

温度変化で可逆的に形態変化する ハイドロゲル

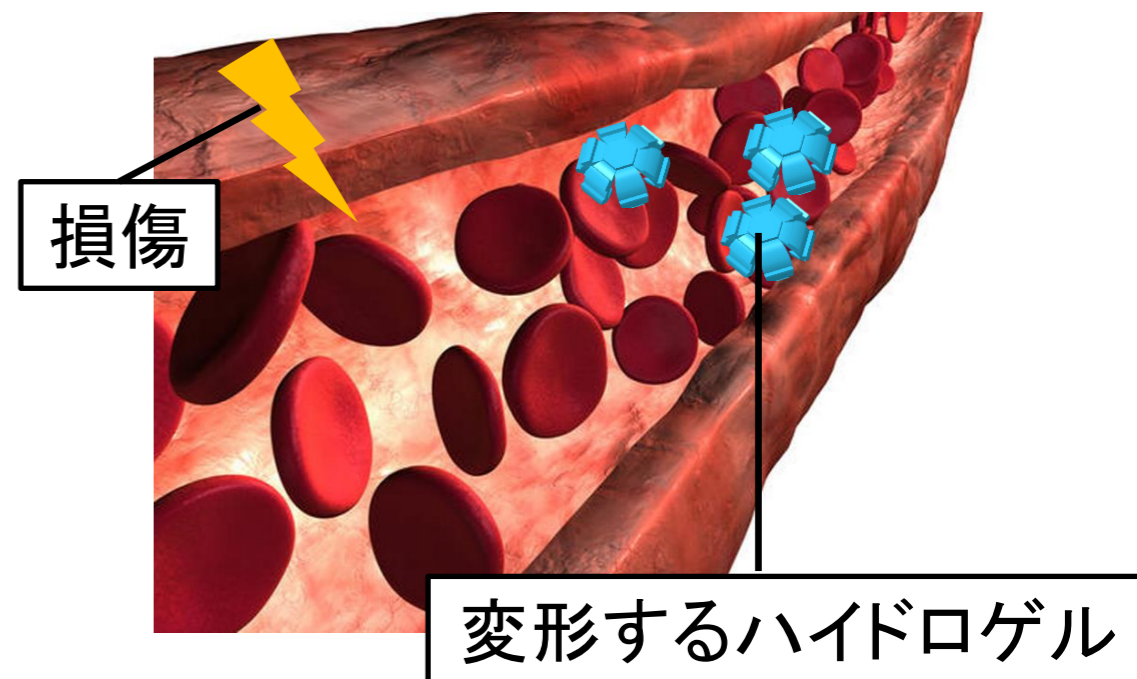
早稲田大学 次世代ロボット研究機構
客員次席研究員 長濱 峻介

2025年7月29日

本技術の目的

- 流路の内部に刺激に応じて変形するハイドロゲルを流す。
- 変形により機能を切り替えて、組織の修復や特定細胞への吸着等の介入を可能とする。
- できるだけシンプルな製法とすることで大量生産を可能とする。

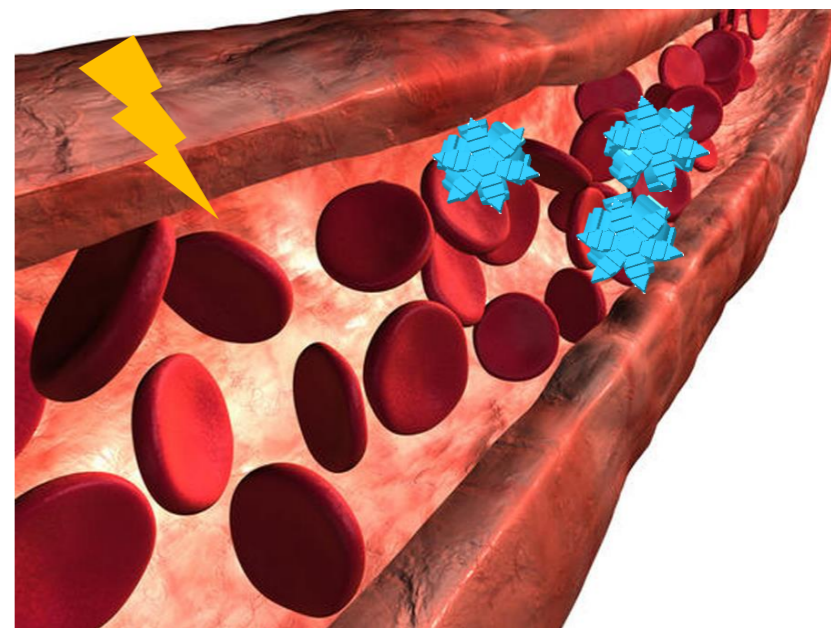
例えば血管内では・・・



本技術の目的

- 流路の内部に刺激に応じて変形するハイドロゲルを流す。
- 変形により機能を切り替えて、組織の修復や特定細胞への吸着等の介入を可能とする。
- できるだけシンプルな製法とすることで大量生産を可能とする。

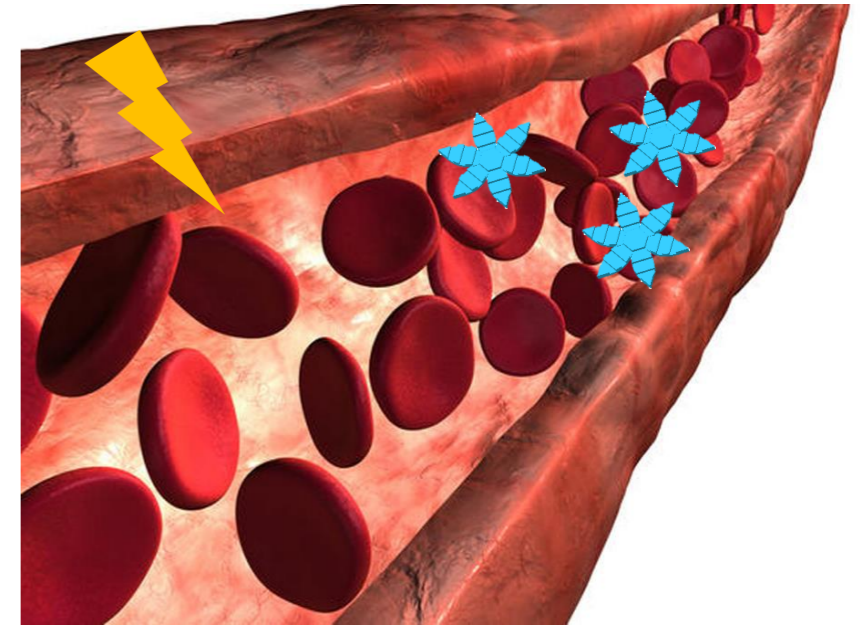
例えば血管内では・・・



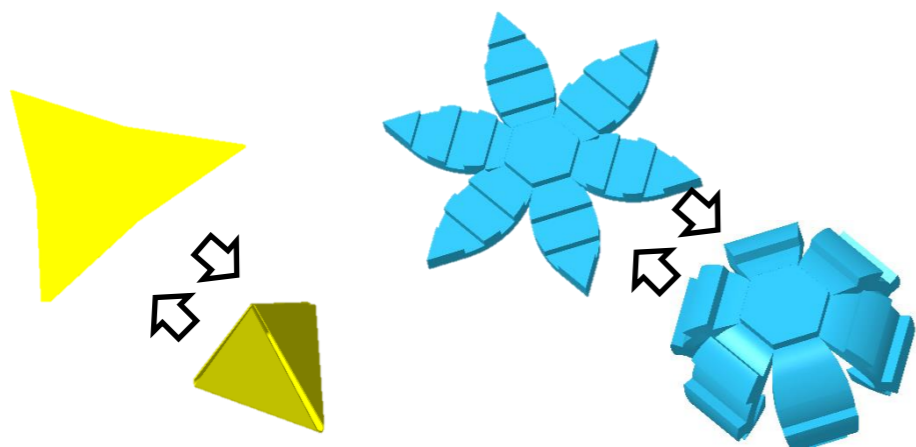
本技術の目的

- 流路の内部に刺激に応じて変形するハイドロゲルを流す。
- 変形により機能を切り替えて、組織の修復や特定細胞への吸着等の介入を可能とする。
- できるだけシンプルな製法とすることで大量生産を可能とする。

例えば血管内では・・・



変形の原理

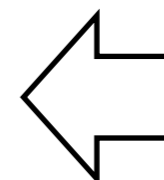
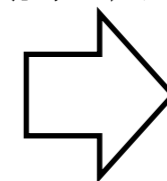


上下面の表面積の違いにより膨潤-収縮時に屈曲する
⇒膨潤-収縮時の差を大きくするために
温度応答性高分子を利用

マクロスケールにおける空気圧ロボット
と同じ原理



膨張



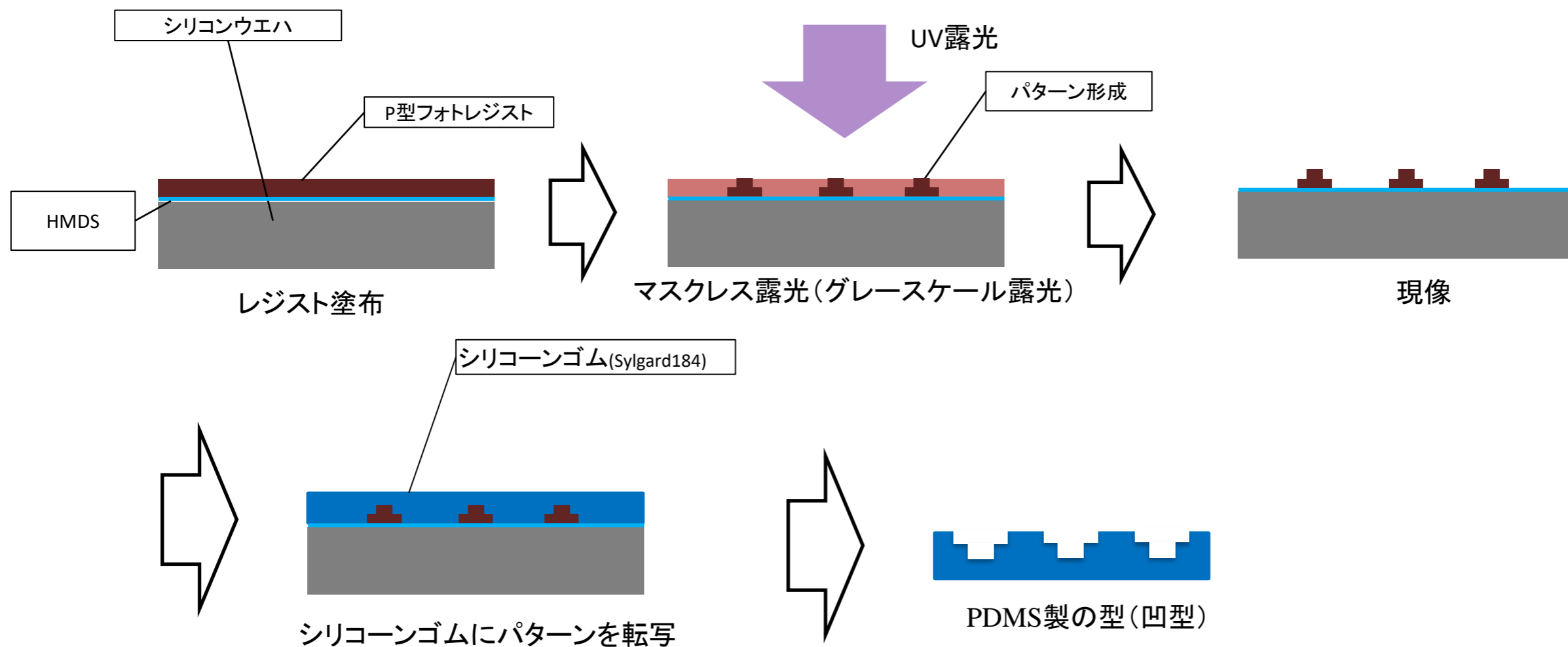
収縮



こちら側が大きく膨らむ

製法 ～型の製作～

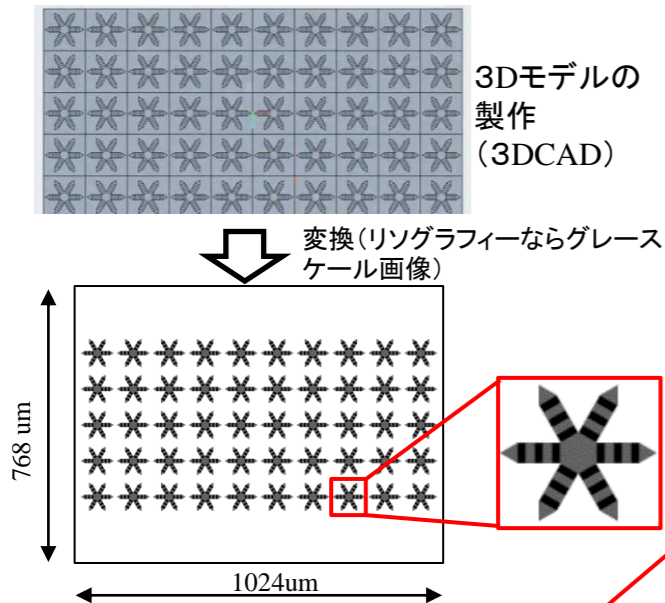
①ソフトリソグラフィで型を製作



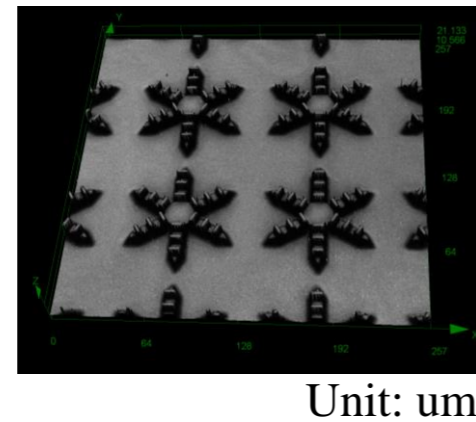
製法 ～型の製作～

①ソフトリソグラフィで型を製作

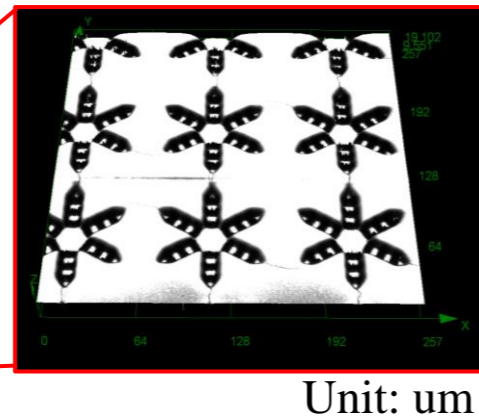
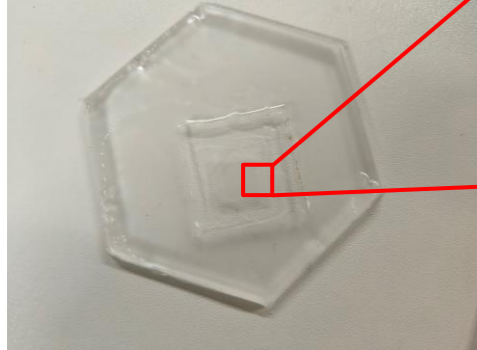
a) パターンのデータ製作



b) Si基板上で現像されたパターン



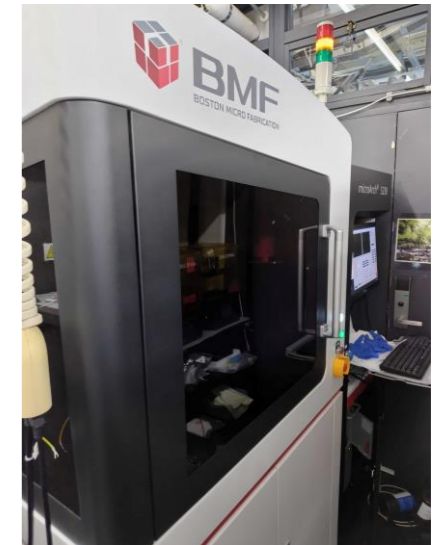
c) 転写後のPDMSのレーザー顕微鏡像



パターンの製作装置



マスクレス露光装置
(D-light DL-1000GS/KCH)



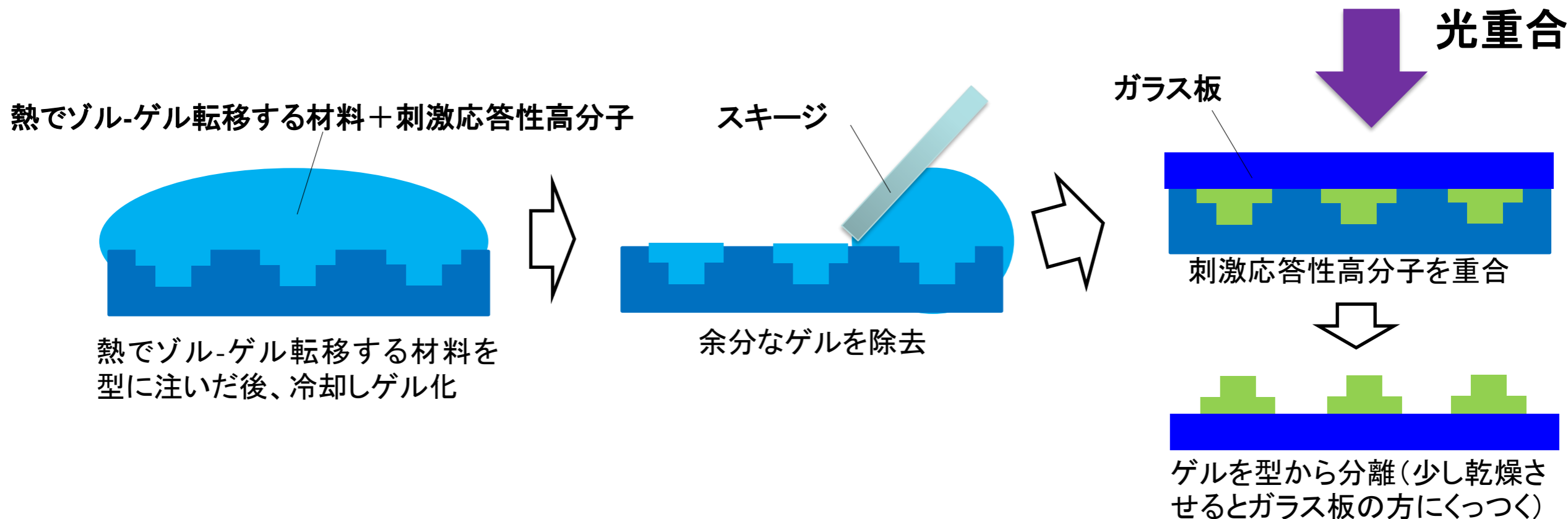
高解像度の3Dプリンタ
(microArch S230A)



PDMS製の型(凹型)

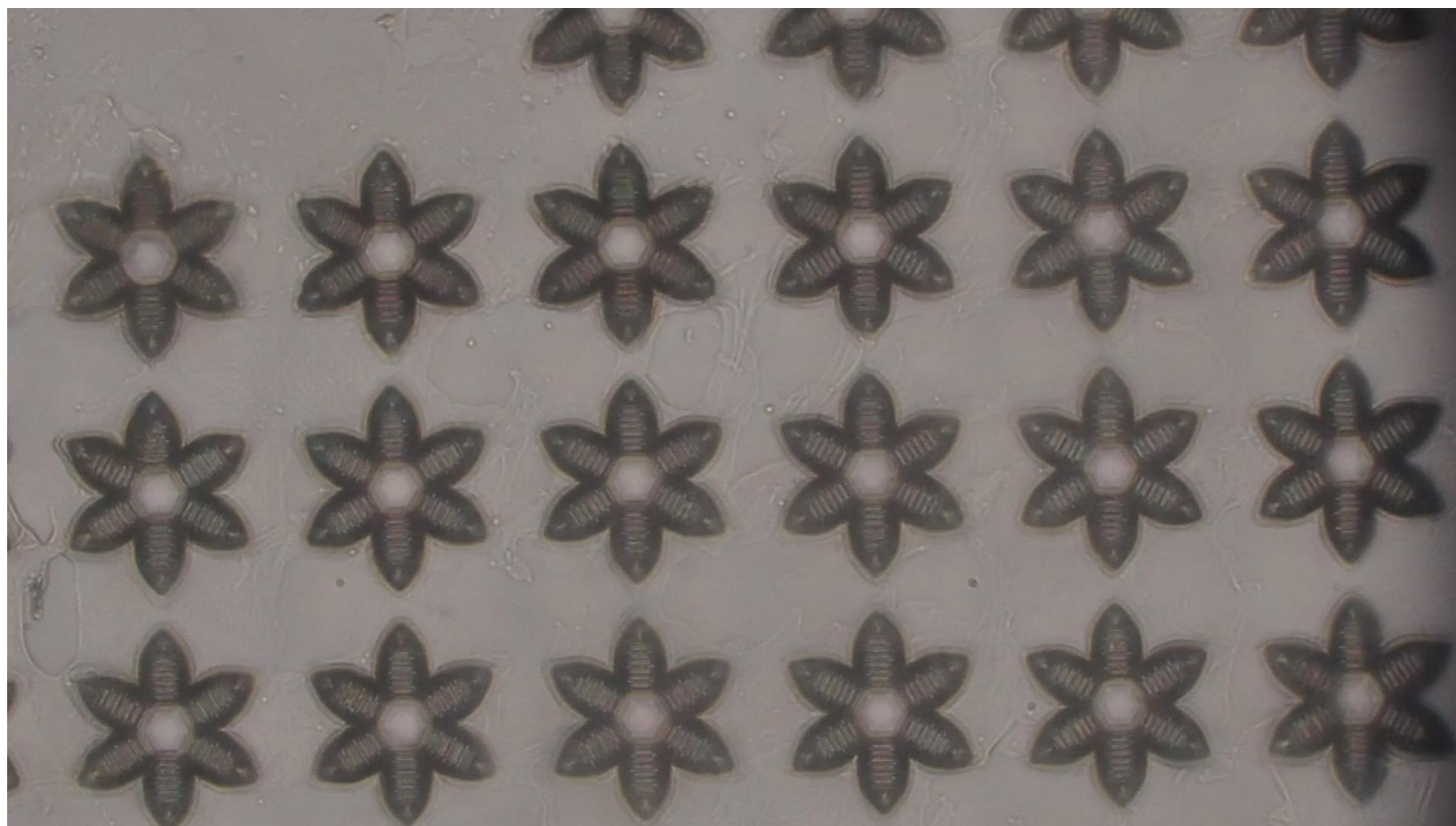
製法 ～ゲルの重合～

②ハイドロゲル溶液を型に注いだ後、ゲルを重合

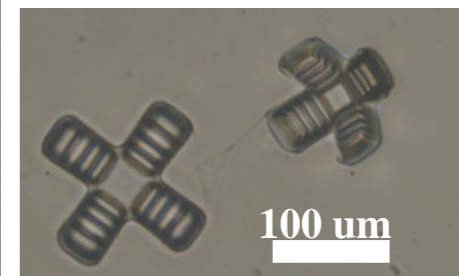
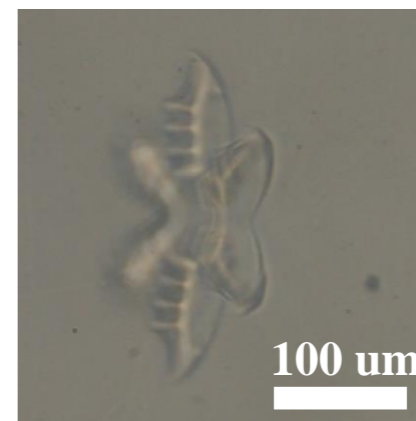


製法 ～剥離～

③ゲルを板から剥離する

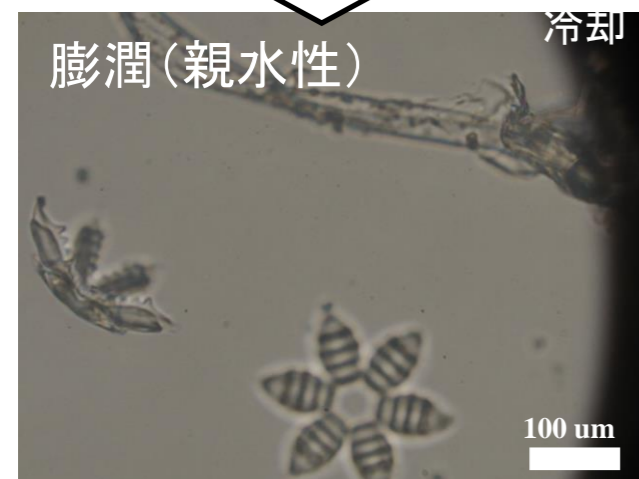
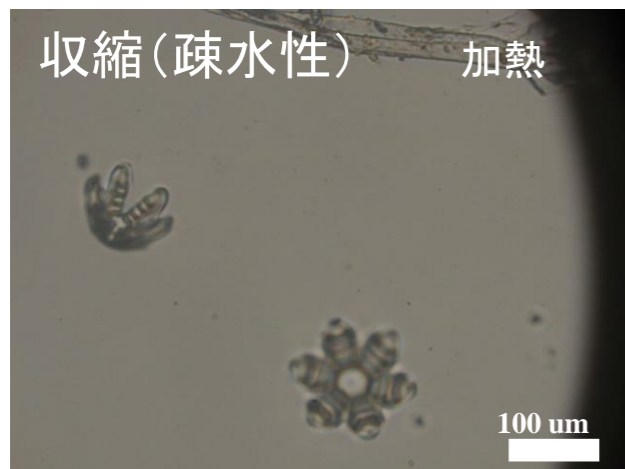


型の形状に応じて、色々な構造
が得られる

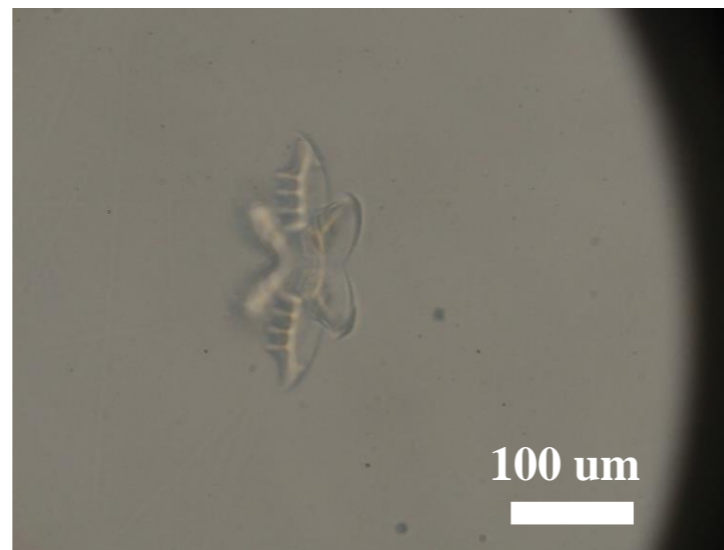


変形の様子

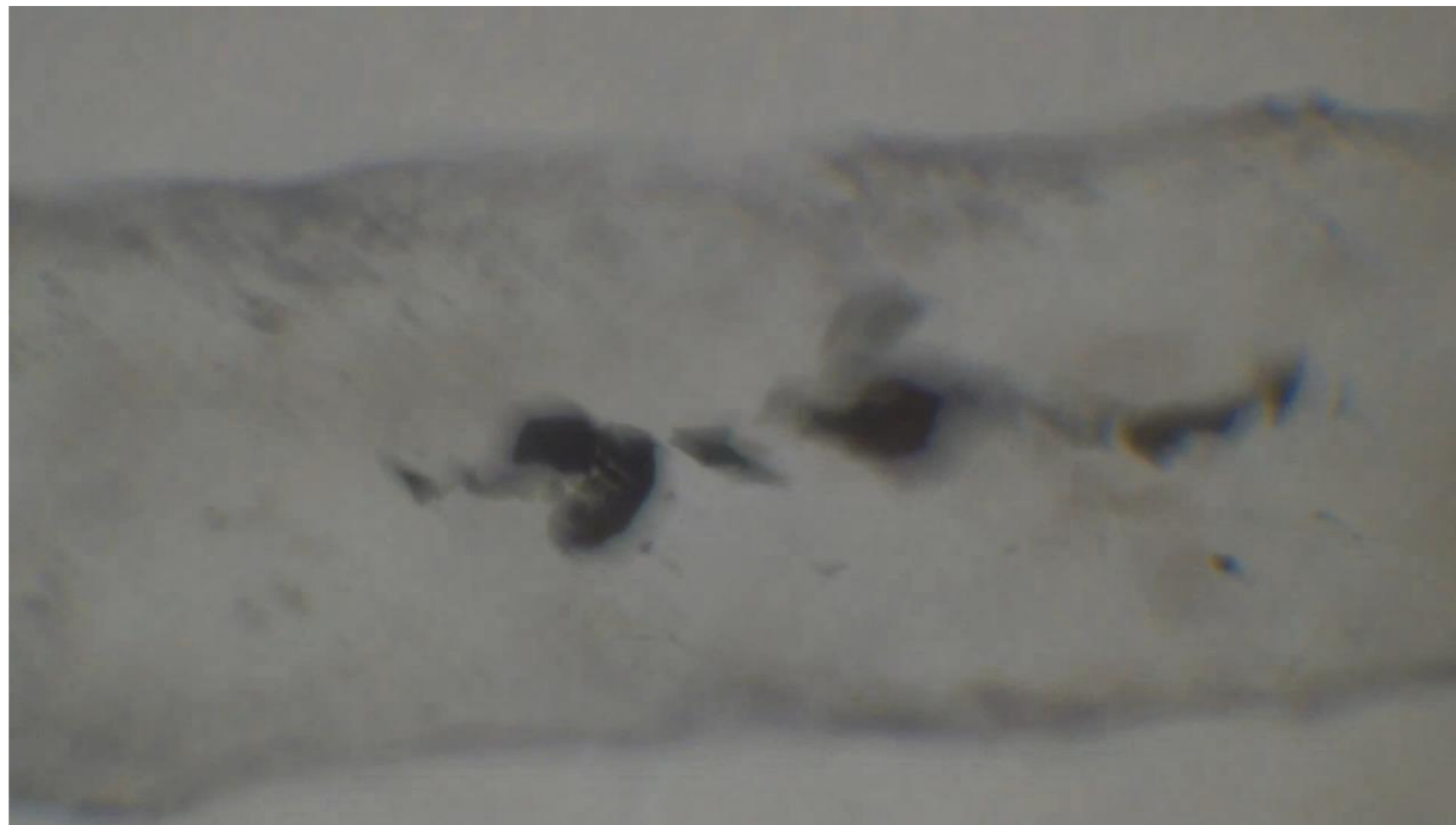
温度をかけると膨潤して変形する(今回の例では, LCST型のNIPAMを温度応答性として使用しているため, 37°C を境に疎水性と親水性が切り替わる.)



動画



流路内を流れる様子



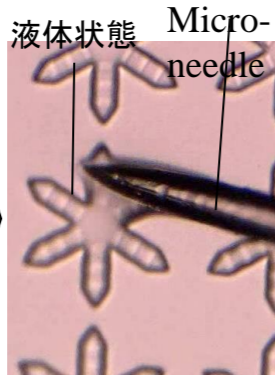
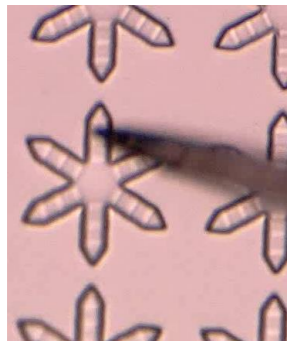
製法の特徴 ～ゲルの重合～

アガー(寒天)などの物理ゲルで形状を作った後に温度応答性高分子をラジカル重合
⇒PDMSに残存する酸素によるラジカル重合における酸素阻害を防ぐ

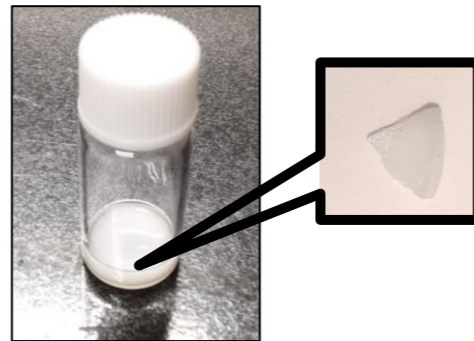
物理ゲルなしの場合

PDMS中の型の内部のゲルは重合されていなかった。一方で、同じ溶液に関わらず瓶の中のゲルは重合された。
⇒型のパターンが微小なので酸素阻害の影響を受けやすい。

a) 重合失敗



b) 重合成功



物理ゲルを用いた場合(本提案)

①物理ゲルの重合

熱でゾル-ゲル転移する材料(物理ゲル) + 刺激応答性高分子材料(化学ゲル)

残存酸素



物理ゲルを型に注いだ後、冷却しゲル化
⇒物理ゲルは酸素の影響を受けづらいため固化する

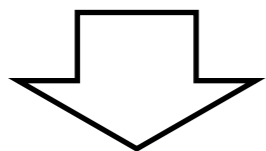
②化学ゲルの重合



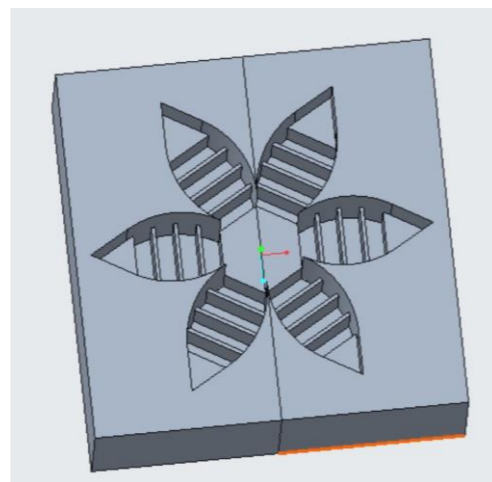
物理ゲル内で刺激応答性高分子をラジカル重合(光重合)
⇒物理ゲルが界面にある酸素の影響を低減する

製法の特徴 ～型の製法～

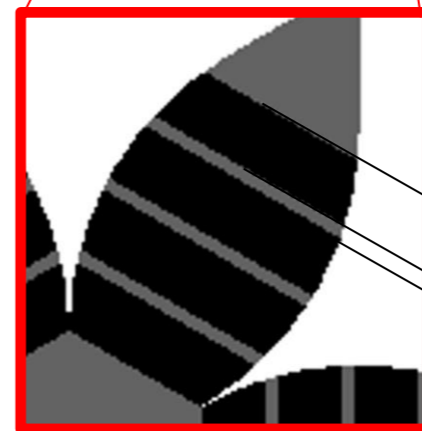
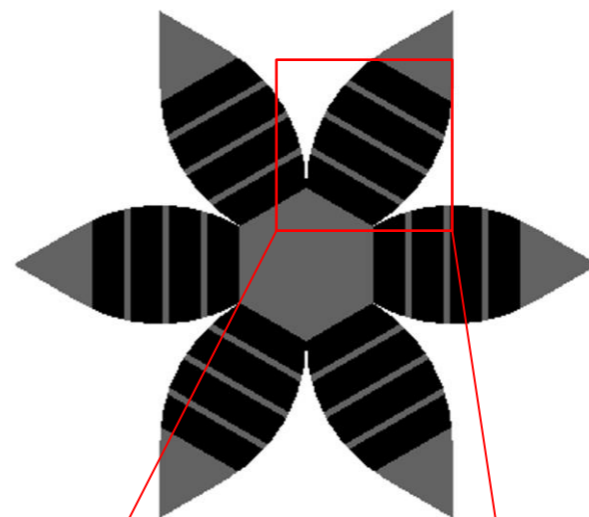
大面積かつ柔軟に設計するために、パターンの製作にはマスク露光装置や光造形3Dプリンタを用いている。



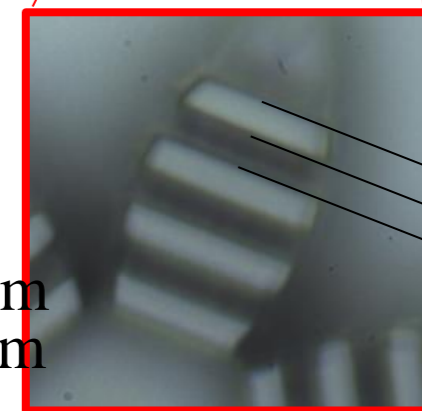
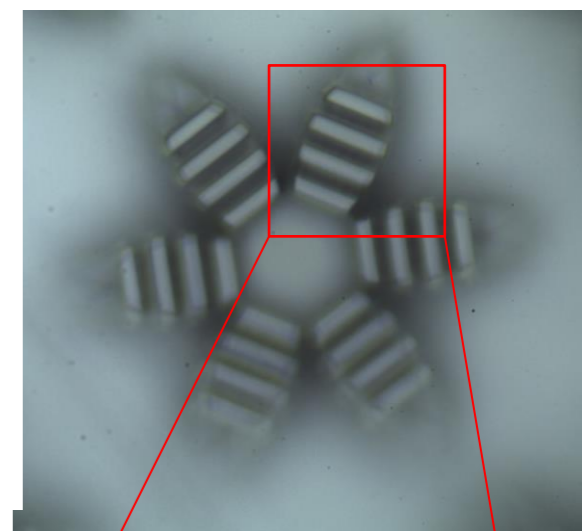
解像度が1 μm 程度が限界であり、光の広がりを考慮することで狙った寸法にしている。



3次元データ (stl
ファイル)



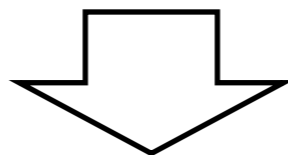
2次元データ (グレース
ケール画像)



現像したパ
ターン

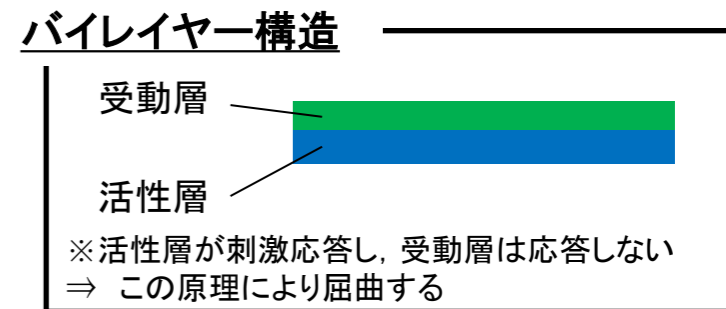
従来技術とその問題点

構造ではなく刺激に対する膨潤率が異なる2つの材料を用い、その膨潤量の差で変形させる技術が多い（バイレイヤー構造）





従来技術では、

- ・ 微小な構造を作る際に精密なアライメントが必要
 - ・ 多段階で製造することになるため工程が多い
- 等の製造上の煩雑性があり、大量生産が難しい。



新技術の特徴・従来技術との比較

	従来手法(バイレイヤー)	提案手法(単層膨潤差)
		
材料数	2 種以上	1 種のみ
アライメント	厚み・界面合わせ必須	不要
界面剥離	起こり得る	界面無し
加工難度	アライメント, フトリソ, 3D プリントなどを組み合わせるため工程が増える	1 種類の型で加工できるので, 工程が短縮できる
形状設計	基本は1軸湾曲. 高度化には勾配設計が必要	凹凸パターンや空洞配置で 多自由度の曲げ／捩じり／膨張 が可能
曲げモーメント	材料の弾性差で大きく取りやすい	膨潤差由来なので小さい場合がある

想定される用途

- 液体が流れる管が破損した際に修復する

特定箇所に吸着する機能を付与することで、破損した水道管や血管を塞ぐ。

- 特定の対象に吸着し干渉する

がん細胞などに吸着し特定の薬剤を供給することで治療を行う。

実用化に向けた課題

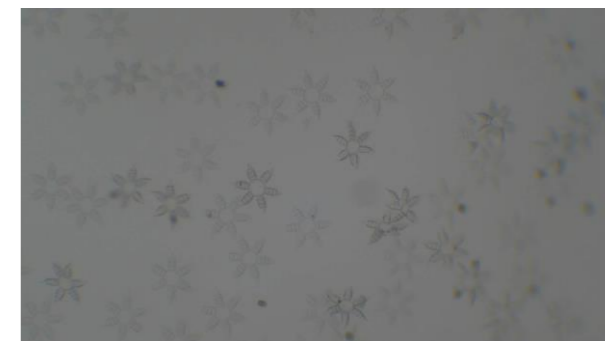
- 現在，刺激に応じて変形が可能なところまで開発済み．しかし，表面を修飾する技術が未解決である．
- 今後，表面修飾（例えば吸着機能の付与）を行い，管の破損した箇所を選択的に吸着する技術開発を行っていく．
- 実用化に向けて，製造の精度の安定や回収手法を確立させて歩留まりを改善する必要もある．

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	<ul style="list-style-type: none"> ・型の製作手法を確立し、型を用いた微細構造を有するハイドロゲルの成型を実現した 	
現在	<ul style="list-style-type: none"> ・温度刺激により変形することを実証 ・特定の材料に選択的に吸着する技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・ムーンショット目標の成果報告会にて破損した流路の修復を行う
5年後	<ul style="list-style-type: none"> ・酸素やpHなどの幅広い刺激に対して変形可能にし、吸着を制御する ・吸着可能な対象を増やす(現在は特定の材料のみに吸着できる). 	<ul style="list-style-type: none"> ・老朽化した水道管の修復を行う.
10年後	<ul style="list-style-type: none"> ・生体適合性を確認し、医療応用の可能性を模索する ・生体組織への選択的な吸着を実現する 	<ul style="list-style-type: none"> ・止血などの医療への応用可能性を検討する
20年後	<ul style="list-style-type: none"> ・狙った細胞に吸着する技術を開発する 	<ul style="list-style-type: none"> ・がん治療などに応用する

企業への期待

- 製造の歩留まりについては、型や基板の表面改質により克服できると考えている。また、材料次第ではすでに安定的に製造できている（右図はエラストマーを使用）。
- 細胞への接着技術の知見を持つ企業との共同研究を希望。
- また、ドラッグデリバリーシステムを開発中の企業、マイクロロボット分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。



型や基板を改質，材料の選定により安定的な製造が実現できる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は型により機能性ハイドロゲルを製作するため、微小なパターンを有する構造体を大量生産できる。
- リソグラフィ技術やmicroArch S230などの機材を保有しているため、迅速に試作が可能である。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 温度応答性ハイドロゲルの製造方法
及び温度応答性ハイドロゲル
- 出願番号 : 特願2025-028447
- 出願人 : 早稲田大学
- 発明者 : 長濱 峻介

お問い合わせ先

株式会社早稲田大学TLO

T E L 03-3207-8836

e-mail contact-tlo@list.waseda.jp