

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：34303

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21869

研究課題名（和文）人工循環系による人工物の安定化と不安定化に関する研究

研究課題名（英文）Research on the stabilisation and destabilisation of artefacts by artificial circulatory systems.

研究代表者

長濱 峻介（Nagahama, Shunsuke）

京都先端科学大学・ナガモリアクチュエータ研究所・助教

研究者番号：70754745

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、材料内に循環路を埋め込み、循環路からの物質供給により材料の安定化（乾燥の抑制など）と不安定化（材料の分解など）を実現することを目指したものである。研究期間中に、対象材料をハイドロゲルとして流路構造を埋め込むことで、乾燥を防ぐための水や、材料を分解するためのキレート剤を材料に供給する機構、および分解する材料を開発した。また、流路の内部で動的に変化することで、材料の機能を変化させるためのマイクロカプセルの製作を行った。ロボット等の自律的に働く機械システムにおける、活動時には材料を安定化させ活動を維持し、故障で停止した際には材料を不安定化させ構造を破壊し環境負荷の減させる機能に繋がる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大部分が水で構成されるハイドロゲル材料に循環路を通し、水や分解剤などの物質を材料に供給することで、材料単体では実現できない機能が達成できるようになる。例えば、従来は乾燥などで機能が失われ、ロボット等の機械に適用が困難であった材料を、安定的に運用できるようになり、適用可能とする。また、能動的に材料を分解する物質を供給することで材料の分解を促進し、人工物が壊れた際の環境中への残存による環境負荷を低減できる。これらの機能は、自律的な機械システム（ロボットなど）が様々な環境中で働くことになる将来、システムを安定的に活動させ、故障時には自然に還ることによる環境負荷の抑制に必須であると考えている。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to stabilize (e.g., inhibit drying) and destabilize (e.g., decompose) materials by embedding a circulation channel in the material and supplying substances from the circulation channel. During the research period, a mechanism was developed to supply water to prevent drying and chelating agents to decompose the material and to decompose the material by embedding the target material as a hydrogel in the channel structure. In addition, microcapsules were fabricated to change the function of the material by dynamically changing inside the channel. In autonomously working mechanical systems such as robots, the material is stabilized to maintain activity when active, and when it stops due to failure, the material is destabilized, and the structure is destroyed, leading to a reduction in environmental impact.

研究分野：ロボティクス

キーワード：人工循環器系 ハイドロゲル 分解 乾燥抑制 安定化と不安定化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、機能停止した機械が自己融解する仕組みの実現を目指す。機械や建物等の人工物は、長期間の使用を想定設計されるため、その機能を果たさなくなった際にも環境中に長期間存在することとなる。この「長期間存在」することは、人工物が機能している間は利益をもたらすが、機能しなくなった時には環境に負荷を与え環境破壊を招くなどの不利益が生じる可能性が存在する。本研究では、人工物が活動している間は安定的で、活動しなくなったら不安定化し分解するという仕組みを、人間の身体の仕組みを模倣して行う。

### 2. 研究の目的

人間は生きている間は、血液循環系が細胞の生存に必要な物質を供給しつづけるため、身体の構造が維持され続ける。一方で、人間が死を迎えた際には、血液循環系による物質供給が止まり細胞も死ぬ。そして、細胞の死と同時に分解酵素や微生物が作用して自己融解が始まり不安定化する。つまり、上記の物質供給のメカニズムを模倣できれば、人工物においても人間同様に安定と不安定を切り替える構造を実現できる。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究では(1)溶解する材料の開発、(2)流路から材料を供給する技術の開発、(3)分解と維持を動的に行うための動的に変形するカプセル機構の開発を行った。

### 4. 研究成果

溶解するハイドロゲル(不安定化に関わる材料)と乾燥耐性を有するハイドロゲル(安定化に関わる材料)の開発を行った。溶解するハイドロゲルに関しては、高湿度環境下で溶解する材料の力学特性や動的粘弾性の経時変化の評価を行った。環境試験機を用いて高湿度(95%r.h.)かつ常温の環境下に合成したゲルを静置した後、強度と動的粘弾性の測定を行い溶解前後で比較を行った。強度に関しては、破断強度の低下がみられた。また、動的粘弾性率の変化においては、貯蔵弾性率の低下がみられた。これらの結果から、本研究のハイドロゲル材料が溶解し液体的な性質に変化したことを定量的な差として確認できた。また、セルロースナノファイバー(CNF)を添加することで動的粘弾性の変化率を変更可能であることを確認した(図1)。一方で、CNFにより材料の弾性率が大きく向上したため CNF 添加により固体的な性質を保っていただけであり、変化量としては同程度であることを確認した。強度も CNF の添加により大きく向上したため、高湿度化で静置した後も CNF を添加していないサンプルと比較すると破断強度が大きくなった。さらに、本研究において合成したゲルがナイロンなどの高分子に強固に吸着することを確認した。また、乾燥耐性を有するハイドロゲルの開発に関しては、生物の乾燥耐性を模倣した構造をハイドロゲル材料に組み込むことで、体積や重量の変化の比率をコントロールすることが可能であることを確認した。

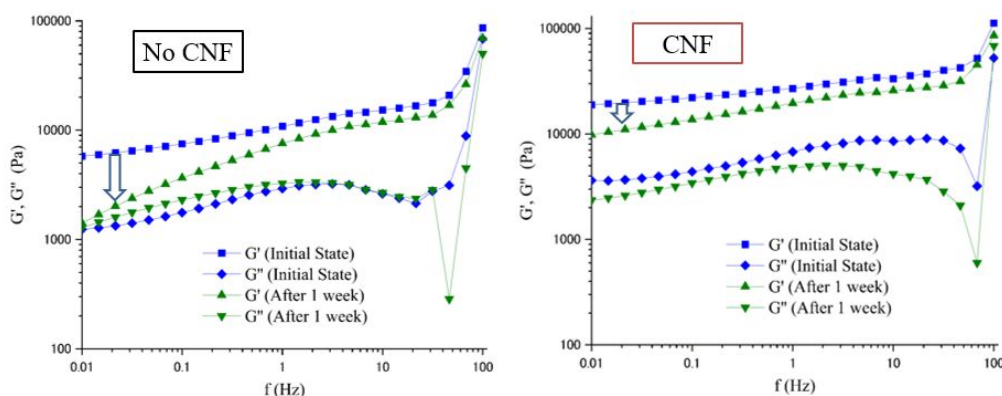


図1 溶解するハイドロゲルの動的粘弾性の経時変化；CNFの有無に応じて変化の度合い)が異なる

また、1MPa程度の強度を有するイオン架橋ハイドロゲル材料の内部に循環路を形成し、水分を供給することで構造の乾燥の抑制による構造維持(安定化)を図り、キレート剤を供給することで構造の分解(不安定化)を行った。イオン架橋ハイドロゲル材料に関しては、ゼラチンゲル

を足場としてアルギン酸ナトリウムゲルの重合を行うことで得た。キレート剤を含んだ溶液に浸漬することで、構造が破壊され分解することを確認した(図2)。また、3Dプリンタを用いて流路のパターンを有する型を製作し、その型を用いてハイドロゲルを重合した後、シアノアクリレートを用いてゲル同士を接合することで、流路を備えたハイドロゲルの制作を行った。そのハイドロゲルにポンプを接続し、水およびキレート剤(トリポリリン酸ナトリウム)の供給を行った(図3)。水やキレート剤がハイドロゲル内部を流れていることは確認できたが、物質の供給量の問題などで乾燥を完全に抑制することや構造を完全に分解することはできなかった。

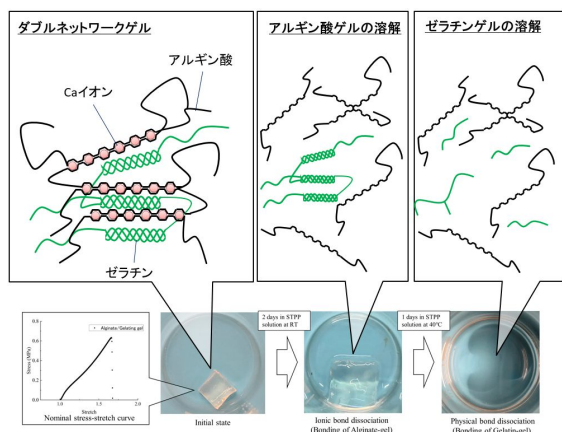


図2 キレート剤(STPP)によるハイドロゲルの分解

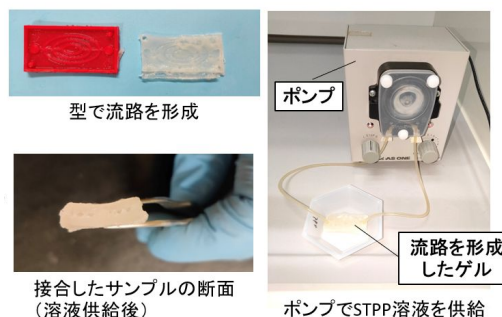


図3 循環路を有するハイドロゲル内に水とキレート剤(STPP)を流し構造を分解

また、任意の物質を供給するためのカプセルの製作手法の構築を主に行った。グレースケールリソグラフィーを用いて立体的なパターン(100um程度)を製作し、PDMSにパターンを転写することで型を得る(図4)。得られた型の内部で刺激応答性ハイドロゲルを重合することで、刺激に応じて変形する微小なハイドロゲル(カプセル)を得た。前年度までに型の製作手法は確立できていたが、刺激応答性高分子が型内で重合不良を起こしたため、カプセル構造を得ることができていなかった。本年度は、物理ゲルを最初に重合し、その内部で刺激応答性高分子を重合することで、重合不良の原因である酸素に刺激応答性高分子が触れないようにしたことで、ハイドロゲルを得ることができた。ハイドロゲルの変形を利用して吸着の制御等を行い、材料への物質供給時の作用を切り替える。物質供給による材料の分解に関しては、流路を導入した材料を用いることで分解自体は実現できたが、完全に分解するためには流路の構造や供給の仕方を考える必要があり、今後研究を進める必要がある。本研究期間中にハイドロゲルの3Dプリント技術などの技術を用いて任意形状の流路をハイドロゲル内に導入する技術は実現できたため、今後これらの技術を用いて、材料の安定化や分解のための材料への物質供給に適した流路構造を見出ししていく。

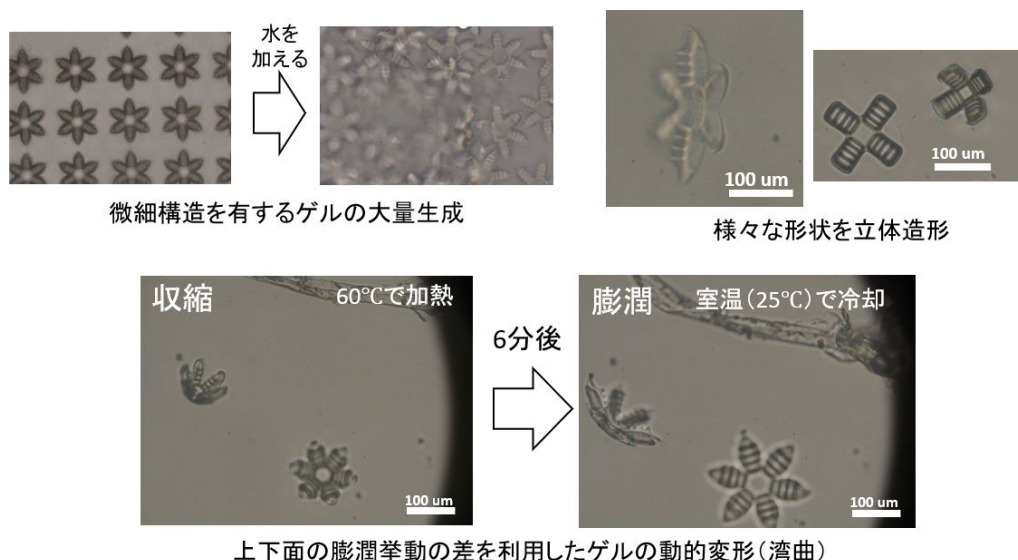


図4 循環路中で働くカプセルの製作；動的に変形することで吸着の制御等を行う

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長濱峻介
2. 発表標題 DLP式光造形により製作した足場を利用したアルギン酸カルシウムゲルの立体造形
3. 学会等名 第103回日本化学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長濱峻介
2. 発表標題 マスクレス露光技術による刺激応答性マイクロカプセルの製作
3. 学会等名 第71回高分子学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunsuke Nagahama
2. 発表標題 Towards a robot that takes advantage of the "softness" of soft materials
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kayo Migita, Shunsuke Nagahama, Shigeki Sugano
2. 発表標題 Proposal of the anti-drying method of hydrogel biomimetic the moisture retention function of living organisms
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 右田 かよ、長濱 峻介、菅野 重樹
2. 発表標題 乾燥耐性を有する生物の構造を模倣したハイドロゲルの乾燥特性の評価
3. 学会等名 第70回高分子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長濱 峻介
2. 発表標題 イオン架橋を有するダブルネットワークハイドロゲルへの物質供給による分解特性の評価
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会 (2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長濱峻介, 右田かよ, 菅野重樹
2. 発表標題 セルロースナノファイバーを添加した分解性ハイドロゲルの分解特性の評価
3. 学会等名 日本化学会 第101春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菅野 重樹  (Sugano Shigeki)  (00187634)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------