

# 金属 3D プリンタによる造形物の強度及び形状評価 Strength and Shape Evaluation of Printed Object by Metal 3D Printer

森本 祐作\*<sup>1</sup>, 米谷 英治\*<sup>2</sup>

MORIMOTO Yusaku and MAITANI Eiji

## 抄 録

MEX 方式の金属 3D プリンタによって製作した造形物の強度及び形状評価を行った。強度は、17-4PH ステンレス鋼 (SUS630 相当), D2 工具鋼 (SKD11 相当), H13 工具鋼 (SKD61 相当), Inconel625, Copper 材料について造形姿勢の異なる 2 種類の試験片を製作し、引張試験を行うことで評価した。その結果、全ての材料について造形姿勢の違いによる異方性を有する性質があることがわかった。形状については、17-4PH ステンレス鋼で製作した造形姿勢の異なる円柱、穴、リブ及び溝、角度の試験片を 3D スキャナによって測定し、各形状における寸法精度を設計値からの偏差をもって確認した。

## 1 はじめに

金属 3D プリンタによる部品製作は、従来の工作機械による切削や研削加工等の除去加工とは異なり、金属材料を積層していくことで形状を造形する。そのため、造形時の積層方向や姿勢が強度及び寸法精度に影響を及ぼすことが知られている<sup>1), 2), 3)</sup>。しかし、MEX (Material Extrusion) 方式の金属 3D プリンタは PBF (Powder Bed Fusion) 方式や DED (Directed Energy Deposition) 方式と比べて普及がそれほど進んでいない<sup>4)</sup> ことから、強度や寸法精度に関する情報が少なく、機器利用時の障壁となっている。そこで本研究では、当センターに導入した MEX 方式の金属 3D プリンタ Metal X (Markforged 社製) によって得られた造形物の強度及び形状評価を行うことで、機器及び造形物の特性を把握し、県内企業の金属 3D プリンタ利用促進への足掛かりとすることを目的とする。

## 2 実験方法

### 2・1 強度評価

#### (1) 引張試験片の製作

JIS Z 2241<sup>5)</sup> で規定された 14B 号試験片形状を採用した。図 1 に試験片形状を、表 1 に試験材料をそれぞれ示す。積層方向による影響を確認するため、図 2 (a), (b) に示すように、造形姿勢を引張試験の軸方向に対し、平行となる姿勢①と、垂直となる姿

勢②の 2 種類を造形した。なお、造形パラメータについては、インフィル形状の項目のみ Solid (中実) に変更し、ほかは標準ソフトウェア Eiger の初期値<sup>6)</sup> とする。また、ヤング率、0.2%耐力、ポアソン比を算出するために、2 軸直交型ひずみゲージ KFGS-2-120-D16-\*\* (\*\* : Copper は 16, その他材料は 11) (共和電業社製) を、シアノアクリレート系接着剤を用いて接着した。加えて、破断伸び測定のため、最小読取値 0.01mm のハイトゲージを用いて試験片の平行部に 35mm の原標点距離を印した。

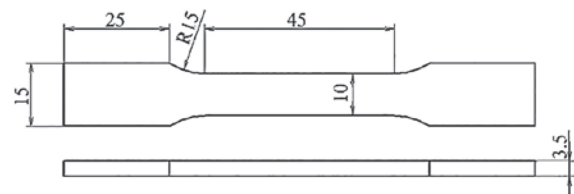


図 1 引張試験片形状 (単位 : mm)

表 1 試験材料

材料名称	主な用途
17-4PHステンレス鋼 (SUS630相当)	部品全般、汎用用途
D2工具鋼 (SKD11相当)	高硬度・耐摩耗性→冷間加工金型等
H13工具鋼 (SKD61相当)	高硬度・高耐熱性→熱間加工金型等
Inconel625	高耐熱性・耐蝕性→航空機エンジン部品等
Copper	高熱伝導率→熱交換器等

\*1 機械技術担当, \*2 材料技術担当

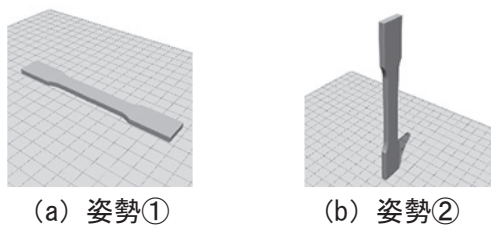


図2 引張試験片造形姿勢

## (2) 引張試験

JIS Z 2241 に準拠して引張試験を行うこととし、試験機には万能材料試験機 5985 シリーズ（インストロン社製）を用いた。ひずみ測定にはコンパクトレコーディングシステム EDX-10B, EDX-15A, DB-120A（共和電業社製）を用い、測定レンジは $\leq 0.01$ ひずみとした。

## (3) 機械的・物理的特性評価

### ①引張強さ

試験本数は試験片ごとに 3 本とし、試験速度を 5mm/min として試験中の最大荷重を測定した。試験片断面積は、最小読取值 0.001mm のマイクロメータを用いて標点間の幅、厚みをそれぞれ 3 点測定し、その平均値から算出した。

### ②ヤング率

引張試験及びひずみ測定から得られた応力-ひずみ線図の初期勾配（0.0005～0.001 ひずみ間）をヤング率とした。

### ③0.2%耐力

応力-ひずみ線図において、ヤング率と同じ傾きを持ち、0.002 ひずみ（0.2%）の点を通る直線を引き、この直線と応力-ひずみ曲線との交点における応力を 0.2%耐力とした。

### ④ポアソン比

引張試験中に測定した時々刻々の横ひずみを同刻の縦ひずみで除し、その平均値をポアソン比とした。

### ⑤破断伸び

引張試験によって破断した試験片を突き合わせ、事前に印した刻印から永久伸びを工具顕微鏡 TUM-220EH（トプコン社製）で測定した。得られた永久伸びを原標点距離 35mm で除し、百分率で表した値を破断伸びとした。

### ⑥相対密度

アルキメデス法により測定した姿勢毎の試験片密度を、Markforged 社から提供された表 2 に示す各試

験材料の理論密度で除し、百分率で表した値を相対密度とした。

表2 試験材料の理論密度

材料名称	理論密度[g/cm <sup>3</sup> ]
17-4PHステンレス鋼	7.85
D2工具鋼	7.7
H13工具鋼	7.8
Inconel625	8.44
Copper	8.96

## 2・2 形状評価

### (1) 形状評価試験片の製作

試験片は、機械部品の基本的な構成要素である円柱、穴、リブ、溝、角度の寸法精度が確認できる形状とし、試験材料は 17-4PH ステンレス鋼を用いた。また、造形姿勢やサポートの有無によって寸法精度に違いがでることから、円柱及び穴についてはプリントベッドに対して各要素が上向き、横向きの 2 種類、リブ及び溝は、上向き、横向き水平、横向き垂直の 3 種類の姿勢で造形した。図 3 に試験片形状を示す。なお、造形パラメータは標準ソフトウェアの初期値とする。

### (2) 形状測定

3D スキャナ HandySCAN 3D Black Elite Limited Edition（Creaform 社製）で試験片全体の形状を点群データとして測定し、メッシュ解像度 0.100mm の STL データ形式で出力した。

### (3) 形状評価

設計値（3DCAD データ）と取得した STL データを 3D 計測ソフトウェア Geomagic Control X（3D Systems 社製）を用いて寸法測定及び比較し、直径、幅、奥行、高さについては設計値からの偏差[mm]を、角度については設計値からの偏差[°]で評価した。なお、ここでいう幅、奥行、高さは、それぞれ金属 3D プリント正面に向かって左右方向が幅、手前奥方向が奥行、上下方向が高さである。



図3 形状評価用試験片

### 3 結果

#### 3・1 強度評価

##### (1) 引張強さ

図4に各材料及び姿勢ごとの引張強さを示す。図中のエラーバーは試験片数 n=3 における最大最小を表している。図に示すように、全ての材料において姿勢による差が有意にあることが確認でき、姿勢①が姿勢②と比べ引張強さが大きいことがわかる。最も引張強さの差が小さいD2工具鋼で、姿勢①に対して姿勢②の引張強さが22.5%、Inconel625にあつては45.4%小さいことがわかった。

##### (2) ヤング率

図5～図9に各材料及び姿勢ごとの応力-ひずみ線図を、表3にヤング率を示す。図及び表に示すように、全ての材料において姿勢による差があり、姿勢①より姿勢②のヤング率が大きいことがわかる。なお、Copperについては、銅合金の中で化学成分が近いタフピッチ銅<sup>7)</sup>と比べヤング率が極めて小さいことから、測定に問題を有している可能性がある。

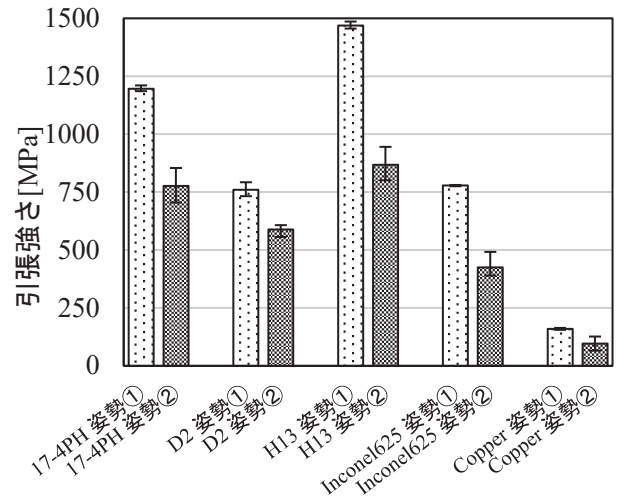


図4 引張強さ

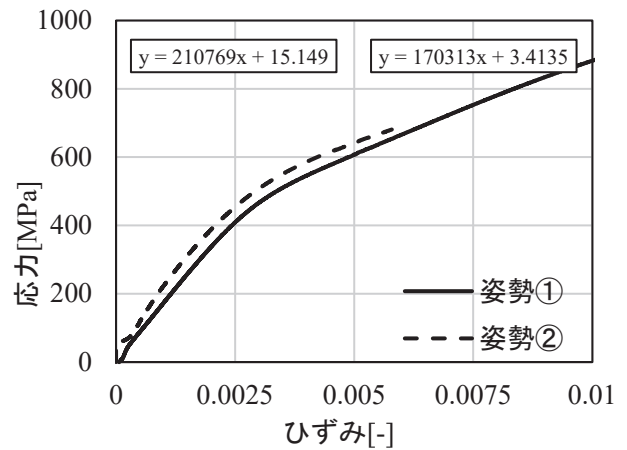


図5 応力-ひずみ線図 (17-4PH ステンレス鋼)

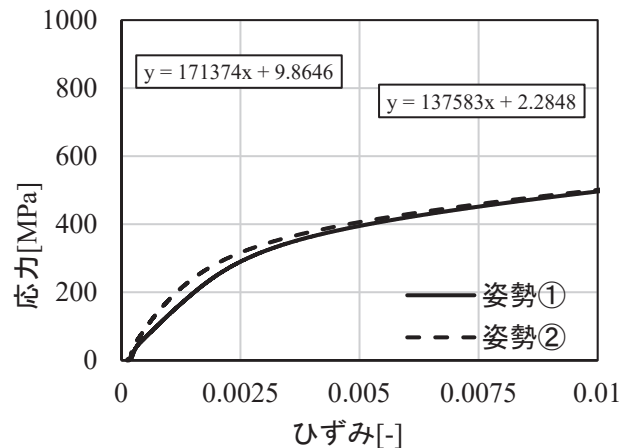


図6 応力-ひずみ線図 (D2 工具鋼)

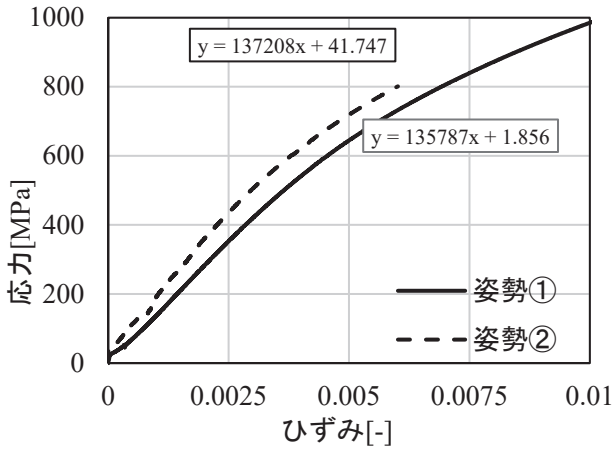


図7 応力-ひずみ線図 (H13 工具鋼)

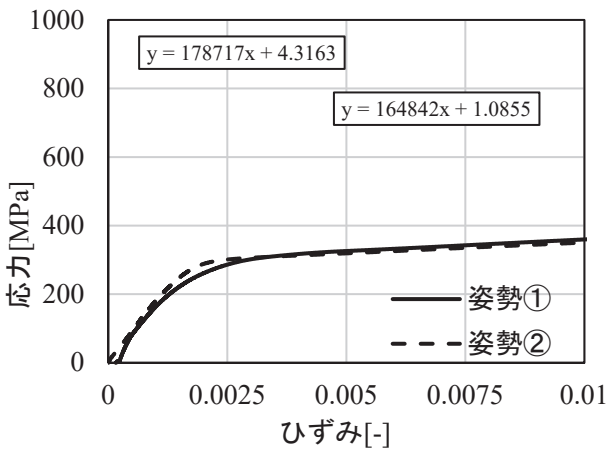


図8 応力-ひずみ線図 (Inconel625)

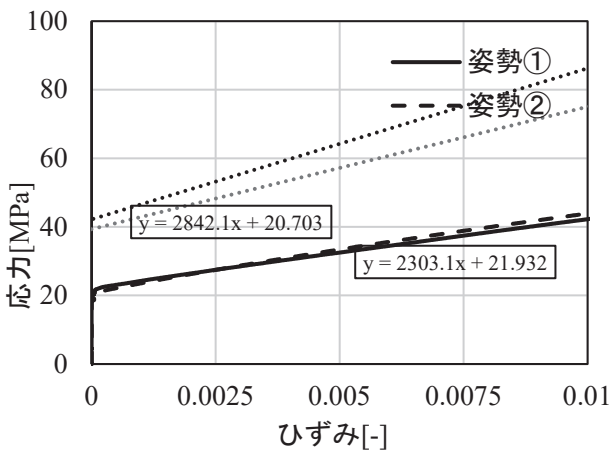


図9 応力-ひずみ線図 (Copper)

表3 ヤング率

材料名称	ヤング率[GPa]
17-4PHステンレス鋼	170
D2工具鋼	138
H13工具鋼	姿勢① 136
Inconel625	165
Copper	2
17-4PHステンレス鋼	211
D2工具鋼	171
H13工具鋼	姿勢② 137
Inconel625	179
Copper	3

(3) 0.2%耐力

図10～図14に各材料及び姿勢ごとの0.2%耐力算出過程を、表4に0.2%耐力を示す。図及び表に示すように、姿勢によって傾向に明確な違いがないことがわかる。なお、姿勢①のCopper及び姿勢②のH13工具鋼、Copperについては、実験方法で示した直線と曲線の交点が得られないため、応力を算出することができなかった。

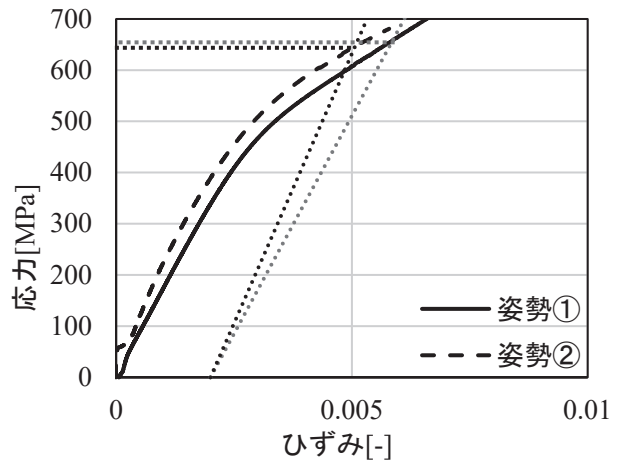


図10 0.2%耐力算出 (17-4PH ステンレス鋼)

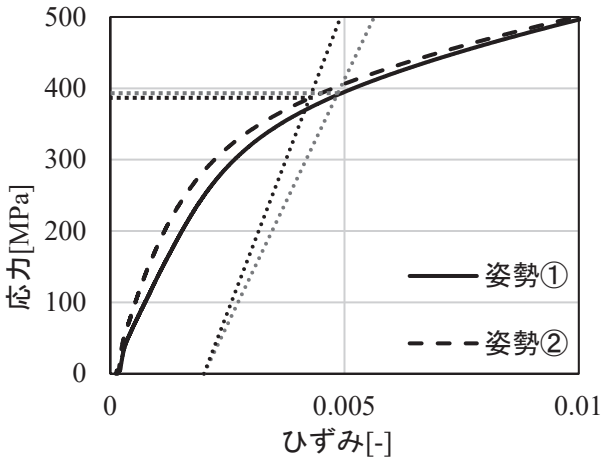


図 1 1 0.2%耐力算出 (D2 工具鋼)

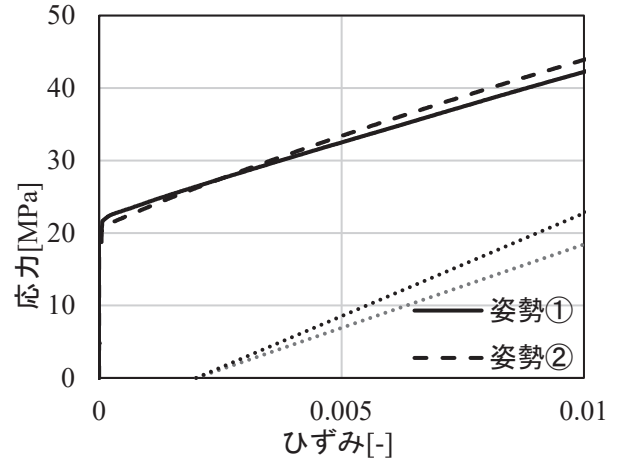


図 1 4 0.2%耐力算出 (Copper)

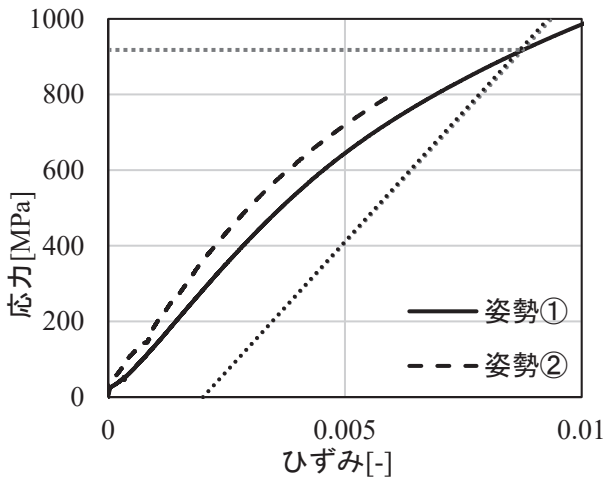


図 1 2 0.2%耐力算出 (H13 工具鋼)

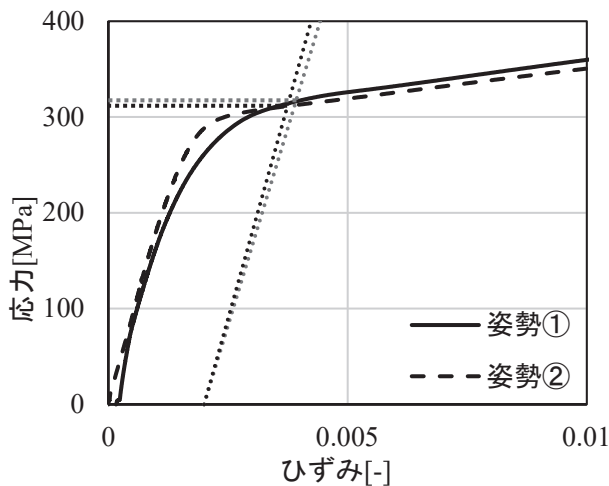


図 1 3 0.2%耐力算出 (Inconel625)

表 4 0.2%耐力

材料名称	0.2%耐力[MPa]
17-4PHステンレス鋼	657
D2工具鋼	389
H13工具鋼	姿勢① 918
Inconel625	315
Copper	—
17-4PHステンレス鋼	644
D2工具鋼	388
H13工具鋼	姿勢② —
Inconel625	311
Copper	—

(4) ポアソン比

表 5 に各材料及び姿勢ごとのポアソン比を示す。表に示すように、姿勢による傾向に明確な違いは認められなかった。

(5) 破断伸び

図 15 に各材料及び姿勢ごとの破断伸びを示す。図中のエラーバーは試験片数 n=3 における最大最小を表している。図に示すように、全ての材料において姿勢による差が有意にあることが確認でき、姿勢①が姿勢②と比べ破断伸びが大きいことがわかる。最も破断伸びの差が小さい Copper で、姿勢①に対して姿勢②の破断伸びが 57.6%、Inconel625 にあっては 86.9%小さいことがわかった。

表 5 ポアソン比

材料名称	ポアソン比[-]
17-4PHステンレス鋼	0.286
D2工具鋼	0.274
H13工具鋼	姿勢① 0.276
Inconel625	0.297
Copper	0.395
17-4PHステンレス鋼	0.263
D2工具鋼	0.285
H13工具鋼	姿勢② 0.266
Inconel625	0.296
Copper	0.489

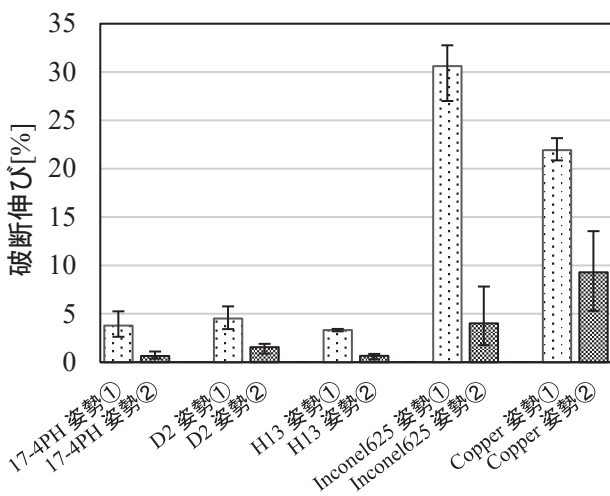


図 15 破断伸び

(6) 相対密度

表 6 に各材料及び姿勢ごとの相対密度を示す。表に示すように、姿勢①が姿勢②と比べ相対密度が大きい傾向にあることがわかる。

表 6 相対密度

材料名称	相対密度[%]
17-4PHステンレス鋼	96.4%
D2工具鋼	95.8%
H13工具鋼	姿勢① 93.3%
Inconel625	96.1%
Copper	93.0%
17-4PHステンレス鋼	94.9%
D2工具鋼	95.8%
H13工具鋼	姿勢② 92.6%
Inconel625	94.9%
Copper	91.1%

3・2 形状評価

図 16～図 26 に各形状及び姿勢ごとの形状評価の結果を示す。図中のエラーバーは 3D スキャナの容積精度を表している。円柱は上向きが、穴は横向きが設計値に近く造形されることがわかる。円柱、穴ともに横向きは上向きより大きく造形される傾向が見られた。リブは 横向き水平及び垂直の奥行きが設計値に近く、横向き水平の高さが最も設計値から離れていることがわかる。溝は、上向きの幅が最も設計値に近く、上向きの高さは特に 0.13mm 及び 1mm において設計値から大きく離れている。これについては、試験片を目視で確認したところ、造形不良と考えられる形状が観察された。角度は、小さい角度ほど設計値より大きく、90°を除いて大きい角度になるほど設計値より小さく造形される傾向が見られた。最も設計値に近いのは 50°であった。

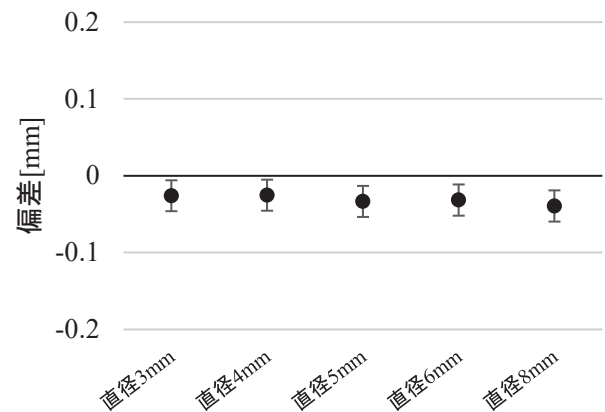


図 16 円柱上向き

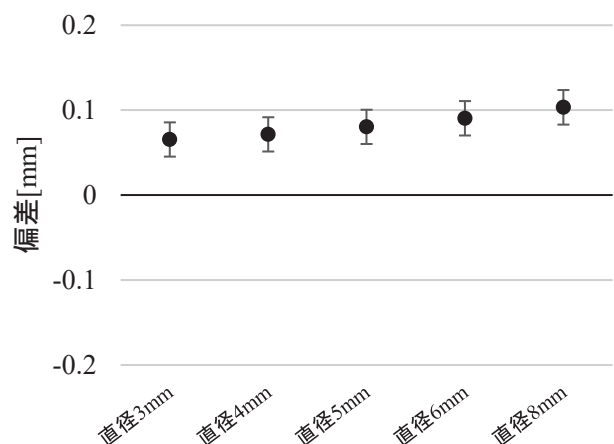


図 17 円柱横向き

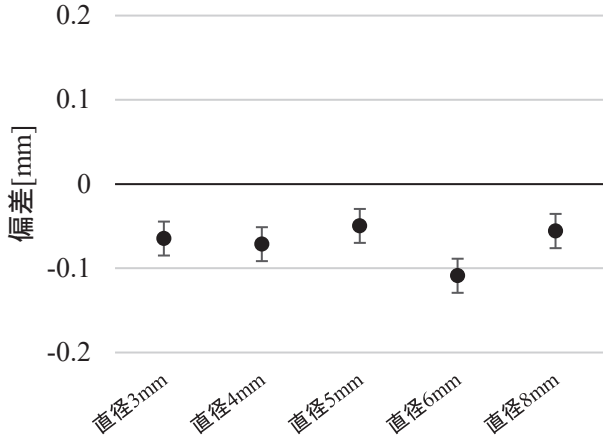


図 18 穴上向き

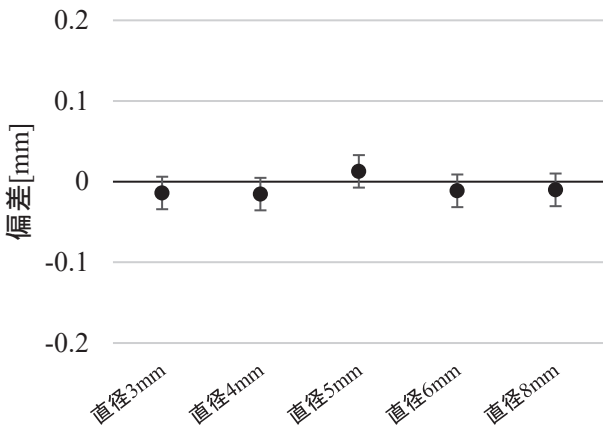


図 19 穴横向き

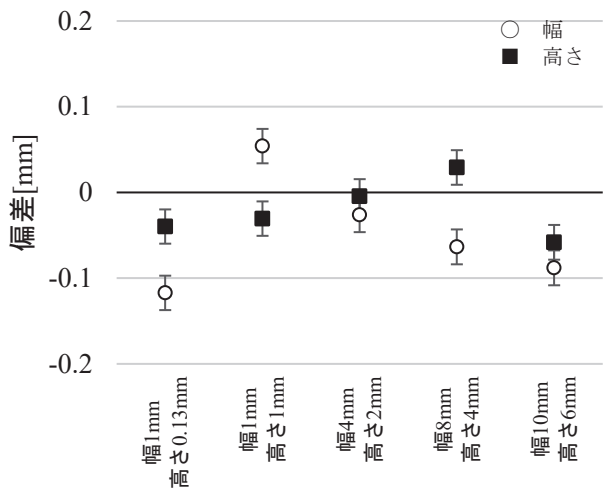


図 20 リブ上向き

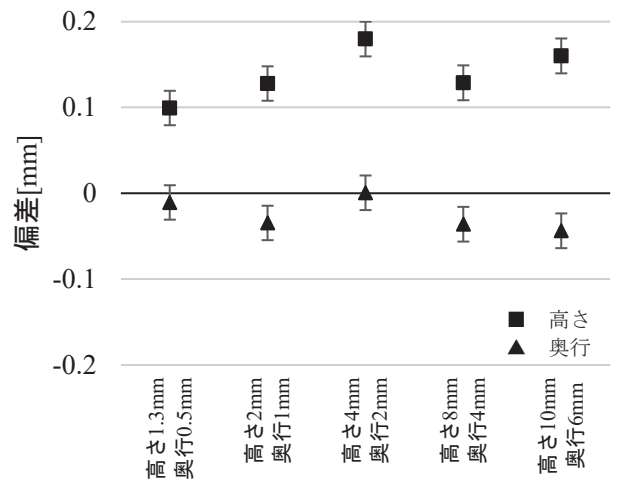


図 21 リブ横向き水平

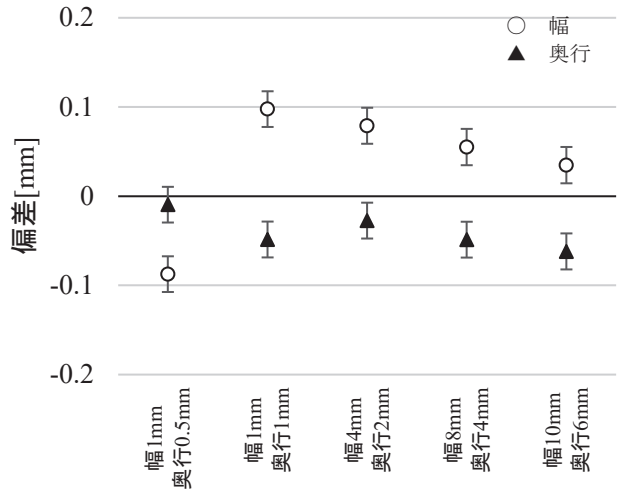


図 22 リブ横向き垂直

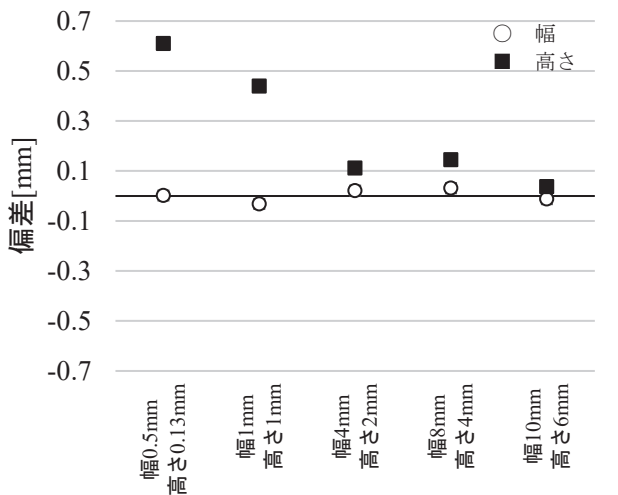


図 23 溝上向き

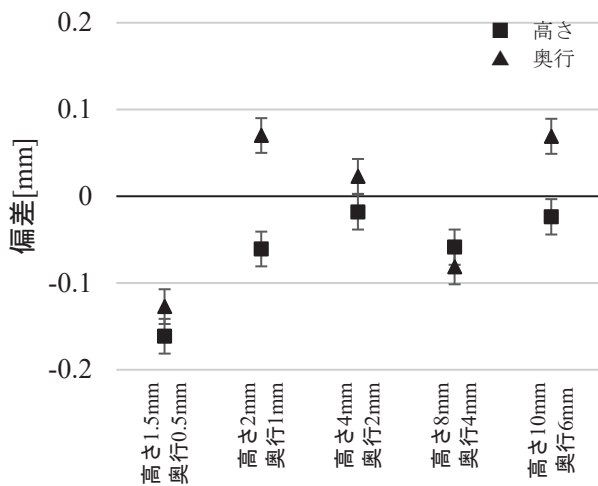


図 2.4 溝横向き水平

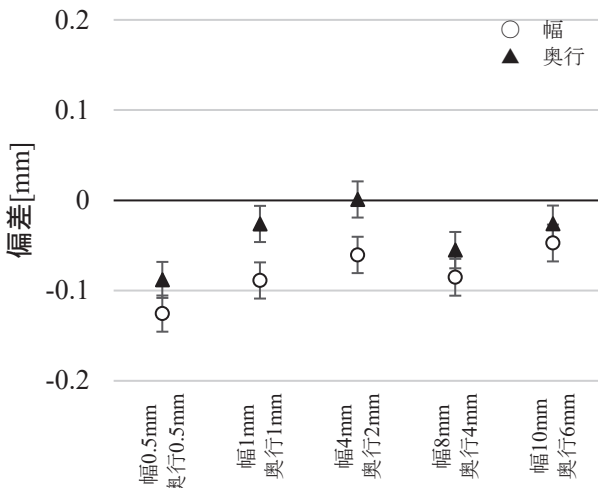


図 2.5 溝横向き垂直

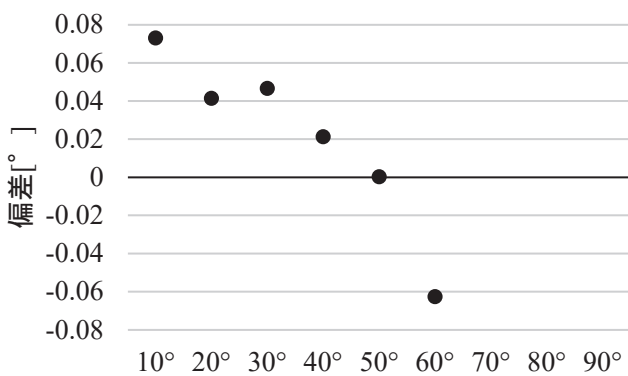


図 2.6 角度

#### 4 まとめ

強度及び形状評価用試験片を MEX 方式の金属 3D プリンタで製作し、引張試験及び形状測定を行い評価した結果、以下のことがわかった。

(1) 各材料において、造形姿勢が異なる場合の引

張強さ、ヤング率、0.2%耐力、ポアソン比、破断伸び及び相対密度が得られた。

(2) 引張強さ、ヤング率、破断伸び及び相対密度には異方性があることがわかった。一方で、0.2%耐力及びポアソン比に異方性は見られない。

(3) 形状については、造形不良が起こらなければ、大きさは設計値の $\pm 0.2\text{mm}$ 内に、角度は設計値の $\pm 0.15^\circ$ 内に収まることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 豊川良平, 岡村隆宏. “金属積層造形における積層方向と機械的特性・金属組織の異方性”. 長野県工業技術センター材料技術部門研究報告. 2022, No.17, p. M42-M45.
- 2) 山本貴文, 氷見清和. “異方機能性を制御するための W 系材料を用いた金属 3D プリント技術の構築”. 富山県産業技術研究開発センター研究報告. 2020, No.34, p. 19-20.
- 3) Ivan Aiza, Chiara Baldi, Federico Matías de la Vega, Sara Sebastiani, Niccolò Enrico Veronese, Mohammad Yousefi, Mohammad Hossein Mosallanejad, Erfan Maleki, Mario Guagliano, Luca Iuliano, Abdollah Saboori, Sara Bagherifard. “Effects of build orientation and inclined features on physical, microstructural and mechanical properties of powder bed fusion additively manufactured metallic parts”. Progress in Materials Science. 2025, Vol.147, 101357, doi:10.1016/j.pmatsci.2024.101357, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642524001269?via%3Dihub>.
- 4) 中本貴之, 木村貴広, 三木隆生, 南久, “金属系 3D プリンターを活用した公設試の取組み (全国 の状況をまとめて)”. スマートプロセス学会誌. 2021, Vol.10, No.4, p. 187-191.
- 5) JIS Z 2241 : 2011 金属材料引張試験方法
- 6) 株式会社データ・デザイン. “第 4 章 ソフトウェアの操作方法”. Eiger ソフトウェアマニュアル第 4 版, 2024, p. 35-43.
- 7) 古河電気工業株式会社. “無酸素銅、タフピッチ銅 OFC (C1020)、TPC (C1100)”. 銅条・高機能材事業部門. [https://www.furukawa.co.jp/copper/product/bar/ofc\\_tpc.html](https://www.furukawa.co.jp/copper/product/bar/ofc_tpc.html).