

革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構  
の解明

2019年度採択研究代表者

2021年度 年次報告書
-----------------

酒井崇匡

東京大学 大学院工学系研究科  
教授

ゲルのロバスト強靱化機構の解明と人工腱・靭帯の開発

## § 1. 研究成果の概要

本研究は、動的・静的結晶の制御による強靭化メカニズムを確立し、そのコンセプトのもと、ロバスト性と強靭性を両立する人工腱・靭帯を開発することを目的とする。研究達成のため、以下の研究テーマを設定した。

- ① 動的・静的結晶によるロバスト強靭化の学理解明
- ② 腱・靭帯におけるロバスト強靭性の理解
- ③ ロバスト強靭性ゲルによる人工腱・靭帯の開発と実証実験

酒井 G では、脆性ゲルとロバスト強靭性ゲルの詳細な比較を行った結果について、原著論文が Science Advances 誌に掲載された。脆性ゲルの拡散係数の温度依存性から、高分子ゲルの拡散係数にも負のエネルギー弾性が関与していることを示し、原著論文が Physical Review Letter 誌に掲載された。また、ゲルの浸透圧の普遍性について、原著論文が Physical Review Letter 誌に掲載された。強靭性ポリビニルアルコールゲルを試作し、動物モデルを用いて生体安全性を確認した。

眞弓 G では、環動ゲルが示すロバスト強靭性のメカニズムを明らかにし、原著論文が Science 誌に掲載された。また、動的結合性網目についての原著論文が、Advanced Materials 誌に掲載された。液浸状態での X 線散乱実験を実施し、伸長配向結晶の成長過程の観察に成功したほか、NMR による構造解析によりシクロデキストリンの凝集構造の観察にも成功した。

増淵 G では、スライドリングゲルをモデル化し、伸長時の結晶化を考慮した計算を実行し、結晶化を定性的に再現することに成功した。結晶化モデルの理論的な基盤を整備するため、高分子網目系における基礎的な物理の検討を行い、5 報の原著論文を出版した。

佐藤 G では、分岐ポリビニルアルコールの 10 g スケールの合成に成功した。ゲル化に用いる末端官能基について適切な保護を行うなど反応経路を設計することにより、末端官能基を維持した分岐ポリビニルアルコールの合成に成功した。

得られた結果をもとに、次年度以降の動的・静的結晶の学理解明、人工腱・靭帯の開発に役立てる。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 酒井グループ

- ① 研究代表者: 酒井 崇匡 (東京大学大学院工学系研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・動的・静的結晶による強靱化の学理解明
  - ・腱・靱帯の強靱化メカニズムのモデル化
  - ・人工腱・靱帯プロトタイプ of 破壊実験と実証実験

### (2) 眞弓グループ

- ① 主たる共同研究者: 眞弓 皓一 (東京大学物性研究所 准教授)
- ② 研究項目
  - ・モデルゲルの構造・ダイナミクスの解明
  - ・腱・靱帯の構造・ダイナミクスの解明
  - ・人工腱・靱帯プロトタイプ of 腱・靱帯の構造・ダイナミクスの解明

### (3) 増淵グループ

- ① 主たる共同研究者: 増淵 雄一 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・拡張した多体スリップスプリングモデルによる動的・静的結晶の再現
  - ・シミュレーション駆動の設計指針の提案

### (4) 佐藤グループ

- ① 主たる共同研究者: 佐藤 浩太郎 (東京工業大学物質理工学院応用化学系 教授)
- ② 研究項目
  - ・動的・静的結晶化を示すゲルの探索的合成
  - ・シミュレーション駆動の設計指針に基づく合理的な高分子合成

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) “Tri-branched gels: Rubbery materials with the lowest branching factor approach the ideal elastic limit”, Takeshi Fujiyabu, Naoyuki Sakumichi, Takuya Katashima, Chang Liu, Koichi Mayumi, Ung-il Chung, and Takamasa Sakai, *Science Advances* 8, eabk0010 (2022).
- 2) “Universal Equation of State Describes Osmotic Pressure throughout Gelation Process” Takashi Yasuda, Naoyuki Sakumichi, Ung-il Chung, Takamasa Sakai, *Physical Review Letters* 125, 267801 (2020).
- 3) “Temperature Dependence of Polymer Network Diffusion”, Takeshi Fujiyabu, Takamasa Sakai, Ryota Kudo, Yuki Yoshikawa, Takuya Katashima, Ung-il Chung, and Naoyuki Sakumichi,

Physical Review Letters 127, 237801 (2021)

- 4) “Tough hydrogels with rapid self-reinforcement”, Liu, Chang, Naoya Morimoto, Lan Jiang, Sohei Kawahara, Takako Noritomi, Hideaki Yokoyama, Koichi Mayumi, and Kohzo Ito, Science 372, 1078 (2021).
- 5) “Star-Polymer-DNA Gels Showing Highly Predictable and Tunable Mechanical Responses” Masashi Ohira, Takuya Katashima, Mitsuru Naito, Daisuke Aoki, Yusuke Yoshikawa, Hiroki Iwase, Shin-ichi Takata, Kanjiro Miyata, Ung-il Chung, Takamasa Sakai, Mitsuhiro Shibayama, and Xiang Li, Advanced Materials 34, 2108818 (2022).