

令和 7 年度事業計画

一般財団法人
高分子研究所

一般財団法人高分子研究所は、高分子科学の研究を奨励し、高分子科学の発展に寄与することを目的として、高分子科学に関する研究、高分子の基礎並びに応用に関する研究会の開催等の事業を行っている。令和7年度には以下の事業を計画している。

(1) 当研究所研究員による高分子研究の実施

研究員（研究グループ代表者）

金澤有紘	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻准教授
鬼塚清孝	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
山口浩靖	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
井上正志	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
橋爪章仁	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
今田勝巳	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
寺尾 憲	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
高島義徳	大阪大学大学院理学研究科高分子科学専攻教授
宇山 浩	大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻教授
藤内謙光	大阪大学大学院工学研究科応用化学専攻教授
中川敦史	大阪大学大学院蛋白質研究所教授
加藤貴之	大阪大学大学院蛋白質研究所教授
栗栖源嗣	大阪大学大学院蛋白質研究所教授

(各グループ研究計画は次項以降に記載)

(2) 自然共生高分子セミナーの開催 随時（年5回程度）

世界中から最先端の研究を行っている高分子研究者を迎え、講演。一般にも公開しており、参加費無料で聴講することができる。

(3) 第30回産学高分子研究会の開催 令和7年6月（予定）

産業界から高分子研究所の最先端のお話を聴くと同時に、大学の研究者からも最近の研究について講演し、お互いにディスカッションをする。一般にも公開している。

(4) 講演会の開催 令和8年3月（予定）

大学・企業の研究者から、最新の研究について講演。産学間で議論する。一般にも公開している。

(1) 高分子の一次構造制御に向けたカチオン共重合系の創出

(阪大院理) 金澤 有紘

【目的】高分子合成において、分子量、末端構造、モノマー配列などの一次構造の精密制御は、優れた性質・機能を発揮する高分子の創出のために非常に重要である。また、合成高分子の廃棄物が環境に与える負荷を鑑みて、高分子主鎖への分解性部位の構築や、高分子の分解・解重合によるモノマー再生が可能な系への関心が高まっている。我々は、ビニルモノマー、環状モノマー、カルボニルモノマーなど多様なモノマーを駆使したカチオン（共）重合系を開発し、一次構造の制御された高分子や分解性高分子の合成を行ってきた。本年は、新たなモノマーの組み合わせによるビニル付加・開環カチオン共重合系、異なる種類の環状モノマーを組み合わせたカチオン開環共重合系、配列制御カチオン三元共重合系、シリル環状アセタールのリビング開環重合系などの開発を目的として研究を推進する。

【計画】新規カチオン共重合系の開発、カチオン重合性モノマーの設計、分解性部位の構築手法の開発、解重合が可能な系の設計を見据えて研究を行う。とくに、双環構造をもつスピロオルトエステルとビニルエーテルのビニル付加・開環カチオン共重合による分解性・交互配列高分子の合成、環状エステルと環状ヘミアセタールエステルのカチオン開環共重合による配列制御・分解性高分子合成、ビニルエーテル・スチレン類・アルデヒドの制御カチオン三元共重合によるブロック構造と交互配列を併せもつ分解性高分子の合成、有機塩基触媒によるシリル環状アセタールのリビング開環重合・解重合によるモノマー再生系などを検討する。

（２）金属蛋白質活性部位の特異な疎水的環境に関する研究

（阪大院理）鬼塚清孝、岡村高明

【目的】高機能高分子錯体である金属蛋白質は、水中であっても、その活性中心を疎水的環境にすることで、水素結合のような弱い相互作用を効果的に保ち、活性な準安定構造を維持している。このような疎水的環境（疎水空間）が、基質の取り込み、認識や活性化を行う特異な反応場を創り出している。活性中心のみを再現した低分子モデル錯体の反応性は酵素に遠く及ばず、周辺の蛋白質が創り出す反応場が重要である事は言うまでもない。本研究は、金属蛋白質活性部位の疎水空間、配位子、立体障害、水素結合などの要素を抽出し、緻密な設計により再現したモデル錯体を合成し、金属蛋白質の高機能の起源や活性制御機構を明らかにする事を目的とする。

【計画】次年度は、モリブデン酵素である亜硫酸オキシダーゼ（SO）、キサントキシダーゼ（XO）のモデル錯体の合成に重点を置いて研究を進める。新たな試みとして SO、XO 活性部位近傍のアミノ酸残基側鎖（活性制御官能基と呼ぶ）を含む配位空間の再現を目指し、非常に嵩高い疎水性アシルアミノ基を用いて溶解度の向上と反応性制御を行うことで新奇非対称ベンゼンジチオラート配位子の合成を検討する。

(3) 超分子科学的相互作用を駆使したスマートポリマーの創製

(阪大院理) 山口浩靖・小林裕一郎

[目的]

生体系では、DNAにおける相補的な核酸塩基対形成、酵素による基質認識や抗原-抗体反応など、分子認識が重要な役割を果たしている。本研究では、このような分子認識をもたらす超分子科学的な相互作用を利用して分子や材料の特性を可変させることができるシステムを設計する。2025年度は、(1) 標的物質に特異的に結合し、高感度で可視化できるイメージングシステム、(2) 必要に応じて酵素反応をオン・オフできる超分子ネットワークシステム、および(3) 外部刺激に応答してミクロ構造が組み変わり、力学強度や光学特性が変化するようなスマート材料システムを開発する。

[計画]

(1) 標的物質の高感度イメージングシステム

疎水性蛍光色素と環状ホスト分子との超分子錯体形成を利用すると、蛍光分子の凝集を抑制しつつ、蛍光分子を抗体に効率良く修飾できることを見出した。本年度はこの方法論を展開して、蛍光強度のさらなる増幅を可能にする超分子錯体形成システムを構築し、機能性イメージング素子として利用する。

(2) 酵素反応をオン・オフできる超分子ネットワークシステム

天然酵素に分子認識ユニットを修飾し、このユニットに相補的な関係のユニットを導入した合成高分子を添加すると、酵素の触媒活性が変化するようなシステムを設計する。外的条件により均一化・相分離するような超分子ネットワーク構造を形成させることで触媒活性のコントロールのみならず、酵素の分離・精製も可能になると予想される。さらに異種酵素にそれぞれ相補的な相互作用ユニットを導入し、これらの酵素が集合体を形成することにより、カスケード反応を加速させることができるようなシステムを構築する。

(3) 物性が外部刺激により変化するスマート材料システム

高分子主鎖または側鎖に超分子科学的な相互作用をもたらすユニットを導入する。導入されたユニットと親和性のある化学種を添加することで高分子が集積し、材料形状や材料内の物質動態が変化する機能性超分子材料を創製する。化学種のみならず、光や熱などの刺激への応答性、並びにエネルギー変換特性についても調査する。

(4) ナノ繊維の補強効果

(阪大院理) 井上正志、浦川 理

【目的】 ゴムなどの高分子材料において、その物性を向上させるために、さまざまな補強材が利用されている。中でも、繊維補強複合材料は、自動車、航空宇宙、建築などの幅広い分野で実用化されており、より高性能かつ持続可能な材料の開発が求められている。本研究では、ナノ繊維やバイオ由来繊維の補強効果に着目し、環境負荷の低減と機能性向上の両立を目指した指針を得ることを目的とする。特に、ナノ繊維特有の熱運動由来の屈曲性に注目し、ナノ繊維補強材料の機械的特性の物理的起源を解明する。また、新規な繊維強化手法の開発を行い、その特性を詳細に評価することで、次世代の高機能補強材の創出を目指す。

【計画】 本研究では、天然由来のナノ繊維としてセルロースナノファイバー (CNF) およびセルロースナノクリスタル (CNC)、人工ナノ繊維としてカーボンナノチューブ (CNT) に着目する。マトリックス材料としては、ポリスチレンなどの熱可塑性高分子を選定し、異なる混合比の複合材料を作成する。作製した複合材料に対して、動的粘弾性試験および一軸伸長実験による機械特性の評価、DSC 測定による界面特性の解析、マイクロメカニクス理論および Morse 理論を用いたデータ解析を行う。これらの評価を通じて、ナノ繊維の熱運動由来の屈曲性が補強効果に及ぼす影響を解明し、より有効な補強効果の活用方法を明らかにする。本研究の成果は、環境負荷の低い高性能補強材料の設計指針の構築に貢献すると期待される。

(5) 新規高密度トリアゾールポリマーの合成と機能

(阪大院理) 橋爪 章仁・中畑 雅樹

【目的】タンパク質に代表される生体高分子は、厳密に規定された一次構造に基づいた高次構造を形成し機能を発現している。生体高分子の構造や機能に触発され、近年、合成高分子における連鎖制御が重要な課題になっており、多くの研究がなされている。しかし、一般的な付加重合では、厳密な連鎖制御高分子の合成はきわめて困難である。われわれは、銅(I)触媒アジド・アルキン環化付加(CuAAC)に着目し、アジドとアルキンを有するモノマーを段階的に重合することにより、種々の側鎖を有する連鎖制御高分子の創製、および、連鎖制御高分子の機能開拓を目指している。

【計画】われわれは、アジドとアルキンが一つの炭素原子に結合した 4-アジド-5-ヘキシン酸 (AH) 誘導体をモノマーとして、CuAAC 重合あるいは段階的 CuAAC を行うことにより、いくつかの高密度トリアゾールポリマーを合成してきた。今年度に引き続き、次年度も、AH 誘導体を合成し、その CuAAC 重合あるいは段階的 CuAAC によって、種々の新規高密度トリアゾールポリマー、特に、一次構造が精密に制御されたポリマーを合成する。得られた新規高密度ポリマーの自己組織化および相互作用について調査する。

(6) 高輝度単量体赤色蛍光蛋白質の開発

(阪大院理) 今田勝巳、川口辰也、竹川宜宏

【目的】 生体深部のイメージングには、光毒性が低く組織透過性に優れる長波長の単量体蛍光蛋白質が適する。天然赤色蛍光蛋白質 (RFP) は 4 量体である上に暗く、天然 RFP に基づいて開発された既存の RFP も単量体化したものは暗い。我々は人工改変により緑色蛍光蛋白質 (GFP) を RFP へ変換して明るい人工 RFP の作成に成功したが 4 量体であり、単量体化したものは暗くなる。そこで、単量体化人工 RFP の変異実験と結晶構造解析を行い、暗くなる原因を解明して高性能 RFP の創出へつなげることを目的とする。

【計画】 人工改変により作成した 4 量体 RFP から変異導入により作成した輝度の異なる単量体 RFP の結晶構造解析を行い、構造比較から単量体化による輝度低下の原因を推定する。続いて、人工 RFP に対して推定に基づいた変異を導入し、結晶構造解析と分光計測を行い、輝度を損なわない単量体化の設計指針を見出す。

(7) 両親媒性多糖誘導体の合成とミセル構造形成

(阪大院理) 寺尾 憲、高橋 倫太郎

【目的】無水コハク酸によって両親媒性を付与された多糖は、オクテニルコハク酸澱粉をはじめ、界面活性剤、乳化剤、流動性改良剤など、幅広い用途で利用されている。本研究室では、アミロースおよびプルランを基に合成した両親媒性多糖誘導体のミセル構造を解明することに取り組んできた。アミロース誘導体では、ビニル系両親媒性高分子に類似したミセル構造が形成されるものの、分散性に課題が残っている。一方、プルラン誘導体では疎水性基が分子鎖の一部に偏在して導入された結果、分布の広いミセル構造が確認された。これら多糖由来の両親媒性高分子が形成するミセル構造と機能性との相関を明らかにするためには、均一なサイズのミセルを形成する試料の調製および精緻なミセル構造の解析が必要である。

【計画】本研究では、有機溶媒系においてプルランおよびデキストランに飽和アルキルコハク酸無水物を反応させ、両親媒性多糖誘導体を合成する。得られた異なる分子量のプルランおよびデキストラン誘導体について、分子鎖長、置換度、溶媒の pH を変化させ、形成されるミセル構造を詳細に検討する。具体的には、少量の塩を含む水溶液中でミセルを分散させ、形成されたミセル構造を小角 X 線散乱法 (SAXS) および静的・動的光散乱法 (SLS・DLS) により特性化する。さらに、ピレンをプローブとした蛍光測定により、ミセル形成の挙動も検証する。

(8) 可逆性・可動性架橋に基づいた高分子材料の創製

(高分子材料設計学研究室) 高島 義徳

【目的】 本研究では、高分子材料内部の分子レベルの架橋設計とマイクロ構造の制御に基づいた高分子材料の設計を行う。分子レベルの架橋設計には可逆性架橋または可動性架橋を高分子鎖間に導入する。これらの架橋構造に応じて、力学特性や刺激応答性が大きく左右される。2025 年度の目標として (1) 外部刺激による分解性・接着性の制御、(2) 新規環状分子 Cyclic phenyl sulfide (c[n]PS) による機能化、(3) 可逆性結合をもつ高分子の拡散挙動の解明、に取り組む。

【計画】 (1) 光刺激により可動性架橋点を切断、または可逆性架橋の会合・解離を制御することで、高分子材料の分解性や接着性の機能制御を目指す。酸分解性結合をもつシクロデキストリン(CD)を用いて生分解性高分子に可動性架橋を導入して光酸発生剤と複合化することで、光刺激による可動性架橋の切断と生分解性高分子の酵素触媒反応の制御を目指す。CD と光異性化分子が形成するホスト-ゲスト錯体を可逆性架橋として高分子接着材料に導入する。光刺激により錯体を解離することで接着力を制御して、易解体性接着を目指す。

(2) ポリフェニルスルフィドの生産時の副生成物である c[n]PS を単離して、新規環状添加剤として高分子と複合化することで材料の機能化を目指す。c[n]PS は高い熱安定性を有し、高耐熱性高分子との複合化が可能である。重合基を修飾することで高分子側鎖に導入し、高耐熱性可動性架橋材料の作製を目指す。

(3) 繰り返し会合・解離が可能な可逆性架橋をもつ高分子は、興味深い粘弾性挙動を示すことが知られており、その制御により材料の力学物性や自己修復性の向上が達成できる。中性子反射率法に基づき、高分子/高分子界面における鎖の拡散に及ぼす可逆性架橋の影響を明らかにする。自己修復に必要な界面厚みは何 nm であるかを明らかにし、自己修復性高分子材料の機能性向上につながる材料設計指針の提案を目指す。

(9) タンニン酸添加による脂肪族ポリエステル物の物性制御

(阪大院工) 宇山 浩、徐 于懿、菅原章秀

【目的】 タンニン酸 (TA) は植物の樹皮や葉、果実などに含まれる水溶性のポリフェノールであり、TA が有する多数のフェノール性水酸基は様々な物質と水素結合を効果的に形成できる。本研究では、ポリ(ϵ -カプロラクトン) (PCL) をはじめとする生分解性脂肪族ポリエステルの Tg を上昇させることで熱的性質を改変することを目的とする。ポリエステルのカルボニル基と TA の水酸基との間で水素結合を多点で形成しネットワーク化することで熱的安定性が向上することを期待した。

【計画】 PCL、ポリブチレンアジペートテレフタレート、ポリブチレンサクシネート、ポリ(3-ヒドロキシ酪酸-co-3-ヒドロキシヘキサン酸)、ポリ乳酸の 5 種類の生分解性脂肪族ポリエステル単体およびブレンドに対して TA を添加し、二軸混練機を用いて熔融混練する。動的粘弾性測定から Tg、引張試験により機械的特性、示差走査熱量測定により熱特性を評価する。また、水接触角測定、リパーゼを利用した酵素触媒分解試験、小角・広角 X 線散乱測定、抗酸化試験および抗菌試験を計画する。

(10) 酸性超分子有機多孔質材料の開発

(阪大院工) 藤内 謙光、中村 彰太郎

【目的】無機系の多孔質材料は古くから貯蔵、分離、精製、触媒など様々な用途で広く利用されてきた。一方でこの20年余り、高機能化の観点から有機分子をその構成要素に用いた有機多孔質材料の研究開発が精力的に行われている。さらに我々はそこに分解性、再生性を組み込むために超分子化学的なアプローチによって多孔質材料を設計構築している。本研究では、温室効果ガスである二酸化炭素を選択的に吸着分離することのできる多孔質有機塩の構築を目指す。さらに空孔表面を様々な元素や置換基で修飾することによって、ガス分子をはじめとする化学種への選択性の制御とそのメカニズムを解明する。

【計画】多環式芳香族スルホン酸と嵩高いトリフェニルメチルアミン (TPMA) 誘導体を組み合わせることで、電荷補助型水素結合による多孔質材料が形成される。TPMA のフェニル基に置換基を導入すると、空孔表面にその置換基が露出し、多孔質材料の空孔環境を様々に変換できることを見出している。今回 TPMA のフェニル基のパラ位にカルボキシル基を導入することにより、アンモニアの吸着を目的とした。アンモニアは農業や工業で幅広い用途があり、近年では新たな燃料や冷媒としても期待されている。さらに、カルボキシル基を導入することで一般的な HOF に見られるカルボン酸ダイマーを形成させ、構造体を付加的に補強することによって多孔質構造の安定性を向上させる。さらに TPMA へのカルボキシル基の導入数を調整することによって様々な酸性空孔表面を有する有機多孔質材を構築し、種々のガス分子の吸着測定を行うことによってアンモニアに対する選択性を評価する。

(11) 巨大な生体超分子複合体の原子構造決定に関する研究

(阪大蛋白研) 中川敦史、山下栄樹、松田真

【目的】放射光を利用したX線結晶構造解析やクライオ電子顕微鏡を用いた単粒子解析は、巨大な生体超分子複合体の構造解析のための強力な手法である。本研究では、X線結晶構造解析のための SPring-8 の蛋白研ビームライン(BL44XU)の高度化と、放射光の特性を活かした新たな構造解析技術の開発を行う。さらに、X線結晶構造解析やクライオ電子顕微鏡による単粒子解析により、タンパク質や生体超分子複合体の原子構造を解明し、それに基づく機能解明を目指す。

【計画】 SPring-8 の蛋白研ビームライン (BL44XU) を活用した多様なデータ収集法の開発を行う。さらに、多軸ゴニオメータを活用して、異なる環境にある同一元素の化学状態や局所構造を区別した解析を可能とする Diffraction Anomalous Fine Structure (DAFS) 法の開発を継続して進める。これらの技術開発に加え、単結晶 X 線結晶構造解析法とクライオ電子顕微鏡単粒子解析を駆使し、電位センサータンパク質、緑膿菌多剤排出タンパク質複合体などの構造解析を進める。

(12) 嗅覚受容体の構造及び機能解析

(阪大蛋白研) 加藤 貴之、高崎寛子、大出真央

【目的】 嗅覚は、動物が外部環境を探索し、生存に必要な情報を収集するための重要な感覚である。食物の識別、捕食者の検知、仲間とのコミュニケーションなど、多様な生理機能に関わる嗅覚は、進化の過程で高度に発達してきた。この感覚は、嗅覚受容体によって実現され、動物の生存戦略において極めて重要な役割を果たしている。

嗅覚受容体は Gタンパク質共役受容体 (GPCR) の一種であり、ヒトでは約400種類が確認されている。しかし、人間が識別できる匂いの種類は10万を超えるとされており、これは 1つの嗅覚受容体が複数の匂い分子を認識し、1つの匂い分子が複数の受容体に認識される という柔軟な仕組みによるものである。このような複雑な認識システムにより、人間は極めて多様な匂いを識別し、環境の変化を迅速に察知することができる。

しかし、嗅覚受容体がどのように匂い分子を認識し、脳へと情報を伝達するのか、そのメカニズムは未解明な点が多い。さらに、嗅覚受容体は嗅覚以外の組織でも発現していることが知られており、その一部は がんの進行や転移に関与する可能性 が指摘されている。そのため、本研究の目的は、嗅覚受容体の構造解析を通じて、匂いの感知機構や生物学的機能の解明を進めることにある。これにより、嗅覚の基本原理を明らかにするとともに、がん治療などの応用分野における新たな展開を促進することを目指す。

【研究計画】

本研究では、ヒトをはじめとする複数の嗅覚受容体に焦点を当て、クライオ電子顕微鏡を用いた構造解析を実施する。嗅覚受容体は膜タンパク質であり、精製が困難であるため、ナノディスクなどの人工脂質膜環境を利用した発現精製を行う。

さらに、得られた構造情報をもとに、匂い分子との相互作用や受容体の活性部位を特定するための実験を進める。加えて、分子動力学シミュレーションを用いて、受容体の構造変化や匂い分子の結合機構を詳細に解析し、嗅覚受容体の機能的特性を明らかにする。

(13) 植物型フェレドキシンの中性子構造解析

(阪大蛋白研) 栗栖源嗣、川本晃大

【目的】葉緑体中のレドックス代謝反応の多くは、電子伝達タンパク質フェレドキシン (Fd) に依存して駆動される。Fd の高分解能 X 線構造から酸化還元に伴う構造変化を議論しようと数多くの X 線結晶構造が報告されてきたが、水素原子の位置を可視化することは難しい。特に、[2Fe-2S]クラスター周りの水素原子はフーリエの打ち切り効果と相まって特に水素原子の可視化が困難である。そこで原子番号に依存せずに重水素原子が炭素原子と同等の原子散乱長を示す中性子構造解析を行い、酸化還元に伴う構造変化を厳密に記述することを目的とする。

【計画】植物型 Fd の中性子構造解析を実施するためには、 1 mm^3 を超える大型結晶を酸化状態と還元状態とで作成し、研究用原子炉 JRR3 の中性子線を用いて 1 結晶あたり 3 週間かけて回折強度データを収集する。その際に、酸化状態と還元状態の植物型フェレドキシンの同型結晶を重水素化し、十分な強度で回折イメージを収集する必要がある。得られた回折像から回折強度データを積算し、全ての水素原子を含む Fd の完全な構造解析を実施する。