

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)  
博士前期課程4名、学部3名(2021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。

##### (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。

#### (C) ウェアラブル・インプラント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・インプラントなデバイスへ発展させることを目指している。

#### (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。さらに、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している。

## 2021 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。2021 年度は、特に、シリカ粒子が形成するベシクル状の構造体の形成に関して、小角 X 線散乱 (SAXS) 法を用いて液相自己組織化プロセスの理解を深めた。さらに、ベシクルを高分子スポンジに固定化することで、オンゲストルームスケールからミリメートルスケールまでの 4 段階の階層構造を有する多孔体を作製し、水浄化材料として利用する応用研究を進めた。本研究は、リンショーピン大学の Dr. Emma Björk との共同研究として実施し、多孔体が無機イオン吸着能を有することを明らかにした。

### 【プロトン共役電子移動機構を持つタンパク質ナノファイバーの創製】

我々が開発したエラスチン類似タンパク質は、37°C の水中で自己集合してナノファイバーを形成する。2021 年度は、エラスチン類似タンパク質の配列を遺伝子工学の手法を用いて改変し、ファイバー形成能を保持したまま、プロトン共役電子移動機構を付与することを試みた。大腸菌を宿主として、この新規タンパク質を発現させることに成功し、タンパク質がファイバー形成能を保持していることを明らかにした。

### 【生分解性高分子を誘電層とする摩擦帯電型ナノ発電機の構築】

ポリ-L-乳酸 (poly L-lactic acid; PLLA) は生分解性と生体適合性を持つため、皮膚装着型や体内埋め込み型の TENG の誘電層として発展性を持つ。さらに、PLLA は成膜方法に依存して圧電性を持つため、摩擦帯電効果と圧電効果の重ね合わせによる高い出力が期待される。本研究では、エレクトロスピンニング

法によって PLLA 膜を作製し、poly(methyl methacrylate) (PMMA) を対誘電層として TENG を構築し、出力評価を行った。TENG 出力が摩擦帯電効果と圧電効果の重ね合わせとなることを確認した。さらに、TENG 出力にはエレクトロスピンニング時の残留電荷が関与していることを明らかにし、残留電荷の制御にも成功した。また、PLLA が圧電性を発現する理由について、これまで分子レベルでの機構解明がなされていなかったため、エレクトロスピンニング法により成膜した PLLA 膜における官能基の配向角を、赤外分光／多角入射分解分光法 (FTIR/MAIRS 法) を用いて測定した。その結果、配向角と出力電圧の間に相関がある可能性を見出した。本研究は、エネルギー理工学専攻尾上研究室との共同研究として実施した。

#### 【イオン-双極子相互作用によって形成される高分子ゲル電解質の基礎物性】

フッ化ビニリデンとヘキサフルオロプロピレンから成る高分子 (PVDF-HFP) は大きな双極子を持つ。このため、単に PVDF-HFP をイオン液体に溶かすだけで、イオン-双極子相互作用によって高分子が架橋されネットワーク構造が形成されてゲル化する。このように簡単に電気伝導性ゲルを作製することができる。さらに、溶媒(イオン液体)が架橋剤として働くという特徴は、高分子溶液学の観点からも興味深い。本研究では、このネットワーク構造を SAXS 及び広角 X 線散乱 (WAXS)、赤外分光法によって調べ、さらに粘弾性を回転型レオメーターによって調べた。その結果、ネットワーク構造が高分子濃度に応じて相似的に変化すること、またそのネットワーク構造によって粘弾性が、これまでに報告例がないほど強く高分子濃度に依存することを明らかにした。すなわち、PVDF-HFP がイオン液体に対する優れた増粘剤であると言える。

#### 【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	12	4	4	9
学生	8	0	0	0

## 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】

- ・イオン-双極子相互作用により形成される高分子ゲル電解質の構造とダイナミクス
- ・水浄化材料への応用に向けた階層構造を有する多孔体の作製
- ・生体適合性を有する導電性ナノファイバーの創製に向けたタンパク質のアミノ酸配列設計と合成
- ・ポリ乳酸のエレクトロスピンニング膜の構造と圧電性に成膜時の印加電圧が与える効果

## その他・特記事項

- ・2021 新化学技術研究奨励賞ステップアップ賞(公益社団法人新化学技術推進協会)、鳴瀧彩絵、受賞対象「チクソトロピックゲルによる細胞三次元培養基材の開発と創傷治療への応用」、2021 年 6 月 10 日
- ・報道(NHK おはよう東海)、鳴瀧彩絵、番組タイトル「女性研究者を増やせ！名古屋大学では」、2021 年 6 月 22 日。