形状の一体での製作や構造内部を空洞にする軽量化など、付加価値のある製品づくりに期待されている金属3Dプリンターを本県は2018年度に導入した。

マークフォージド社のMetal Xは金属粉末に油脂と熱可塑性樹脂を混合したフィラメント状の材料を使用する造形装置であり、金属形状を得るまでに3つの工程を必要とする。まず、Metal Xで材料を融解しつつ、直径0.250mmのノズル先端から線状に押し出して形状を積層造形する（以下、造形体という）。次に造形体に含まれる油脂の脱脂を経て、最後に焼結炉を用いて熱可塑性樹脂を分解、気化して残った金属粉末を焼き固める（以下、焼結体という）。

また、Metal Xは専用ソフトウェアにより形状の設計値に対し、焼結による収縮をあらかじめ見越して補正計算した造形体をつくる。このときの層を形成する走査パターンのノズル動線を図1に示す。N層とN+1層の内側のノズル動線②及び④は互いに直交する配置で積層され、積層間隔は0.150mmとなる。また、形状の外枠①及び③に対し、内側のノズル動線の交わる角度は任意の角度とすることができ、図1では交わる角度が45度の配置となる。

使用材料17-4 PH Stainless Steel (SUS630) の外観評価と金属組織を第一報で報告したが、今回、走査パターンによる異方性を踏まえつつ幾何特性、

機械的特性及び構造評価の結果をまとめ、本研究の最終報とする。

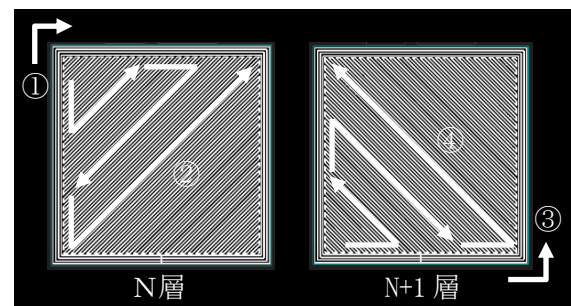


図1 ノズル動線（中実構造の場合）

#### 2. 評価方法

##### 2.1 幾何特性・長さ

###### 2.1.1 試験片製作

焼結体の積層厚み1.0mmとする板を製作。

辺の組み合わせとして短辺10.0mmに対し、長辺100.0mm及び200.0mmの板。さらに短辺30.0mmに対し、長辺50.0mmの板を3個ずつ用意した。

###### 2.1.2 測定器及び方法

M形標準ノギス最小読取値0.05mm及び画像寸法測定機（QVTP Apex302PRO, ミットヨ）を使用し、短辺と長辺それぞれ3回測定して平均値を求め、設計値に対する誤差を算出した。

画像寸法測定機は対物レンズで拡大したカメラ映像から測定物のエッジを検出し、非接触で寸法

測定が可能であり、今回、対物レンズQV-HR2.5×(サブレンズ×2.0)を使用して板の映像を取得。基準面を測定ステージとした上で、配置した板の一边を結ぶ測定点群から最小二乗法で線を設け、次に対辺の任意の箇所の測定点群から平均の点を作成。基準面に対する線と点の垂線間の投影距離を辺の長さとした。

## 2.2 幾何特性・表面性状

### 2.2.1 試験片製作

焼結体の一边を20.0mmとする立方体を製作。

走査パターンによる表面性状の違いを見るため、形状の外枠に対し、内側の交わる角度を90度及び45度とする2種類の走査方向の面を3個ずつ用意。

立方体を切断した面が走査方向の面と垂直になるように、走査方向の面における一边とその対辺それぞれの中点から切断。この面を樹脂埋め込み後に仕上げ研磨した。

### 2.2.2 測定器及び方法

対物レンズQV-HR2.5×(サブレンズ×6.0)による画像寸法測定機を使用し、切断した面から走査方向及び積層方向それぞれの実表面の断面曲線を測定。この曲線からカットオフ値 $\lambda_s$ 低域フィルタを適用して短波長成分を除去した後、カットオフ値 $\lambda_c$ 高域フィルタの適用で長波長成分を遮断して粗さ曲線を求めた。

粗さパラメータの算出では、この曲線が周期的なものだと判断し、基準長さを0.8mmとした。

## 2.3 機械的特性・硬さ

### 2.3.1 試験片製作

焼結体の一边を20.0mmとする立方体を製作。

2.2.1同様に形状の外枠に対し、内側の交わる角度を90度及び45度とする2種類の走査方向の面を3個ずつ用意。走査方向及び積層方向それぞれの面に対し、表面凹凸を粒度#400で面調整した。

### 2.3.2 測定器及び方法

デジタル式全自動硬度計(DTR-FA-300, 松沢精機)を使用し、圧子を円すい形ダイヤモンド硬さ記号HRCとするJIS Z 2245:2021に基づく試験力を付与。試験片表面を5点測定して平均値とその標準偏差を算出、ロックウェル硬さとした。

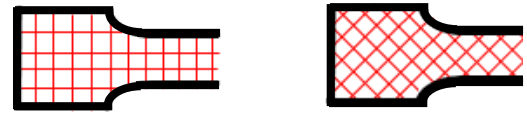
## 2.4 機械的特性・引張強さ

### 2.4.1 試験片製作

焼結体の積層厚みを3.0mmとする板状試験片13B号をJIS Z 2241:2011に基づき製作。

2.2.1同様に試験片の平行部の外枠に対し、

図2のとおり内側の交わる角度を90度及び45度とする2種類の走査方向の面を3個ずつ用意した。



平行部に対して90度

平行部に対して45度

図2 製作した走査パターン

### 2.4.2 測定器及び方法

最小読取値0.01mmのM形標準ノギスを使用して試験片の標点間を3点測定し、その平均寸法から原断面積を求めた。次に原標点距離をマーキングした試験片に対してオートグラフ(IS-10T, 島津製作所)を使用し、試験速度毎分10mmの最大試験力を測定。

最大試験力を原断面積で除して引張強さと破断した2つの試験片を突き合わせた最終標点距離から伸びをそれぞれ算出した。

## 2.5 構造評価・非破壊試験

### 2.5.1 試験片製作

焼結体の板状試験片13B号を製作。

構造内部の状況を確認するため、図2に掲げる2種類の試験片から平行部をそれぞれ切り出し、走査方向の面を樹脂埋め込み後に仕上げ研磨した試験片を用意した。

### 2.5.2 測定器及び方法

75MHz探触子(V3658-SU)による超音波映像装置(AT7500, 日立建機)を使用し、水浸法にて試験片表面から一定深さの反射エコー平面情報を画像化した。

## 2.6 構造評価・密度

### 2.6.1 試験片製作

焼結体の一边を20.0mmとする正六角柱を3個製作した。

### 2.6.2 測定器及び方法

試験片の質量を体積で除して見かけ密度の平均値とその標準偏差を算出。

電子天秤(AG245, メトラー・トレド社)で質量を測定。密度・比重測定装置(ペンタピクノメータ, カンタクローム社)の試料室体積10cm<sup>3</sup>でヘリウムガスの気体置換法により自身が占める容積を測定した。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 幾何特性・長さ

図3に測定値から設計値を差し引いた絶対誤差を設計値で除した相対誤差を示す。補正計算した造形体から焼結による収縮を経ても相対誤差1.3%未満の寸法精度を有する焼結体を得られた。なお、設計値10.0mmのM形標準ノギスの値は、最小読取値0.05mmを原因とした外れ値である。

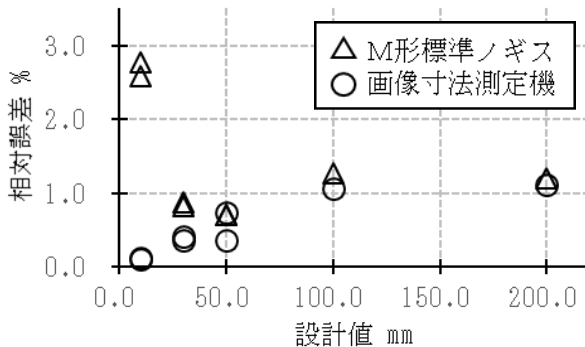


図3 辺の寸法精度

#### 3.2 幾何特性・表面性状

図4に走査方向及び積層方向それぞれの実表面の断面映像と評価長さ4.0mmの粗さ曲線の一例を示す。本来であれば、JIS B 0651:2001に定める粗さ曲線用のカットオフ値を適用するところであるが、画像寸法測定機のデータ取得の限界によりサンプリング間隔0.9μm以下、λs8.0μmに改めて粗さ曲線を求めた。

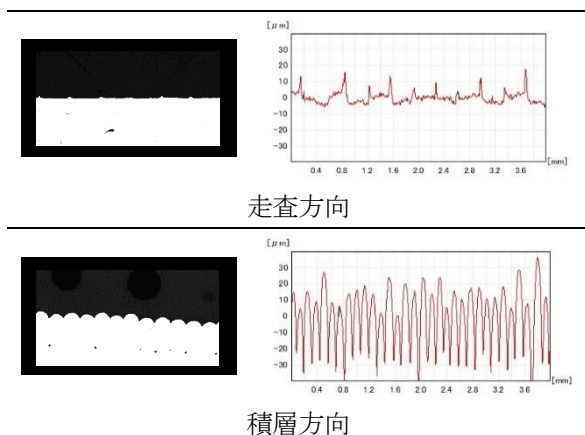


図4 実表面の断面映像(左)と粗さ曲線(右)

表1に高さ方向のパラメータで算術平均粗さRaと最大高さ粗さRz、横方向のパラメータで平均長

さRSmの平均値を示す。積層方向の面は外観目視でわかる程の粗さを確認できるが、その値は走査方向の面に対して数倍となった。

金属同士を組み合わせたとき、表面が粗いほど接触面の影響で摺動性や気密性などは悪くなる。このような用途では後加工のための取り代を設計段階で確保する対応が求められる。

表1 粗さパラメータ

		(n=3)		
		Ra μm	Rz μm	RSm mm
90度	走査方向	2.4	15.8	0.33
	積層方向	12.6	65.7	0.16
45度	走査方向	2.5	18.4	0.36
	積層方向	12.2	62.9	0.16

#### 3.3 機械的特性・硬さ

表2に試験結果を示す。若干の偏差はあるが、立方体は走査方向、積層方向、さらに走査方向で内側の交わる角度に関係なく一様な硬さであり、HRC28を得た。

表2 ロックウェル硬さ試験HRC

		(n=3)	
		走査方向	積層方向
90度	平均値	28	28
	標準偏差	0.9	1.2
45度	平均値	28	29
	標準偏差	1.1	0.8

#### 3.4 機械的特性・引張強さ

表3に試験結果及び図5に平行部の破断の様子を示す。同一条件の焼結体にもかかわらず、走査パターンによる異方性は引張強さに違いを与え、また、標点外破断した試験片数を除くn=2による破断伸びはいずれも全く伸びず、その破断の様子は走査パターンの影響を受けたようにみえる。

表3 引張試験

		(n=3)	
		引張強さ N/mm <sup>2</sup>	破断伸び %
90度		1078	3
45度		1024	1



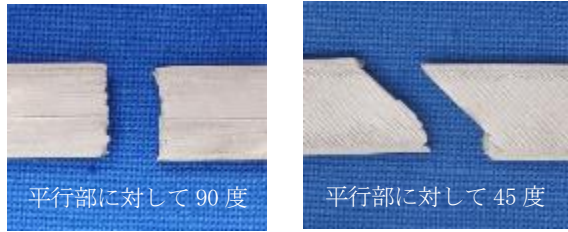


図5 平行部の破断の様子

17-4 PH Stainless Steel (SUS630) は固溶化熱処理と析出硬化処理を行うことで機械的性質が変化する鋼材であるが、今回の破断伸びは少なくとも析出硬化処理が行われていないことを示す。

次に走査型電子顕微鏡 (SU6600, 日立ハイテクノロジーズ) を使用し、平行部に対して 90 度の破面を観察した。図 6 のとおり構造内部に空隙が確認でき、隣り合った走査パターンとの境界面を起点に破断したものと推察される。

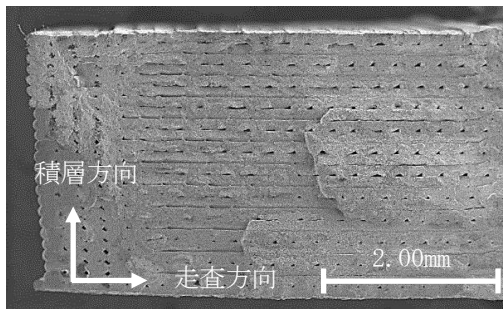


図6 破面のSEM像

### 3.5 構造評価・非破壊試験

図 7 に音響映像を示す。映像の一部に不明瞭な箇所はあるが、探触子の走査範囲において金属とは異なるものが検出された。

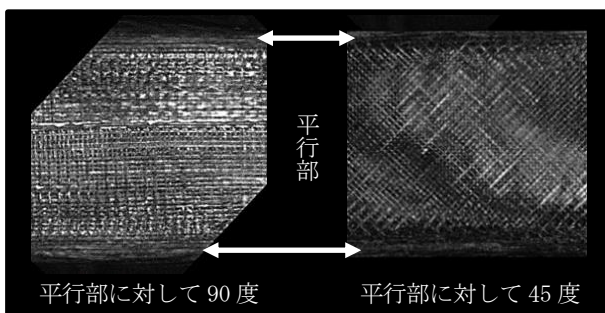


図7 音響映像

超音波映像装置は対象物から反射した超音波の強度を測定しており、内部の密度差に応じて反射

強度の濃淡が映像表示される。今回の結果は金属内部に空隙が存在していることを示し、その配置は走査パターンに合致する。

図 8 に空隙形成の模式図を示す。ノズル先端から材料が線状に押し出される時、隣り合う走査パターンとの境界面で材料が埋めきれない空間が生じていると考えられる。そのため層ごとに直交する空隙が形成されることになり、図 5 のような破壊の起点になり得る。

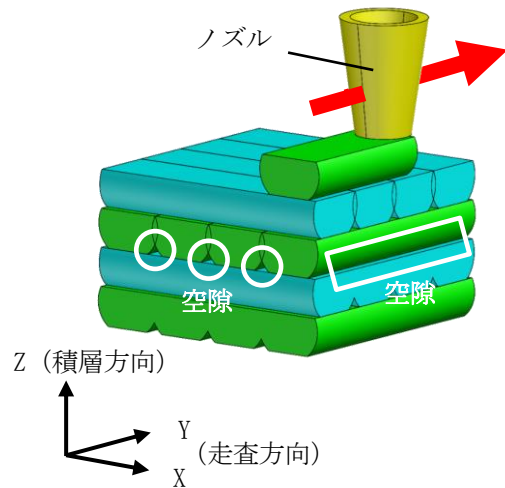


図8 空隙形成の模式図

### 3.6 構造評価・密度

見かけ密度は平均値  $7.53 \text{ g/cm}^3$  (その標準偏差は  $0.003$ ) となった。JIS G 4303:2021にあるSUS630の基本質量  $7.78 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{m})$  に対する相対密度で96.8%の金属が焼結で得られたことになる。

### 4. まとめ

今回、走査パターンによる異方性を踏まえつつ幾何特性、機械的特性及び構造評価を実施した。

補正計算された造形体は収縮により焼結体になるが、その寸法精度は一辺200mmまでは相対誤差1.3%未満であった。また、測定値から設計値を差し引いた絶対誤差はこの範囲において線形変化であり、焼結による収縮は構造に対して一様と判断した。一方、ノズル先端から線状に材料を押し出すという造形装置の特性上、その表面性状は箇所によって大きく異なることから期待する機能への対応が求められる。

17-4 PH Stainless Steel (SUS630) は熱処理を施すことでJIS G 4303:2021に定める機械的特性が

得られる。しかし、硬さ試験及び引張試験の結果はこれに該当せず、本来の特性を得るためには再度、熱処理条件を満たす必要がある。

焼結で相対密度96.8%の金属は得られるものの、構造内部には走査パターンによる異方性とこれに起因する空隙が存在する。異方性は引張試験のような荷重に対して影響を及ぼし、さらに空隙はそれ自体が破壊を起こす起点となる。そのため、空隙は構造上の欠陥として考慮する必要がある。