

3D プリンタによるゴム系材料造形物の気密性調査

生産技術室 中嶋 貴生

Evaluation of the 3D Printed Gaskets' Watertightness

Takao NAKAJIMA

本研究では、気密性を有する製品の設計・試作サイクル高速化に寄与することを目的として、ゴム系の材料 2 種類を用いて、3D プリンタで造形したパッキンの気密性及び造形した試料の機械特性の評価を実施した。

その結果、機械的特性の評価では造形方向で結果に差異は見られなかった。気密性の評価では造形方向により結果に差異が出ることが確認され、その原因が、造形物断面の歪みや積層痕由来と考えられる表面の凹みにより、部分的につぶし率が低下することによるものと推察された。

1. はじめに

ゴムを使用したパッキンは、民生品から工業部品まで広く一般的に使用される機械部品で、製品の気密性を維持するために極めて重要な部品である。

パッキンを作製する場合、その試作方法として、切削や打ち抜き、試作型による成形等が一般的であるが、選択する手法により作製できる形状に制限があることに加え、成形や打ち抜きにあつては、成形用の型や打ち抜き用の刃の作製が必要となる。また、試作品の評価等により形状変更が発生した場合、型や刃の修正や再作製が必要となり、時間及びコスト的な負担が大きくなる。

一方で、3D プリンタは 3D データから自由度の高い形状の作製が可能であり、また、3D データを修正することで、複数パターンを試作や形状の修正を容易に行うことができる。また、近年では、硬質材料以外に軟質のゴム系の材料を用いることで、ゴム部品についても機能性の確認を含めた試作が可能となっている。

3D プリンタを用いてパッキンを試作することができれば、自由度の高い形状を 1 個から素早く作製することができ、製品開発スピードの向上や開発におけるコスト削減に繋げることができる。そこで本研究では、ゴム系の材料を用いて 3D プリンタで造形したパッキンの気密性及び造形した試料の機械的特性の評価を実施した。併せて 3D プリンタの特性を生かしたパッキンを含む部品形状の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 造形条件

特性が異なるゴム系材料 2 種類を用いて、それぞれの材料で試料を作製し評価を行った。造形条件を表 1 に示す。

表 1 造形条件

装置名	Stratasys Objet260 Connex1
モデル材	Agilus30 Black, TangoGray
サポート材	SUP705B
表面処理	マット
積層ピッチ	30 μ m

なお、造形を安定して行うため、評価材料と併せて、硬質材料の RGD720 も造形を行う際に使用した。サポート材は非水溶性のものを使用し、造形後にウォータージェットにより除去した。

2.2 デュロメータ硬さの評価¹⁾

2.2.1 評価試料の作製

1 辺 25mm を設計値とする立方体を造形した。

造形方向は、立方体の面が装置 XY 面、YZ 面、ZX 面と平行となる向きもの(以下平行造形)、立方体の面が装置 YZ 面に対して 45°方向となるもの(以下 YZ45°造形)及び立方体の面が装置 ZX 面に対して 45°方向のもの(以下 ZX45°造形)とした。図 1 に試料の造形方向を示す。

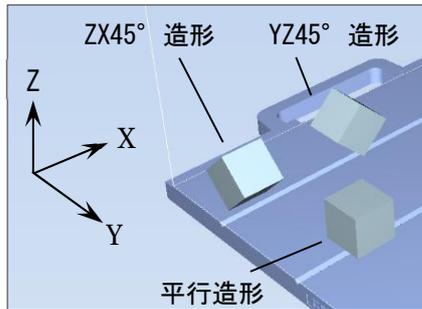


図1 デュロメータ硬さ評価試料造形方向

2.2.2 評価方法

ゴム硬度計(ムラテック KDS株, DM-204A)を用いて立方体の面の中央部でデュロメータ硬さタイプ A を測定した。

測定は、装置 XY 面, YZ 面, ZX 面に平行な面(平行造形の 6 面), YZ 面に対して±45°の面(YZ45°造形の 4 面), ZX 面に対して±45°の面(ZX45°造形の 4 面)で行った。

立方体を各方向 3 個ずつ造形し、測定はゴム硬度計を手持ちで行い、結果は、ゴム硬度計が試料に接触した直後の最大値と時間経過後の安定値の読み取りを行った。

2.3 圧縮弾性率の評価²⁾

2.3.1 評価試料の作製

直径 29mm, 厚さ 12.5mm を設計値とする円柱形試料を造形した。

造形方向は, XY 平行(円が装置の XY 面に平行), YZ 平行(円が装置 YZ 面に平行), YZ45°(円が装置 YZ 面に対して 45°傾斜)の 3 方向とした。図 2 に試料の造形方向を示す。

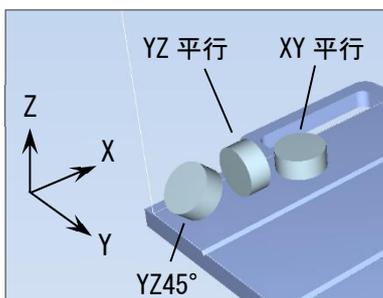


図2 圧縮弾性率評価試料造形方向

2.3.2 評価方法

初期の厚みに対して 25%のひずみに達するまで 10mm/min の速度で試料を圧縮し、10mm/min の速度で力を取り除く操作を連続して 4 回繰り返す、4 回目の圧縮力-変形曲線を用いて、曲線の立ち上が

る点を原点として、圧縮前の圧縮ひずみ 20%の圧縮力から式 1 により圧縮弾性率を求めた。

$$E_{20} = F / (A \times \varepsilon) \quad (1)$$

E_{20} : 圧縮弾性率[MPa]

F : 荷重[N]

A : 円柱の断面積[mm²]

ε : 圧縮ひずみ

数量は各方向 3 個ずつとし、材料試験機(インストロン社, 5567)及び材料試験機付属の圧縮用円板で圧縮試験を実施した。試験に際して、圧縮用円板にシリコンオイル潤滑剤(信越化学工業株, KF-96H-10000cs)を薄く塗布した。

圧縮前の試料の断面積及び厚みを X 線 CT 装置(ヤマト科学株, TDM1000H-II(2K))を用いて測定し、実測値から圧縮弾性率を求めた。

2.4 圧縮永久ひずみの評価³⁾

2.4.1 評価試料の作製

直径 29mm, 厚さ 12.5mm を設計値とする円柱形試料を造形した。

造形方向は, Agilus30 Black は圧縮弾性率の評価と同じく, XY 平行, YZ 平行, YZ45°の 3 方向とした。TangoGray は XY 平行の 1 方向とした。

2.4.2 評価方法

圧縮状態の試料を加熱保持し、その後、常温状態で圧縮から解放した試料の寸法を測定することで圧縮永久ひずみの評価を行った。

試料の加熱は小型環境試験器(エスペック株, SH-642)で 168 時間行い、温度条件は, Agilus30 Black では 125°C, TangoGray では 35°Cとした。

試料の圧縮はステンレス製の平板及びスペーサーを使用し、初期圧縮率が 25%程度となるように圧縮を行った。

数量は各 3 個とし、試験に際して、圧縮用の平板にシリコンオイル潤滑剤を薄く塗布した。図 3 に試料の取り付け状態を示す。

試料の初期及び圧縮状態から解放後常温で 30 分程度放置した後、円柱中央部で厚みを測定した。測定は画像寸法測定機(株)ミットヨ, QVTP Apex 302PRO)を用いて非接触で行なった。厚みの実測値から初期圧縮率を式 2, 圧縮永久ひずみを式 3 によりを算出した。

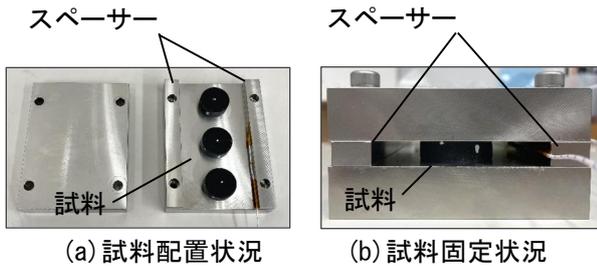


図3 円柱形試料取り付け状況

$$C = (h_0 - h_s) / h_0 \times 100 \quad (2)$$

$$CS = (h_0 - h_1) / (h_0 - h_s) \times 100 \quad (3)$$

C : 円柱形試料初期圧縮率[%]

CS : 圧縮永久ひずみ[%]

h_0 : 円柱形試料初期厚み[mm]

h_1 : 圧縮から解放した際の円柱形試料厚み[mm]

h_s : スパース厚み[mm]

2.5 気密性の評価^{4), 5)}

2.5.1 評価試料の作製

Agilus30 Black では太さ 2.4mm, 内径 17.8mm を設計値とする O リングを造形した。TangoGray では太さ 2.4mm, 内径 17.8mm 及び太さ 2.1mm, 内径 17.8mm を設計値とする O リングを造形した。

造形方向は, XY 平行(内径円が装置の XY 面に平行), YZ 平行(内径円が装置 YZ 面に平行), ZX 平行(内径円が装置 ZX 面に平行), YZ45°(内径円が装置 YZ 面に対して 45°傾斜), ZX45°(内径円が装置 ZX 面に対して 45°傾斜)の 5 方向とした。図 4 に試料の造形方向を示す。

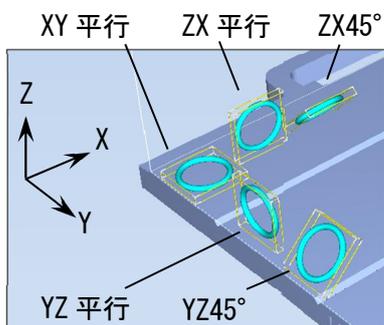


図4 Oリング造形方向

2.5.2 評価方法

アルミ板に溝加工を施した治具を作製し, 溝に O リングを取り付け, 常温の水道水及びテストポンプ(楕キョーワ, T-100K)を用いて内部から加圧

した。溝の深さは JIS B 2401-2(固定用 O リング呼び番号 P18)で規定される寸法の 1.80mm(実測値)と規定寸法より深くした 1.97mm(実測値)の 2 点で評価を行った。

加圧は 8MPa まで行い, 漏水有無を目視で確認した。評価は造形した試料と市販のニトリルゴム製 O リング(太さ 2.4mm, 内径 17.8mm, JIS B 2401-1 記号 NBR-70-1, 以下市販 O リング)で行い, 数量は各 3 個とした。加圧前に画像寸法測定機を用いて非接触で, 3 視野 9 点でつぶし方向の太さを測定し, 太さの平均値から, 式 4 及び式 5 により, つぶし率とハウジング占有率を算出した。

O リング太さの測定状況を図 5 に, 試料の取り付け及び試験時の概略断面図を図 6 に, JIS B 2401-2(固定用 O リング呼び番号 P18)で規定される寸法と今回作製した治具の寸法実測値を表 2 に示す。

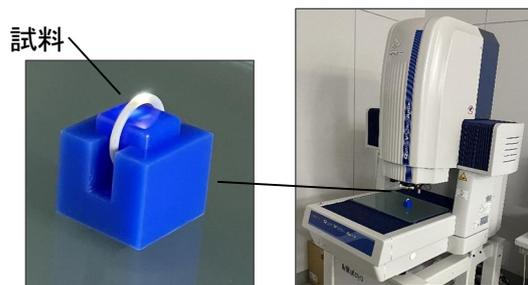


図5 Oリング太さ測定状況

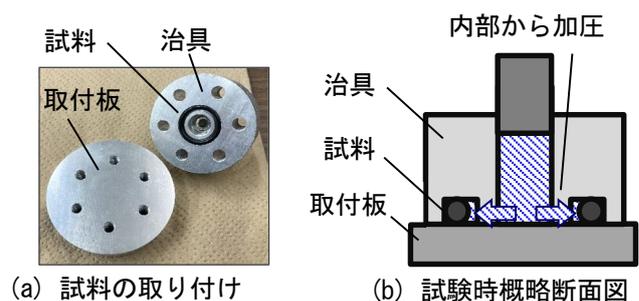


図6 試料取り付け及び試験時概略断面図

表2 Oリング取り付け溝寸法

	JIS 規定	治具 No. 1	治具 No. 2
溝外径 [mm]	22	22.04	22.01
溝幅 [mm]	3.2 ^{+0.25} ₀	3.25	3.30
溝深さ [mm]	1.8 ^{+0.05} _{-0.05}	1.80	1.97

$$s = (d-h) / h \times 100 \quad (4)$$

$$f = (\pi d^2 / 4) / (b \times h) \times 100 \quad (5)$$

s : つぶし率[%]

f :ハウジング占有率[%]

d : Oリング太さ[mm]

b : Oリング取り付け溝幅[mm]

h : Oリング取り付け溝深さ[mm]

2.6 Oリングの形状確認

2.6.1 評価試料の作製

設計値が太さ 2.4mm, 内径 17.8mm の O リングに, 造形物の上下表裏を明確とするためリングの内径及び外径に 1 か所ずつ突起を設けた形状で造形を行った。

造形方向は 2.5.1 と同様とし, 突起の位置は造形時に以下となるように配置した。

外径突起: XY 平行では装置 Y 軸原点方向

その他の造形方向では Z 方向の頂部

内径突起: YZ 平行, YZ45° では装置 Y 軸原点側

その他の造形方向では装置 X 軸原点側

造形材料及び造形方向を図 7 に示す。

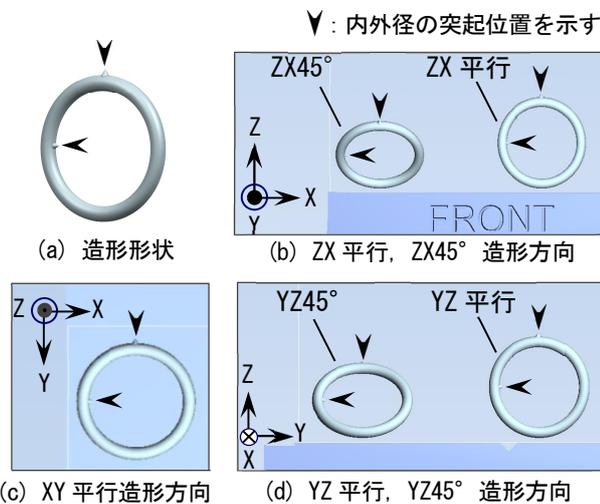


図 7 形状確認用造形材料及び造形方向

2.6.2 評価方法

以下①から③の手順で市販 O リング及び造形 O リングの形状確認を行った。

①X 線 CT 装置を用いて O リングを撮像, ②解析ソフト VGSTUDIO MAX (ボリュームグラフィックス社) を使用して, ヒストグラム の谷を区切りとし, 試料の CT 像とバックグラウンドを分離し STL データ化, ③得られた STL データと設計データを ZEISS

INSPECT Optical3D (ZEISS 社) 上で, ベストフィットで重ね合わせる。

CT 撮像状況を図 8 に示す。

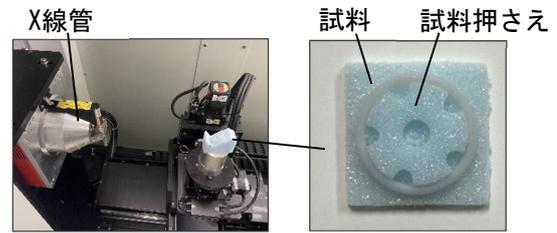


図 8 CT スキャン撮像状況

3. 結果及び考察

3.1 デュロメータ硬さの評価

デュロメータ硬さの測定結果を図 9 に示す。いずれの材料においても造形方向により, デュロメータ硬さに大きな差異は見られなかった。

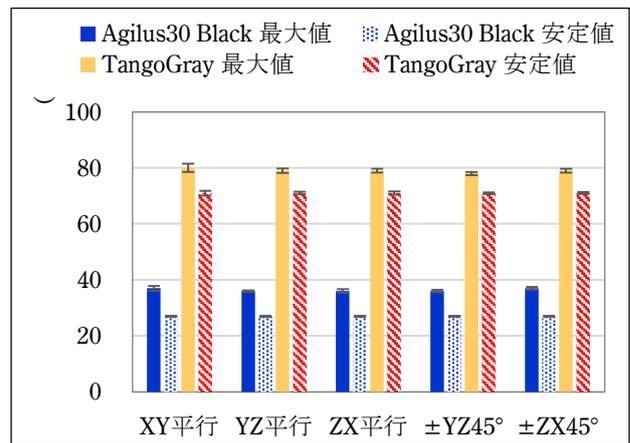


図 9 デュロメータ硬さ

3.2 圧縮弾性率の評価

圧縮弾性率の評価結果を図 10, 図 11 に示す。いずれの材料においても造形方向により, 圧縮弾性率に大きな差異は見られなかった。

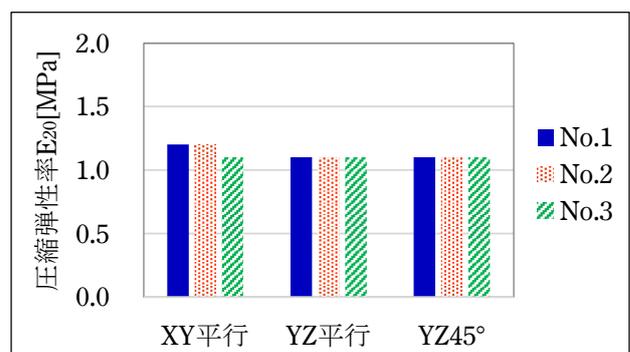


図 10 Agilus30 Black 圧縮弾性率

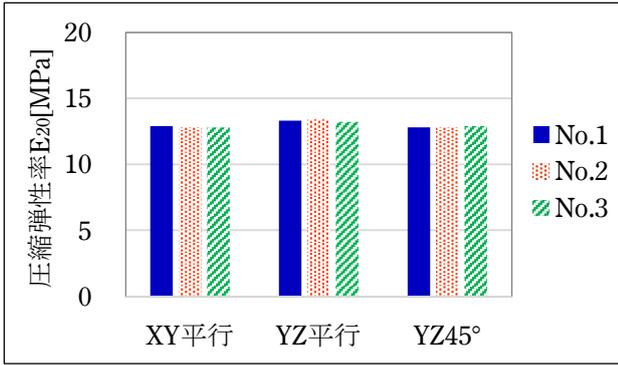


図 1.1 TangoGray 圧縮弾性率

3.3 圧縮永久ひずみの評価

Agilus30 Blackの圧縮永久ひずみはいずれの造形方向でも15%程度で造形方向により大きな差異は見られなかった。

TangoGrayの試料2個について、恒温槽投入24時間後の経過観察時に割れが確認されたため評価を中止した。残りの1個について、継続で評価を行ったところ、168時間の圧縮ひずみは0.3%で、初期状態と比較しほぼ寸法変化がない結果となった。

Agilus30 Blackの168時間加熱後の圧縮永久ひずみを図 1.2 に、TangoGrayの恒温槽投入24時間後の状態を図 1.3 に示す。

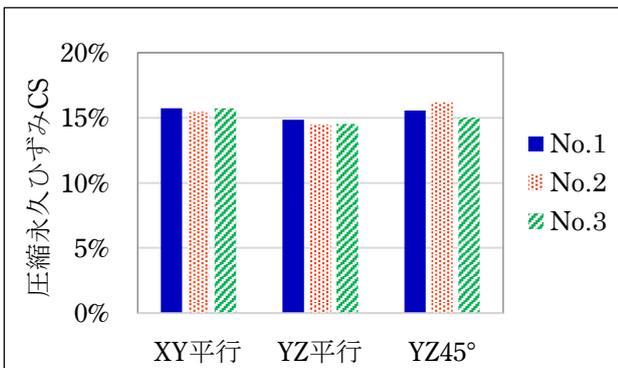


図 1.2 Agilus30 Black 圧縮永久ひずみ (125°C, 168h)

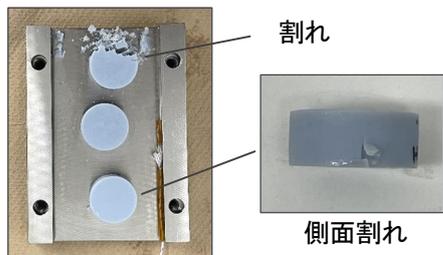


図 1.3 TangoGray 圧縮永久ひずみ経過 (35°C, 24h)

3.4 気密性の評価

太さの実測値及び気密性評価の結果を表 3 から

表 6 に、また、気密性評価結果の例を図 1.4 に示す。

市販Oリング及びTangoGray 太さ2.4mmでは漏水は確認されなかった。Agilus30 Black及びTangoGray 太さ2.1mmでは、造形方向により気密性に差異が確認された。

同じ造形方向で比較した場合、つぶし率を低くした場合に漏水が発生している。また、3.1、3.2から造形方向により造形物表面の硬さ及び圧縮した際の反発特性に大きな差異はないことから、造形したOリングで漏水が発生した原因は、気密性を維持するために必要なつぶし率を確保できていないことによるものと考えられる。

造形方向の比較を行った場合、Agilus30 BlackのXY平行と溝深さ1.97mmではつぶし率が15%程度であったが漏水は無く、つぶし率が同程度又はそれ以上であったZX45°と溝深さ1.80mm、ZX平行及びYZ45°と溝深さ1.97mmで漏水が確認された。同様にTangoGray太さ2.1mmについても、XY平行と溝深さ1.97mmではつぶし率が4%程度であったが漏水は無く、つぶし率がそれ以上であったZX平行及びYZ平行と溝深さ1.97mmで漏水が確認された。本結果は、太さ測定(ポイントでの測定)では確認できていない造形物表面の凹凸によるものと考えられ、3.5でOリングの形状確認の結果及び考察を示す。

表 3 Agilus30 Black 結果

造形方向	試料番号	太さ実測 [mm]	溝深さ1.80mm			溝深さ1.97mm		
			s [%]	f [%]	漏水有無	s [%]	f [%]	漏水有無
XY平行	No. 1	2.33	22.7	72.9	無し	15.5	65.6	無し
	No. 2	2.34	23.1	73.5	無し	15.8	66.2	無し
	No. 3	2.32	22.4	72.3	無し	15.1	65.0	無し
YZ平行	No. 1	2.47	27.1	81.9	無し	20.2	73.7	無し
	No. 2	2.48	27.4	82.6	無し	20.6	74.3	無し
	No. 3	2.48	27.4	82.6	無し	20.6	74.3	無し
ZX平行	No. 1	2.33	22.7	72.9	無し	15.5	65.6	有り
	No. 2	2.35	23.4	74.1	無し	16.2	66.7	有り
	No. 3	2.31	22.1	71.6	無し	14.7	64.5	有り
YZ45°	No. 1	2.29	21.4	70.4	無し	14.0	63.4	有り
	No. 2	2.28	21.1	69.8	無し	13.6	62.8	無し
	No. 3	2.32	22.4	72.3	無し	15.1	65.0	無し
ZX45°	No. 1	2.24	19.6	67.4	無し	12.1	60.6	有り
	No. 2	2.22	18.9	66.2	有り	11.3	59.5	有り
	No. 3	2.23	19.3	66.8	有り	11.7	60.1	有り

表4 TangoGray太さ2.4mm 結果

造形方向	試料番号	太さ 実測 [mm]	溝深さ1.80mm			溝深さ1.97mm		
			s [%]	f [%]	漏水 有無	s [%]	f [%]	漏水 有無
XY 平行	No.1	2.35	23.4	74.1	無し	16.2	66.7	無し
	No.2	2.35	23.4	74.1	無し	16.2	66.7	無し
	No.3	2.34	23.1	73.5	無し	15.8	66.2	無し
YZ 平行	No.1	2.54	29.1	86.6	無し	22.4	77.9	無し
	No.2	2.53	28.9	85.9	無し	22.1	77.3	無し
	No.3	2.53	28.9	85.9	無し	22.1	77.3	無し
ZX 平行	No.1	2.43	25.9	79.3	無し	18.9	71.3	無し
	No.2	2.41	25.3	78.0	無し	18.3	70.2	無し
	No.3	2.46	26.8	81.2	無し	19.9	73.1	無し
YZ 45°	No.1	2.44	26.2	79.9	無し	19.3	71.9	無し
	No.2	2.42	25.6	78.6	無し	18.6	70.8	無し
	No.3	2.42	25.6	78.6	無し	18.6	70.8	無し
ZX 45°	No.1	2.33	22.7	72.9	無し	15.5	65.6	無し
	No.2	2.28	21.1	69.8	無し	13.6	62.8	無し
	No.3	2.28	21.1	69.8	無し	13.6	62.8	無し

表5 TangoGray太さ2.1mm 結果

造形方向	試料番号	太さ 実測 [mm]	溝深さ1.80mm			溝深さ1.97mm		
			s [%]	f [%]	漏水 有無	s [%]	f [%]	漏水 有無
XY 平行	No.1	2.05	12.2	56.4	無し	3.9	50.8	無し
	No.2	2.06	12.6	57.0	無し	4.4	51.3	無し
	No.3	2.06	12.6	57.0	無し	4.4	51.3	無し
YZ 平行	No.1	2.18	17.4	63.8	無し	9.6	57.4	無し
	No.2	2.20	18.2	65.0	無し	10.5	58.5	無し
	No.3	2.25	20.0	68.0	無し	12.4	61.2	有り
ZX 平行	No.1	2.16	16.7	62.6	無し	8.8	56.4	有り
	No.2	2.18	17.4	63.8	無し	9.6	57.4	有り
	No.3	2.08	13.5	58.1	無し	5.3	52.3	有り
YZ 45°	No.1	2.09	13.9	58.6	無し	5.7	52.8	無し
	No.2	2.13	15.5	60.9	無し	7.5	54.8	無し
	No.3	2.12	15.1	60.3	無し	7.1	54.3	無し
ZX 45°	No.1	2.01	10.4	54.2	無し	2.0	48.8	有り
	No.2	2.00	10.0	53.7	無し	1.5	48.3	有り
	No.3	2.01	10.4	54.2	無し	2.0	48.8	有り

表6 市販Oリング 結果

試料番号	太さ 実測 [mm]	溝深さ1.80mm			溝深さ1.97mm		
		s [%]	f [%]	漏水 有無	s [%]	f [%]	漏水 有無
No.1	2.43	25.9	79.3	無し	18.9	71.3	無し
No.2	2.41	25.3	78.0	無し	18.3	70.2	無し
No.3	2.42	25.6	78.6	無し	18.6	70.8	無し



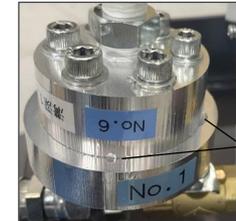
(a) 市販OリングNo.1
+溝深さ1.97mm (漏水無し)



(b) TangoGray 太さ2.4mm XY平行
No.1+溝深さ1.97mm (漏水無し)



(c) Agilus30 Black ZX45° No.1
+溝深さ1.97mm (漏水有り)



(d) Agilus30 Black ZX45° No.1
+溝深さ1.97mm 拡大
漏水

図14 気密性評価結果

3.5 Oリングの形状評価

Agilus30 BlackとTangoGrayで結果に大きな差異は見られなかったことから、市販Oリング及びAgilus30 Blackの結果を図15に示す。

市販Oリングでは、表面に凹み等の欠陥はなく、またリングの太さもリング全体でほぼ均一であることが確認できた。

造形したOリングは、リング断面が均一な円ではなく、全体的に歪みや凹凸があることが確認され、特に、ZX45°方向では、リング全体で断面が楕円となり、つぶし方向の太さが小さくなっていることが確認できた。また、造形物表面に積層痕由来と思われる積層面と平行な凹みが確認できた。積層面と平行な凹みは、XY平行では内外径に、それ以外の造形方向ではシール面に内径側と外径側が繋がるように発生しており、その量はリング断面の歪みと合わせると設計寸法に対して0.1mmから0.3mm程度であった。

シール面に凹みが現れるYZ平行、ZX平行、YZ45°、ZX45°では、凹みが生じている個所で部分的につぶ

し率が低下していることが推察され、こうしたことから、造形方向で3.4のような結果の差異に繋がったものと考えられる。

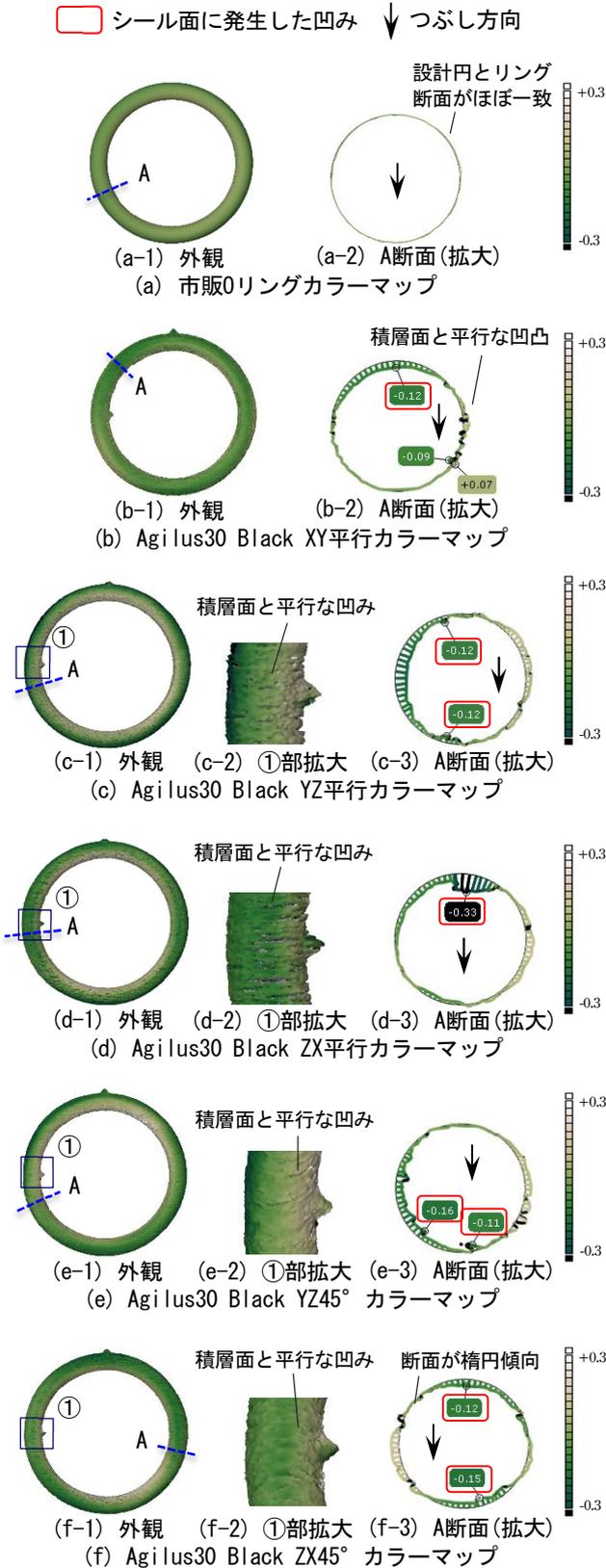


図15 Oリング形状確認結果

4. パッキン一体型部品の造形検討

今回造形に使用した3Dプリンタは複数の材料を同時に造形することが可能であるため、硬質材とゴム系の材料を使用した、パッキン一体型の部品造形について検討を行った。

パッキン一体型の部品の例としてパッキン付きの防水ねじと開口部を広くとった防水ボックス(下部側)を図16に示す。

3.4及び3.5の結果から、防水ねじにあっては、図16の(a)に示す造形方向とする場合は、パッキンのシール面に凹みができることが予想され、図16の(b)に示すねじを縦向きに配置した場合と比較して、気密能力は低下するものと思われる。防水ボックスについては、パッキンが積層方向と斜めになる(e)の個所で、他の部分より気密性が低下することが考えられ、場合により当該箇所を太くする等の対応が必要になると予想される。

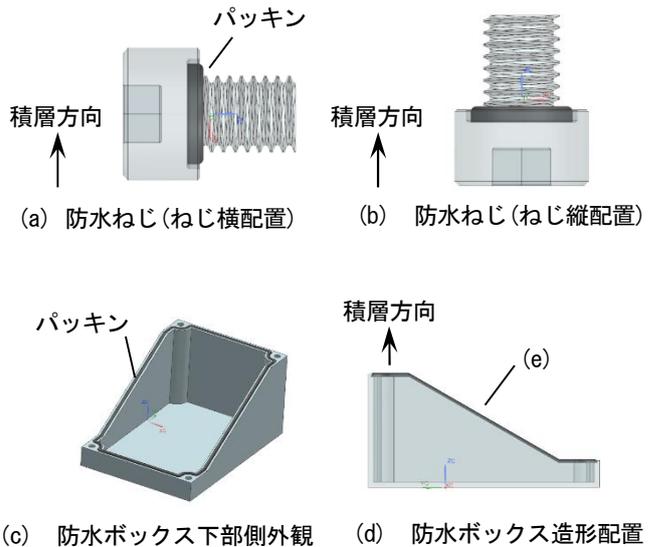


図16 パッキン一体型造形部品の例

5. まとめ

ゴム系の材料2種類を用いて、3Dプリンタで造形したパッキンの気密性、デュロメータ硬さ、圧縮弾性率、圧縮永久ひずみの評価を実施した。その結果以下が得られた。

- 1) デュロメータ硬さ及び圧縮弾性率は造形方向に影響を受けない結果が得られた。
- 2) 圧縮永久ひずみについては、Agilus30 Blackでは造形方向で結果に差異は見られず、TangoGrayについては、35°Cで割れが確認された。

3) 気密性の評価では，造形方向により結果に差異が出る事が確認され，その原因が，造形物断面の歪みや積層痕由来と考えられる表面の凹みにより，部分的につぶし率が低下することによるものと推察された。

参考文献

1) 日本産業規格 JIS K 6253-3:加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—硬さの求め方—第3部:デュロメータ硬さ, pp. 8 - 9(2023).

2) 日本産業規格 JIS K 6254:加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—応力-ひずみ特性の求め方—, pp. 2-6(2016).

3) 日本産業規格 JIS K 6262:加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—常温，高温及び低温における圧縮永久ひずみの求め方, pp. 2-6(2013).

4) 日本産業規格 JIS B 2401-1:O リング—第1部:O リング, pp. 6-8(2012).

5) 日本産業規格 JIS B 2401-2:O リング—第2部:ハウジングの形状・寸法, pp. 2-5, p. 13, pp. 21-25(2012).