

# 3D ゲルプリンターを用いた臓器の手術モデルの作製

Modeling of surgical models of organs Using a 3D Gel Printer

坂下大輔<sup>1</sup>, 川上 勝<sup>2</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>, 小川 純<sup>2</sup>,  
古川 英光

Daisuke SAKASHITA<sup>1</sup>, Masaru KAWAKAMI<sup>2</sup>, Yosuke WATANABE<sup>2</sup>, MD Nahin Islam SHIBLEE<sup>2</sup>, Jun OGAWA<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】

近年、ハイドロゲルの応用例として手術シミュレーション用の臓器モデルが注目されている。我々は、柔らかいハイドロゲルを、3D ゲルプリンターを用いて直接造形することで従来の臓器モデルよりも本物に近い構造や感触を持つ臓器モデルの作成を可能とする技術を開発している。3D プリンターを用いる事で、製作の時間やコストを抑え、患者一人一人に応じた臓器モデルを作成することが期待される。我々の3D ゲルプリンターはモノマー溶液の液面を紫外レーザーで照射、走査することで硬化させる方式を用いている。現在、この3D ゲルプリンターで狭い空隙を持った形状を造形すると、空隙部が埋まった状態で造形されてしまう問題が有る。これは造形過程において、モノマー溶液が空隙部に長時間滞留することにより、その領域のモノマーへの照射が繰り返し行われることが原因であると考えられる。重合禁止剤をモノマー溶液に添加したところ、空隙構造の造形に改善が見られた。今後、このプリンターを用いて、尿管や血管のような中空構造の造形を目指す。

キーワード: 臓器モデル, ハイドロゲル, 重合禁止剤

## 【Abstract】

Recently, organ replica models for surgical simulation have attracted attention as an application of hydrogel. We are developing a technology that enables the creation of lifelike organ models with a structure and feel closer to the real thing than conventional organ models by directly modeling soft hydrogel using a 3D gel printer. The use of 3D printers is expected to reduce production time and cost, and to create organ models tailored to each individual patient.

Our 3D gel printer uses a method of curing by irradiating and scanning the liquid surface of the monomer solution with a UV laser. Currently, there is a problem that when a 3D gel printer is used to create a shape with narrow voids, the voids are filled. This is thought to be caused by the repeated irradiation of the monomer in the void area due to the prolonged retention of the monomer solution in the void area during the molding process. When a polymerization inhibitor was added to the monomer solution, the modeling of the void structure was improved. In the future, we aim to use this printer to model hollow structures such as ureters and blood vessels.

Keywords: organ replica model, hydrogel, polymerization inhibitor

## 1. 序論

ハイドロゲルは、高分子で架橋された水を内部に含む物質の総称である。ハイドロゲルの3D 造形技術の応用分野として、手術シミュレーション用の臓器モデルの製造が想定される。臓器モデル作成用のハイドロゲル材料として、我々は相互架橋網目(ICN: Inter-crosslinking Network structure)ゲルに着目した。ICN ゲルは異なる種類の高分子が相互架橋することによって3次元の網目を形成する。ICN ゲルは用いる高分子の種類を変えることによって、ゲルの特性を変えることが可能であり、臓器のような柔らかい物体の造形に適した材料と言え、3D ゲルプリンターを用いた直接造形により、本物に近

い構造や感触を持つ臓器モデルの作成が可能となる。我々はモノマー溶液の液面を紫外レーザーで照射して硬化させる方式を用いたゲル3D プリンターを開発している。現在、この3D ゲルプリンターで血管や尿管などの狭い空隙を持つ形状を造形すると、空隙部が埋まった状態で造形されてしまう問題が有った。

本研究では重合禁止剤をモノマー溶液に添加したところ、空隙構造の造形に改善が見られたためその造形結果について報告する。

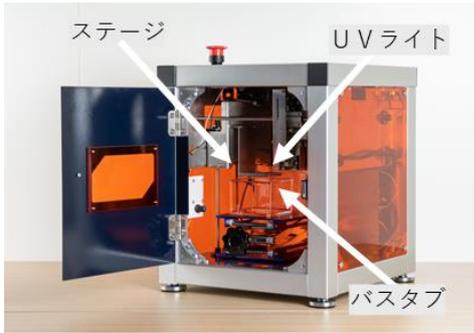


図1 Gel PiPerの外観

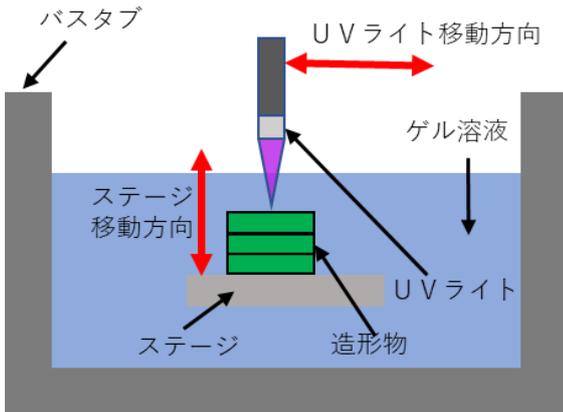


図2 3D ゲルプリンター-Gel PiPerによる造形の模式図

## 2. 装置の説明

3D プリンターの方式には光造形法やインクジェット法などが上げられるが、今回は高精度の造形が可能となる光造形法に着目した。その光造形法の中にも、自由液面方式と規制液面方式などの造形方式が存在する。規制液面方式では造形ステージを引き上げながら造形する方式であり、臓器モデルなどの柔らかい材料を用いた造形では、ステージの引き上げの際に造形物が破損したり、自重で造形物が変形したりする問題が有る。

自由液面方式は液面をレーザーで照射して硬化させて造形する方式である、先行研究では高粘度の材料を用いた造形が困難であることが分かっているが、本研究で用いている ICN のゲルモノマー溶液は低粘度であるため自由液面方式を採用した高精度な造形が可能と考えられる。

本研究では、我々が開発した 3D ゲルプリンター「Gel PiPer」を用いた。Gel PiPer は自由液面方式を採用しており、バスタブ内のゲル溶液に 405nm の UV レーザーを任意の位置で照射し、3次元構造を造形する。スポット径は 0.3mm であり、造形ステージはステンレス製の金網を

用いている。

図 1 に Gel PiPer の外観を示す。

図 2 に Gel PiPer による造形の模式図を示す。

## 3. 実験方法

本研究では走査速度 10m/s とし、UV レーザーの光量を 10mW とした。

造形材料となるゲル溶液は、ICN(Inter-crosslinking Network structure)ゲルを用いた。表 1 に ICN ゲルの組成を示す。モノマーとして DMAAm(N,N-Dimethyl acrylamide)、ポリマーとして HPC(Hydroxypropyl Cellulose)、架橋剤として KarenzMOI-EG (2-(2-methacryloyloxyethoxy) ethylisocyanate)、光重合開始剤として TPO (Diphenyl (2,4,6-trimethyl benzoyl) phosphine Oxide)、印刷精度向上のための吸収剤として AS-150(Benzenesulfonic acid, 2, 2'-(1,2-ethenediyl)bis[5-[4-methoxy-6-(phenylamino)-1,3,5-triazin-2-yl]amino]-,sodium salt(1:2))、溶媒として精製水を使用した。また、本実験では内径 3mm、外径 6mm、長さ 10mm の横向きの円管を造形した。

現在そのような空隙のある形状を Gel PiPer で造形する際本来UV照射による硬化反応が起きないはずの空隙部において反応が起きてしまうことで空隙部が埋まるという問題がある。そこで、我々は重合禁止剤を用いて改善をはかった。重合禁止剤はラジカルと反応して安定な化合物を生成する事で重合を停止させる効果がある。ICN ゲルに重合禁止剤MEHQ (4-Methoxyphenol)を混合し造形精度に影響があるか調査した。ゲル溶液は重合禁止剤の添加無し、1wt%、0.1wt%、0.01wt%を加えた4つの条件のゲル溶液を用意した。

## 4. 評価方法

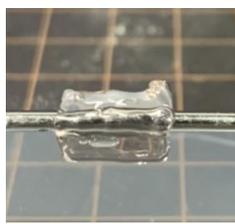
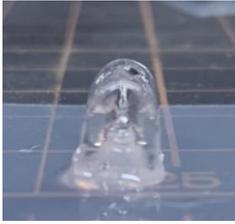
重合禁止剤による造形の可否を調査し、その上で造形可能であった物に関しては、造形直後に直径約 2mm の 3D プリンター用フィラメントを管の片側から挿入し貫通した場合を○、貫通しなかった場合を×とし表にまとめた。

なお、造形不可であった物は中空の評価を-とした。

表 1 ICN ゲル組成表

モノマー [Mol/L]	ポリマー [Mol/L]	架橋剤 [Mol/L]	光重合開始剤 [Mol/L]	吸収剤 [wt%]
DMAAm	HPC	Karenz	TPO	AS-150
4.0	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-1}$

表 2 造形物評価結果

	重合禁止剤の含有量[wt%]			
	無し	0.01	0.1	1
造形可否	○	○	○	×
中空	×	○	○	-
造形物				
側面図				-

## 5.実験結果

造形物評価結果を表 2 に示す。

重合禁止剤の添加なしでは、造形可であったが中空を造型できなかつた。

重合禁止剤の含有量 0.01wt%では、空隙部が埋まることなく造型できた。しかし、造型後にバスタブから取り出すと自重によってやや下面が潰れ側面から観察すると表 2 側面図のようにトンネル型になった。

重合禁止剤の含有量 0.1wt%では、空隙部が埋まることなく造型できた。しかし、造型直後にバスタブから取り出すと表 2 側面図のように自重に耐えられず自立しなかつた。重合禁止剤の含有量 1wt%では管自体の造型が不可であった。

## 6.考察

重合禁止剤の添加なしでは、紫外光が造形物を透過し空隙部で硬化反応が起き、穴が埋まったと考えられる。重合禁止剤含有量 0.01wt%では、重合禁止剤による重合の阻害により空隙部での硬化反応が起きなかつたため造型が成功したと考えられる。重合禁止剤含有量 0.1wt%の場合も、0.01wt%の結果と同様に重合禁止剤による重合の阻害により空隙部での硬化反応が起きなかつたため造型が成功したと考えられる。

重合禁止剤含有量 1wt%では、重合禁止剤により過剰に重合が阻害され、本来硬化が行われるはずの場所で反応が起きなかつたため造型が失敗したと考えられる。

中空が造型できた重合禁止剤含有量 0.1wt%, 0.01wt%において造形物の側面に注目すると、0.1wt%は0.01wt%に比べて大きく崩れている事が分かる。また、1wt%では、造型自体ができないという点から重合禁止剤の含有量が多くなるほど造形物の強

度が弱くなると考えられる。

現在、造形物の強度が低く、寸法計測ができないため、定量的な評価をするのが困難である。今後 ICN ゲルの組成やポリマーを構成する HPC(Hydroxypropyl Cellulose)の種類を変更することで、現在よりも強度が高く、自重に負けないゲルの造型を行う。

## 7.結論

重合禁止剤の添加により、狭い空隙を持った形状の造型において改善が見られた。現状では、重合禁止剤の含有量が 0.1wt%~0.01wt%の範囲内で造型が可能であると分かった。また、重合禁止剤の含有量が過剰であると造型自体が不可になる事が分かった。

現在、強度面の問題によりゲルの形状の定量的な評価ができていない。造形の精度や正確性の改善には定量的な評価が重要であるため、ICN ゲルの組成の変更やゲルの種類の変更により強度の向上を図る必要がある。

## 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. 高田、剛、日馬瑠璃、古川英光。「相互架橋ネットワーク (ICN) 構造を有する超高延性ゲル」  
表面科学とナノテクノロジーの電子ジャーナル 10 (2012): 346-350.
2. 田勢泰士, et al. "3D ゲルプリンターでの造形に適した低粘度ゲル材料の開発と機械特性の評価." 日本機械学会論文集 (2018): 17-00459.
3. Russo, Giovanni, and Marco Lattuada. "Synthesis of non-spherical polymer particles using the activated swelling method." *Journal of Colloid and Interface Science* 611 (2022): 377-389.
4. Seo, Soyoung E., et al. "Three-dimensional photochemical printing of thermally activated polymer foams." *ACS Applied Polymer Materials* 3.10 (2021): 4984-4991.