

# MIM 技術者が解き明かす 金属フィラメント 3D プリンタ — L18 直交表を用いた MEX 方式金属積層造形の パラメータ設計 —

浜松メタルワークス㈱ 谷川 啓人\*、小杉 峰弘\*\*

浜松メタルワークスは、2025 年にテイボー（浜松市中央区）の MIM 事業部が独立して発足した会社であり、独立以前から 30 年以上にわたって MIM (Metal Injection Molding：金属粉末射出成形法) による金属部品の製造・販売および技術開発を手がけてきた。現在はその経験を活かし、MEX 方式金属積層造形の実用化にも取り組んでいる。

## MIM と MEX 方式金属 AM

MIM は、金属粉末とバインダ（樹脂などの結合剤）を混練・射出成形し、脱脂と焼結工程を経て金属部品を製造する手法である。複雑形状の部品を高精度で量産できるのが特徴である一方、金型を要するため少量多品種品や試作品の製造・製品の設計変更への柔軟な対応には不向きである。

一方、金属 3D プリンタによる金属 AM (Additive Manufacturing：付加製造・積層造形) は、金型レスで金属製品を 1 点から製造することが可能な手法だが、最も主流の PBF (Powder Bed Fusion：粉末床溶融結合) 方式は装置価格が数千万円以上する高額な装置で、金額面での導入ハードルが高い。

対して、MEX (Material Extrusion：材料押出) 方式は樹脂用 3D プリンタとして装置価格が数万～数百万円程度の安価なものが広く普及している。また、金属粉末とバインダを混合した MEX 用金属フィラ

メントが 2～3 万円 /kg から市販されており、造形物（グリーン体）を MIM 同様に脱脂・焼結することで金属部品の製造が可能である。一方で、MEX の造形パラメータ設定項目は非常に多岐に渡るうえ、金属フィラメントは樹脂フィラメントに比べて推奨造形速度が遅く高価であるため、造形条件の検証を行うには時間とコストを要する。

そこで、長年 MIM による部品製造を行ってきた当社の知見を活かして、金属フィラメントの造形性に与える影響が大きいと思われる造形パラメータに関して、L18 直交表を用いて各パラメータと品質の関係を明確にしたうえで、パラメータ設計<sup>1)</sup>を実施した。

## 実験条件

### 1. 実験材料および装置

実験材料には、ForwardAM 社製「Ultrafuse17-4PH (φ1.75 mm)」を用いた。本材料は約 50～60vol% の SUS630 金属粉末と POM を主成分とするバインダから構成されており、樹脂フィラメントと比べて強度が低い・密度が高い・冷却が速いといった特性を持つ。使用した装置の諸元を表 1 に示す。

装置は材料特性を考慮し、

- ① スプールホルダがエクストルーダー上部に位置し、フィラメント送給部の曲率が低い
- ② スプールホルダにベアリングが搭載されており、材料引き出し時の負荷が少ない
- ③ ダイレクトエクストルーダー方式で、フィラメント送給時に材料に曲げ荷重が加わりにくい
- ④ 材料を含め装置全体がカバーで覆われており、

\* Keito Tanigawa：技術開発部 素材開発課

\*\* Takahiro Kosugi：同 部長

〒431-2102 静岡県浜松市浜名区都田町 11135  
TEL(053)415-8777

表 1 装置諸元

機種	Raise3D Forge1
ノズル径	φ0.4 mm
ノズル材質	Cu 合金 +Ni めっき
プレート材質	ガラス

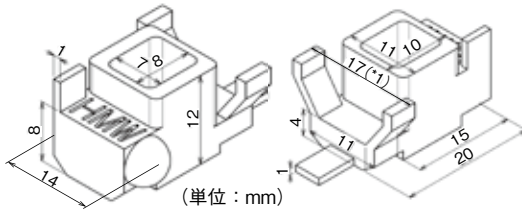
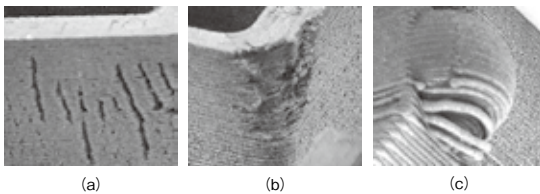


図 2 サンプル形状および寸法測定箇所



- (a) 吐出抜け：ビードの吐出が部分的に途切れた箇所  
 (b) 削れ：ノズル先端に付着した材料が垂れ下がることで、造形済みのグリーン体と衝突して削れた箇所  
 (c) 半球下面：下面ビードが定着せずにビードが垂れ下がった箇所

図 3 外観評価項目

外気の影響を受けにくい

といった構造をもつ「Raise3D Forge1」を選定した。サンプル作製時の工程の流れを図 1 に示す。

造形時にはプレートと材料の定着を高めるための水溶性定着材 (Magigoo Metal) を使用し、造形後にプレートごと水道水に浸漬して溶解させたあと、80℃のオープンで乾燥させてグリーン体を得た。

グリーン体に対して、触媒脱脂 ( $N_2$ + 硝酸混合ガス雰囲気、120℃) を行いバインダ主成分の POM を分解したあと、残存バインダの熱脱脂 ( $N_2$  雰囲気、600℃) と焼結 (Ar 雰囲気、1,300℃) を経て、SUS630 の焼結体を得た。

なお、脱脂および焼結時の温度と時間設定は、ForwardAM 社の推奨条件<sup>2)</sup>に準拠し、雰囲気や昇温速度は設備の仕様に合わせて調整した。

## 2. サンプル形状および評価項目

実験で用いたサンプル形状および焼結後の設計寸法・測定箇所を図 2 に示す。サンプル形状は、XYZ 各方向でそれぞれ複数箇所が測定できる形状とした。

特性値と評価・測定方法を表 2 に示す。また、外

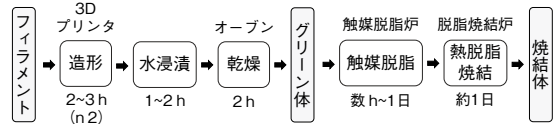


図 1 サンプル作製工程

表 2 評価項目 (特性値) 一覧

評価項目 (特性値)	評価・測定方法
転写性 (寸法)	マイクロメーター (最小表示量 0.00 1mm)
密度	アルキメデス式密度計
外観 (吐出抜け)	外観の優劣に応じ 5 段階評価
外観 (削れ)	A: 10 点 B: 7.5 点 C: 5 点
外観 (半球下面)	D: 2.5 点 E: 0 点
硬さ (HRA)	ロックウェル硬さ試験機
変形量	図 2(*1)部の測定値から (焼結体寸法 - グリーン体寸法 / 拡大率) にて算出

表 3 制御因子・誤差因子一覧

	制御因子	水準 1	水準 2	水準 3
A	配置	斜め 45°	長手 X	—
B	流量	93%	96%	99%
C	リトラクト量	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm
D	造形速度	60%	100%	140%
E	ノズル温度	210℃	230℃	250℃
F	プレート温度	100℃	110℃	120℃
G	レイヤー高さ	0.10 mm	0.12 mm	0.20 mm
H	押出幅	0.36 mm	0.40 mm	0.44 mm
誤差因子 N1/N2		新品ノズル / 摩耗ノズル		

観評価項目の詳細を図 3 に示す。

## 3. 制御因子の割り付け

制御因子と誤差因子の一覧を表 3 に示す。なお、A ~H のパラメータのうち、A (配置) と C (リトラクト量) 以外は下線部の現行条件 (スライサーソフト上のデフォルト値) を第 2 水準とした。

D (造形速度) は造形部位によって設定値が異なるため、現行条件 (例: 壁面 20 mm/s、内部充填 30 mm/s など) を 100% として、一律で 60% もしくは 140% に増減させた。

また、図 4 に示す摩耗前後のノズルを誤差因子とし、新品ノズルを N1、摩耗ノズルを N2 とした。

摩耗ノズルは、メーカーが交換の目安とする、金属フィラメント 3 kg 造形後のものを用いた。

選定した制御因子を表 4 に示す L18 直交表に割り当て、スライサーソフト (ideaMaker for Metal)