

# ゲルを用いた摺動デバイスの研究

## Research on Sliding Devices Using Gel

佐藤 大介<sup>1</sup>, 渡邊 洋輔<sup>2</sup>, エムディナヒン イスラム シブリ<sup>2</sup>, アジット コースラ<sup>2</sup>,  
小川 純<sup>2</sup>, 川上 勝<sup>2</sup>, 古川 英光<sup>2</sup>

Daisuke SATO<sup>1</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBLEE<sup>2</sup>, Ajit KHOSLA<sup>2</sup>,  
Jun OGAWA<sup>2</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Hidemitsu FURUKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山形大学工学部

<sup>2</sup> 山形大学大学院理工学研究科

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Yamagata University

<sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

### 【要約】

一軸偏心ねじポンプは高粘度流体や固体懸濁液、研磨性の高い泥状液などの定量移送を可能とする。しかし、移送粒子への損傷を抑制する利点を持つが、継続的な摺動による金属の摩耗がポンプ寿命を低下させてしまうことが知られている。金属を代替するポンプ材料の候補として形状記憶ゲルが挙げられる。この形状記憶ゲルは弾性の温度依存性があり、常温時は硬く、高温時に柔らかくなる性質をもつ材料である。本研究は形状記憶ゲル材料による一軸偏心ねじポンプのステータの3次元造形の手法を検討し、移送物質に対するロータとステータとの間に発生する摩擦及びトルク特性を分析する。

キーワード: 3D モデリング, 形状記憶ゲル, 摺動, 容積式ポンプ

### 【Abstract】

Mono pump enables the quantitative transfer of high-viscosity fluids, solid suspensions, and highly abrasive muddy liquids. Although it has the advantage of suppressing damage to the transferred particles, it is known that metal wear due to continuous sliding shortens the pump life. Shape memory gel is a candidate for pump materials that can replace metals. This shape memory gel is elastic and temperature-dependent, and it is hard at room temperature and soft at high temperatures. In this study, we will develop a stator for a mono pump using a shape memory gel material and analyze the correlation between the transferred material and the torque and friction generated during sliding.

Keywords: 3D modeling, shape memory gel, sliding, positive displacement pump

### 1. はじめに

一軸偏心ねじポンプは、移送流体の吐出量を回転数で制御でき、流体粒子への損傷が少ないという利点をもつ。医療分野において小児科用人工心臓の血液移送ポンプに採用しようと研究が進められている。しかし、一軸偏心ねじポンプは移送流体の液温や外部環境の気温に起因するステータの膨張及び収縮が生じる。ステータが大きく膨張すると、内部を摺動するロータとの摩擦が発生してしまい、ロータおよびステータの両方が摩耗してポンプ寿命の低下を引き起こす[1]。堀江らはステータとロータの隙間を設けることでこの課題を克服する手法を報告している [2]。

本研究では、一軸偏心ねじポンプ摺動部での摩擦損失を減少させるため、低摩擦性をもつ高分子ゲル材料に着目する。高分子ゲル材料の一つである形状記憶ゲル[3][4]は常温時に硬く、高温時には柔らかくなる性質をもつ。この形状記憶ゲルを用いることで移送流体の温度で適応的に物性が変化する一軸偏心ねじポンプのステータを開発することが可能である。堀江らを参考にロータとステータの間に隙間を設け、モデリングを行い、隙間にゲル材料をコーティングすることによる摩擦

の抑制方法を検討する。形状記憶ゲルステータを3次元造形する方法はDLP方式3Dプリンタとシリコン型造形がある。本稿は両者の造形方式による、形状記憶ゲルのステータの造形精度を検証し、移送流体に対するポリ乳酸樹脂製のロータとの回転で生じる摩擦およびトルクを測定することで一軸偏心ねじポンプのゲルステータの有用性について議論する。

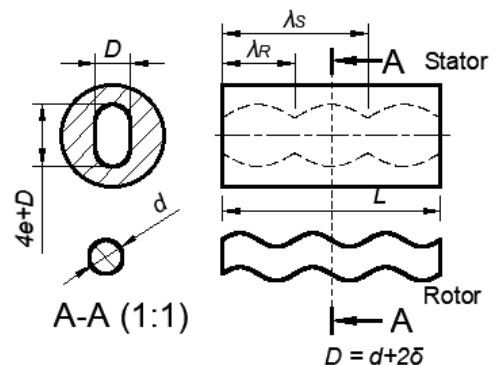


図 1. 一軸偏心ねじポンプのロータ・ステータ

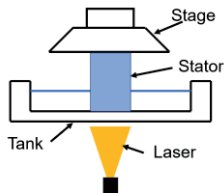


図 2. DLP 方式 3D プリンタの造形の様子

2. 一軸偏心ねじポンプの構造・材料

前述のとおり，ステータ材料には形状記憶ゲルを採用する．形状記憶ゲルは温度応答性を用いて形状を記憶させることを可能にした高分子材料であり，ある一定温度に上昇させることにより形状を復元・変形させやすくすることができ，温度を下げることで形状を保持することができるという特徴をもつ．ステータは内部の寸法が重要であるため，形状記憶ゲルは膨潤しにくい組成を用いて作製した．モノマーである *N,N*-ジメチルアクリルアミド(DMAAm)を 0.7mol/L，アクリル酸オクタデシル(SA)を 0.3mol/L の割合で攪拌させ，架橋剤として *N,N'*-メチレンビス(アクリルアミド)(MBAA)を 0.00057mol/L，開始剤としてジフェニル(2,4,6-トリメチルベンゾイル)ホスフィンオキシド(TPO)を 0.0045mol/L，吸収材として AS150 を混合させ精製水を入れず溶液を作製した．

一軸偏心ねじポンプの構成は 1 条の雄ねじにあたるロータと 2 乗の雌ねじにあたるステータからなっており，ステータの中にロータが差し込まれると，その隙間に「キャビティ」という独立した一連の密閉空間が形成される．ロータは自転すると同時にステータ中心に対して偏心量を半径として自転とは逆方向に公転する．キャビティ内に吸い込まれた液体は，密閉された空間ごと，吐出方向へ連続移送されることになる．キャビティの断面積は一定であるため，吐出される量も常に一定となるという特徴を持っている[5]．

図 1 に一般的な一軸偏心ねじポンプのロータおよびステータの概略図を示す． $d$  はロータ直径， $D(=d+2\delta)$  はステータ内径， $e$  は偏心量， $\lambda_R$  はロータピッチ， $\lambda_s$  はステータピッチ， $L$  はステータの長さである．本研究で使用するポンプは  $d$  を 7.0 mm，偏心量  $e$  に対する偏心率  $\epsilon(= e/d)$  を 0.2 とする．ロータピッチ  $\lambda_R$  は 15.0 mm，ステータピッチ  $\lambda_s$  は 30.0，ステータ段数  $s(=L/\lambda_s)$  は 1.5 とした．またロータとステータとの隙間幅  $\delta$  は 0.1mm とする[6]．

ロータは積層式 3D プリンタによるポリ乳酸樹脂を用いて造形を行い，ステータは DLP 方式 3D プリンタ(Phrozen Shuffle)による造形とシリコーンゴム(Ecoflex00-30)による型にゲル材料を流し込み UV 硬化させることで造形する，2 種類の造形法を行った．DLP 方式 3D プリンタはタンク内に溶液を入れ，下部からレーザーを照射することによって溶液を硬化させていく造形法であり，造形物はステージに造形されていく．その様子を図 2 に示す．

表 1. 造形結果

Modeling method	3D print		Mold
	30	90	
Cure time (s)	30	90	
Side view			
Bottom view			
Top view			

表 2. 測定寸法および相対誤差

	30s	90s	Mold
$D$ [mm]	5.98	6.66	7.26
Bottom	[-16.9 %]	[-7.5 %]	[0.83 %]
$4e+D$ [mm]	11.30	11.41	12.84
Bottom	[-11.7 %]	[-10.9 %]	[0.31 %]
$D$ [mm]	8.87	7.36	7.43
Top	[23.2 %]	[2.2 %]	[3.2 %]
$4e+D$ [mm]	13.46	13.62	12.87
Top	[5.2 %]	[6.4 %]	[0.55 %]
$L$ [mm]	46.62	47.25	45.48
	[3.6 %]	[5.0 %]	[1.1 %]

※ [ ] is relative error

3. 結果

3.1 寸法精度

Phrozen Shuffle を用いて造形を行った結果と型による造形の結果を表 1 に示す．Phrozen Shuffle の設定はレイヤ厚さを 100  $\mu$ m とし硬化時間は 30s・90s の 2 パターンを試した．また，計測した寸法および相対誤差を表 2 に示す．

表 1, 2 において 30s のステータを観察するとステージに接着していた面は，設定寸法より一様に寸法が減少しているのに対し，ステージに接着していなかった面，つまり最後に造形された面は穴の部分が楕円状に広がってしまっていた．また，内部の特徴的なスクリーウ状の穴には凹凸が目立ち，ロータを入れ手で回転させると抵抗感が感じられた．

次に 90s のステータを観察するとステージに接着していた面は，形状こそやや歪になってしまったが寸法は 30s の時ほど減少は見られなかった．最後に造形された面は穴の部分も含め寸法が出ていた．しかし，常温では硬いはずの SMG であるが最後の 1/5 ほどは柔らかく

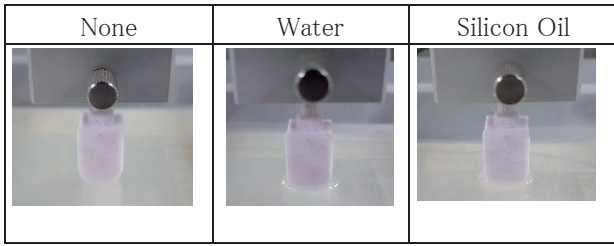


図 3. 測定時の様子

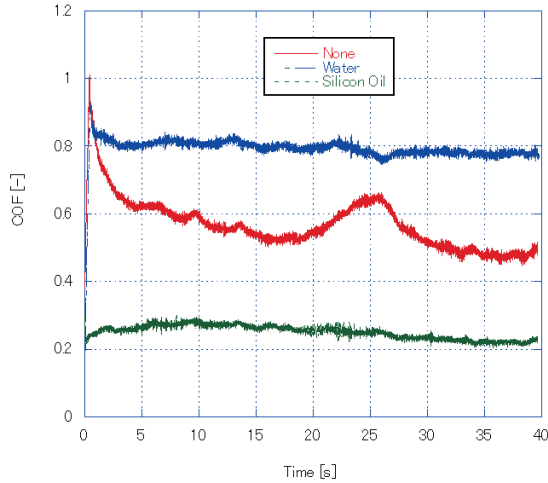


図 4. 測定した摩擦の時間変化

表 3. 動摩擦係数および標準誤差

	None	Water	Silicon oil
Dynamic friction coefficient	0.605	0.791	0.260
Standard error	$5.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$8.6 \times 10^{-3}$

予想していた SMG の硬さを持っていなかった。最後に型でのステータを観察すると、全体的に Phrozen Shuffle で造形したステータと比較し、相対誤差を抑えることができていた。内部の穴はロータを違和感なく回すことができていた。上面は UV 照射時に液面側であり、ややへこみが見られた。また、シリコンゴムの型を積層式 3D プリンタで作製した型で造形したため、積層痕がシリコンゴムおよびステータにもついていた。3 種類の造形を比較し、トルク試験で用いるステータは型で造形したものとした。

### 3.2 界面流体におけるステータ・ロータ間の摩擦特性

形状記憶ゲルとポリ乳酸樹脂の摩擦を評価するために摩擦試験機(トライボマスター  $\mu$  V1000)を使用する。板状にした形状記憶ゲルの上に、ポリ乳酸樹脂の治具を押し当て摩擦を測定した。測定条件は移動速度 0.5 mm/s, 垂直荷重 300 g, 移動距離 20 mm に設定した。

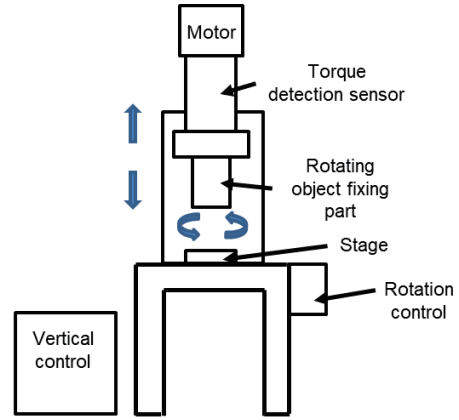


図 5. 上下回転型試験機概要

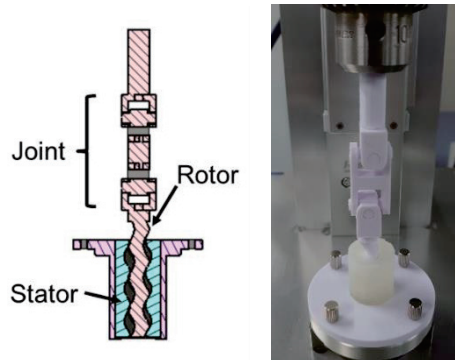


図 6. ロータとステータの 3D 断面データ、装置に取り付けた様子

摩擦測定は界面流体がない場合、界面流体として水・シリコンオイルを用いた場合の 3 パターン、それぞれ 5 回測定を行った図 3 に各パターン時の測定の様子を示す。

表 3 にそれぞれ 5 回の平均動摩擦係数および標準誤差を示す。図 4 に測定した摩擦の時間変化のグラフを示す。表 3, 図 4 を見ると界面流体なしの場合、動摩擦係数は 0.605 と水の 0.791 場合より低い値を示したが、グラフを見ると静止摩擦が発生した後、摩擦が低下し動摩擦を示している様子が見られる。一方で水とシリコンオイルは静止摩擦と動摩擦の差があまりないよう見受けられる。また、シリコンオイルは 3 つの中で動摩擦係数、標準誤差ともに最も低い値を示した。

### 3.3 形状記憶ゲルステータによる摺動トルクの評価

形状記憶ゲルステータとポリ乳酸樹脂製ロータによる一軸偏心ねじポンプの摺動トルクを評価するために上下回転型試験 TL901 を使用する。図 5 に装置概要を示す。回転固定部にジョイントを取り付けたロータを固定し、またステージに固定するための治具を用いてステージにステータを固定する。図 6 に実際の装置に本研究で用いる一軸偏心ねじポンプを取り付けた外観を示す。測定条件としてモータの回転数は 15rpm とし、測定時には流体なしの場合、流体として水、シリコンオイルを使用した場合の 3 パターンを実施した。また、試験はそれぞれ 5 回測定し、平均を求めた。表 4 にトルク試験の

表 4. トルク試験結果

	None	Water	Silicon oil
Torque [N・m]	0.0021	0.0012	0.00063

結果を示す. 表 4 を見るとシリコンオイルの値が 0.00063N・mと 3 つの中では最も低いという結果が得られた.

#### 4. 考察

##### 4.1 寸法精度

30s のステータにおいて, 表 2 から分かるように寸法精度が悪い. その理由としては 1 層あたりの硬化時間が短い点が挙げられる. 対して 90s のステータでは硬化時間が長く寸法精度も 30s と比較すると高いことが分かる. しかし, 90s のステータでは最後の 1/5 ほどは柔らかいという現象が起こった. これはモノマーである DMAAm と SA が分離し, SA が常温で結晶化してしまったのが問題であると考えている. 形状記憶ゲルの 3D プリントにおいて最も問題となっているのが, 液温の低下による SA の結晶化である. ゲル作製時, 本来常温で固体の SA を約 60°C に温め, 液体として DMAAm と混合しており, この SA の変化を形状記憶ゲルは利用しているが, 造形時間が 30s では約 4 時間, 90s では約 10 時間かかる 3D プリントでは液温が低下する十分な時間であると推測できる.

一方で, 型のステータではすべての寸法において高い精度を持っていることが分かる. 造形時間も約 1 時間と早く, DMAAm と SA が分離する前にゲル化させることができている. しかし, 問題点として積層痕が挙げられる. これは積層式 3D プリンタを使用した型で, シリコンゴムの型を作製したためであるため, 今後 DLP 方式 3D プリンタを使用した型の造形を検討する必要がある.

##### 4.2 界面流体におけるステータ・ロータ間の摩擦特性

表 3, 図 4 より動摩擦係数において界面流体なしの場合と水の場合で, 水の場合が高い値を示した理由として考えられることは, 水を滴下した際に形状記憶ゲルの表面がややベタついたことが挙げられる. また, 水, シリコンオイルの場合は標準誤差が小さいのに対し界面流体なしの場合は大きく, 測定回数を増やし再現性を高められると推測できる.

##### 4.3 形状記憶ゲルステータによる摺動トルクの評価

表 4 より流体なしの場合と水の場合を比較すると, 摩擦試験とは異なり, 水の場合の方が高い値を示した. このことに対して, ロータとステータの間には約 0.1mm の隙間が空いており, ロータとステータの接触時間が短いことが考えられる. また, シリコンオイルの値は小さく, 実験時にロータ・ステータが流体を吐出しているポンプとしての動きを見せていたことからトルク試験において有効

な材料だと判断できる.

#### 5. おわりに

ゲルを用いたステータ作製において 3D プリンタを用いた造形ではヒータを用いた液温を下げない工夫や, 造形時間を減らす必要があることが分かった. また, 型を用いたステータ作製では積層痕をなくすため使用するプリンタを DLP 方式 3D プリンタに変更する必要があることが分かった.

摩擦試験・トルク試験において本報告では 3 パターンの実験を行いシリコンオイルが最も低い値を示し, その安定供給も可能なことから, 今後ゴムやポリ乳酸樹脂などでステータを作製し比較する際に使用することを検討する.

#### 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP17H01224, JP18H05471, JP19H01122, JST COI JPMJCE1314, JST OPERA JPMJOP1844, JST OPERA JPMJOP1614, 内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理法人: NEDO) によって支援を受けたものである.

#### 参考文献

1. 西村 健志, 上辻 英史, 岩井 善郎, 一軸偏心ねじポンプしゅう動部における粒子挙動に関する研究, トライボロジスト 第 63 巻 第 9 号 (2018)
2. 堀江 昌朗, 長濱 正太, 隙間を有する一軸スクリュウポンプの二重螺旋流路内部流れ特性に関する研究 摂南大学融合科学研究所論文集 第 4 号 第 1 号 (2018)
3. 吉田 一也, 和田 真人, 川上 勝, 古川 英光, 高強度ハイドロゲルにおけるトライボロジー, トライボロジスト 第 63 巻 第 5 号 (2018), pp.352.
4. MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa, 4D Printing of Shape - Memory Hydrogels for Soft - Robotic Functions  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admt.201900071> (Retrieved on September 17, 2020)
5. ヘイシン モーノポンプ® モーノポンプとは 構造と原理  
<http://www.mohno-pump.co.jp/about/construction.html> (Retrieved on September 17, 2020)
6. 堀江 昌朗, 重光 翔, 大倉 成夫, 小児科用一軸偏心スクリュウ血液ポンプに関する基礎的研究, (2015)