

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（第1報）

生産技術室 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋
 材料技術室 一箭 喜晴, 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

And Yoshiharu ICHIYA, Hiroyuki YOSHIDA, Masahiko NAKAMURA, Takayuki YAMAMOTO

本県ではMIM（金属粉末射出成形）技術を応用した金属3Dプリンタを導入したため、今後予想される県内企業への需要に対して金属3Dプリンタへの高い知見を要求されるようになると考えられる。そのため、プリンタで作製される造形物に関して造形精度や内部面の観察について評価を行った。本報では、評価を通じて造形する段階での造形予測、技術力の向上などにつながったので報告する。

1. はじめに

金属3Dプリンタは、マシニングなど既存の加工方法では作製できない形状を一体部品として作製できることから、近年、医療、航空、自動車など様々な分野で採用されている。当研究所で平成30年度に導入した金属3Dプリンタ「METAL X」は3D積層造形方式とMIM（金属粉末射出成形技術）を組み合わせた造形が可能である。製品試作、短ロット製品などの造形目的でこの金属3Dプリンタを使用した時の性能を調査して利用者の満足のいく製作が可能か、また事前に造形予測判断の習得を本研究の目的とする。

2. 実験方法

2.1 形状評価

金属3Dプリンタ（表1、図1）でステンレス材料（SUS630相当）を使用し単純な形状のものから複雑な機械部品等を造形していき造形から焼結までの全行程を実施する。造形品の外観を目視で確認し、出来具合を判断、また明らかに造形に不良があるかの可否判断をした。そして各工程（造形、洗浄、焼結）による不具合等がないかを調査した。

表1 使用機器

機器名	製造者	型式
金属3Dプリンタ	Markforged	METAL X



図1 METAL X 外観

2.2 精度評価

この金属3Dプリンタは焼結による金属粉末の結合による縮小を計算してあらかじめ大きめに造形される。そのため、縮小の具合が寸法精度にどう影響するのかを考え、造形物のCADモデルの設計数値を基準に画像寸法測定機（表2）による造形物の寸法測定を実施した（図2）。

測定する造形物の形状については形状評価で問題なくこの金属3Dプリンタで造形可能なサイズの単純な形状の外形寸法（長方形、薄板、三角形、円筒、円錐等）で測定を行った。測定結果を日本産業規格（以下JIS）の普通公差¹⁾と比較するとどの程度の公差等級なのかを調査した。

また、プリンタヘッドによる動線、積層痕により目視でなく、表面粗さを数値化したとき造形物各面のざらつき具合がどの程度なのかを比較用粗さ標準片（JIS B 0659準拋²⁾）を使用して調査した。

表2 使用機器

機器名	製造者	型式
画像寸法測定機	ミットヨ	QVTP Apex302PRO

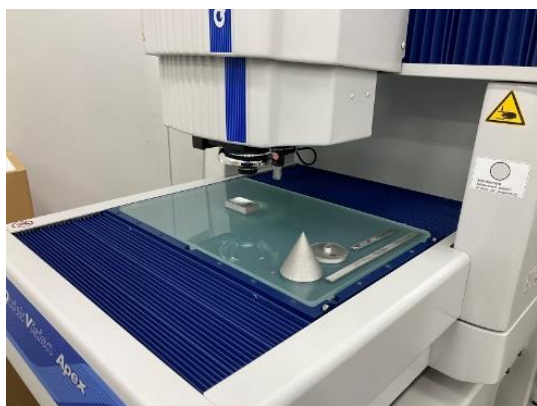


図2 測定風景

2.3 造形物の組織及び組成評価

組織の観察には、20mm角の立方体(中実)形状に造形した金属3Dプリンタ造形物を用いた。図3に示すとおり、造形物を切断し、耐水研磨紙による研磨、その後ダイヤモンド懸濁液による研磨により鏡面を出し、王水・塩化第一銅飽和溶液によりエッチングし、観察試料を作製した。

また、今回使用した造形材料(樹脂と金属を混練した専用フィラメント)はSUS630相当であるが、全行程を実施後、造形物がJIS規格通りSUS630相当の成分³⁾であるか、また残留物等がないかICP発光分光分析装置により成分分析を行った。

なお、組織及び組成評価で用いた装置は表3のとおりである。

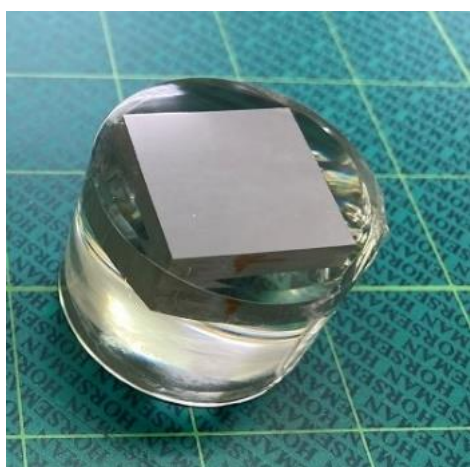


図3 切断研磨した造形物断面

表3 使用機器

機器名	製造者	型式
三次元マイクロ スコープ	キーエンス	VHX-1000/1100
ICP発光分光 分析装置	スペクトロ社	ARCOS MV130・FHM22

3. 結果及び考察

3.1 外観での評価

3.1.1 目視による表面状態

積層して造形するプリンタであるため積層方向からみて側面は積層痕が見られる。曲面での造形であると階段状に積層されていることがわかる。また造形物上面はプリンタヘッドによる動線跡が目視で確認できる(図4)。

積層痕ならびに動線跡については造形後もしくは焼結後に後加工による研磨等を実施すれば改善される(図5)。

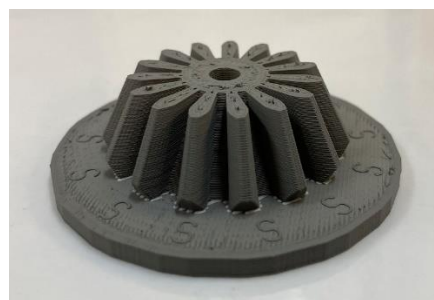


図4 積層痕(側面), 動線跡(上面)

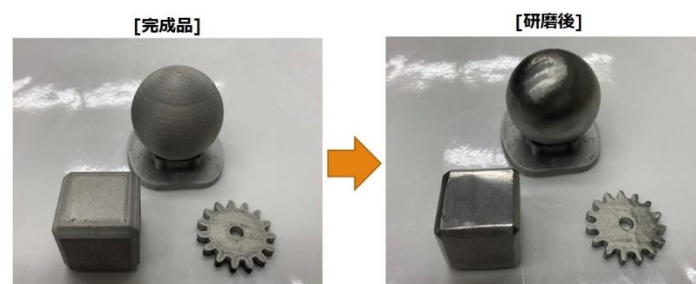


図5 研磨による表面処理

3.1.2 造形困難ならびに不可例

基本的にプリンタヘッドによる積層を繰り返す工程であるため立方体や平面的な造形については問題なく造形は可能である。複雑な機械部品等もはめあい公差, ネジ穴等精度が要求される箇所以外は概ね造形可能であった。しかし、単純な形状でも三角部の先端部の鋭角部についてはプリンタ

ヘッドのノズル径の仕様上、丸みを帯びるもしくはつぶれてしまうことが確認できる(図6)。

積層方向に対して薄い板状の造形を行うとサポート土台等の固定ができないため崩れてしまう場合がある。造形工程のみならず、洗浄、焼結工程においても水流等外的要因による負荷で作業中に傾くまたは崩れてしまう恐れがあるため造形にはある程度の厚みが必要である(図7)。

また傾斜が高い部品についてはサポート土台を作製せずに造形することが可能だが部品の重心等の影響で上記薄い板状造形と同じく崩れてしまう可能性があることがわかった。

造形不可ではないが中空がある部品についてはサポート土台を造形する必要がある。サポートの造形物接触面以外は同材質のため形状によってはサポートの除去が困難な場合がある(図8)。

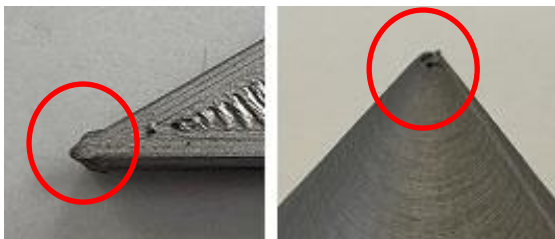


図6 鋭角部の不良



図7 薄板造形の不良

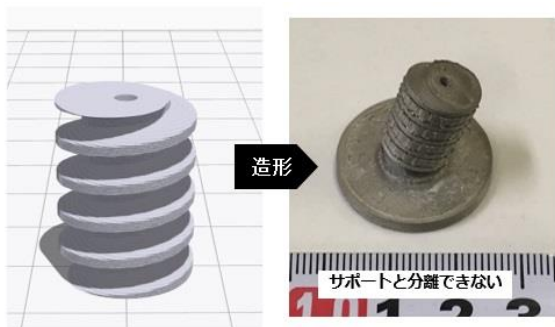


図8 サポート除去困難例

3.2 測定による公差精度

3.2.1 公差寸法

測定結果を表4に示す。全体的にCAD時の設計寸法から造形物完成時の各寸法を比較してみると設計時より概ねプラス公差で完成していることがわかった。また、外形寸法が大きくなるにつれて精度も粗くなり100mmを超えてくると普通公差¹⁾の削り加工寸法の普通許容差における公差等級が極粗級になる結果となった。

鋭角な先端がある部品については先端部が丸みを帯びたり、欠けたりして造形自体が出来ないため測定数値にばらつきが発生した。

画像寸法測定機で造形物を拡大してみると図9のとおり積層方向側面は凹凸形状なのが見られるため、後処理加工無しの場合、精度を要求する面には積層方向を考慮してから造形を開始する必要がある。

表4 寸法公差

単位：mm

設計数値	10	30	50	100	200
測定数値	10.07	30.15	50.24	101.12	202.28
公差	0.07	0.15	0.24	1.12	2.28
公差等級	中級(±0.1)	中級(±0.2)	中級(±0.3)	極粗級(±1.5)	極粗級(±2.5)

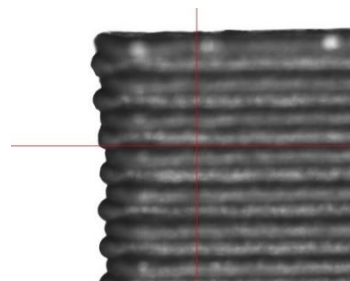


図9 造形物側面 拡大撮影

3.2.2 造形物の表面粗さ

観察する造形物の表面を積層方向から見て平行、垂直、傾斜(曲面)、サポート土台の剥離部分を観察し粗さの基準²⁾と比較したところ、表5のとおり並仕上げから荒仕上げ相当となった。しかし、サポート剥離部については荒仕上げ並であった。

剥離面にはセラミック材料を積層して焼結後に剥離するが機器の仕様上、セラミック材料の塗布ノズルは造形材料のノズルより射出径が大きいいため、その差で動線間に隙間が生まれて面が波状形状となり大きなざらつきが発生し他の面に比べ粗くなるためである。

表5 各面の粗さ

	算術平均粗さ	仕上げ面
平面	6.3a~12.5a	並仕上げ~荒仕上
垂直	6.3a~12.5a	並仕上げ~荒仕上
傾斜	6.3a~12.5a	並仕上げ~荒仕上
剥離部	25a以上	荒仕上げ

3.3 造形物の組織及び組成評価

3.3.1 造形物断面の観察及び組織観察

図10は、20mm角の立方体(中実)形状に造形した造形物断面のOM像を示したものである。代表的な箇所を赤いラインにて示したように、規則正しく発生しているポイドが確認できる。積層造形の際、プリンタヘッド動線の造形パスの縁にポイドが発生したものと考えられる。またこのポイドは形状にもよるが、図11に示すとおり、金属3Dプリンタソフトウェアが自動設計されるプリンタヘッド動線の造形パスにより造形物表面に表れることがある。一連の造形工程完了後は、焼結が完了しているため修正が難しい。そのため焼結前に修正作業をする必要がある。

図12は、更に倍率を上げた撮影した、造形した造形物断面のOM像を示したものである。黒い部分はδフェライトが確認できる組織となっており、白色部のマトリックスはマルテンサイトがみとめられる⁴⁻⁶⁾。本来であれば、SUS630は、固溶化熱処理(溶体化熱処理)後に、析出硬化熱処理(時効硬化熱処理)を施し、Cu-rich相を析出させることで、高強度と高硬度を得る⁷⁻⁹⁾。

本工程において、焼結工程は自動で行われるため詳細を知ることはできないが、装置及び組織より推察すると、少なくとも、上記工程の踏んでいないと思われる。このことが、機械的特性に対し、どう影響するのかを今後も調査する必要がある。

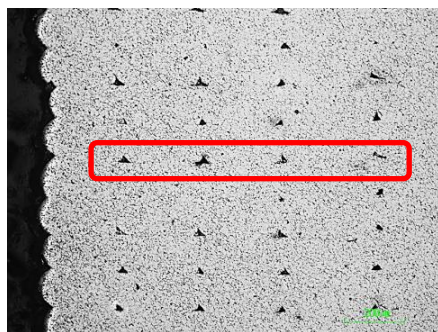


図10 造形物断面のOM像

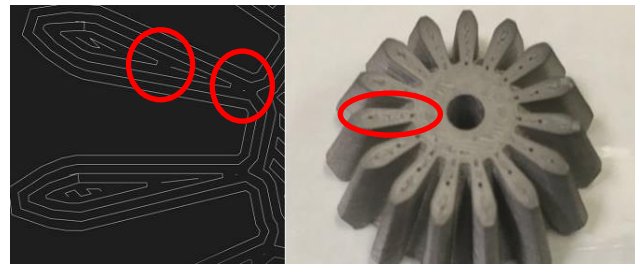


図11 表面のポイド発生例

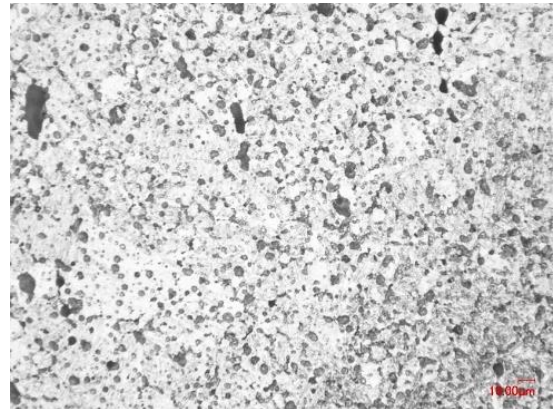


図12 拡大した断面写真

3.3.2 元素分析

表6は、造形物の成分元素をJIS G 1258-3¹⁰⁾等で分析した結果を示したものである。下段に参考としてJIS規格値³⁾を示した。両者を比較すると、析出硬化系のSUS630相当の規格値内³⁾であることが確認できた。このことにより洗浄工程等により、多量のワックスや樹脂の残留物はないものと考えられる。

表6 造形物分析結果及びSUS630JIS規格値³⁾

測定結果	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb
	0.05%	0.28%	0.15%	0.034%	0.005%	4.19%	16.51%	4.00%	0.18%
JIS規格値	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb
min						3.00%以上	15.00%以上	3.00%以上	0.15%以上
max	0.07%以下	1.00%以下	1.00%以下	0.04%以下	0.03%以下	5.00%以下	17.50%以下	5.00%以下	0.45%以下

4. まとめ

形状の評価については鋭角な箇所や薄板形状以外は単純な形状であれば造形可能であることが分かった。内部が中空構造のものについてサポートの除去方法等を計算して造形条件を考える必要がある。

無加工の状態では寸法ならびに表面精度が粗く外観で見てもはつきりざらつきが見えるためそのまま精度が高い部品、短ロット製品に活用するの

は難しいと思われる。しかし、工数は増加するが研磨等の後工程を実施すれば改善は可能である。サイズの大きい造形物は公差が大きく影響するため、外形寸法以外にも精度を要する箇所を造形する場合、多少なりとも公差が影響するため注意が必要である。

内部観察をしたところ化学成分は特段問題ないが、積層造形によるボイド等が見られる。また、組織を含め、機械的特性について今後調査していく予定である。

参考文献

- 1) JIS B 0405 : 1991 普通公差
- 2) JIS B 0659 : 2002
製品の幾何特性仕様 (GPS)
- 3) JIS G 4303 : 2012 ステンレス鋼棒
- 4) 佐藤知雄：増補 3 版鉄鋼の組織写真と解説, 200 (1989) 丸善(株)
- 5) 山本科学工具研究社：標準顕微鏡組織 (第 3 類), 62
- 6) 仁平宣弘：熱処理のしくみと技術, 108 (2017) (株)ナツメ社
- 7) 日本鉄鋼協会編：第 5 版鋼の熱処理, 568 (1968) 丸善(株)
- 8) 長谷川正義：ステンレス鋼便覧, 487 (1975) (株)日刊工業新聞社
- 9) 中山英樹, 京極秀樹, 小松眞一郎 : 44, 11, 1019 (1997) 粉体および粉末冶金
- 10) JIS G 1258-3 : 2014
鉄及び鋼—ICP 発光分光分析方法—第 3 部