

# 形状記憶ゲルの分割造形及び粘着力による固定方法の検討

Method to Fix Shape Memory Gels by Segmental Modeling and Adhesive Force

本間 飛翔, 青山 響, 小川 純, 渡邊 洋輔,  
エムディナヒンイスラム シブリ, 川上 勝, 古川 英光

Tsubasa HONMA, Hibiki AOYAMA, Jun OGAWA, Yosuke WATANABE,  
MD Nahin Islam SHIBLEE, Masaru Kawakami, Hidemitsu FURUKAWA

山形大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata university

## 【要約】

形状記憶ゲルで大きな構造物を造形するための方法として、STL 編集ソフトである Magics を用いてデータを分割し LCD 方式の 3D プリンタで造形後、粘着力で固定する方法について検討した。本研究ではクビナガリュウの STL データを 16 個に分割し、LCD 方式の 3D プリンタで造形を行った後、各造形物を形状記憶ゲルの粘着力で固定した。その結果、造形時間が長くなる形状では溶液が分離することにより白濁や硬さの変化などの異方性が確認され、その後の造形では粘着力の低下や造形精度の低下が確認された。溶液が分離されていない造形物では精度や粘着力が低下せず、異方性は確認されなかったことから、溶液が分離していない場合であれば分割造形による大きな構造物の造形が期待でき、また SMG の持つ粘着力による固定も期待できる。

キーワード: 形状記憶ゲル, 3D プリンタ, 分割造形, 粘着力

## 【Abstract】

As a method for forming large structures with shape memory gel, we investigated a method of dividing data using Magics, an STL editing software, and fixing them with adhesive force after forming them with a 3D printer using an LCD system. In this study, the STL data of a Plesiosaurus was divided into 16 pieces, and each piece was fixed by the adhesive force of the shape memory gel after it was created by a 3D printer using the LCD method. As a result, anisotropy such as cloudiness and changes in hardness were observed as a result of solution separation for shapes with longer molding time, and a decrease in adhesive strength and molding accuracy were observed for subsequent moldings. In the modeling in which the solution was not separated, there was no decrease in accuracy or adhesive strength, and no anisotropy was observed. In addition, fixation by the adhesive force of SMG can be expected.

Keywords: Shape Memory Gels, 3D-Printer, Segmental Modeling, Adhesive Force

## 1. 序論

形状記憶ゲル (Shape Memory Gels, 以下 SMG) は室温付近で変形後、50 から 60°C の範囲に加熱すると軟化し元の形状に戻る性質をもつ。この性質を柔らかいロボットの主要な機能として展開する方法が報告されている[1]。SMG の造形は一般的に LCD 方式の 3D プリンタや、型に入れ紫外線や熱を与えることで硬化させる手法が挙げられるが、どちらの方法でも寸法の大きな設計物は造形が困難となる。前者はステージの範囲を超過する設計物の造形が不可能であり、後者は寸法が大きい程反応熱によって造形が乱れ、機械的特性が変化する恐れがある。そのため、大きな構造でも造形が可能となる方法が必要とされている。大型の 3D プリンタとしてはエス・ラボ株式会社や慶応義塾大学 SFC 研究所ソーシャル・ファブリケーション・ラボ、デジタルファブリケーションスタジオの積彩と共同で開発した、造形サイズ横 3 m×奥行 3 m×高さ 3 m の超大型ペレット式 3D プリンタ「茶室」が挙げられる[2]。また市販され

ている光造形の 3D プリンタでは 3D SYSTEMS の ProX<sup>®</sup>が造形サイズ 650×750×550 mm と比較的大型な造形を可能としている。しかし、ステージやバスタブが大きくなる程機械全体の寸法も増加していき、価格も高価となっていく。今後 SMG の実用化に向けた開発において、構造物の肥大化に伴い大型の 3D プリンタを導入していく事は、コスト面や運用面においても合理的とはいえない。一方で、このような問題を解決するため、CAD ソフトや STL 編集ソフトでデータを分割し、家庭用の小型な 3D プリンタでも大型の構造物が造形可能となるような手法が検討されている[3]。特に寸法が明確に定められた設計物では、分割後の固定方法として端部に凹凸を設け、機械的に結合することで各部品を固定する方法が挙げられる[4]。しかし、形状変化を伴う SMG に上記のような機械的な固定方法を用いると、結合面での応力集中による破断や、変形することではめ合いに齟齬が生じる、また Blender や 3D スキャンによって得られた STL データでは明確に寸法が決ま

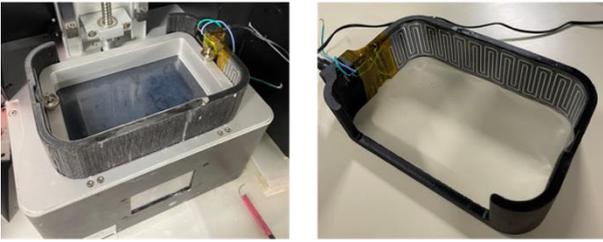


図 1. バスタブの加熱方法[5]

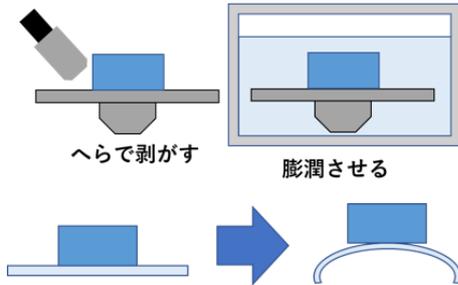


図 2. PET フィルムによる剥離性の向上[5]

りにくいため、正確にアセンブリ可能となる凹凸を設けることが困難といった問題が生じてしまう。そのため、これらの問題を解決するための固定方法が必要となってくる。

本稿では SMG の 3D プリンタによる分割造形およびゲルの粘着力を用いた分割後の固定方法について検証する。

## 2. SMG の分割造形

### 2.1 材料

SMG は *N,N*-Dimethylacrylamide (DMAAm) , Stearylacrylate (SA) の共重合と *N,N'*-

Methylenebisacrylamide (MBAA) の架橋からなる三次元網目構造を有するゲルである。本研究では LCD 方式の 3D プリンタ Phrozen shuffle で造形する。光源の波長 405 nm に合わせるために、光開始剤は 2,4,6-trimethylbenzoyl-diphenyl phosphine oxide (TPO) を使用し、光吸収剤には AS150 を使用した。また、溶媒にはエチレングリコールを使用した。

### 2.2 バスタブの加熱

モノマーに使用される SA の融点は 30°C であり、常温で長時間放置すると少しずつ凝固してくる。造形物が大きい場合は 3D プリンタの造形時間が長くなるため、凝固した SA がバスタブ内に残留し重畳しなくなる。そこで、この問題を解決するためにバスタブの周囲に電熱線のヒーターを設置し、溶液が冷却されないよう常に加熱しながら造形を実施した(図 1)[5]。

### 2.3 ステージ表面の変更

LCD 方式の 3D プリンタで造形する際、chitubox®

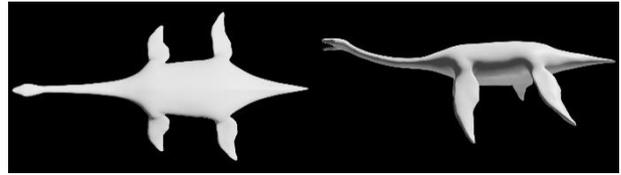


図 3. クビナガリュウのモデル

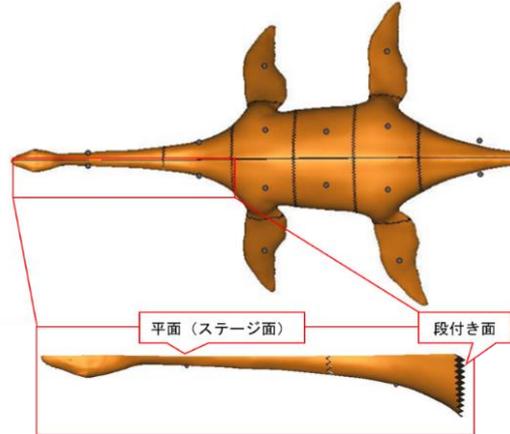


図 4. STL データの分割

等のスライサソフトで STL データを配置するが、特に寸法が大きいデータを造形する場合は自重によりステージから剥離する恐れがあるため、ステージ面に対し造形物の設置面積が増えるように配置する。しかし、材料に SMG を用いる場合は、ステージへの接着が他の UV レジンより強くなり、造形後のステージとの剥離が困難となる。そこでステージ表面に予め PET フィルムを貼り、フィルム上に造形物が積層されるようにした(図 2)[5]。

### 2.4 STL データの分割

本研究では全長約 250 mm のクビナガリュウのデータを使用した(図 3)。なお、このモデルは山形大学やわか 3D 共創コンソーシアムにて柔軟な材料で造形を目指す大型 4D モデルのプロトタイプとして設定しており、将来的に博物館に寄贈することを目標としている。

造形上の制約条件として Phrozen Shuffle の造形範囲は縦 70 mm、横 124 mm であり、この範囲を超える寸法の物体は造形できない。そこで、STL の編集ソフトである Magics を使用して 16 個に分割し、ステージ寸法に収まるように編集した。また、頭部から尾部にかけて分割面を平面にすることで、造形時のステージに対する設置面積を増加させた。LCD 方式では曲面を造形する際、自重で落下させないためにスライサソフトでサポートを追加する必要があるが、分割造形では分割により平面が生成され、ステージに面するように配置することによってサポートの必要がなくなり造形制度の向上に繋がることを期待される。首部や胴体部毎の分割面は段状にすることで、固定時の接触する表面積を増加させている(図 4)。

表 1. フタバズキリュウの分割した STL データと造形物の評価

	A	B	C	D	E	F	G
STL							
造形物							
			下部に白濁 粘着力低下	下部に白濁 粘着力低下	下部に白濁 粘着力低下 造形精度低下	粘着力低下 造形精度低下	粘着力低下 造形精度低下
造形時間	1h16min	3h8min	5h13min	4h50min	5h42min	3h2min	1h19min

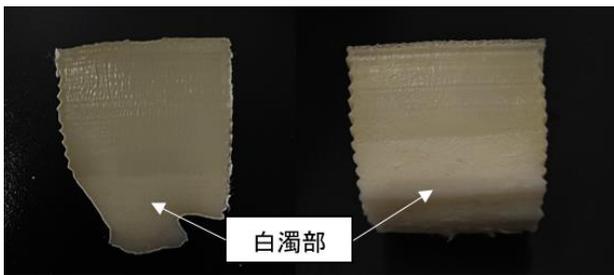


図 5. 白濁部 (左:C, 右:D)

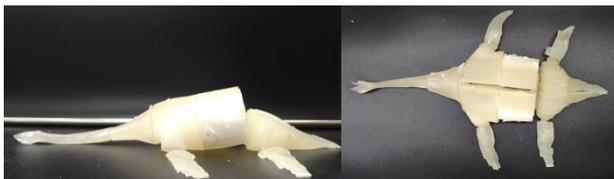


図 6. 粘着力による固定

### 3. 粘着力による固定

分割した部品の固定は SMG の粘着力を活用した. SMG のモノマーである SA は親油性の粘着力を誘発する側鎖結晶性高分子であり, 造形直後や高温下において粘着力を発生する[6]. クビナガリュウのヒレと胴体など接触面積が少ない部品間や粘着力が局所的に少なくなった面においては, DMAAm と Lauryl Acrylate (LA) で作製した粘着シート(厚さ 1 mm)を張り付け固定している. LA も SA と同様に側鎖結晶性高分子であり, 親油性による粘着力で固定される. 既存の接着剤とは異なり柔らかく粘着することが可能となる.

## 4. 結果と考察

### 4.1 造形について

表 1 に分割ごとの造形物を示す. 造形は A, B, ..., G の順に行い, ゲル溶液は同様のものを繰り返し使用した. 最初の方に造形した A, B は精度が高く粘着力による固定も可能だったが, C 以降の造形物は後半に進むにつれて粘着力が低下し, E 以降は造形物に乱れが生じて精度が著しく低下した. また C, D, E は下部に硬い白濁が確認された(図 5).

### 4.2 形状記憶特性について

造形したクビナガリュウの首部(A, B)を用いて形状記憶特性を調査した. 90 °C の水に造形物を入れ変形後に室温(25 °C)の水に入れることで硬化させる. その後再度 90 °C の水に入れて温度を上昇させた. その結果, 元の形状に戻る動作が確認され, 形状記憶特性が確認された. そのため, 既存の SMG と同様に使用できることが期待される.

### 4.3 粘着力による固定について

図 6 に SMG の粘着力による各分割造形物の一体化の外観を示す. A, B は SMG の粘着力のみで固定できたが, 他の造形物は粘着力が低下したため SMG のみでは固定されず, LA の粘着シートにより固定した. 特に E, F, G に関しては粘着シートを張り付けた場合でも粘着が行われなかった.

### 4.4 考察

C, D, E に硬い白濁が発生した点について, 長時間の造形によって溶液内の DMAAm と SA 分離したことにより, 積層面における SA の割合が増加したことが要因であると推察される(図 7). SA は常温下では白い結晶となり, 重合した場合も同様に白いポリマーとなる. DMAAm の分子量は 99.133, SA の分子量は 324.55 であり, また分子構造から DMAAm は親水性, SA は親油性を示すことから, 時間と共に溶液が分離する現象が生じた可能性が高い. そして, これらの造形物は他と比較して寸法が大きく, 造形時間も 4 時間から 5 時間程度と長くなっている. 従って長時間造形する場合は, 時間と共に SA が沈下し, バスタブ底面の SA の割合が増加することで白濁した硬い造形物が生成されたと考察できる.

一方で造形時間が短い A, B では, 溶液がほとんど分離されていないため想定どおりの造形が実施され, 異方性や粘着力などへの影響もほとんど観測されていない. 一方, C 以降で粘着力が低下した点について, 同じ溶液を繰り返し使用したことで分離した SA の割合が少しずつ減少したことに起因すると推察される. 今回は造形後に余った溶液を回収し再

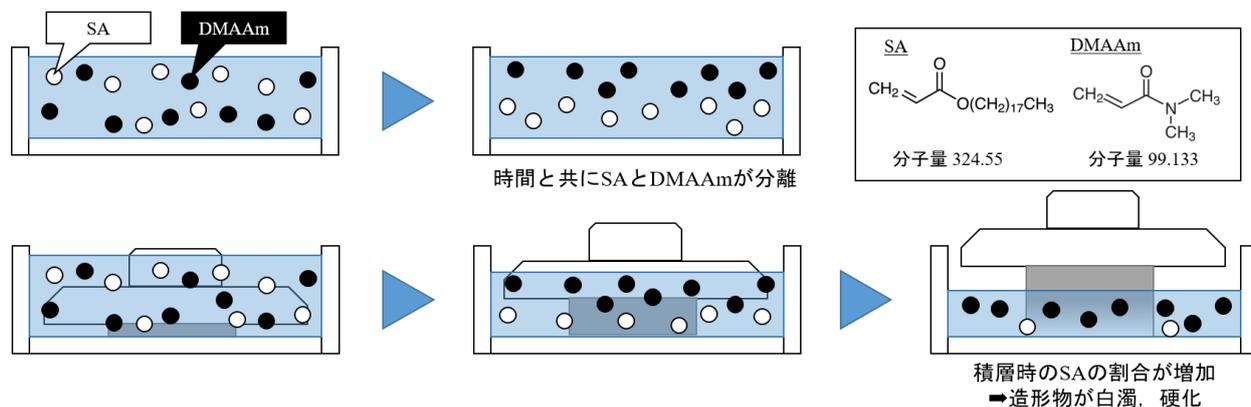


図 7. 時間経過による溶液の分離と造形への影響

度造形する際に繰り返し使用していた。そのため繰り返しの回数増加に伴い、溶液中の SA の割合も減少し、結果として SA の粘着力に依存する分割 SMG の拘束力が低下したと捉えることができる。後半の E, F, G で造形精度が低下した点については、溶液の割合が変化したことにより造形が乱れたことが一因であると考察される。

## 5. 結論

本研究では形状記憶ゲルで大きな構造物を造形するため、STL データを分割して造形を行い粘着力で各造形物を固定した。造形時間が長くなる場合は時間と共に溶液が分離し、SA の割合が変化することで白濁や硬さの変化、粘着力や造形精度の低下が確認された。溶液が分離されていない造形物では精度や粘着力が低下せず、異方性は確認されなかったことから、溶液が分離していない場合であれば分割造形による大きな構造物の造形が期待でき、また SMG が持つ粘着力による固定も期待できる。

時間の経過と共にバスタブ内で溶液が分離し、造形物の柔らかさに影響を与えることが示唆された。3D プリンタで異方性を実現することは長年の課題とされているが、分割造形後に粘着力で固定する場合は寧ろ様な印刷が求められる。そのため、超音波や振動による攪拌など、溶液が分離しない造形手法が必要となってくる。また、本研究では造形物の異方性を目視や触った感触で評価していたが、層毎に切り取って FT-IR 等を実施し DMAAm と SA の比率を調査することや、力学試験による機械的特性などの定量的な評価が今後必要となる。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05471, JP19H01122, JP21H04936, JP21K14040, JP22K17972, JST OPERA JPMJOP1844, ムーンショット農林水産研究開発事業 (MS508, JPJ009237), 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」, 「官

民による若手研究者発掘支援事業」(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. MD Nahin Islam Shiblee, Kumkum Ahmed, Masaru Kawakami, Hidemitsu Furukawa “4D Printing of Shape - Memory Hydrogels for Soft - Robotic Functions” *Advanced Materials Technologies*, Vol. 4, No. 8, 1900071, 08.2019.
2. エス. ラボ株式会社, “超大型ペレット式 3D プリンタ, 「茶室」を開発(令和 4 年 9 月 22 日時点)”, <https://slab.jp/releases/20210709/>
3. Tomohiro Yamada, Yusuke Nakayama ”A report of the practical cases of 3D printer” *TRANSACTIONS OF JASVET*, Vol. 31, No. 1 2015
4. 占部 俊樹, 豊福 誠治, 館野 寿丈, “211 アディティブ・マニファクチャリングによる分割造形手法に関する研究: 円筒形状の接続による長尺モデルの作製(OS3: アディティブ・マニファクチャリングの生産システム(1))”, 日本機械学会, No.14-8, *生産システム部門研究発表講演会 2014 講演論文集*, '14.3.17, 東京
5. やわらか 3D 共創コンソーシアム ソフトマシン DOJO, “形状記憶するゲルソール(令和 4 年 9 月 15 日時点)”, <https://soft3d-c.jp/softmachinedojo/>
6. 八尾 滋, “側鎖結晶性高分子による結晶化超分子間力とその将来展望” *高分子論文集 (Kobunshi Ronbunshu)*, Vol. 73, No. 2, pp. 139-146 (Mar., 2016)