

金属3Dプリンタで造形したInconel 625焼結物の機械的強度評価

小野裕也*¹ 森本良一*¹ 小熊広之*¹ 都知木邦裕*² 女鹿貴信*** 南部洋平*²

Mechanical Strength Evaluation of Inconel 625 Sintered Product Printed With a Metal 3D Printer

ONO Yuya*¹, MORIMOTO Ryouichi*¹, OGUMA Hiroyuki*¹,
TOCHIKI Kunihiko*², MEGA Takanobu***, NAMBU Yohei*²

抄録

金属3DプリンタによるInconel 625造形部品の実用化支援のため、金属3Dプリンタで4種類の走査方向の異なる引張試験片を造形し、機械的強度の測定及び光学顕微鏡・SEMによる観察を行った。その結果、積層方向の違いによって、引張強度、破断伸びとも差があることが明らかとなった。この理由は、①試験片平行部に発生した気孔の影響②表面の凹凸や表層に発生した大きな気孔の影響と考えられる。

キーワード：金属3Dプリンタ，Inconel 625，焼結物，材料押出

1 はじめに

Inconel 625はNiとCrの他にMoとNbを固溶する固溶強化型合金で、耐熱性、耐食性が良好なため、航空機の燃焼システムに使われている他、発電所設備用部品などにも用いられている。しかし、主要成分であるNi, Cr, Mo及びNbはレアメタルであることから、使用量の削減が世界的に求められている。さらにInconel 625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。3Dプリンタを用いれば、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、材料のムダが少なく、脱炭素化にも寄与する。一方、金属3Dプリンタでの造形は、金属粉を熔融（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。本研究は、金属3Dプリンタによる

Inconel 625造形部品の実用化支援のため、気孔の発生状況、気孔及びノズルの走査方向の違いが強度に与える影響を評価した。

2 実験方法

2.1 金属 3D プリンタ

造形には、Markforged 社の Metal X を使用した。この造形機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¹⁾、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得ることができる²⁾。

2.2 試験片の造形

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 に示した。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

*¹ 材料技術担当

*² 機械技術担当

*** 現 埼玉県計量検定所

た試験片を姿勢②とした(図1)。更に、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: 28h		

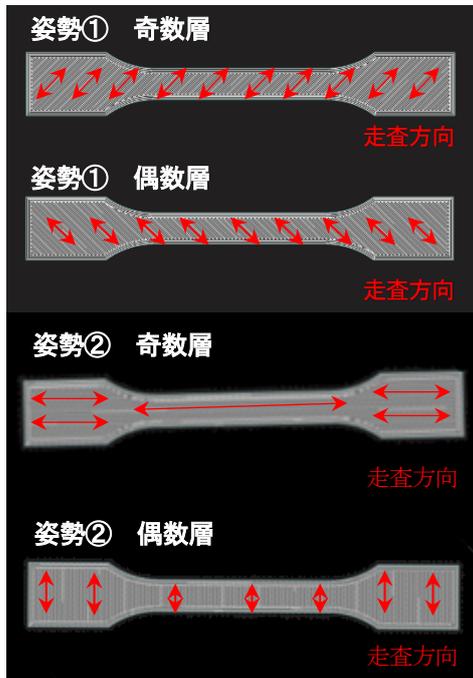


図1 引張試験片の走査方向

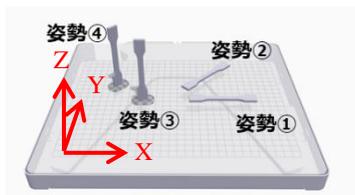


図2 引張試験片の造形姿勢

2.3 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、圧延材の

Inconel 625 の密度 (8.44g/cm³) を基に相対密度を算出した。

2.4 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 (n=3)。

2.5 硬度の測定

ブリネル硬度試験機 (H-15338、三精工業株) により硬さを求めた (n=3)。

2.6 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。

3 結果及び考察

3.1 密度測定の結果

姿勢①③の試験片平行部から 3mm×6mm×10mm の寸法に切り出して密度を測定したところ、姿勢①が 8.22g/cm³ (相対密度 97.4%)、姿勢③が 8.05g/cm³ (相対密度 95.4%) あった。

3.2 引張試験の結果

図3に姿勢①②、図4に姿勢③④の引張試験結果を示した。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有意な差は見られなかった。姿勢③と④の結果も有意な差は見られず、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では引張強さ及び破断伸びが低下した。

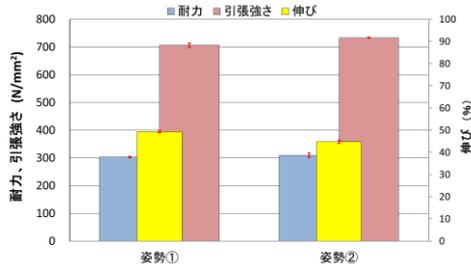


図3 引張試験結果 (姿勢①②)

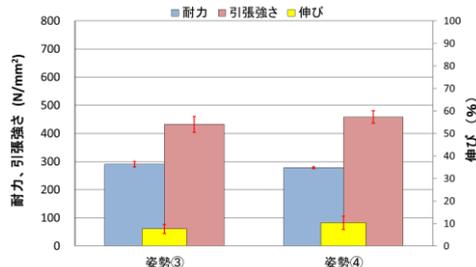


図4 引張試験結果 (姿勢③④)

3.3 硬さ試験の結果

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。測定値は190であった。

3.4 気孔観察の結果

引張試験前の試験片について、図5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した。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6)。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時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³⁾。

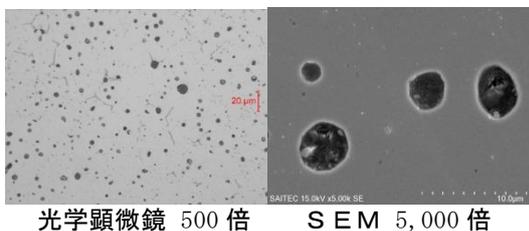


図5 姿勢①の断面観察結果

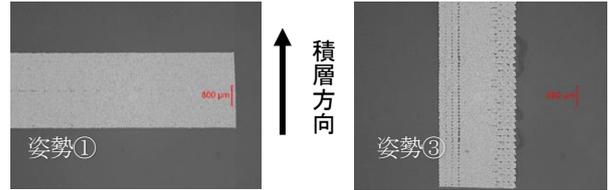


図6 平行部の積層面 (12.5倍)

3.5 引張試験後の観察結果

図7に姿勢③の破断面写真を示した。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、3.1の結果のとおり姿勢③④は姿勢①②に対して、相対密度が小さい(気孔が多い)ことと、姿勢③④では、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る。

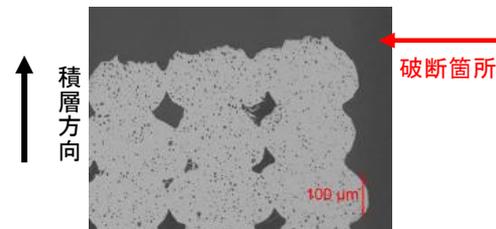


図7 姿勢③の平行部の破断面 (100倍)

3.6 圧延材との比較

表2に強度試験結果を示した。姿勢①②は圧延材のInconel 625(固溶化熱処理品)と同程度の強度であった。

表2 強度試験の結果

	耐力 (N/mm ²)	引張強 さ (N/mm ²)	伸び (%)	ブリネ ル硬さ
姿勢①	302	706	49	190
姿勢②	309	734	45	
姿勢③	290	432	8	
姿勢④	279	458	10	
Inconel 625 ⁴⁾ (固溶化熱処理品)	290 ~ 414	724 ~ 896	40 ~ 65	116 ~ 194

4 まとめ

625,(2013)3 5)

金属 3D プリンタによる Inconel 625 造形部品の実用化支援のため金属 3D プリンタで造形した Inconel 625 焼結物の機械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) 焼結物には直径 5~10 μm 程度の気孔があり、相対密度は姿勢①が 97.4%、姿勢③が 95.4%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・破断伸びにおいて有意な差はなく、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) 姿勢①②の引張強度・破断伸びは、圧延材の固溶化熱処理品と同程度であった。
- (4) 姿勢③の表面に凹凸が確認された。観察したところその間隔は積層ピッチと考える。
- (5) 姿勢①②に比べて姿勢③④の引張強度・破断伸びが低かったのは、姿勢③④の方が気孔が多かったことと造形時に生成された表面の凹部と表層部の大きな気孔の影響と考える。
- (6) 造形した試験片のブリネル硬さ(HBW 5/750)は固溶化熱処理品の規定値内であった。

参考文献

- 1) 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(2022)18
- 2) 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 (2023) 5 3) 大宮三郎, “自動制御理論”, 丸善, p123-127 (1979).
- 3) 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)
- 4) Special Metals Corporation : INCONEL alloy