

2024 年度年次報告書

原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能

2022 年度採択研究代表者

石田 康博

理化学研究所 創発物性科学研究センター

チームリーダー

エントロピー増大に逆らう革新材料「力学極性ゲル」による物質・エネルギー・生物の整流化

主たる共同研究者：

奥村 大（名古屋大学 大学院工学研究科 教授）

木戸秋 悟（九州大学 先導物質化学研究所 教授）

坂井 伸行（物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター 主幹研究員）

武石 明佳（神戸大学 大学院理学研究科 講師）

研究成果の概要

エントロピー増大に逆らう機能は、低秩序状態から高秩序状態を創り出す、時代や分野を超えた科学や社会の中心命題である。この重要な機能を具現化するには、外部刺激に対して方向特異的に応答する材料、すなわち極性の材料が必要である。電場・磁場・光などに対し極性を示す材料はこれまでに盛んに研究されている一方、機械的な力に対し極性を示す材料「力学極性ゲル」は、我々により初めて実現された。力学極性ゲルの学理を樹立するとともに、機能を実証することが本課題の骨子である。2024年度は下記の検討を行った。

(1)数理モデルの構築: マルチスケール解析と均質化に基づく力学極性ゲルの機構解明を推進した。昨年度に構築したユニットセルモデルについて、ナノシートとゲル組織の剛性比・ナノシートの層構造の面間距離・ナノシートの横幅、といったパラメータを系統的に変えた有限要素解析を行い、より優れた物性を示す力学極性ゲルを設計するための指針を得た。

(2)力学物性の制御と向上: 昨年度、ナノシートの横幅が大きいほどゲルの力学極性が高まることを明らかとした。そこで今年度、層状結晶の合成法を粉体法からペレット法に切り替える、あるいは層状結晶から単層ナノシートへの剥離に用いる水酸化アンモニウムや溶媒を最適化することにより、大サイズのナノシートを得る手法を開発した。

(3)エネルギー抽出・物体輸送への応用: 昨年度、力学極性ゲルに振動を加えた際、物体が一方向に直進運動されることを明らかとした。そこで今年度、ナノシートを風車状に配置させた円盤型のゲルを開発し、物体の一方向性の回転運動を実現した。また、風車状の構造体を簡便に得るべく、キラルな棒状ウィルスを経路中に集合させる方法を確立した。

(4)細胞の操作への応用: プロトタイプゲルの力学極性は、ナノシートの方向特異的な座屈により発現するが、細胞接着斑の微弱な力ではナノシートを座屈できない可能性が高い。そこで、より小さな力にて力学極性を示すゲルとして、軟ゲル組織中に硬ゲル領域を斜め方向に導入した、第二世代の力学極性ゲルを開発し、その表面平滑性・細胞接着性を確認した。

(5)微小動物の行動制御への応用: 昨年度、線虫の一種(C.エレガンス成虫)が力学極性ゲル表面にて一方向に走行することを見出した。そこで今年度、ショウジョウバエ幼虫・C.イノビナータ成虫・C.エレガンス幼虫の本ゲル表面における挙動を調べ、この現象の一般性と限界を確認した。また、線虫の一方向走行の分子基盤を解明するための要素技術を確立した。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Song, Y. Sakai, N. Ebina, Y. Iyi, N. Ma, R. Ishida, Y. Sasaki, T.* “Systematic Study on Swelling/Delamination of Layered Metal Oxides with Quaternary Ammonium Ions: Production of Well-Shaped/Oversized Unilamellar Nanosheets”, *Small Methods*, 2401055, (2023).
- 2) Wang, S. Kang, L. Salamon, P. Wang, X. Uchida, N. Araoka, F. Aida, T. Dogic, Z. Ishida, Y.* “Stimuli-Responsive Self-Regulating Assembly of Chiral Colloids for Robust Size and Shape Control”, *Nature Communications*, **15**, 9891, (2024).