

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)
学部3名(2020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次元のベンケル状へと自在に自己組織化させる技術を確立している。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。

(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。

2020 年度の研究・教育の概要

【ナノ粒子自己組織化の機構解明】

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、液相でリング状に自己集合する珍しい現象を見出している。しかしながら、自己組織化現象に特有の構造多分散性が問題となっていた。つまり、リングを構成する粒子の員数は 3~6 個とばらつきがあり、また、リング状集合体以外にも、チェーン状の構造や、無秩序な凝集体などが一定割合存在していた。ただし、この知見は主に走査型電子顕微鏡による観察で得られたものであり、試料調製時の乾燥過程の影響を受けている可能性があった。

そこで 2020 年度は、SAXS 測定により、リング状集合体の構造解析を *in situ* で(液相のまま)実施した。粒径 15 nm のシリカナノ粒子と poly[(propylene oxide)-*block*-(ethylene oxide)] を含む分散液を 45°C に加熱したところ、 $q = 0.2 \text{ nm}^{-1}$ 付近に振動を有する特徴的な SAXS プロファイルが得られた。半径が 7.7 nm の球が正五角形の頂点に位置し、隣り合う球同士の間には 1 nm の隙間があるモデルがこの実験結果をよく再現した。すなわち、液相中では構造単分散性にすぐれたリング状自己集合構造が形成されていることを初めて示すことができた。

【タンパク質ナノファイバー分散液の導電率測定】

我々が開発したエラスチン類似ポリペプチドは、37°C の水中で自己集合してナノファイバーを形成する。このナノファイバー分散液の導電率を調べたところ、等しい pH を有する酢酸水溶液よりも高い値であった。さらに、タンパク質ナノファイバー分散液へ超音波を照射すると、タンパク質二次構造が秩序化するとともに、動的粘弾性測定による貯蔵弾性率 G' の値が上昇した。分散液の pH はわずかに上昇した。以上より、

本タンパク質ナノファイバーがプロトン伝導体として機能し、その機構はタンパク質ナノファイバー中の分子集合構造に依存する可能性が示された。

【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が確認できただけでなく、PLLA の膜内分極方向に応じて、PMMA と PLLA の摩擦帯電系列が逆転するという、摩擦帯電の原理に関わる新たな知見を得ることができた。

【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	16	1	1	6
学生	2	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】

- ・両親媒性高分子存在下におけるシリカナノ粒子リング状集合体の *in situ* 構造解析
- ・超音波処理がもたらすタンパク質ナノファイバー分散液の導電性の向上とその機構の提案
- ・生分解性高分子を誘電層に用いた摩擦帯電型ナノ発電機の構築

その他・特記事項

- ・第 14 回(令和 2 年度)風戸研究奨励賞、高橋倫太郎、受賞対象「イオン液体中における高分子ベシクルの形成過程のその場観察」、2021 年 3 月 6 日