

金属3Dプリンタにより造形したSUS630 (17-4PHステンレス鋼) の力学的特性評価

小野裕也*¹ 森本良一*¹ 小熊広之*¹ 都知木邦裕*² 南部洋平*²

Mechanical Characterization of SUS 630(17-4PH Stainless Steel) Sintered Product Printed With a Metal 3D Printer

ONO Yuya*¹, MORIMOTO Ryouichi*¹, OGUMA Hiroyuki*¹,
TOCHIKI Kunihiro*², NAMBU Yohei*²

抄録

金属3DプリンタによるSUS 630造形部品の実用化支援のため、当センター所有の材料押出 (Material Extrusion: MEX) 方式の金属3Dプリンタで引張試験片を造形し、この方式による機械的強度に与える影響の検証を行った。さらに、粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) 方式の3Dプリンタによる造形品及び圧延材との機械的強度の比較を行った。その結果、3Dプリンタによる造形品は、MEX方式ではPBF方式及び圧延材と比較して引張強さは同等の値を得られたが、気孔の影響により伸び・耐力は下回る結果となった。

キーワード：金属3Dプリンタ，SUS 630，造形方式，材料押出

1 はじめに

SUS 630は優れた耐食性を保ちながら強度を改善した磁性を持つステンレス鋼で、強度・耐食性が良好なため、航空機の燃焼系統に使われているほか、医療機器・建築資材などにも用いられている。しかし、SUS 630は切削加工性が悪く、目的形状を得るためには長時間の加工が必要となっている。

これらの問題解決のため、金属3Dプリンタによる造形が期待されている。金属3Dプリンタを用いることにより、切削では不可能な複雑形状の部品をニアネットシェイプで造形可能であり、除去加工の手間やコストを削減することができる。一方、金属3Dプリンタでの造形は、金属粉を溶融 (焼結) して成形するため、造形物内部に気孔が生じ強度

が低下する可能性がある。そこで本研究は、当センター所有の金属3Dプリンタによる SUS 630造形部品の実用化支援のため、以下について検証を行った。①相対密度、②気孔の発生状況、③気孔及びノズルの走査方向の違いが強度に与える影響、④寸法効果。さらに、粉末床溶融結合 (以下、PBF という) 方式の造形品及び圧延材との機械的強度の比較を行った。

2 実験方法

2.1 試験片の造形

造形には、材料押出 (以下、MEX という) 方式である Markforged 社の Metal X を使用した。この装置は、金属粉末に油脂と熱可塑性樹脂 (以下、バインダーという) を混合したフィラメントを使用する造形装置であり²⁾、積層造形した造形物からバインダーの除去を行い、残った金属粉末を焼結することによって金属製品を造形することがで

*1 材料技術担当

*2 機械技術担当

きる³⁾。試験片形状は JIS Z2241:2022 に規定されている 14B 号試験片 (厚さ 3mm、平行部の幅 6mm) とした。造形条件を表 1 に示す。輪郭→45°、輪郭→135° を繰り返して造形した試験片を姿勢①、同様に輪郭→0°、輪郭→90° を繰り返して造形した試験片を姿勢②とした (図 1)。さらに、図 2 のとおり、Z 軸方向に輪郭→45°、輪郭→135° に造形した試験片を姿勢③、輪郭→0°、輪郭→90° に造形した試験片を姿勢④とした。

表 1 引張試験片の造形条件

	奇数層	偶数層
姿勢①③	輪郭 4 周後、平行部 に対して 45°	輪郭 4 周後、平行部 に対して 135°
姿勢②④	輪郭 4 周後、平行部 に対して 0°	輪郭 4 周後、平行部 に対して 90°
走査ピッチ : 0.25 mm、積層ピッチ 0.125 mm		
脱脂時間 : 12h、乾燥時間 : 4h、焼結時間 : 27h		

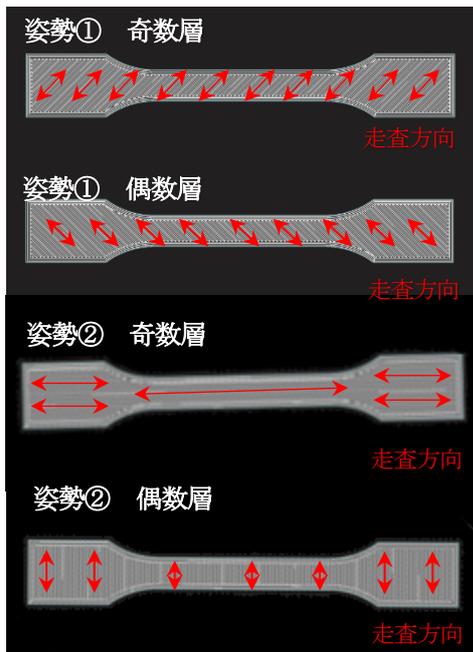


図 1 引張試験片の走査方向

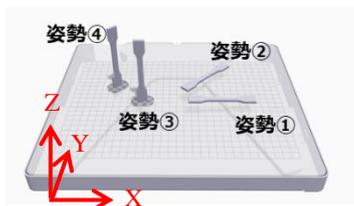


図 2 引張試験片の造形姿勢

2.2 相対密度の測定

JIS Z 8807:2012 に規定されている比重瓶法により焼結物の見掛け密度を測定し、JIS G 4304:2021 の SUS 630 の密度 (7.78g/cm³) を基に相対密度を算出した。

2.3 引張強度の試験

万能材料試験機 (AGX-300kN、(株)島津製作所) を用いて引張試験を行い、耐力、引張強さ、破断伸びを求めた。サンプル数は 3 本とした。

2.4 硬度の測定

φ20mm×10mm の円柱状の硬さ試験片 (姿勢①) を造形し、ブリネル硬さ (HBW 5/750) を測定した。

2.5 気孔・破面の観察

引張試験前の試験片 (平行部から切り出し、側面から中心部に向かって磨いた) と試験後の破面を、樹脂に埋め込んだ後に仕上げ研磨し、光学顕微鏡 (DMi8A、ライカマイクロシステムズ(株))、走査型電子顕微鏡 (SEM) (SU3500、(株)日立ハイテク) を用いて観察した。

2.6 寸法効果の検証

平行部の幅 (6mm、9mm、12mm) が異なる試験片 (姿勢①) に対して万能材料試験機 (AGX-300kN、(株)島津製作所) を用いて引張試験を行い、耐力、引張強さ、破断伸びを求め、寸法効果の検証を行った。サンプル数は 3 本とした。

3 結果及び考察

3.1 相対密度測定の結果

引張試験片平行部から 3mm×6mm×10mm の寸法に切り出して密度を測定したところ、MEX 方式 (姿勢①) が 7.60g/cm³ (相対密度 97.7%)、PBF 方式が 7.68g/cm³ (相対密度 98.8%) であった。

3.2 引張試験の結果

表 2 に姿勢①②③④及び PBF 方式と SUS630 圧延材の引張試験と硬さ試験結果を示す。姿勢①と

②では走査方向が異なるが、耐力、引張強さ、伸びのいずれの値も顕著な差は見られなかった。また、姿勢①と②は JIS G 4304:2021 に規定されている SUS630 H1150 の値と同等の値であることを確認した。

姿勢③と④では結果に顕著な差は見られず、走査方向の違いによる引張強度への影響(異方性)は確認されなかった。しかし、姿勢①②に対し、姿勢③④では耐力、引張強さ及び破断伸びが低下した。図 3 に姿勢①②と PBF 方式及び SUS630 圧延材の引張試験結果を示す。MEX 方式で造形された試験片は、PBF 方式及び SUS630 圧延材の試験片と比較して、伸びの値が小さくなった。引張強さについては、顕著な差はみられなかった。

表 2 各種試験片の引張・硬さ試験結果 (n=3)

	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	ブリネル 硬さ
MEX①	715	1125	8	306
MEX②	809	1092	6	
MEX③	611	717	4	
MEX④	657	687	2	
PBF	963	1089	20	341
圧延材	1084	1087	15	363
SUS 630 H1150	725以上	930以上	8以上	277以上

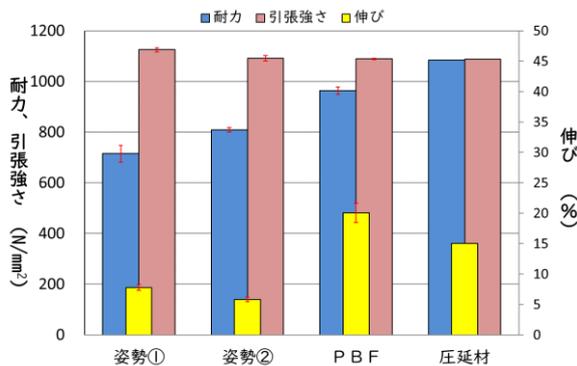


図 3 引張試験結果

姿勢① n=3
姿勢② n=3
PBF n=5
圧延材 n=1

3.3 硬さ試験の結果

測定値は 306 であった (n=3)。

3.4 気孔観察の結果

引張試験前の試験片について、図 4 に姿勢①の光学顕微鏡及び SEM による平行部の断面観察結果を示す。断面に直径 5~10μm 程度の多くの気孔が観察された。次に平行部の積層面を観察した(図 5)。姿勢①と比較して姿勢③では、表面に凹凸が観察された。この凹凸間隔は積層ピッチと一致していることから造形する際に形成されたものと考えられる。また、姿勢③は姿勢①よりも大きな気孔が表層部に観察された。これは、輪郭走査時にノズル先端から材料が線状に押し出される際、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ためと考えられる⁴⁾。

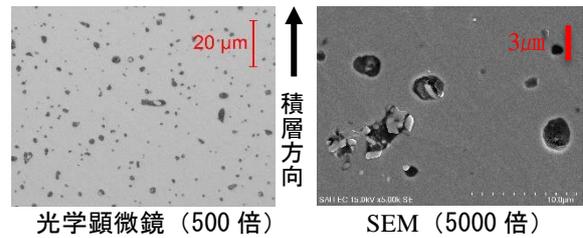


図 4 姿勢①の断面観察結果

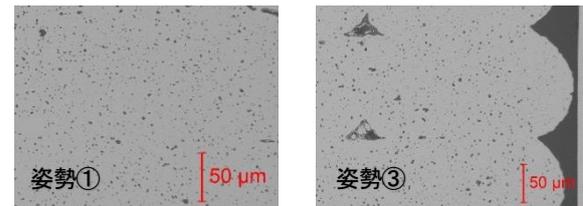


図 5 平行部の積層面 (200 倍)

3.5 引張試験後の観察結果

図 6 に姿勢③の破断面写真を示す。この写真から表面の凹凸部の凹部が破壊の起点となり、表層にある大きな気孔に伝播して破壊が進展した様子が観察された。3.2 の項で述べたとおり、姿勢①②に対して姿勢③④の引張強度、破断伸びが低くなったのは、姿勢③④は表面の凹部が起点となり、表層の大きな気孔に亀裂が伝播したことが原因と考えられる。

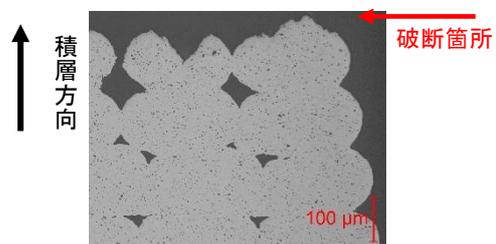


図 6 姿勢③の平行部の破断面 (100 倍)

3.6 寸法効果の検証

図7に引張試験結果を示す。平行部の幅(6mm、9mm、12mm)が異なる試験片(姿勢①)の耐力、引張強さ、伸びのいずれの値も顕著な差は見られず、寸法効果は確認されなかった。

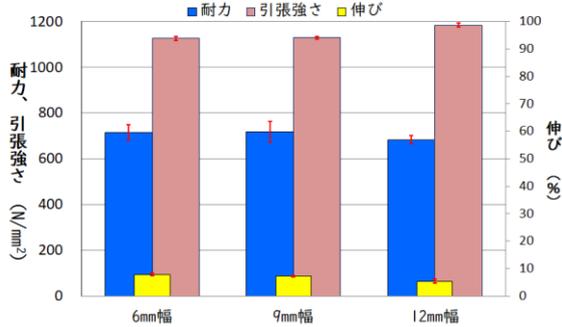


図7 引張試験結果(平行部幅別)

4 まとめ

金属3Dプリンタで造形したSUS630焼結物の力学的特性を評価したところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 相対密度はMEX方式が97.7%、PBF方式が98.8%であった。

(2) 姿勢①と②では走査方向が異なるが、引張強度・破断伸びにおいて顕著な差はなく、異方性は確認されなかった。また、姿勢③と④についても同様であった。

(3) MEX方式とPBF方式の引張強度は同程度であったが、破断伸びはPBF方式の方が約3倍大きかった。

(4) 姿勢①②に比べて姿勢③④の引張強度・破断伸びは低かった。これは姿勢③④では造形時において表層部に大きな気孔が形成されやすく、表面の凹部が起点となり、気孔に亀裂が伝播したことが原因と考えられる。

(5) 造形した試験片のブリネル硬さ(HBW 5/750)はJIS G 4304:2021に規定されているSUS630 H1150の値と同程度であった。

(6) 平行部の幅(6mm、9mm、12mm)が異なる試験片の引張強度・破断伸びに顕著な差はなく、寸法効果は確認されなかった。

本研究を進めるに当たり、PBF造形物を提供していただきました地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 千葉浩行主任研究員に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中山 英樹, 京極 秀樹, 小松眞一郎, “MIMプロセスによるSUS630焼結体の組織と機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響”, 粉体および粉末冶金 第45巻第9号 pp.882 (1998).
- 2) 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋, 吉田 浩之, 中村 昌彦, 山本 貴之, “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)”, 千葉県産業支援技術研究所研究報告 No.20, pp. 18-22 (2022).
- 3) 多川 信也, 谷口 幸典, “FFF方式金属3Dプリントの脱脂・焼結プロセスにおける不良の改善”, 奈良県産業振興総合センター研究報告 No.49, pp.5 (2023).
- 4) 富山 和也, 城之内 一茂, 花澤 明洋, 吉田 浩之, 中村 昌彦, 山本 貴之, “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”, 千葉県産業支援技術研究所研究報告 No.20, pp. 11 (2020).

謝辞