

名古屋大学工学研究科 エネルギー理工学専攻  
エネルギー材料工学講座

## エネルギーソフトマテリアル科学研究グループ

鳴瀧彩絵(教授)、高橋倫太郎(助教)、ISLAM Md Zahidul(特任助教)  
博士後期課程 1 名、博士前期課程 7 名、学部 4 名 (2023 年度の実績)

---

### 研究分野と研究方針

#### 【概要】

ソフトマテリアルとは、有機高分子、分子集合体、ゲル、コロイドなど、やわらかい物質の総称である。たとえば有機高分子は、軽量で加工しやすいという特徴に加え、物理化学的特性・電気的特性などを分子構造で任意に制御できるため、我々の身の回りで広く使われている。また、タンパク質のような分子集合体は、水素結合や疎水性相互作用のような比較的弱い力、あるいはイオン結合のように環境の変化でくっつきたり切れたりする動的な結合により、水中で自発的に立体構造をとり、分子機械とよばれるような精密な機能を生み出す。ソフトマテリアルが、周囲の環境を感じとり、自発的に秩序化する現象は、自己組織化(混沌とした状態から自発的に秩序が現れる現象)の一種といえる。

当研究グループでは、上記のようなソフトマテリアルの特徴に注目し、「ソフトマテリアル自己組織化を理解し、省エネルギープロセスで社会の役に立つ材料をつくる」「環境中の微小エネルギーから電力を得る」研究等に取り組んでいる。環境・エネルギー・医療分野での課題解決を目指し、未来社会を見据えた最先端の研究に挑戦したいと考えている。

#### 【キーワード】

ソフトマテリアル、自己組織化、省エネルギー、環境発電、医用材料、高分子、タンパク質、ゲル、コロイド、ナノファイバー、ナノ粒子、イオン液体、レオロジー、小角 X 線散乱

#### 【主な研究と内容】

##### (A) 自己組織化によるナノ材料の省エネルギー合成

無機ナノ粒子の配列体は従来の原理を超えた機能を発現することが理論的に予測されており、それらを省エネルギーで生産するプロセスの開発が求められている。我々は、単独では異方性を持たない無機ナノ粒子を、水中で 1 次元のチェーン状、2 次元のリング状、あるいは 3 次元のベシクル状へと自在に自己組織化させる技術を確認している。ここでは両親媒性高分子と無機ナノ粒子の相互作用が重要な役割を果たしており、この現象のメカニズム解明と材料応用に関する研究を進めている。さらに、この多様な形態の無機ナノ粒子の自己組織化体は、樹脂やエラストマーなどにフィラーとして添加することによってその力学物性を大きく向上させると考えられる。このような応用の可能性についても探索している。

##### (B) 自己組織化タンパク質ナノファイバーのエネルギー・医用材料応用

我々は、生体組織に伸縮性を与えるタンパク質「エラスチン」に着想を得た人工タンパク質を開発しており、これを用いて再生医療のための細胞足場材料や小口径人工血管を構築する研究を進めている。さらに、このタンパク質が水中で良質なナノファイバーを形成できることに注目し、ファイバーに電子やイオンを輸送する機能を持たせることで、フレキシブルな導電性材料や、生体と機械をつなぐインターフェースへと発展させる研究を展開している。また、このタンパク質ゲルはひずみ硬化等の非線形粘弾性挙動を示すことが明らかになってきており、その機構の解明や細胞との力学的カップリング等に関する研究にも着手した。

#### (C) ウェアラブル・インプラントブル環境発電デバイスの構築

力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する環境発電デバイスである「摩擦帯電型ナノ発電機 (Triboelectric Nanogenerator; TENG)」の構築に取り組んでいる。発電原理に誘電体同士の接触による摩擦帯電を利用する TENG では、誘電体に有機高分子を利用できるため、軽量性・柔軟性・設計性に優れたデバイスの構築が期待できる。我々は特に、誘電層に生分解性高分子を利用することで、ウェアラブル・インプラントブルなデバイスへ発展させることを目指している。これまでの検討により、誘電層となる高分子膜をエレクトロスピンニング法で作製すると、高分子の種類によっては残留電荷が生じることを見出した。この機構の解明と、残留電荷を長期間保持する方法の提案を併せて進めている。

#### (D) イオン液体中における種々の高分子の自己組織化

複数の異なるモノマーからなる高分子(共重合体)は溶液中で様々な形態の自己集合体を形成する。我々はイオン液体を溶媒に用いて、この自己集合現象を調べている。イオン液体は蒸気圧が極めて低いため、液体のまま透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察を行うことができる。液相 TEM 観察以外にも、小角 X 線散乱 (SAXS) 測定、小角中性子散乱 (SANS) 測定やレオロジー測定を駆使して、イオン液体中における種々の高分子集合体の構造とダイナミクスを明らかにすることを目的としている。また、省プロセスでイオンゲルを作製する方法の開発および電子デバイスへの応用に適した高分子/イオン液体の系を探索にも取り組んでいる。

## 2023 年度の研究・教育の概要

### 【ナノ粒子自己組織化の機構解明と応用】

我々は、粒径 10~20 nm 程度のナノ粒子(シリカ、金など)が、両親媒性のブロック共重合体の存在下、液相でチェーン状、リング状、ベシクル状等に自己集合する珍しい現象を見出している。2023 年度は、シリカ粒子が形成するチェーン状の構造体が形成する過程を小角 X 線散乱 (SAXS) 法を用いて観察した。その結果、まるでモノマーが重合して高分子になるようなメカニズムで、シリカナノ粒子が連なってゆきチェーン状の構造になることを明らかにした。また、リンショーピン大学の Dr. Emma Björk との共同研究として、細孔構造をもつシリカ(メソポーラスシリカ)の形成メカニズムやそれを用いた高分子ナノコンポジットの作製について研究を進めている。

### 【自己組織化タンパク質ナノファイバーのエネルギー・医用材料応用】

我々が開発したエラスチン類似タンパク質は、37℃の水中で自己集合してナノファイバーを形成する。2023年度は、プロトン共役電子移動を発現し導電性を持つ組換えエラスチンの作製を目指し、従来のエラスチン類似タンパク質のフェニルアラニン残基をチロシン残基に配列変換した新規誘導体を作製した。円二色性スペクトル測定と透過型電子顕微鏡観察により、この誘導体がナノファイバー形成能を保持していることを確認できたともに、従来の誘導体よりも導電性が向上したことを見出した。また、タンパク質ゲルを用いた細胞培養基材の開発においては、ゲル内部で筋芽細胞の培養と分化誘導が可能であることを実証した。さらに、エラスチン類似タンパク質を遺伝子工学によらず化学合成で得る研究を名大 ITbM の大石俊輔先生との共同研究で実施し、ナノファイバー形成能をもつ短鎖の合成エラスチンを得ることに成功した。データ駆動型アプローチによる配列最適化にも取り組んでいる。

#### 【エレクトロスピニング法による高分子エレクトレットの構築】

高分子エレクトレットは振動発電や摩擦帯電発電等、環境のエネルギーから電力を得るエネルギーハーベスティングデバイスの素子として注目されている。2023年度は、コロナ放電によるエレクトレット作製に実績のあるフッ素樹脂 Cytop に対して、エレクトロスピニング法により不織布を作製するとともに残留電荷を長期保持するエレクトレットの作製を試みた。エレクトロスピニングのパラメータ制御と保持温度の最適化により Cytop エレクトレット不織布の作製に成功し、摩擦帯電型ナノ発電機として駆動できることを実証した。また、ポリフッ化ビニリデンを誘電層とする摩擦帯電型ナノ発電機において、誘電層に原子層堆積法を用いてアルミナやチタニアを成膜することで表面電荷を制御し、出力を向上できる可能性を得た。

#### 【イオン液体を媒質とするゲルの基礎物性】

液体の塩(イオン液体)をとネットワーク状高分子からなるゲルは、柔軟性と電気伝導性質を併せ持つことから、エレクトロニクス分野において様々な応用が期待されている。しかしながら、その作製プロセスの煩雑さを改善することや、粘弾性・電気伝導性などの物性を制御することは、チャレンジングな研究課題である。当研究室では、(1)フッ化ビニリデン系高分子とイオン液体の間に働くイオン-双極子相互作用を利用して高分子を架橋し、ゲルを作製する研究、(2)モノマーをイオン液体に溶解させ、イオン液体中で重合を行い、ゲルを作製することで省プロセス化する研究を行っている。2023年度は、(1)の系では、2022年度に発見したゲル化する際に臨界現象が観測されることについて、詳細な実験を行い、同時に理論的考察を深めた。また、モノマー組成を制御することにより、強靱なゲルが得られることを見出した。(2)の系では、星形高分子を用いることによって、より力学物性に優れたゲルが得られることを発見した。また、種々の条件でボトムアップ的に実験を積み重ねることにより、高分子1次構造と、それが集合して形成される2次構造の関係性についての知見を深めた。

#### 【本年度の研究成果発表の概要】

|    | 国内会議発表 | 国際会議発表 | 国際会議予稿 | 学術論文 |
|----|--------|--------|--------|------|
| 教員 | 13     | 0      | 0      | 13   |
| 学生 | 31     | 0      | 0      | 5    |

## 本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

### 【卒業論文】

- ・シリカナノチェーンをフィラーとする高分子ナノコンポジットの創製
- ・重合誘起自己組織化で作製した固体高分子電解質のマイクロ相分離構造および粘弾性の解明
- ・エレクトロスピンニング法による高分子エレクトレット不織布の作製
- ・人工タンパク質ハイドロゲルの粘弾性特性の解明

### 【修士論文】

- ・イオン双極子相互作用を利用した電気伝導性ゲルの構造と物性
- ・階層構造を有する多孔体の作製と水浄化への応用
- ・人工タンパク質ナノファイバーのアミノ酸配列変換が導電性に与える効果
- ・摩擦帯電型ナノ発電機誘電層への原子層堆積による性能向上

## その他・特記事項

### 【受賞および大型研究費への採択】

- ・高分子学会 2023 年度高分子研究奨励賞 高橋倫太郎「時間分解小角 X 線散乱法による種々の高分子集合体の形成メカニズムの解明」
- ・日本ゴム協会第 15 回ブリヂストンソフトマテリアルフロンティア賞奨励賞 高橋倫太郎「重合誘起自己組織化によるゲル化過程の解明と材料開発」
- ・2023 年繊維学会秋季研究発表会優秀ポスター賞 鈴木恵太「フッ素樹脂のエレクトロスピンニングによるエレクトレット不織布の作製」2023 年 11 月 27 日
- ・東海高分子研究会学生研究奨励賞 堀雄一「エラスチン類似タンパク質ナノファイバーの導電性向上に向けた配列設計」、2023 年 9 月 8 日
- ・科研費学術変革領域(A) 細胞外情報を統御するマルチモーダル ECM 研究計画に採択(鳴瀧)

### 【アウトリーチ活動】

- ・名古屋大学 NExT プログラム(社会人向けセミナー)で講演 鳴瀧彩絵(2023 年 6 月)
- ・でんきの科学館オープンスクールで研究室展示(2023 年 7 月)
- ・放課後槍高トークで講演 愛知県立一宮高等学校 鳴瀧彩絵(2023 年 7 月)
- ・テクノサイエンスセミナー「発電する布をつくってみよう」(2023 年 8 月)

### 【学生の課外活動】

河崎憲祐君が全日本大学駅伝に名古屋大学チームの主将として出場し、2 区を快走(2023 年 11 月)