

重点研究

金属 3D プリンタ 造形品の構造部材適用に向けた 耐久性・信頼性に関する研究

石川 信幸* 高岩 徳寿* 柏崎 親彦*

Study on Durability and Reliability for Application to
Structural Members of Metal 3D Printer
ISHIKAWA Nobuyuki, TAKAIWA Norihisa and KASHIWAZAKI Chikahiko

金属 3D プリンタによる造形品（金属積層造形品）は、造形時に発生する空隙等に起因し機械加工品等と比べ機械的性質が劣るとされ、疲労特性に関するデータも少ない。本研究では、3D プリンタの構造部材適用に向け、造形後に施した処理が造形品に及ぼす機械的性質及び疲労特性を評価した。時効処理無し試料と時効処理試料は、ほぼ同等の疲労限度となり溶製材の約 50%の疲労強度となることがわかった。時効処理後ショットブラストを施し表面に圧縮の残留応力を付与した試料は、未処理品に比べ疲労限度が 30%向上することが認められた。

Key Words: 3D プリンタ, 金属積層造形, 高サイクル疲労, マルエージング鋼

1 はじめに

今日のものづくりは、多品種少量生産に移行している中、いかに効率良く高付加価値の製品を製造するかが課題となっている。このような中で、3D プリンタによる造形品を治具や金型などの製造部材としてだけでなく、最終製品や部品として直接活用していく取り組みが注目されている^{1),2)}。

今後は、金属 3D プリンタを用いた 3D データからの直接製造による省力化の他、部品一体化による軽量化・機能化、オンデマンド製造などの特徴を発揮できる設計・製造技術へのアプローチが必要である²⁾。

しかし、一般的に金属 3D プリンタ造形品は、鍛造部品や機械加工品と比べ機械的性質が劣るとされ、同時に疲労特性に関する情報も少ない。これは、造形時に発生する内部の僅かな空隙等に起因して機械的性質や疲労強度が低くなるため、機械構造部材や機構部材などへの適用の妨げとなっている³⁾⁻⁶⁾。したがって、金属 3D プリンタ造形品の機械構造部材等への適用を進めるためには、造形品の機械的性質のみならず疲労特性を把握し耐久性・信頼性をあらかじめ検証しておく必要がある。

そこで本研究では、金属 3D プリンタ造形品の造形後に施した処理と、造形品の機械的性質や疲労特性との関係を把握し、疲労限度について調査した。

2 研究の方法

2.1 供試材及び試験片

供試材は、マルエージング鋼粉末を用いて金属 3D プリンタ（(株) ソディック製・OPM-250L）により造形した。造形条件は、高岩らの研究によって断面の密度が 99.89%と最大となる条件を採用した⁷⁾。造形条件を表 1 に示す。素材は、図 1 に示すとおりベースプレートに垂直な方向に積層し、直径 10mm 長さ 150mm の丸棒を作製した。また、造形に使用したマルエージング鋼の化学成分を表 2 に示す。造形した素材を試験片形状に機械加工した。試験片形状を図 2 に示す。機械加工後の試験片の一部に対し、真空熱処理炉（(株) サーマル製・VC-4）を用いて図 3 に示す熱処理サイクルで時効処理を施した。すなわち、340℃4 時間保持後 480℃3 時間保持しその後炉冷した。時効処理後の試験片の一部を粒径 1.2mm の鉄系ショットをショットタンブラスト（新東工業（株）製・STB-0B TD-2G）を用いて 3 分間投射した（以下、ショット処理）。なお、本処理は、機器の構造上詳細な投射条件を設定できない。疲労試験に供する試験片の名称と処理を表 3 に示す。以下、機械加工した試験片を「時効無し」、機械加工後時効処理した試験片を「時効処理」、時効処理後ショット処理を施した試験片を「時効+ショット」と呼ぶこととする。

*栃木県産業技術センター 機械電子技術部

表 1 素材造形条件

積層厚さ (mm)	0.04
レーザー走査ピッチ (mm)	0.12
レーザースポット径 (mm)	0.2
レーザー走査速度 (mm/s)	1000
レーザーパワー (W)	420
エネルギー密度 (J/mm ²)	87.50

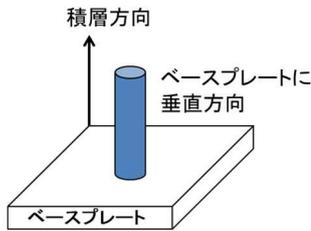


図 1 素材造形方向

表 2 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.01	0.04	0.03	0.01	0.00	17.9
Cr	Mo	Co	Ti	Fe	
0.02	4.99	8.99	0.98	Bal.	

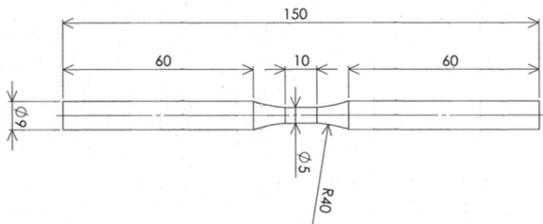


図 2 試験片形状

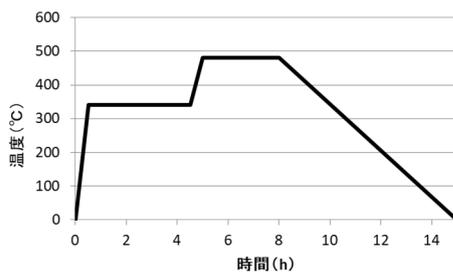


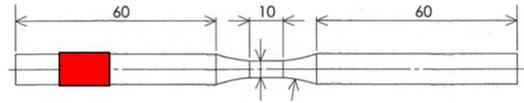
図 3 時効処理熱処理サイクル

表 3 試料名と処理

試料名称	処理
時効無し	造形素材から旋盤で試験片形状に機械加工
時効処理	時効無し試験片を、真空熱処理炉で 340°C 4h 保持、480°C 3h 保持後炉冷
時効+ショット	時効処理後に、粒径 1.2mm の鉄系ショットをショットタンブラストで 3 分間投射

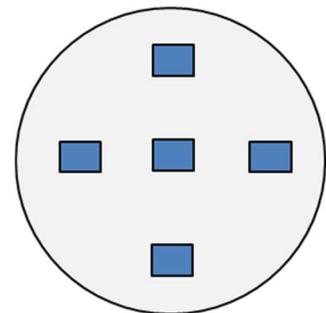
2. 2 機械的性質と残留応力の測定

試験片平行部軸方向の表面粗さ測定は、表面粗さ測定システム(アメテック(株)製・PGI840)を用いた。平行部軸方向の表面残留応力の測定は、微小部 X 線応力測定装置(リガク(株)製・Auto MATE)を用いた。測定は、 $\sin^2\Psi$ 法(Cr-K α 線, α -Fe (211))で行った。表面粗さ及び残留応力の測定は、試験片加工の工程毎に全数測定を行いその変化を確認した。時効処理により表面粗さは変化しないため時効後の表面粗さ測定は省略した。空隙率及び硬さ測定試料は、疲労試験後のつかみ部より切り出した。試料採取位置を図 4 に示す。硬さは、ロックウェル硬さ試験機((株)アカシ製 HR522)を用いて測定し、内部の空隙率は、時効無し、時効処理各 3 本を研磨し、金属顕微鏡(オリンパス(株)製・GX71)により図 5 に示す試料中央と周囲 4 か所の 5 視野を 100 倍で撮影した画像を 2 値化処理し、空隙の面積比の平均値として求めた。



■ 硬さ及び空隙率測定試料採取位置

図 4 硬さ及び空隙率測定試料採取位置



■ : 撮影位置

図 5 光学顕微鏡写真撮影位置

2. 3 疲労試験

疲労試験は、電磁共振式疲労試験機((株)ツビッコローエル製・Vibrophore100(図 6))を用いた。繰返し数は 1.1×10^7 回まで行った。疲労試験後の破面は、走査型電子顕微鏡(日本電子(株)製・JSM-5600LV)を用いて観察した。



図6 疲労試験機

3 結果及び考察

3.1 試験片の処理と機械的性質

表4に試験片の表面粗さと表面残留応力の測定結果を示す。時効+ショット試料の表面粗さは、時効無し及び時効試料の表面粗さと同等であった。時効処理後の試料の硬度はHRC51~54のため、ショット処理を施しても表面の変形は起きにくく表面粗さが変化しなかったものと考えられる。表面の残留応力は、時効無し試料が最も引張残留応力が大きく、時効処理を施すことにより引張残留応力は減少した。さらに、時効+ショット試料は、ショット処理により圧縮残留応力が付与された。

表4 表面粗さと表面残留応力測定結果

試料名	表面粗さ (μm)		表面残留応力 (MPa)
	Ra	Rz	
時効無し	0.4~2.0	2.9~8.7	135~516
時効処理			106~267
時効+ショット	0.5~1.1	3.6~7.1	-243~-345

表5にロックウェル硬さと断面の空隙率の測定結果を示す。時効処理によって材料が強化されたことが確認された。断面の空隙率は、時効処理による変化はなかった。図7に空隙率を測定した時効無し試料、時効処理試料の光学顕微鏡写真を示す。写真中の黒色部が試料内部の空隙である。

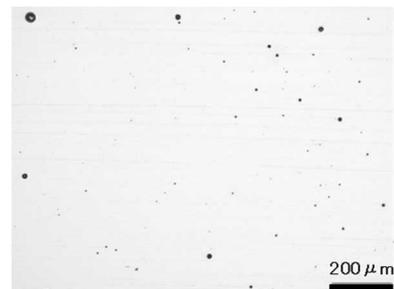
表5 ロックウェル硬さと断面の空隙率測定結果

試料名	ロックウェル硬さ HRC	断面の空隙率 (%)
時効無し	34~37	0.23~0.26
時効処理	51~54	0.22~0.29
時効+ショット		—

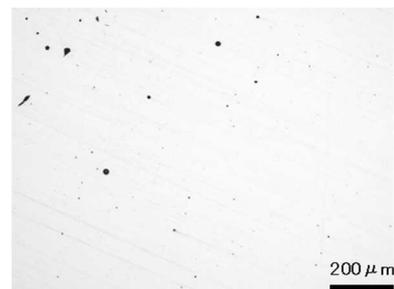
3.2 疲労強度

図8に室温大気環境下における疲労試験結果を示す。時効無し試料と時効処理試料の間では大きな違いは見られなかった。 1.1×10^7 回疲労限度はおよそ300MPaであり、溶製材の約50%の強度になった⁸⁾。応力が400MPa以下になると破断繰返し数にばらつきが見られた。3Dプリンタ造形品の疲労強度は、内部の空隙や密度に影響を受けるとの研究報告があり、時効処理により材料強度は向上したが、内在する空隙が同等のためほぼ同一線上になったと推測される³⁾。

時効+ショット試料は、800MPaから長寿命側に推移し疲労限度は400MPaとなり他の2試料に比べ疲労限度が30%向上した。時効+ショット試料は、表面の圧縮応力が初期亀裂発生を抑制して長寿命化に至ったと推測される。

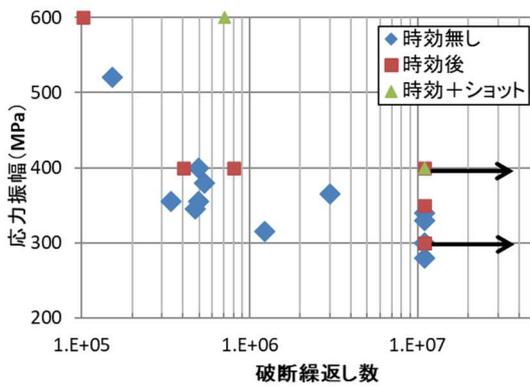
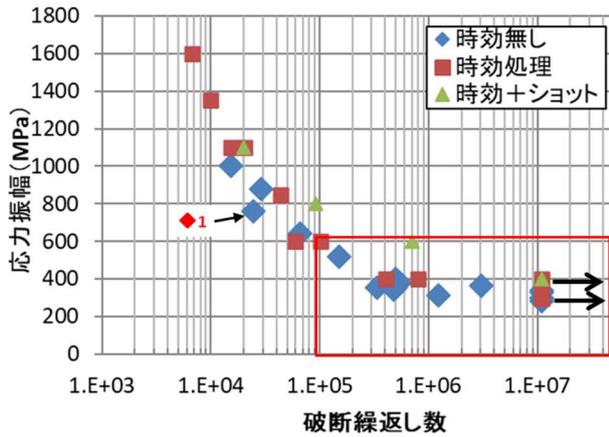


時効無し試料の断面光学顕微鏡写真



時効処理試料 断面光学顕微鏡写真

図7 断面の光学顕微鏡写真

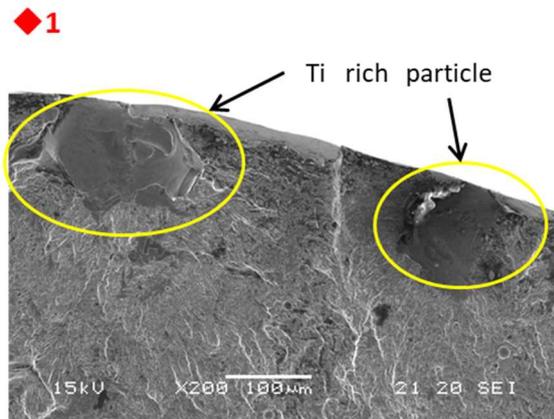


上図枠内応力振幅600MPa以下領域の拡大図

図8 疲労試験結果

3.3 破壊面観察

試験後の試料を、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図9に示す。図8中で寿命が短かった時効無し試料の応力760MPa、破断繰返し数24,000回の試料(◆1)の破壊起点近傍には、基地組織よりチタンが強く検出される100 μ m程度の粒子が観察された(丸囲い部)。この粒子が起点となったと推測される⁹⁾。



時効無し試料 応力760MPa 破断繰返し数24,000回

図9 SEM観察結果

4 おわりに

金属 3D プリンタで造形したマルエージング鋼造形品に機械加工，時効処理，時効後ショット処理を施した3種の試料の疲労試験を行い，以下の知見を得た。

- (1) 時効無し，時効処理がほぼ同一のS-N線になり，疲労限度はおよそ300MPaで溶製材の50%程度になった。空隙の割合が同程度のため，時効無しと時効処理の疲労限度に差が生じなかったと考えられる。
- (2) ショット処理を施すことで，表面に圧縮残留応力が付与され800MPa以下の応力で長寿命化することが確認され，疲労限度はおよそ400MPaであった。ショット処理を行わない試料に比べ33%疲労限度が向上した。
- (3) 試験片表面に，基地とは異なる粒子が露出しているような場合，早期に破断に至ることがわかった。

謝 辞

本研究を実施するにあたり多大なるご指導をいただいた宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 教授 高山 善匡氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小岩井修二：“素形材”，Vol. 61No. 7, 21-26, (2020)
- 2) チャックハン・タン：“素形材”，Vol. 61No. 7, 34-39, (2020)
- 3) 趙研，安田弘行，當代光陽，上田実，竹山雅夫，中野貴由：“スマートプロセス学会誌”，第9巻第4号，180-184, (2020)
- 4) 土屋詩織，高橋宏治：“ばね論文集”，第66号，7-12, (2021)
- 5) 唐土庄太郎，増尾大慈，矢倉孟，山本泰弘：“粉末および粉末冶金”，第61巻第5号，250-254, (2014)
- 6) 平田智丈，木村貴広，中本貴之：“軽金属”，第70巻第4号，128-135, (2020)
- 7) 高岩徳寿，荒井辰也：“栃木県産業技術センター研究報告”，No. 16, 53-57, (2019)
- 8) 深澤郷平，勝又信行，古屋雅章，寺澤章裕，鈴木大介，佐野正明：“山梨県産業技術センター研究報告”，第1号, (2018)
- 9) 政木清孝，小林祐次，水野悠太：“材料” Vol. 67 No. 10, 891-897, (2018)