
東京工業大学 物質理工学院

2020

応用化学系 (境界領域化学)

Department of Chemical Science & Engineering
School of Materials and Chemical Technology
Tokyo Institute of Technology



物質理工学院・応用化学系のヴィジョン

物質理工学院・応用化学系では、化学の知識や最新技術を応用して「人類の夢を実現する化学」を探究し、無限の未来を創造します。

化学は物質変換の原理を解き明かし、未知の化合物を合成するとともに、物性発現の仕組みを解明する学問です。応用化学系では、物質の基礎的性質や反応性を原子・分子レベルで深く理解しつつ、最高度の化学技術システムの修得を目指します。応用化学系では、学習・教育の目標を、豊かな人間社会の持続的発展に必要な「革新的化学技術」を自ら開拓できる人材の育成と定め、未来の社会と環境の構築に積極的に関与する科学技術者及び研究者の育成を行うとともに、技術革新に果敢に挑戦して新たな産業と文明を拓く高度職業人の養成を目指しています。

系主任からのメッセージ

私たちの生活は、衣類やプラスチック、パソコン、医薬品からガソリンや灯油などの燃料まで、様々な化学物質や化学製品に囲まれています。豊かな社会を維持し、さらに発展させるためには、これらの機能性材料や有用化学物質を、地球環境に配慮しつつ合理的に生産する必要があります。応用化学系では、原子・分子レベルから化学工業プロセス、さらには地球環境まで、様々なスケールで進行する化学現象を広く深く理解することが研究と教育の目標です。私たち教員は、それぞれの最先端の研究と教育を通して、より良い社会の実現に資する化学者・技術者の育成を目指します。

このパンフレットについて

このパンフレットは、物質理工学院・応用化学系の教員と研究内容等を4つの分冊に分けて紹介しているうちの1分冊で、すずかけ台キャンパスで主な研究室活動を行う教員の紹介を行っています。

物質理工学院・応用化学系 すずかけ台キャンパスの教員

教員名	建物-居室	Tel	E-mail	Page
穂田 宗隆 教授	主: A	R1-220	5230 makita@res.titech.ac.jp	2
吉沢 道人 教授	主: A	R1-218	5284 yoshizawa.m.ac@m.titech.ac.jp	3
荒井 創 教授	主: E 副: A	G1-912	5406 arai.h.af@m.titech.ac.jp	4
北村 房男 准教授	主: E 副: A	G1-812	5405 kitamura@echem.titech.ac.jp	5
菅野 了次 教授	主: E 副: A	G1-1014	5401 kanno@echem.titech.ac.jp	6
平山 雅章 教授	主: E 副: A	G1-1012	5403 hirayama@echem.titech.ac.jp	
穴戸 厚 教授	主: A 副: E	R1-412	5242 ashishid@res.titech.ac.jp	8
久保 祥一 准教授	主: A 副: E	R1-410	5249 kubo@res.titech.ac.jp	
原 正彦 教授	主: A 副: E	G1-1008	5437 masahara@echem.titech.ac.jp	9
富田 育義 教授	主: E 副: A	G1-614	5413 tomita@echem.titech.ac.jp	10
稲木 信介 准教授	主: E 副: A	G1-910	5407 inagi@echem.titech.ac.jp	11
野村 淳子 准教授	主: A	R1-510	5239 jnomura@res.titech.ac.jp	12
横井 俊之 准教授	主: A	S5-202	5430 yokoi@cat.res.titech.ac.jp	13
本倉 健 准教授	主: H 副: A	G1-612	5569 motokura@chemenv.titech.ac.jp	14
眞中 雄一 特定准教授	主: H 副: A	G1-612	5569 manaka.y.aa@m.titech.ac.jp	
福島 孝典 教授	主: A	R1-912	5220 fukushima@res.titech.ac.jp	16
庄子 良晃 准教授	主: A	R1-909	5221 yshoji@res.titech.ac.jp	
山口 猛央 教授	主: A 副: E	R1-612	5254 yamag@res.titech.ac.jp	18
田巻 孝敬 准教授	主: A 副: E	R1-610	5253 tamaki.t.aa@m.titech.ac.jp	
山元 公寿 教授	主: A	R1-712	5260 yamamoto@res.titech.ac.jp	20
今岡 享稔 准教授	主: A	R1-710	5271 timaoka@res.titech.ac.jp	
豊田 栄 准教授	主: A 副: E	G1-206	5559 toyoda.s.aa@m.titech.ac.jp	22
山田 桂太 准教授	主: A 副: E	G1-208	5416 yamada.k.ag@m.titech.ac.jp	23
長井 圭治 准教授	主: E 副: A	R1A-307	5266 nagai.k.ae@m.titech.ac.jp	24
脇 慶子 准教授	主: E 副: A	J3-1317	5614 waki.k.aa@m.titech.ac.jp	25
和田 裕之 准教授	主: E 副: H A	J3-1618	5362 wada.h.ac@m.titech.ac.jp	26

主担当・副担当の記号

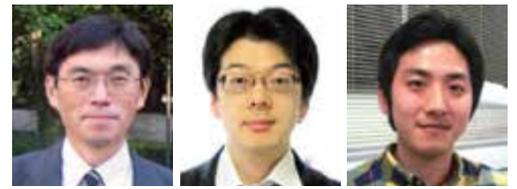
A : 応用化学コース **E** : エネルギーコース **H** : ライフエンジニアリングコース
G : 地球環境共創コース

* 学外からの連絡 045-924-(内線番号)

あき た 穂田研究室

外部刺激や環境に应答する“かしこい”分子の開発

研究キーワード 研究分野：錯体化学・有機化学・光化学・触媒化学
分子エレクトロニクス・単分子素子・分子触媒・グリーンケミストリー



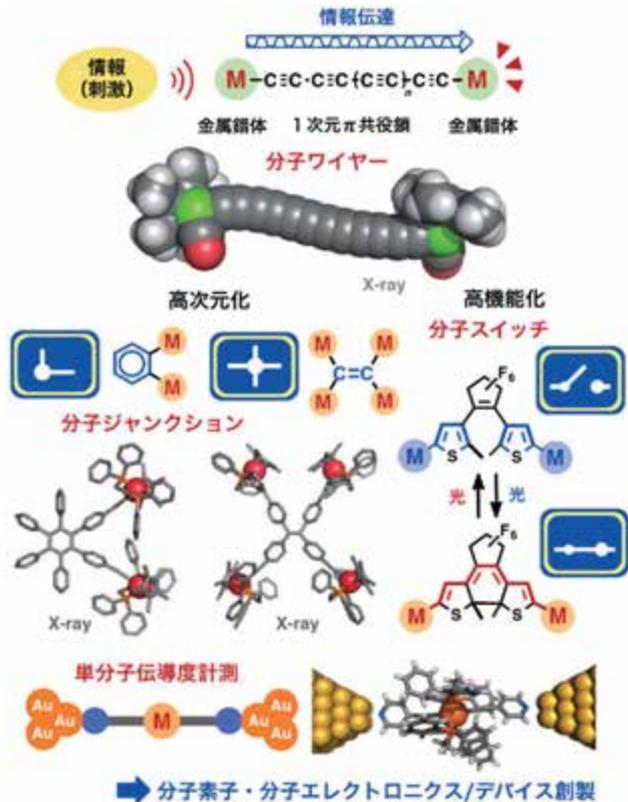
教授 **穂田 宗隆** 主：A 理学博士
 助教 **小池 隆司** 主：A 博士(工学)
 助教 **田中 裕也** 主：A 博士(工学)

研究のねらい “かしこい”分子を開発する

私達の研究室では、新しいタイプの分子材料や分子触媒の創製を目指して、外部刺激や環境変化に应答する“かしこい(スマートな)分子”の開発に挑戦しています。その分子設計のポイントは、電子リッチな有機化合物である「 π 共役分子」と幅広い基礎物性を有する「金属錯体」の利用です。それぞれのユニットを必要な数だけ狙いの位置に連結した構造体は、個々のユニットでは見られないユニークな物性や反応性を発現します。私達は、外部刺激として例えば「光」に着目して、このクリーンな刺激(エネルギー)に应答する構造や反応を開発しています。

分子ワイヤー・ジャンクション 最小電子回路の構築する

次世代の分子エレクトロニクスを目指し、世界最小の電子回路を組み立てる1つのアプローチとして、分子を利用した数ナノサイズの“情報伝達素子”の開発が期待されています。これまでに私達は、一次元の鎖状 π 共役分子の両端に金属錯体を連結することで、拡張した共役系を有する新しい化合物を作製しています。これらは最小の情報伝達素子“分子ワイヤー”として機能し、一方の金属錯体で受けた化学的な外部刺激(酸化還元・光照射など)が、 π 共役鎖を介して他方の金属錯体に効率良く伝わることを明らかにしました(下図)。これまでに最長で3つのRu錯体を含む約4 nmの長鎖分子ワイヤーの構築にも成功しました。また、 π 共役鎖を二次元に拡張した、ポルフィリンなどを含む2核および4核の“分子ジャンクション”を構



築しました。光照射による π 共役ユニットの結合の開裂により、情報伝達のスイッチングおよびチューニング機能を備えた新たな分子ワイヤーを開発しました(左下図)。

さらに、分子ワイヤー内での情報伝達の方向性の制御や機能の集積化による、高次な機能性分子素子の創製にも取り組んでいます。また最近では、私達のオリジナルの分子ワイヤーの溶液中の性質だけでなく、1分子を金電極に架橋してその電気伝導度を直接計測する“単分子伝導度計測”にも挑戦しています。

太陽光を活用した触媒反応 身近な光で新しい反応系を開拓する

光は、熱的には進行しない化学反応を実現する魅力的なツールです。太陽光やLED、蛍光灯は私達にとって特に身近な光源で、「可視光」とよばれる380~680 nmの光が豊富に含まれています。この光を活用した触媒反応の開発は、環境負荷の少ないクリーンなもの作りに繋がる重要な研究テーマです。私達は、「フォトレドックス触媒」とよばれる金属錯体を利用した新しい光触媒反応の開拓に取り組んでいます。特に、医薬品や機能性分子として有用な有機フッ素化合物や酸素、窒素、硫黄などのヘテロ元素を含む有機分子の新しい合成法の開発に挑戦しています。

これまでに、太陽光や青色LEDによる可視光照射で効率よく進行する光触媒反応を見出しました。例えば、①アルケン類のトリフルオロメチル化反応、②エナミンとシリルエノールエーテル類の酸化的カップリング反応、③アルケン類のアミノヒドロキシ化反応、および④有機ボレート塩をラジカル前駆体とするアルケン類へのラジカル付加反応などです(下図)。これらの反応は簡単な実験装置を用い、屋外や室内で実施可能です。私達の反応設計の指針は、単純な構造の分子から多様な機能をもつ新しい分子を作り出すことです。基質分子の構造を精密にデザインし、光触媒作用を活用することで新奇な分子変換反応が可能です。



吉沢研究室

芳香環ナノ空間で創造する新たな分子機能化学

研究キーワード 研究分野：超分子化学・合成化学・材料化学・光化学・ナノ空間化学・水・分子カプセル/チューブ・芳香族化合物・両親媒性分子・色素・生体分子・バイオセンサー



教授
吉沢 道人
主：A
博士(工学)

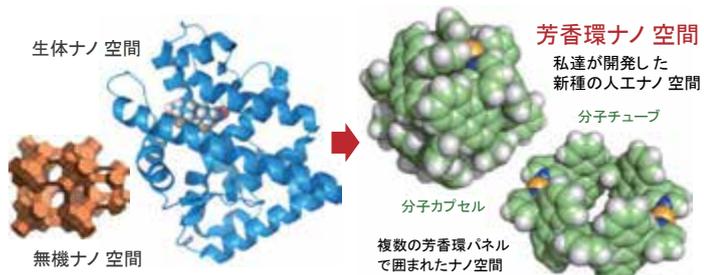


私達の研究室では超分子化学(=分子集合体化学)を基盤に、水中で活用できる“便利なナノ道具”の開発を目指して、「芳香環ナノ空間」に関する研究を行っています。

ナノ空間のデザイン

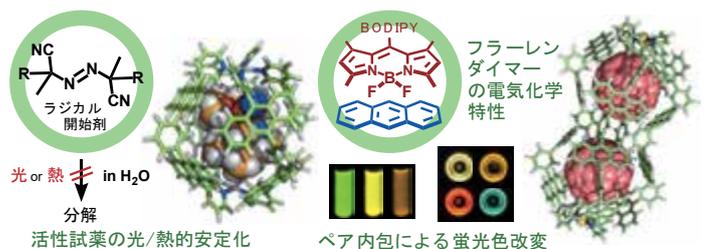
生体内では、水中、温和な条件下で、高選択な分子識別や高効率な分子変換が達成されています。この優れた生体機能は、タンパク質の自己組織化によって形成した“生体ナノ空間”で実現しています。そのため、生体システムに匹敵する「ナノ空間」を人工的に作製することは、合成化学や材料化学、物性化学、分析化学などの分野の新展開が期待できます。また、水中で利用できるナノ空間が作製できれば、生化学を含む幅広い領域での応用も可能になります。

私達の研究室では、複数の芳香環パネルに囲まれたナノ空間を有する新規な三次元構造体の自在構築を目指しています。その戦略として、単純で合成容易な“湾曲型”の芳香環パーツを設計し、これらを異なる結合や相互作用で組織化することで、前例のない「芳香環ナノ空間」を有する水溶性の分子カプセルやチューブを作製しています。



分子物性のチューニング

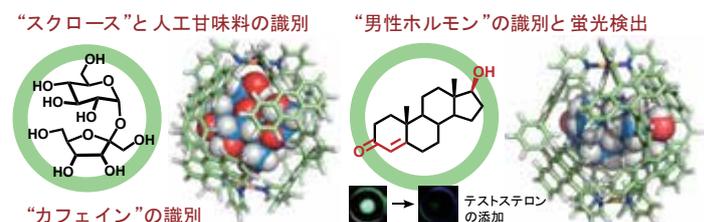
私達の芳香環ナノ空間内では、通常の溶液や固体状態と異なる分子物性が発現しています。例えば、高反応性のラジカル開始剤をナノ空間に内包することで、光遮蔽効果や圧縮効果による顕著な安定化が観測されました。また、色素分子のペア内包や混合により、化学修飾を必要としない蛍光色制御に成功しています。さらに、連結したナノ空間で、フラレンダイマーの特異な電気化学挙動などを探索しています。



生体分子のセンシング

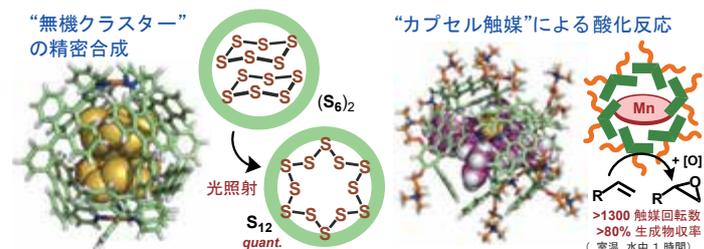
効果的な分子間相互作用により、芳香環ナノ空間内での生体分子の選択的な識別(=センシング)を目指しています。これまでに私達のナノ空間を活用することで、水中・室温で天然糖の混合物から二糖のスクロースを

100%の選択性で捕捉できました。また、代表的な男性ホルモンのテストステロンの識別を達成すると共に、その高感度な蛍光検出に成功しました。飲料に含まれるカフェインや生分解性の乳酸オリゴマーも識別できることから、様々な生体必須分子の“高性能センシング”が期待できます。



分子反応性のコントロール

私達は“ナノフラスコ”としての機能も開拓しています。実際に、芳香環ナノ空間内に2分子の環状硫黄分子を内包し、光照射することで、1分子の大環状分子の選択的合成に成功しました。この成果は、ナノ空間による無機クラスターの初の精密合成です。また、水中・室温での高効率な触媒反応を達成しています。水に不溶なマンガン錯体を芳香環ナノ空間に内包した水溶性カプセル触媒で、高回転数の酸化反応が進行しました。水を媒体とした環境調和型の合成反応や触媒反応の開発を目指しています。



最近の学生/教員の受賞

- 1) 岸田夏月 第17回 ホスト・ゲスト・超分子化学シンポジウム ポスター賞;
- 2-4) 華房真実子/二木啓太/岸田夏月 第9回 CSJ 化学フェスタ ポスター賞;
- 5) 吉沢道人 手島精一記念研究賞(若手研究賞)。

最近の発表論文

- 1) Y. Satoh, L. Catti, M. Akita, M. Yoshizawa, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 12268;
 - 2) K. Matsumoto, S. Kusaba, M. Yoshizawa *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 8463;
 - 3) L. Catti, N. Kishida, T. Kai, M. Akita, M. Yoshizawa, *Nature Commun.*, **2019**, *10*, 1948;
 - 4) T. Nishioka, K. Kuroda, M. Akita, M. Yoshizawa, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 6579;
 - 5) M. Yamashina, T. Tsutsui, M. Yoshizawa *et al.*, *Science Adv.*, **2019**, *5*, eaav3179;
 - 6) 岸田, 吉沢, *化学* **2019**, *74*, 38.
- (下線は修士課程学生)



荒井研究室

次世代エネルギーデバイスの科学に挑戦する

研究キーワード 電気化学エネルギーデバイス、水溶液系二次電池、電力貯蔵、亜鉛空気電池、金属溶解析出機構、酸素還元・酸素発生機構、電極-電解質界面挙動、非平衡挙動



教授
荒井 創
主: 副:
博士(工学)

助教
池澤 篤憲
主:
博士(工学)

携帯電子機器用の電源として活躍する、二次電池を始めとするエネルギーデバイスは、今後は電気自動車や再生可能エネルギー由来電力の貯蔵、災害バックアップ等の用途が期待され、いっそうの長寿命化、低コスト化、そして安全性の向上が求められています。荒井研究室では、電気化学および物質化学をベースとして、水溶液系電池を中心とする次世代エネルギーデバイスの科学に挑戦し、機構解明と特性改善を推進します。

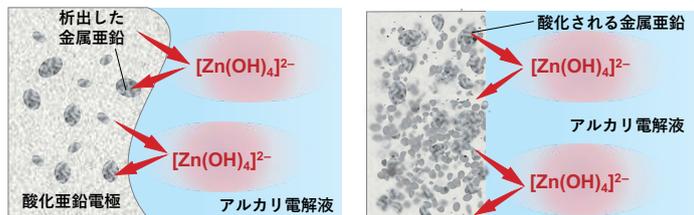
現象解明を進める解析技術の“眼”

電気化学デバイスは、 10^9 倍も異なるサイズ領域における空間・時間的な不均一性が、特性に影響を与えます。すなわち、物質科学のベースである電子・原子配列はもちろん、電解質と界面を形成して電荷移動を左右する粒子としての性質、電子・イオンの輸送に影響を与える電極形状、さらにデバイス内の電流分布や温度分布によるマクロな効果に至るまでの多様な要素が、デバイスの機能を左右します。

当研究室では、電気化学的手法を中心に、可視光・エックス線・中性子といった様々な解析技術の“眼”を駆使して現象を捉え、普遍的なサイエンスとして解明し、デバイス機能の向上につなげます。なぜうまく作動するのか/うまく作動しないのか、容易に説明のつきにくい現象に注目して仮説を立てて考えることが、次のステップへの秘訣と考えています。

亜鉛極反応の可視化

アルカリ乾電池に用いられる亜鉛は高性能で安価な負極材料ですが、二次電池に適用した場合には、形状変化等の原因による短い寿命が課題となっています。当研究室では光学観察とX線測定を組み合わせることにより、充放電で電極に生じる変化をその場観察することに成功し、寿命特性を短時間で予測可能な診断技術として有用であることを示しました。今後、高出力化や自己放電抑制といった特性改善も視野に、現象解明を進めていきます。

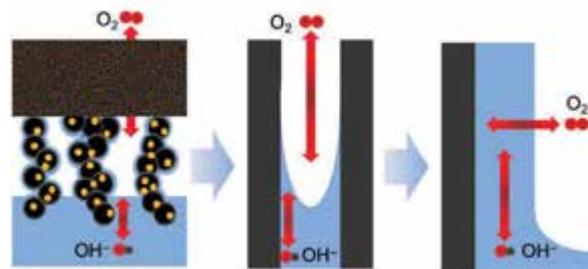


可視化で明らかになった亜鉛極挙動: (左) 充電時・(右) 放電時

反応場の理解に基づく空気極の反応解析

空気中の酸素を利用する金属空気電池は、安価で高い理論エネルギー密度を有していますが、正極にあたる空気極の高い過電圧や耐久性の低さのため、二次電池化が困難です。当研究室では、電極内に形成される反応場の理解に基づく、高性能・高耐久な電極設計を推進しています。

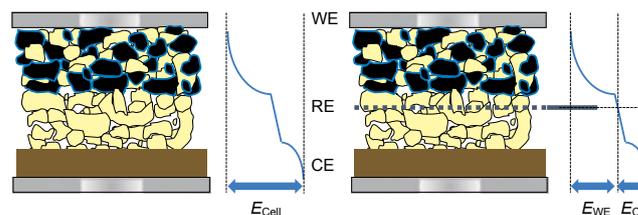
特に、実用性の高い多孔質ガス拡散電極と、単純化された構造を有するモデル電極の双方を用い、交流インピーダンス解析やデジタルシミュレーション等を活用して、物質輸送の律速段階究明を進めています。



実用電極を単純化したモデル電極の構築による機構解明

全固体リチウムイオン電池系の電気化学測定

無機固体電解質を用いる全固体リチウムイオン電池は、高いエネルギー密度・出力特性・安全性が期待できる次世代電池として開発が進んでいます。長寿命化等の課題を解決するためには、固体|固体界面で生じる全固体系特有のイオン輸送現象や電極反応の解明が必要です。当研究室では、電気化学の基礎測定に欠かせない全固体系の参照電極の開発に成功、その効果を検証した上で、全固体電池系特有の電気化学反応における機構解明を目指した研究に取り組んでいます。



開発した参照極を用いた全固体リチウムイオン電池系の測定系

他に、水溶液系電池用の新しい電極材料の開発、電極の相転移挙動の解明、その場中性子回折測定を用いた電池劣化解析といったテーマを推進しています。また国や企業との共同研究や、成果の発信にも力を投入して取り組んでおり、学生の皆さんも学会活動に積極参加しています。



北村研究室

電気化学界面の構造解明を通して新たな機能の発現をめざす

研究キーワード 基礎電気化学、界面構造と電極反応速度、機能性電極および燃料電池触媒の開発、「その場」赤外分光測定、イオン液体、希土類元素



准教授

北村 房男

主: 副:
理学博士

電気化学は、工業電解、環境および臨床における計測、蓄電デバイスなど、化学と電気がかかわるほとんどの分野を対象とする学際的な学問分野です。その根本は、電極と電解質の“界面”で生起する物理化学現象であり、界面電位差を制御することによって、反応の進む方向を自由にあやつることができるという特徴を持っています。当研究室では、電極と溶液の界面に興味を持ち、界面構造と反応速度との関係を明らかにし、さまざまな機能性界面を設計する際に役立つ基礎的知見を得ることを目的とした研究を行っています。

さらに、反応を解明するだけでなく、より優れた特性をもった界面の創成をめざした研究も同時に進めています。電気化学プロセスを利用すると、高温・高圧下における化学反応のように多大なエネルギーを消費し、また危険も伴うプロセスに比べて、常温・常圧の穏和な条件下で反応を進行させることが可能です。また、反応の制御も、電位や電流をコントロールすることで可能となります。こうした、電気化学プロセスの持つ優れた特性を生かして、新しい機能性界面の創製を目指しています。

燃料電池に関する研究

固体高分子形燃料電池は、水素ガスや炭化水素などの燃料を触媒上で空気中の酸素と穏やかに反応させることにより、燃料がもともと持っていた化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するタイプの発電デバイスです。したがってその性能は、いかに効率よくアノードで燃料を酸化し、カソードで酸素を還元できるかに大きく左右されます(図1)。効率よく反応が進む触媒を設計するには、まず実際の反応がどのような経路を経て進行しているのかを理解すること、そのための測定技術の開発が必要となります。分子種の識別に大きな威力を発揮する赤外分光法は、今まさに反応が進行しつつある界面の状況を「その場」観察できるため、反応活性種(中間体など)の特定やその存在量などに関して詳細な議論をおこなうことが可能です。

より高活性な電極触媒の探索

触媒は、まわりの環境を適切な状態に保つことで、その力を余すところなく発揮することができます。白金微粒子触媒にある種の金属酸化物を複合化させることにより、性能が大きく改善されます。当研究室ではこうした複合触媒を、電気化学法を用いて常温・常圧のマイルドな条件下で創り出す技術の開発を行っています(図2)。

イオン液体に関する研究

イオン液体は正および負の電荷を持った分子性イオンのみからなるユニークな液体です。電気をよく通すために、電解質としての利用が可能です。当研究室では、電気化学的な興味からイオン液体の物理化学特性に注目しています。現在は、レアメタルの一種である希土類(ランタノイド)元素の電解析出過程についての研究を行っています(図3)。

ナノ炭素材料+αで機能電極材料へ

近年、グラフェンをはじめとする特殊な構造をもったナノ炭素材料が注目されています。当研究室では、こうした炭素材料をベースとし、酸化還元活性を有するさまざまな機能分子を吸着させたレドックス活性複合材料の創製とその活用法について研究を行っています(図4)。

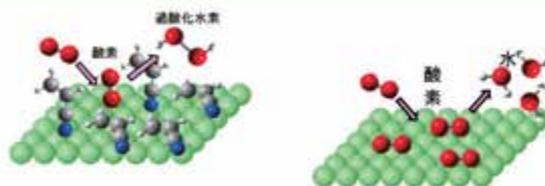


図1 カソード触媒表面での反応(模式図)

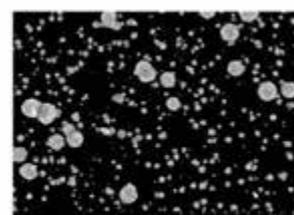


図2 ワンステップ電解析出法で用いるセル(左)と作製した白金-セリア複合触媒の電子顕微鏡写真(右)

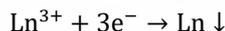
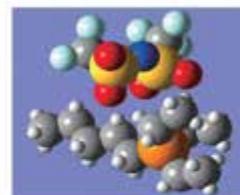
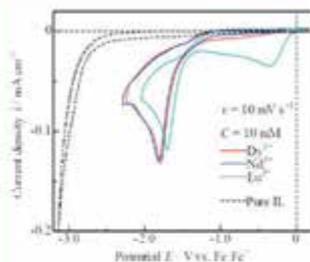


図3 イオン液体(P₂₂₂₅TFSA)中での3価希土類金属イオンの還元反応

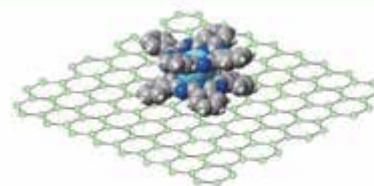


図4 グラフェンと金属フタロシアニン錯体

菅野・平山研究室

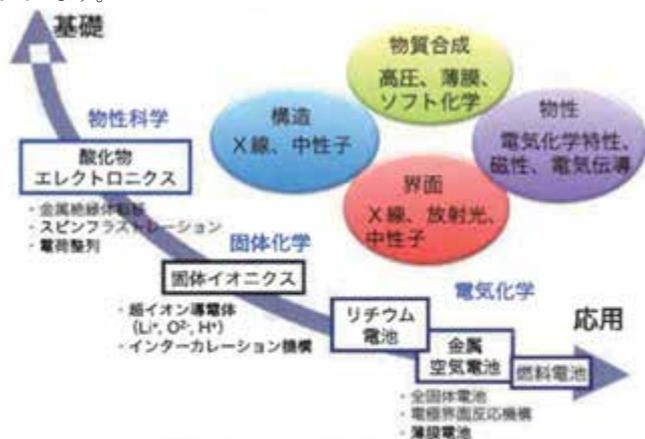
新物質を開拓し未来のエネルギーデバイスを創造する

研究キーワード リチウム電池、全固体電池、燃料電池、金属空気電池、高イオン導電体、中性子散乱、放射光、固体合成化学、電気化学、元素戦略、無機構造化学、電気化学界面設計



教授	教授	助教	特任助教
菅野 了次	平山 雅章	鈴木 耕太	堀 智
主: E 副: A			
理学博士	博士(理学)	博士(理学)	博士(理学)

携帯情報端末の爆発的な普及や電気自動車や燃料自動車の広がり、環境保全問題を背景として、高機能電池への社会的要請はかつてない程の高まりを見せています。菅野・平山研究室では、21世紀の人類の生活を支えるリチウム電池や固体電池、固体酸化物型燃料電池の高機能化から、新規な機構による電気-化学エネルギー変換デバイス開発までを視野に入れ、これらを構成する機能性材料の創製とその物性開拓を強力に推進しています。



研究手法：物質合成と物性、構造を中心として、物質の本質を探り、応用に展開する

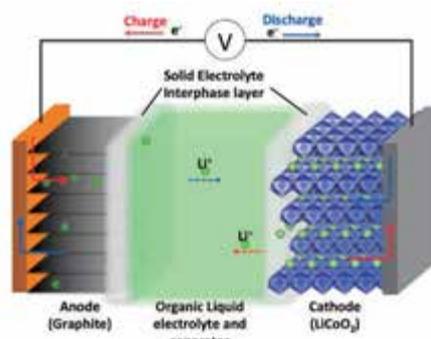
エネルギー貯蔵・変換のための機能性材料設計と合成・評価

材料に要求される機能から遡って、これを実現するための元素の組み合わせ、結晶構造、さらにはその実現可能性などを無機固体化学の見地から幅広く考察し、高圧法、電気化学法、ソフト化学法などの多彩な合成手法を駆使して、所望の材料を実際に合成するルートを開発しています。このようにして得られる新規無機固体物質に対し、結晶構造や電気・磁気、電気化学特性などを詳細に調べて物質合成にフィードバックする研究手法で、特性の優れた数々の材料を世に送り出しています。

ホスト・ゲスト反応の解析

エネルギーの貯蔵や輸送の担体としてのリチウムや水素といった軽元素をゲスト種とし、強固な結晶格子をホストとして可逆的に出し入れする、いわゆるインターカレーション反応は電極反応として幅広く利用されています。特にこの反応を巧妙に組み合わせることで高機能化を実現し成功を収めているのが、新しい電池システムであるリチウムイオン二次電池です。

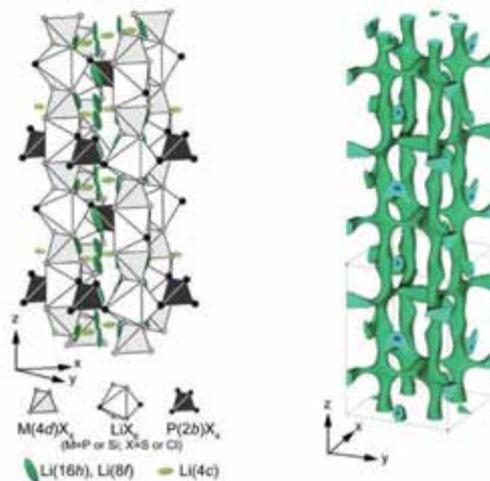
ゲスト種のインターカレーションに伴って結晶構造や物性が変化する現象には実に様々な要因が寄与しており、これを解明し整理することは固体化学者の醍醐味のひとつです。同時にこの現象は電池の充放電特性も大きく左右するために、実用上も極めて重要です。



リチウムイオン電池

リチウムイオン電池は、酸素とコバルトなどの金属を層状に重ねた正極(図右側)と炭素結晶を層状に重ねた負極(図左側)が電解液に浸された構造をしています。正極、負極それぞれの層の間にリチウム原子(Li)が入り込み、電解液を通ることで充電、放電を繰り返します。

平均構造、局所構造、ゲスト種規則配列、変調、揺らぎ、凝集等様々な視点から、リチウムや水素等の軽元素の情報も正確に把握するために、高輝度放射光や中性子も駆使して反応機構を精密に決定する方法論を用いています。層状岩塩型Li(Fe, Co, Ni, Mn)O₂、スピネル型LiMn₂O₄、Li₄Ti₅O₁₂、オリビン型LiFePO₄やこれらの関連物質における種々の新奇な相転移現象を発見し、これにかかわる格子不安定性、電子輸送特性、磁氣的相互作用、電子格子相互作用等の材料物性の本質にまで踏み込んだ議論を行い、電極特性との関連を明らかにする研究を行っています。



宍戸・久保研究室

光分子配列技術の開発とソフトメカニクスの開拓

研究キーワード 分子配向、光、高分子、液晶、ソフトマテリアル、フィルム、フォトニクス、フレキシブル、非線形光学効果、力学、光学、ディスプレイ、スマートウィンドウ、光重合、ハイブリッド材料、微粒子



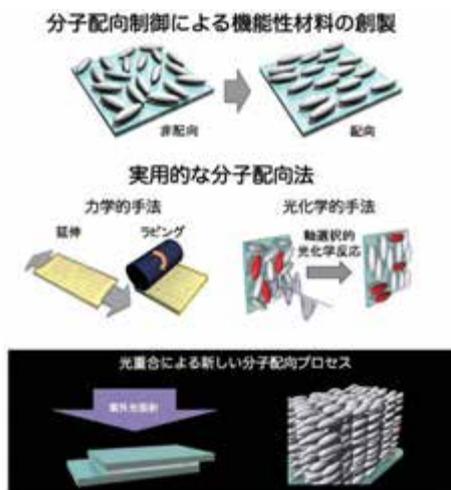
教授 宍戸 厚 主: A 副: E 博士(工学)	准教授 久保 祥一 主: A 副: E 博士(工学)	助教 赤松 範久 主: A 博士(工学)
--	--	---

作製に多量のエネルギーが必要な従来の硬い材料に替わり、省エネルギープロセス型で人体にも優しいソフトかつフレキシブルな分子性物質が低環境負荷で安全安心な社会を支える次世代材料として近年注目されています。しかしながら、エレクトロニクス・フォトニクスデバイスにおける機能発現の要である分子配列については、低い配向度や分子構造の制約など多くの課題が残されているのが現状です。加えて、材料設計においてはソフトな材料の力学(ソフトメカニクス)が必要になりますが、硬い材料を対象とする従来の材料力学をそのまま適用することには難があります。従ってソフトメカニクスの開拓自体も大きな問題です。

これらの課題を解決するため、わたしたちは、光と分子配列の特異的な相互作用に着目し、高機能・高性能な高分子材料の創製を目指して、分子設計・合成・物性評価からデバイスの作製・評価まで、基礎と応用の両面にわたり幅広く研究を行っています。詳しくはHPをご覧ください。

光重合を利用した新規分子配向プロセスの開発

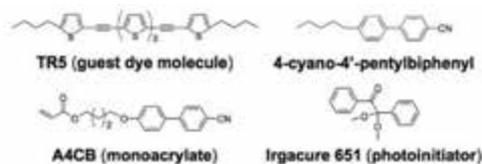
高機能性フィルム創製のためには、液晶をはじめとする機能分子の精緻な配向誘起が重要です。ナノスケールの分子を巨視的に配列することにより、電気物性、磁気特性、熱物性、光学特性などあらゆる物性が向上するといっても過言ではありません。しかしながら、既存の実用的な分子配向法は、延伸やラビングなどの力学的手法と特殊な分子の光化学的手法に限定されており、その選択肢は極めて少ないのが現状です。わたしたちは空間的な強度分布を有する光を用いて光重合を行うことにより、簡便なプロセスで分子配向が誘起できることを見出しています。今後、様々な分子物質を光で自在に配向することにより、従来の材料では出来なかった新たな光・電子機能の発現が期待されます。



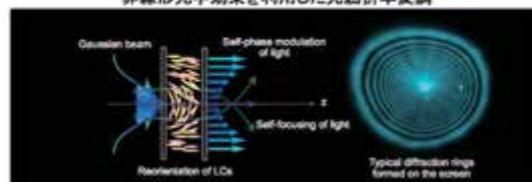
色素ドーピング液晶を利用した調光材料の創成

レーザー光源の普及や自動車のヘッドライトの高強度化を受けて、眩しい光を弱める材料が求められています。しかしながら、一般的な光機能材料においては、光応答は入射光の強度に依存しません。したがって、強い

光だけを認識して弱める材料すなわち調光材料の開発には、新たな分子材料設計が必要になります。わたしたちは、オリゴチオフェンとよばれる色素をネマチック液晶に少量ドーピングすることにより、強い光を入射したときだけ分子配向変化を効率良く誘起できることを見いだしています。最近では市販のレーザーポインター程度の光を弱めることに成功しています。今後はこの分子配向変化に必要な光強度をさらに低下することにより、スマートウィンドウや調光サングラスへの応用が期待されます。



非線形光学効果を利用した光屈折率変調



フレキシブル材料の力学解析

柔軟な高分子材料はソフトマターとよばれフレキシブルディスプレイ、フレキシブルエレクトロニクスや医療材料への応用が期待されています。なかでも、材料の湾曲現象の理解がデバイス設計において極めて重要です。しかしながら、簡便な解析法の不在により、勘と経験に基づく定性的な理解にとどまっているのが現状です。わたしたちは、ソフトマターの湾曲現象を簡便に定量解析できる手法および装置を開発し、柔軟な材料の特異な力学特性を明らかにするとともに、次世代フレキシブル材料に資する高機能材料の設計開発を行います。



分子配向に基づく異方性ナノ材料開発

金属や半導体などをナノスケール化すると、バルク状態とは異なる物性を示すことが知られています。特にナノロッドやナノワイヤーは、形状に由来する異方的な機能を発現する可能性を秘めたナノ材料です。ナノ材料の本質的な機能を引き出すためには、所望の配向構造に導く必要があります。わたしたちは、ナノロッドの表面を液晶高分子で修飾し、配向形成を促す低分子液晶材料と相互作用させることで、配向処理した基板上でナノロッドを一方方向に整列させ得ることを示してきました。配向性ホスト物質と密接に接合するデザインによって、分子配向制御に基づく異方性ナノ材料を開発し、ナノ材料の物性探索および多彩な機能展開を目指しています。

原(正)研究室

自己組織化とナノテクから、分子の進化と機能化に挑む

研究キーワード 自己組織化、有機超薄膜、界面膜、ナノテクノロジー、DNAナノマテリアル、走査型プローブ顕微鏡、高感度分析手法、生命の起源と化学進化、地球生命研究所(大岡山)等との連携研究



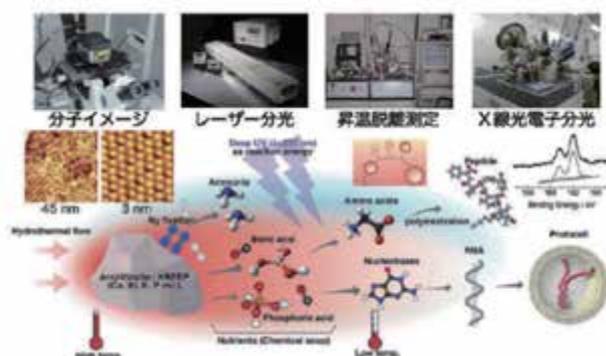
教授 **原 正彦**
主: **A** 副: **E**
工学博士

助教 **石川 大輔**
主: **A** 副: **E**
博士(工学)

本研究室では、物質化学とナノテクノロジーの融合領域から、今までの延長上にはない、新しい社会的価値をもたらす物質の機能設計を目指すと共に、「究極の自己組織化」である生命の起源に迫る、分子の化学進化と機能発現のメカニズムの解明に挑んでいます。化学進化実験は本学 WPI 地球生命研究所(大岡山)にて連携研究を行うなど、基礎から応用に至るダイナミックな研究を展開しています。

自己組織化・ナノプローブを駆使して、新しい機能設計と自ら機能を発現する分子進化のメカニズムの解明に挑む

現代の情報化社会を構成する様々な分野の最先端デバイス開発では、物質の表面・界面と、それらのナノスケールからの構造・物性の解明と機能の設計制御が重要とされています。一方、自然界に見られる生体分子などの物質系では、従来のデバイスでは再現出来ない、巧みな機能性が実現されています。自己組織化単分子膜などの有機超薄膜の表面・界面には、今後も新しい機能発現につながる物性が多く潜んでいます。我々は、個々の分子スケールに至るプローブ顕微鏡、ナノフォトニクス技術を駆使して、表面・界面における分子の構造・配向に加え、化学反応、構造変化、分子間相互作用などを明らかにし、ナノ～メゾスケールの化学・物理現象の新しい解釈を試みています。これらの知見を利用してエレクトロニクス、環境、エネルギー、バイオへの応用、さらには**生命の起源と化学進化**、自然知能の発現に至る幅広い分野の課題解決に挑戦しています。



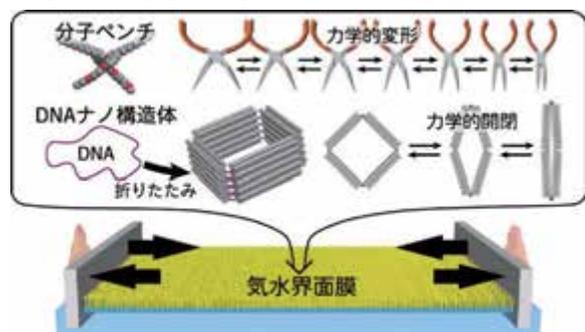
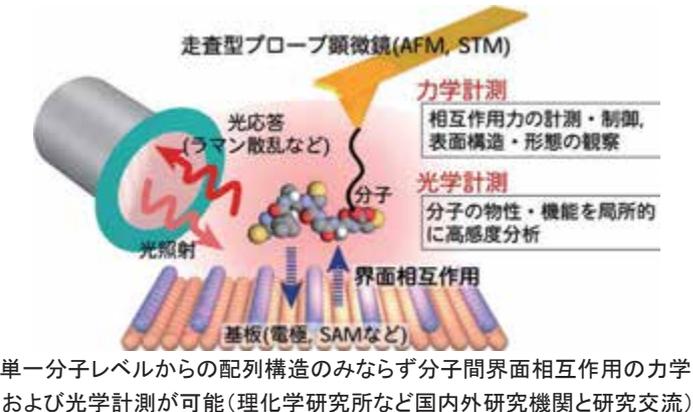
自然界の分子は、どのように合成され(化学進化)、どのように機能を発現して来たのだろうか？(地球生命研究所(大岡山)にて連携研究)

電子デバイスからバイオインターフェースまで機能性表面・界面と物性の制御、単一分子に至る評価計測

本研究室では蒸着・スパッタリングなどの真空装置や、自己組織化単分子膜、脂質二分子膜を用いた湿式超薄膜形成など、金属・半導体などの無機物質から有機生体物質、DNAナノ構造体(DNAオリガミ)まで様々な表面・界面の構造構築と物性制御を行っています。また、単一分子に至る評価計測手法を用いて、ナノスケールから原子・分子の配列構造や物性を議論しています。近年は、アミノ酸分子の鉍物表面反応、**気水界面膜**、フレキシブルデバイスなどへも観察対象を広げています。

研究室主要実験設備

- 走査型トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡
 - 金単結晶作製装置、昇温脱離分光装置、表面プラズモン分光装置
 - 赤外分光光度計、紫外可視分光光度計、蛍光分光光度計
 - 水晶振動子マイクロバランス測定装置、LC飛行時間型質量分析装置
 - 動的・静的光散乱、ゼータポテンシャル測定装置、LB膜作製装置
- (その他、研究室紹介、<https://www.haralab.tokyo>)



界面を利用して分子やDNA構造体などのナノ構造を力学的に操作する

研究室で学ぶこと、バイリンガル、21世紀型スキル

本研究室では自律して研究を遂行出来る「プロとして仕事する力」の習得を指導します。試料作製、測定装置の開発、ナノスケールに至る構造と物性の評価といった一連のプロセスを通じて「最先端の科学技術」と「国際社会に貢献出来る力」の習得を目指しています。

また理化学研究所や本学の地球生命研究所(大岡山)などの研究機関との強い連携により、基礎から応用に至る連続的な研究フェーズと、短期留学を含む国際的な研究環境、及び産官学連携体制を整え、今後、社会で要求される「21世紀型スキル」である新しい「研究力」「国際力」そして「社会力」を学習出来る研究環境作りに努めています。

本研究室は化学、物理、生物、工学、光学、情報など様々なバックグラウンドを持つ学生・スタッフ、外国人留学生・研究員の集合体で、毎日の研究室生活がバイリンガルで異分野交流の機会となっています。(その他、参考、<http://www.elsi.jp>、YouTube “Why Tokyo Tech?”)

富田研究室

新しいつくり方で挑む高分子材料

研究キーワード 高分子合成、有機合成、有機金属化学、有機金属ポリマー、反応性高分子、高分子反応、機能性高分子、 π 共役高分子、リビング重合、ミクロスフェア、ナノスフェア、重縮合、触媒反応



教授

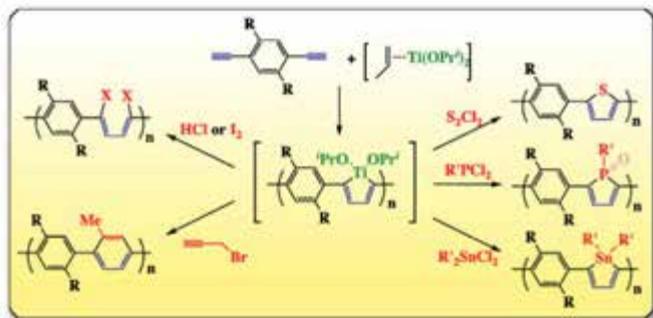
富田 育義

主: 副:
博士 (工学)

当研究室では、稲木研とともに有機化学、有機金属化学、有機電気化学をベースに、新しい概念につながり得る重合手法の開拓や、新しい高分子材料の創製などに関する研究を展開しております。現在行っている代表的な研究テーマはつぎのとおりです。

メタラサイクル構造をもつ主鎖型反応性高分子の合成と主鎖の構造を自由にえられる新しいタイプの反応性高分子としての応用

二官能性アセチレン類と低原子価金属錯体との反応により、主鎖にメタラサイクル構造をもつ新規の有機金属ポリマーの合成を行い、これを主鎖型反応性高分子として用いることによって、多様な主鎖構造をもつ高分子へと変換できることを明らかにしております。例えば、式に示すチタン錯体と末端ジエン類の場合には、主鎖の結合位置が規制された有機金属ポリマーが得られ、高分子反応に用いる低分子試薬を選ぶことにより目的に応じて多彩な主鎖構造をもつ π 共役高分子が構築できることを見いだしています。この方法を用いると、従来の合成法では設計が難しいと思われる高分子も合成できるほか、比較的簡単なジエンモノマーの分子設計によって一挙に多様な主鎖構造をもつ高分子を構築できる特徴が示されてきております。



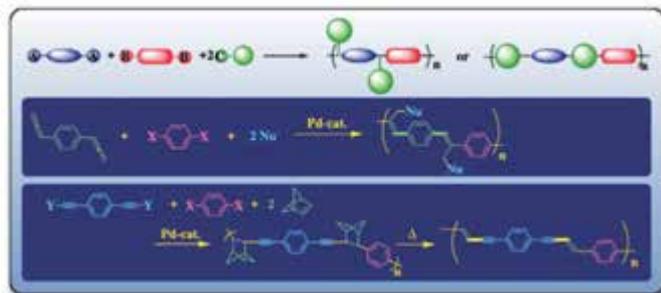
アレン誘導体のリビング重合の開発と理想的なリビング重合としての応用

アレン誘導体はオレフィンよりも不飽和度が1つ高く、アセチレン類の異性体の位置づけにあります。当研究室では、これらをモノマーとしたアリルニッケル触媒による配位重合を検討し、モノマー上の置換基の極性や電子的な性質にほとんど影響を受けることなく、一般性よくリビング重合が進行することを明らかにしております。例えば、水酸基やカルボン酸などといった極性置換基をもつモノマーも直接リビング重合が達成でき、反応性の官能基や高付加価値な機能団をもつ一次構造の規制された多彩な高分子を設計・合成できることを報告してきております。さらに、このリビング重合では、水やアルコールなどの極性溶媒も重合に用いることができることから、リビング重合に立脚しつつ精密なナノスフェア、ミクロスフェアの構築にも取り組んでおります。



遷移金属触媒による多成分系重縮合法の開拓

通常、重縮合、重付加反応は2つの官能基が連結されるシンプルな反応から構成されているため、モノマーの煩雑かつ多段階な合成が高分子の設計のための唯一の方法といえます。当研究室では、遷移金属触媒によるアレン、アセチレン、オレフィン類の3成分カップリング反応などを素反応とした多成分重縮合法の開拓を検討し、比較的簡単なモノマーから多彩な構造をもつ高分子を合成できることを明らかにしております。例えば、不斉高次構造などの機能性を付与したポリ(アリーレンビニレン)や、従来法では構築が難しいと考えられる主鎖構造をもつ新しい π 共役高分子などを比較的簡単なモノマーの設計により合成できることを見いだしております。また、3つめの成分として環状ホスト化合物を用い、不安定な分子ワイヤーを空間的に保護し安定化しながら合成する手法についても検討中です。



最近のメンバー



稲木研究室

電気を操り、新しい視点で有機・高分子材料を設計する

研究キーワード 有機電気化学、機能性高分子、電解合成、バイポーラ電気化学、導電性高分子、フッ素化学、含フッ素ポリマー、レドックス化学、電気化学デバイス



准教授 稲木 信介
主: **E** 副: **A**
博士(工学)

特任助教 信田 尚毅
博士(工学)

当研究室では、電気エネルギーを利用した化学反応・物質変換を基盤とし、機能性分子・高分子材料開発に取り組んでいます。また、それらの電気化学デバイスへの応用も指向しています。特に、グリーンケミストリーの一翼を担う有機電解合成(有機電気化学)の発展系である高分子の電解合成、電解反応の研究に精力的に取り組み、電気化学と高分子化学、フッ素化学の新しい境界領域を開拓しています。電解反応を高度に操ることで、分子レベルから薄膜、バルクに至るまで、有機高分子材料の機能化が可能となります。富田研究室と連携して研究室を運営しています。

高分子の電解合成、電解反応

ポリチオフェンやポリピロールなどの導電性高分子は有機分子でありながら優れた光学特性、電子特性を備えているため、有機エレクトロニクス材料の中核を担っています。当研究室では精密な分子設計により機能性導電性高分子の開発を行っております。

ヘテロ芳香族化合物の電極酸化により生じるラジカルカチオン種のカップリング反応および重合反応は電極上に導電性高分子膜を作成する優れた手法として知られています。当研究室では電解発生活性種を利用した高分子合成の新展開にチャレンジしています。最近、後述するバイポーラ電気化学を用いることで、マイクロファイバー状の導電性高分子を合成することに成功しました。

また、導電性高分子は電極との電子授受によりイオン種を生じるため、色調や導電性が可逆的に変化します。当研究室ではこれら特性を活かしたエレクトロクロミック材料の研究を推進する過程で、この活性種の後続的分子変換に成功しました。これは電気化学的に高分子反応を行うという従来にない全く新しい手法であり、高分子電解反応として展開しています。

バイポーラ電気化学

有機電解合成や高分子電解反応では電位が一様に分布した陽極もしくは陰極を用いますが、最近、同一面に陽極部位と陰極部位を併せ持ち電位勾配を有するバイポーラ電極が注目されています。バイポーラ電極は電気回路に非接触(ワイヤレス)でありながら電極としてふるまう不思議な現象です。当研究室ではこのバイポーラ電極のワイヤレス性、電位勾配電気泳動とのシナジー効果などを利用した高分子膜の傾斜的反応や新規パターンニング法、金属ナノロッド開発などに成功し、世界に先駆けて発表しています。

レドックス活性分子・高分子

上記以外にも、有機・高分子化合物のレドックス特性を最大限引き出すための分子設計・合成を行っています。例えば、炭素-ホウ素クラスターからなるカルボランの電気化学特性に着目し、電極触媒(メディエーター)として有用であることを見出しています。また、 π 共役高分子の適切な位置に電子求引性のフッ素基を導入することで、高分子の電子特性を制御すると共に、反応性高分子としての展開を進めています。

最近の論文

- 1) Bipolar Electrochemistry: A Powerful Tool for Electrifying Functional Material Synthesis, *Acc. Chem. Res.*, 52, 2598 (2019)
- 2) Redox Chemistry of π -Extended Tellurophenes, *Commun. Chem.*, 2, 124 (2019)

<http://www.echem.titech.ac.jp/~inagi/index.html>

高分子電解反応
電解水素化
両極反応
電解塩素化
バターンニング
傾斜発光
傾斜エレクトロクロミズム

フッ素化学
電解フッ素化
含フッ素高分子
電解重合
n型半導体

バイポーラ電気化学
傾斜表面
金属ナノロッド
導電性高分子
ファイバー
ヤヌス微粒子

機能材料
電解集積化

50 μ m

野村研究室



准教授

野村 淳子

主: A

博士 (理学)

環境にやさしいものづくり、決め手は触媒

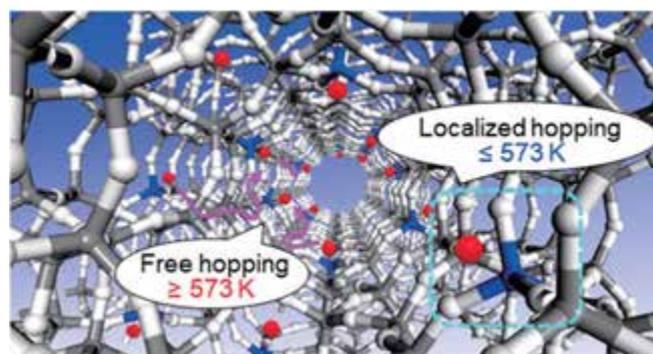
研究キーワード 触媒反応化学、グリーンケミストリー、規則性多孔体物質、反応機構、赤外分光、ゼオライト、メソポーラス物質

触媒は資源・環境・エネルギー問題の解決に大きく貢献できる材料です。触媒材料のなかでも、ゼオライトは近年もっとも注目されており、結晶構造の中に分子サイズの孔を持つ非常にユニークな物質です。また界面活性剤のミセル構造を転写すればゼオライトより大きな孔を持つ新しい材料であるメソポーラス材料が合成できます。また、触媒反応は、活性点と呼ばれる特別なサイトで進行することから、活性点の構造や反応機構の詳細を理解することは、触媒開発のためのみならず学術的にも重要です。私たちは、新しいナノ空間材料の設計、合成法の開発を行うとともに、赤外分光法を用いて、分子が触媒上に吸着する様子や吸着分子が活性化され触媒反応が進行する過程を基礎から詳細に調べています。有毒な薬品を用いず不要な廃棄物も産出しない、環境にやさしい新しい化学変換法をつくりあげることを目指して研究を行っています。

遷移金属酸化物薄膜で形成されたメソ空間での固体触媒機能の発現

遷移金属酸化物薄膜で形成された均一なサイズと規則配列を有するメソ空間を構築し、遷移金属酸化物の選択により、空間の親・疎水性制御および固体触媒機能の発現を目指しています。最近では、特に規則性メソポーラスシリカの細孔内に遷移金属薄膜を調製する研究を行っています。メソ細孔内に形成された遷移金属酸化物薄膜は、バルク表面とは異なる触媒機能の発現が期待され、さらにヘテロ元素を単核で導入し、単離されたヘテロ元素に特徴的な触媒特性を見出しています。また、遷移金属薄膜の厚みや密度を制御することで、触媒担体としての応用も期待されます。

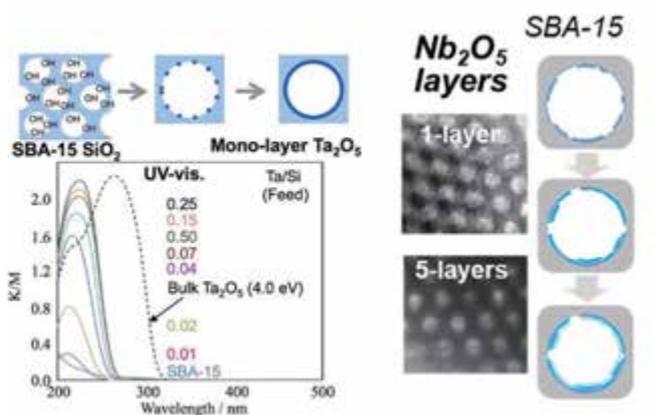
で広く用いられている固体酸触媒です。ゼオライトが工業プロセスで触媒として用いられる際には、一般的に数百℃といった高温で用いられます。しかしながら、このような高温下でのゼオライトの触媒活性点の状態は、不明な点が多々あります。当研究室では、温度可変なIRセルを用いることで実際にゼオライトが触媒として使用されるような高温でのIRスペクトルを測定し、物理化学的な視点からゼオライト活性点の挙動の解明を行っています。また、計算科学的な知見も取り入れることで(共同研究)、より高精度なキャラクタリゼーションの手法の開発も行っています。



J. Phys. Chem. C, (2017).

In-situ IR を用いたゼオライト上での触媒反応機構解明

研究室では、触媒のキャラクタリゼーションのみではなく、触媒反応そのものを赤外分光法で観測しています。ゼオライトやメソポーラス物質上に反応分子が吸着し、反応中間体を経て、生成物になる過程を詳しく観測することで、様々な触媒反応の機構解明を目指しています。

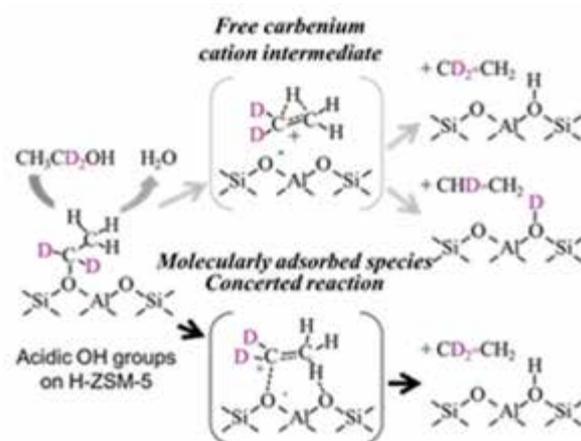


ChemistrySelect, (2016).

Micropor. Mesopor. Mater., (2018).

In-situ IR を用いた高温におけるゼオライト上のプロトンホッピング機構の解明

触媒反応を行う上で、その触媒のキャラクタリゼーションを適切に行うことは、学術的にも工業的にも非常に重要な課題の1つとなっています。当研究室で主に扱っている触媒の1つであるゼオライトは、石油化学等の分野



Angew. Chem. Int. Ed., (2011).

J. Phys. Chem. Lett., (2015).

当研究室は横井研究室と連携しながら研究室を運営しています。

横井研究室



准教授
横井 俊之
主：A
博士(工学)

ナノ空間触媒による炭素資源の有効利用

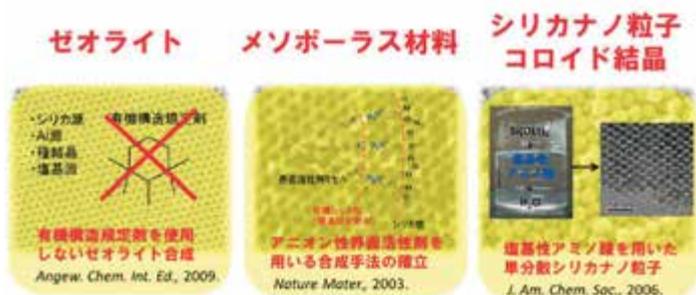
研究キーワード ナノ空間触媒、ゼオライト、メソポーラス物質、単分散シリカナノ粒子、触媒反応化学、グリーンケミストリー、資源化学、C1化学

当研究室は「ナノ空間触媒研究ユニット」として研究・教育を実施しています。ゼオライトやメソポーラス材料のようにナノスケールの空間を有するナノ空間材料はすでに幅広く実用化されており、今後もその発展が期待されるナノテクノロジーの基幹材料の一つです。なかでも、ゼオライトは結晶構造の中に分子サイズのナノ空間を持つ非常にユニークな物質です。このようなナノ空間材料を触媒として用いた場合、ナノ空間の形状と反応物・生成物分子の形状の幾何学的関係による「形状選択性」により、通常の金属酸化物では成し得ない特異な触媒活性を示します。当研究ユニットの目標は多様な資源の有効利用、ならびに化学品製造プロセスのグリーン化に直結する革新的なナノ空間触媒の創製とそれを用いた触媒反応プロセスを開発することです。



新原理によるナノ空間触媒の創製

マイクロからメソ空間を有するナノ空間材料の合成、修飾、構造解析、応用に関する研究を行っています。具体的にはマイクロ細孔を有する「ゼオライト」から、界面活性剤の超分子構造を鋳型として合成される「メソポーラス材料」数 nm～数百 nm の範囲で自在にサイズ制御可能な「単分散ナノ粒子コロイド結晶」の3つの材料を基盤に、主に環境調和型触媒反応プロセスの開発を行っています。これまでの成果として通常のプロセスとは全く異なる、新しい原理によるナノ空間触媒材料の調製法を開発してきました。



新原理によるナノ空間触媒の創製

多様な炭素資源から化学品を作り出す革新的なナノ空間触媒

現在、メタノールからプラスチックなどの化学品原料として用いられるオレフィンを高収率かつ高生産性で製造するナノ空間触媒の開発に挑んでいます。メタノールは二酸化炭素と水素から合成することができるため、この触媒反応プロセスが実用化されれば、二酸化炭素を資源とするオレフィン製造プロセスが確立されることになり、人工光合成型社会の構築にも大きく寄与するものです。

また、天然ガス、シェールガスの主成分で有り、石油に代わる化学資源として注目されているメタンが非常に注目されています。メタンをメタノール、さらには低級オレフィンに直接変換するナノ空間触媒の開発にも挑んでいます。もし、この触媒プロセスが実用化されれば化学産業におけるメタンの新たな活用を切り開き、ひいては新たな産業基盤の確立につながることを期待されます。

ナノ空間触媒の高度構造解析・評価手法の開発

当研究ユニットではナノ空間触媒の合成、触媒反応評価、触媒構造ならびに反応機構解析まで一貫してできる研究環境が十分に整備されています。構造解析、反応機構解析にも力を入れています。例として、

【高分解能多核固体NMRによる構造解析】

- ✓ 多核固体NMRによるヘテロ原子の状態解析
- ✓ MQMAS, DQMAS法による高度構造解析
- ✓ 温度可変プローブを用いた固体NMRによる構造解析

【多様化するマテリアル解析ニーズを実現する高度SEM観察技術開発】

- ✓ 低電圧超高空間分解能SEM観察による超精密表面観察
- ✓ 断面SEM観察と元素分析によるナノ多孔質材料の粒子内部観察



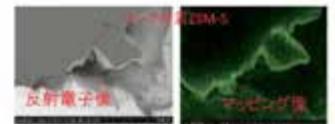
高分解能多核固体NMR

Magnet : 600MHz, 14.01T
Tube size : 1~8 mm
Spinning rate : max 100 kHz

- ✓ MAS NMR法
- ✓ CP/MAS NMR法
- ✓ MQMAS NMR法
- ✓ DQMAS NMR法
- ✓ ²⁹Si, ²⁷Al_hetcor NMR



高分解能SEM/STEM



産学連携・国際共同研究

特にメタノール転換用(MTO)触媒では企業と共同で超高耐久性ゼオライト触媒を開発し、小型パイロットスケールでの性能実証まで進んでいます。また、国内はもちろん、海外の産・学・官と積極的に交流しており、共同研究を推進しています。

当研究室は野村研究室と連携しながら研究室を運営しています。

本倉・眞中研究室

新しい触媒作用の創出による高効率分子変換の実現

研究キーワード 触媒化学◇有機化学◆分光学◇二酸化炭素変換◇環境調和型物質変換◆
協奏的触媒作用◆固定化触媒◇錯体触媒◆酸塩基触媒◇構造解析◆反応機構解明



准教授 本倉 健
主: 副:
博士(工学)

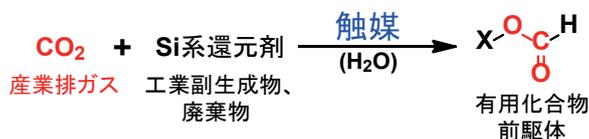
特定准教授 眞中 雄一
主: 副:
博士(工学)

新しい「触媒」の開発によって、化学反応の制御と、高効率物質生産を実現することができます。当研究室では、化学反応を理解するための有機化学、触媒解析・反応機構解明のための分光学、触媒設計のための無機・錯体化学を組み合わせ、新たな触媒・触媒作用の創出と、それを利用した環境調和型の分子変換反応の開発を目指しています。

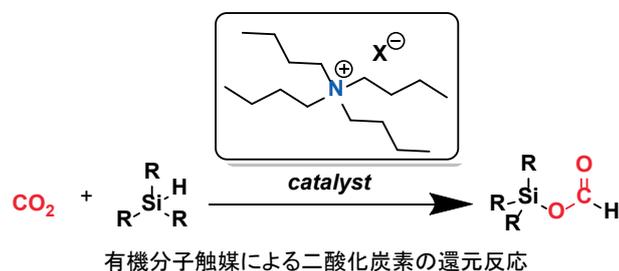
触媒による物質循環反応

二酸化炭素は産業排ガスであると同時に、地球上に大量に存在する貴重な炭素資源と捉えることもできます。研究室では、触媒を用いる二酸化炭素からの有用物質の合成に取り組んでいます。

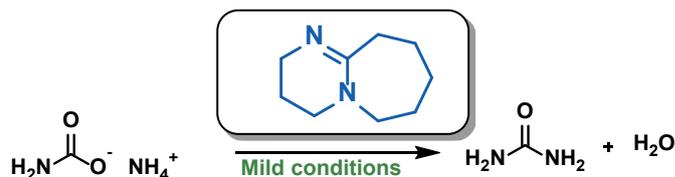
触媒として銅錯体触媒やフッ化物塩を用いると、二酸化炭素の還元反応が進行することを見出しました。この反応で生成したギ酸誘導体は様々な有用化合物へ変換が可能です。さらに、二酸化炭素と反応するケイ素系還元剤として、シリコン工業の副生成物や廃棄太陽光パネルから回収される化合物を利用できる可能性があります。すなわち、廃棄物のみからの有用有機化合物合成を達成できる可能性があります。



例えば、下図に示すアンモニウム塩触媒が、二酸化炭素とヒドロシランの反応に極めて高活性を示すことを発見しました。この触媒は有機化合物のみから構成される「有機分子触媒」であり、金属錯体と比べて安価・安定で取り扱いが容易といった利点を併せ持ちます。



また、環境中の未利用窒素資源を利用し、窒素の循環を促すため、触媒を使って有用な化合物に変換する反応にも取り組んでいます。次の図に示したのは、下水中のアンモニアに大気(二酸化炭素)を反応させて得られる反応物の一つであるカルバミン酸アンモニウムから尿素を合成する反応です。この反応に有機塩基触媒が高い活性を示すことがわかり、環境中の未利用窒素と二酸化炭素を同時に活用できる可能性を見出しました。従来の工業的な尿素合成方法とは異なり、マイルドな条件下で進行するため省エネ効果も期待できます。

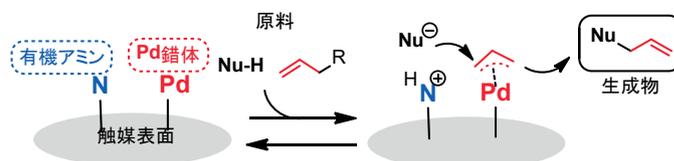


有機塩基触媒による温和な条件下での尿素合成

固体表面における協奏的触媒作用の創出

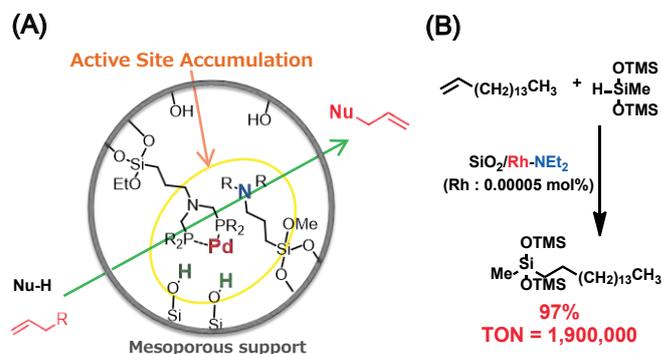
高活性触媒の開発のため、新しい触媒作用の創出に力を入れています。同一固体表面の適切な距離に固定された二つの活性種が、目的の触媒反応に協奏的に作用することを見出しました。この協奏的触媒作用によって、触媒反応を大幅に促進することが可能となります。

二つの活性種として、Pd 錯体と有機塩基を固定化し、有機合成反応の一つである求核剤 (Nu-H) とアリル化剤の反応に用いました。触媒表面では、有機塩基が Nu-H からプロトンを引き抜き、同時に Pd 錯体とアリル化剤からアリルパラジウムが生成します。すなわち、両方の原料が活性化された状態となり、二つの原料の結合形成が効率よく進行します。



Pd 錯体-有機塩基両機能表面によるアリル化反応

「協奏的触媒作用」発現のため、メソ細孔内に複数の活性部位を閉じ込めた新しい触媒構造を構築し、高効率アリル化反応を達成しました (A)。また、協奏的触媒作用を利用すると、シリコン生産に重要なヒドロシリル化反応に超高活性を示す固定化Rh触媒も開発できます (B)。

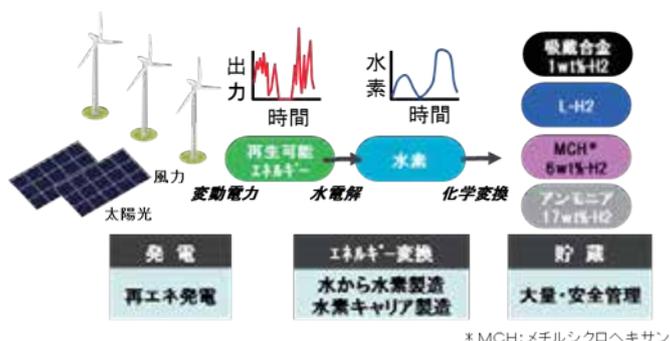


(A)アリル化反応に高活性を示す新触媒 (B)超高効率ヒドロシリル化反応

環境調和型物質変換による再生可能エネルギーの貯蔵技術

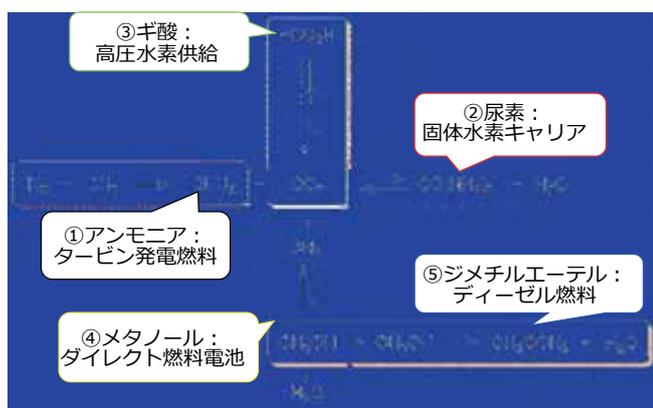
太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギー(再エネ)を社会導入する際に、その変動性や偏在性は大きな障壁になります。大容量の蓄電池を用いたり、グリッド内で様々なエネルギー源を用いたりすることで、エネルギーの安定供給を図ることもできますが、大規模・長期間の変動には対応が難しいのが現状です。そこで研究が進められているのが再エネを貯蔵し輸送できるようにするエネルギーキャリアです。その中でも近年では再エネを用いて水を電気分解して水素を作り、水素を再エネのキャリアとする研究が盛んです。

しかし、水素は気体で扱いにくくエネルギー密度が低いという弱点があります。本研究室ではさらに一歩進み、水素を何らかの安定な化合物に変換して再エネを貯蔵する「水素キャリア」に関する研究も行っています。前述の二酸化炭素の変換反応も水素キャリアの研究の一つと見做せます。



再エネを大量・安定に貯蔵する技術

水素キャリアの中でも具体的には、①アンモニア合成、②尿素合成、③ギ酸合成と分解、④メタノール合成と分解、⑤ジメチルエーテル合成、にターゲットを絞り、高性能な触媒の開発とプロセス化へ向けた検討を行っています。これらは典型的な小分子の変換反応で、既存の石油化学プロセスとして確立しているものがほとんどです。しかし、せっかくクリーンなエネルギーである再エネを貯蔵するので、出来るだけ低投入エネルギーで、廃棄物を少なく、エネルギーと環境の両面から既存のプロセスを超える反応となるよう、新規な触媒の研究開発を行っています。



主に対象とする触媒反応と、

反応物のエネルギーキャリアとしての利用方法例

研究室内で基礎的な反応データを取得した触媒は、次のステージである、プロセス化への検討や大規模実証化実験、水素の利用へとフェーズを移していきます。最終的に目指すのは早期に社会へと研究成果を還元すること。東日本大震災からのエネルギーでの復興や、東京オリンピックへの水素エネルギーの供給の立役者になれる可能性も秘めています。

研究活動

触媒の構造・反応メカニズムの解明のため、核磁気共鳴 (NMR), X線光電子分光 (XPS), X線吸収微細構造 (XAFS) 測定等を積極的に利用しています。特にXAFS測定は、固体表面に存在する錯体の構造解明に極めて有効な手段です。学外の大型放射光施設を積極的に利用し、XAFS測定を行っています。研究成果をまとめ、積極的な学会発表も行っています。普段とは異なる学外での研究活動は、他機関の研究者との交流など、とても刺激的です。



大型放射光施設での XAFS 測定と、学会発表の様子

また、学内連携及び国立研究開発法人産業技術総合研究所の再生可能エネルギー研究センターとの密接な連携を駆使して、研究の社会実装検討もしています。国内唯一の再生可能エネルギーを名前に冠する研究所で、各種環境調和型触媒反応の実証実験が可能です。



国立研究開発法人産業技術総合研究所
福島再生可能エネルギー研究所



当研究室では、有機化学はもちろん、高分子・錯体化学・化学工学など様々なバックグラウンドをもつ学生を受け入れ、新しい知識・技術を共に学び、これまでの知見と融合させ、触媒研究を推進しています。触媒研究を通じて環境問題解決に貢献したい方、新しい分野にチャレンジしたい方とにかく化学が好きな方、一緒に研究やりましょう。

福島・庄子研究室

先端分子科学で挑む機能物質の創製

研究キーワード π 電子系分子・超分子・高分子、カーボンマテリアル、有機典型元素化合物、自己集合、機能性分子集合体、ナノ構造体、電子材料、光化学、酸化還元、刺激応答機能、動的機能、エネルギー・物質変換機能



教授 **福島 孝典**
主: **A**
博士(理学)

准教授 **庄子 良晃**
主: **A**
博士(工学)

研究対象・研究方針

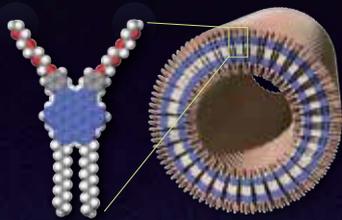
我々の研究室では、様々な物性を有する分子群の創製と、分子自己組織化の精密制御を可能にする方法論の開拓を通じ、有機・高分子からなる物質、いわゆる「ソフトマテリアル」の革新的機能の開拓を目指しています。特に、光吸収・発光特性、電導性、磁性など、物性に富む π 電子系分子群をモチーフとし、立体構造、電子構造、適切な元素・官能基の導入などを戦略的に考え、機能創製に向け合目的に分子をデザインします。合成した分子は「自己組織化」や「ナノスケールの足場」などを利用して空間特異的に集積化し、巨視的にも分子配列が制御された物質を創製します。これらの物質では、個々の分

子に起こるわずかな状態変化が巨視的レベルにまで増幅され、大きな機能を発現することが期待されます。さらに、複数の機能ユニットを効果的に集積化し、個々のユニットの性質の単なる足し合わせではなく、相乗的機能を発現させるための基礎学理を探求します。究極的には、生体に匹敵する高度な物質変換、エネルギー変換を実現する材料の開発を目指します。こうした取り組みを通じて、ナノスケール(分子レベル)からマクロスケールに至るまでの新物質開発と、それらが発現する新機能・新現象を探求します。

下の図は、これまでの主な研究成果や研究アクティビティーを、学生諸氏の活躍の様子とともにまとめたものです。

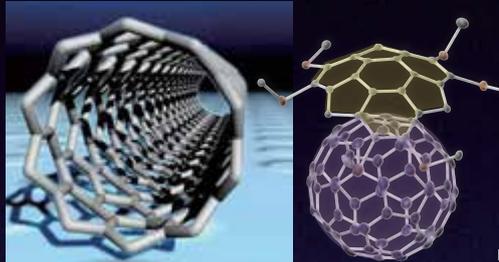
有機・高分子・超分子・典型元素化学を駆使した

π 共役分子の自己組織化による ナノ構造体の精密設計



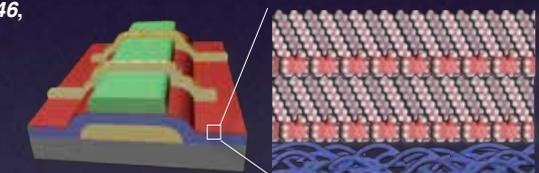
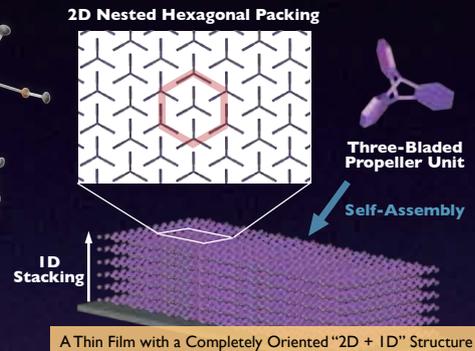
Science 2004, 304, 1481. *PNAS* 2005, 102, 10801. *JACS* 2008, 130, 9434. *PNAS* 2009, 106, 21051. *Science* 2006, 314, 1761. *Science* 2011, 334, 340. *JACS* 2013, 135, 114. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 11168 (Selected as a VIP paper), *JACS* 2015, 137, 13792. etc.

ナノカーบอนを基盤とする ソフトマテリアル



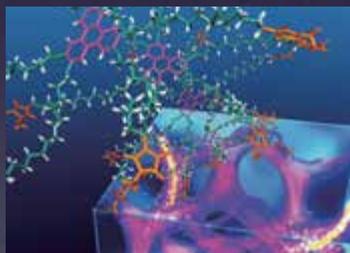
Science 2003, 300, 2072. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, 44, 2410. *Science* 2008, 321, 1468. *Nature Mater.* 2009, 8, 494. *Nature Chem.* 2015, 7, 730. *Chem. Lett.* 2017, 46, 1368. *Chem. Sci.* 2017, 8, 8405. etc.

分子の二次元集合化を基盤 とした高秩序有機薄膜工学



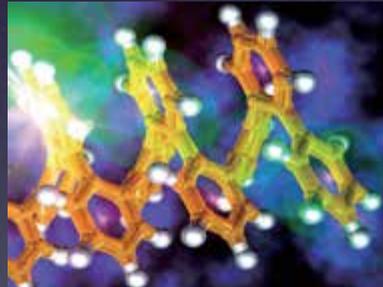
Science 2015, 348, 1122. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016, 55, 06GL01. *JACS* 2016, 138, 11245. *J. Mater. Chem. A* 2016, 4, 18490. *Nature Nanotech.* 2018, 13, 139. *JACS* 2018, 140, 13497. *Sci. Rep.* 2019, 9, 9200. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 41561.

高度な配向規則性・新構造 を有する液晶性分子集合体



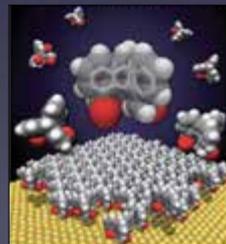
JACS 2009, 131, 17722 (Front Cover). *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 7990. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 8490. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013, 52, 1031. *Nature Commun.* 2018, 9, 4431. *Nature Mater.* 2019, 18, 266.

電子の出入りで動きを 変える共役らせん分子



Nature Chem. 2011, 3, 68. *JACS* 2012, 134, 11084. *JACS* 2013, 135, 14564. *RSC Advances* 2016, 6, 55970.

三脚型分子による高密度 高配向性表面修飾



Appl. Phys. Express 2015, 8, 121101. *J. Phys. Chem. C* 2019, 123, 4401. *J. Am. Chem. Soc.* 2019, 141, 5995. *J. Phys. Chem. C* 2019, in press.



助教 福井 智也
主: A
博士(工学)

特任助教 竹原 陵介
主: A
博士(工学)



研究室体制と研究指導方針

我々の研究室は、有機・高分子・超分子・典型元素化学・有機金属化学・分子集合体化学といった、多様な研究バックグラウンドをもつスタッフ陣から構成されていることが大きな特色です。学生は、個々のスタッフだけではなく、全てのスタッフからの指導を受けることができるため、様々な知識・技術を習得することができます。また大学院生は、当研究室が参画している新学術領域「 π 造形科学」の枠組みで、国内外の共同研究先に滞在し、さらに異分野の研究に取り組むこともできます。こうした活動を通じて、複数の研究分野に精通した「マルチリンガル」な人材を育成することが当研究室の指導理念です。

学生のみなさんへのメッセージ

物質科学が社会に果たす役割は、基礎・応用を問わず益々大きくなっていきます。「環境・エネルギー問題」の解決に向けた取り組みも、物質科学の発展なくしてはなしえません。研究活動に対する「強い意欲」と社会に貢献しようという「高い志」、そして一つところに留まらず常にフロンティアを突き進もうとする「チャレンジ精神」を持った学生の皆さん、我々の研究室で学んでみませんか？いつでも質問・見学を受け付けていますので、興味をもった学生の皆さん、是非我々の研究室を訪ねてみてください！(上記、「研究室ウェブサイト」も併せてご覧ください。)

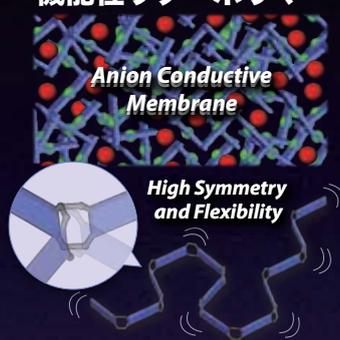
機能性分子・分子集合体の創出とその応用研究

超ルイス酸分子の創製と新物質変換反応の開発



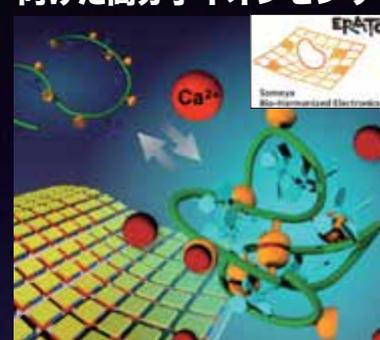
2014年手島精一記念研究賞研究論文賞受賞
Nature Chem. 2014, 6, 498. Highlighted in News & Views and in C&EN. *Chem. Commun.* 2015, 51, 13342 ("Front Cover"). *Inorg. Chem.* 2015, 54, 11889. *Organometallics* 2016, 35, 2022. *Appl. Phys. Express* 2017, 10, 035101. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2017, 56, 5312 ("Back Cover"). *npj 2D Materials and Applications* 2019, 3, 7.

新しい構造特性を持つ機能性ラダーポリマー



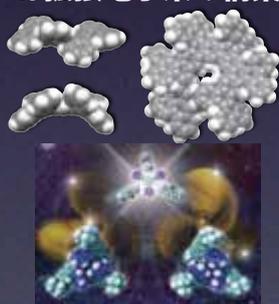
J. Mater. Chem. A 2016, 4, 17655.
ACS Macro Lett. 2017, 6, 775.
Selected as "Synfacts of the Month"

生体調和エレクトロニクスに向けた高分子イオンセンサ



Sci. Rep. 2016, 6, 24275.
Macromolecules 2017, 50, 5940.
ACS Macro Lett. 2018, 7, 711.

新芳香環形成反応による π 拡張電子系の構築



Nature Commun. 2016, 7, 12704.
Mater. Chem. Front. 2018, 2, 807.
Chem. Eur. J. 2018, 24, 13223.
Chem. Commun. 2018, 54, 12314.
J. Org. Chem. 2019, 84, 1941.
Chem. Asian J. 2019, 14, 18796.

学生のアクティビティ

物質電子化学専攻2012~14年度修士論文発表会
最優秀電化賞を設立より3年連続受賞
2014~16年度では3年連続最優秀ポスター賞受賞



日本化学会化学フェスタ、基礎有機化学討論会、高分子討論会、マイクログラビティ学会などでポスター賞受賞 (2012年から合計24件受賞)



π 造形科学若手会
(H30.10.4-6)



日本国内の若手研究者との交流会を実施
国内・国外の研究室に滞在し、共同研究を実施する制度を保有 (大学院生向け)

山口・田巻研究室

持続発展可能社会に向けた材料機能のシステム設計

研究キーワード 燃料電池、バイオマテリアル、膜工学、機能材料システム設計、化学工学



教授 山口 猛央 准教授 田巻 孝敬 助教 大柴 雄平
 主: A 副: E 主: A 副: E 主: A
 博士(工学) 博士(工学) 博士(工学)

環境問題、エネルギー・資源枯渇問題など地球規模の問題の解決や、豊かな生活持続のための医療・医薬技術の進展などのためには、新しい機能材料・プロセスの開発が必要不可欠です。これらの分野では、単でなく精緻で複雑な機能を示す材料デバイス及びプロセスが要求されています。これら高機能材料は、最先端の要素技術とこれらを統合する画期的なアイデアにより生まれます。本研究室では、材料自身をシステムとしてとらえ、複数の素材を有機的に結びつけ、新機能を発現する“機能材料システム”および、そのプロセス化までを対象とし、社会および地球のために真に必要な科学技術のブレークスルーを目指します。具体的には燃料電池、バイオマテリアルの創製から、持続発展可能な地球環境保全技術へと展開します。

固体高分子形(プロトン伝導)燃料電池

固体高分子形燃料電池(PEFC)は、自動車や家庭用定置型の電源として注目されています。日本では世界に先駆けて家庭用燃料電池エネファームや燃料電池自動車の販売が開始され、燃料電池開発のフェーズは実証研究から普及初期へと移行しています。しかし、依然としてコストや耐久性などの課題が残っており、普及拡大へ向けた革新的な技術開発が必要です。

PEFCの中心部分は、反応を行う触媒層と、プロトンを伝導する電解質膜です。本研究室では、燃料電池全体のシステムを俯瞰的に捉えながら触媒層、電解質膜それぞれについても機能材料システムの考え方に基づいて材料開発を行っています。

自動車用途では、さらなる低コスト化・高耐久化が求められています。特に酸素を還元するカソードで使われている白金量の低減、すなわち触媒量あたりの活性向上と、作動条件における触媒層の耐久性向上が重要な課題です。本研究室では、我々独自の技術であるカーボンフリー・ナノ粒子連結触媒により、触媒層の高活性化・高耐久化の両立が可能であることを示すなど、世界の最先端をリードし、課題解決へ近づいています。電解質膜については、ポリマー単独では相反して両立できなかった特性を実現するために、世界で初めて数十 nmの多孔膜細孔中に電解質ポリマーを充填する細孔フィリング法を開発し、新しい構造、機能が発現することを発見しました。また、PEFCで要求されている高温・広湿度で高プロトン伝導性を示す電解質材料の開発へ向けて、量子化学計算と実験の両面からアプローチし、酸高密度構造で特異的に発現する高速プロトン伝導機構を解明し、高温・広湿度で高プロトン伝導性を示す電解質材料の設計指針を明らかにしました。このように、世界でも例をみないナノレベルからの新しい発想や化学合成手法を生み出しています。

固体アルカリ燃料電池

本研究室では、プロトン伝導性の電解質を用いたPEFCと並行して、アンモニアやアルコールなどの液体燃料を直接利用する次世代型の固体アルカリ燃料電池についても研究開発を進めています。

エネルギー問題や地球温暖化問題の解決には、化石燃料から再生可

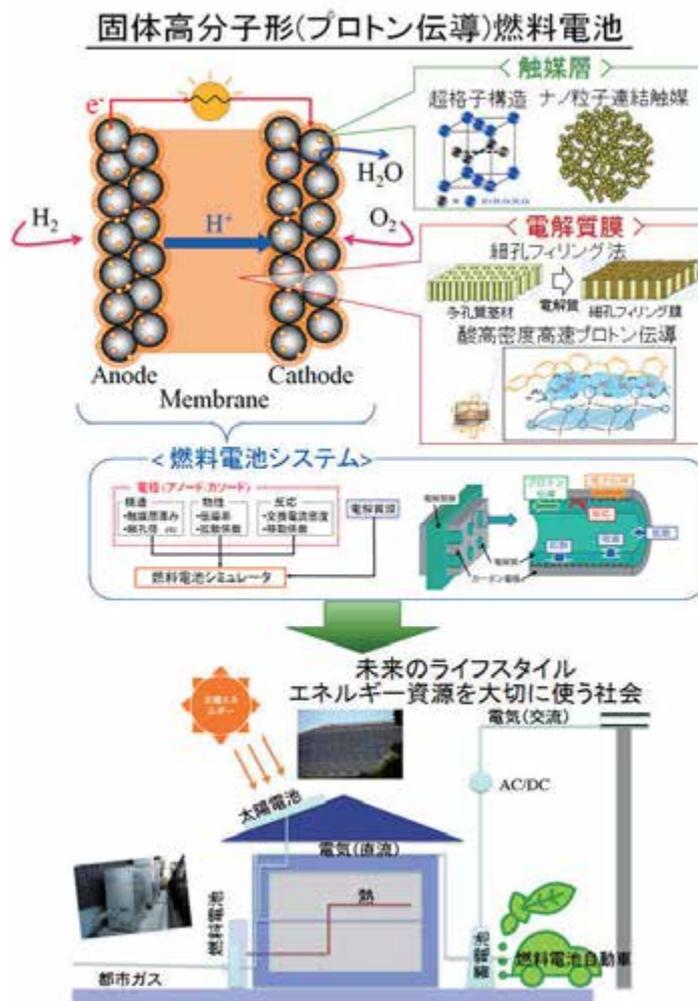


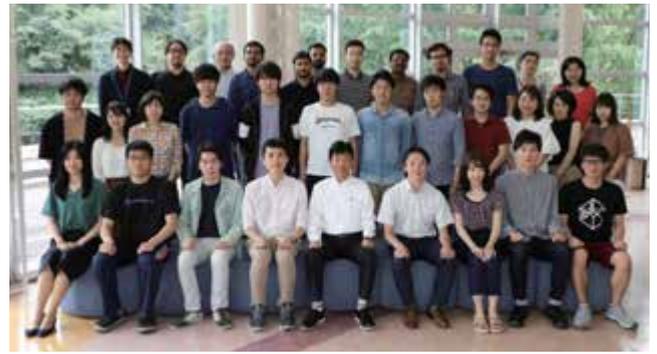
図1 燃料電池における材料機能のシステム設計

能エネルギーへの転換が重要です。例えば、地球上で使用可能な太陽エネルギー量は人類が使用するエネルギー量の100倍近くあると見積もられています。しかし、太陽光や風力を基本とした再生可能エネルギーは、生産地と消費地の場所的隔たりや時間変動が大きく、需給のピークが一致しないため、再生可能エネルギーを貯蔵、輸送できるエネルギーキャリアが必要となります。

最も一般的なエネルギーキャリアである水素は気体であるため、エネルギー密度が低く高圧にする必要があり、貯蔵・運搬が難しいという欠点があります。PEFCでは燃料に水素を用いるため、現状の燃料電池自動車では高価な高圧水素ボンベや、新たな水素スタンドの建設が必要です。従来の自動車で用いられているガソリンと同じように、液体燃料を用いた燃料電池自動車を実現すれば、貯蔵・運搬に関する課題の大半が解消します。しかし、PEFCでは触媒層内が酸環境となり、卑金属が容易に溶解すること



助教
菅原 勇貴
主: A
博士(工学)



から、触媒の選択肢が限定されており、液体燃料の酸化反応に由来するロスを大幅に削減できる触媒は見つかっていません。

プロトンの代わりにOH⁻イオンを逆向きに伝導させるアルカリ燃料電池では、触媒層内がアルカリ環境となり、ほとんどの金属が安定に存在できるため、触媒金属の選択肢が大きく広がります。一方で、アルカリ環境で安定かつ高性能なOH⁻伝導性電解質膜は存在しておらず、固体アルカリ燃料電池の研究は、PEFCに比べて大きく遅れていました。

本研究室では、モデル化合物を用いた実験と量子化学計算により、高耐久性ポリマーの分子設計指針を獲得し、指針に基づいて高耐久性、高イオン伝導性、高燃料透過阻止性を同時に満たす電解質膜の開発に成功しています。また、固体アルカリ燃料電池の利点を活かした極低白金合金触媒や、固体アルカリ燃料電池特有の水移動特性を考慮した膜-電極接合体の研究開発を進めています。

燃料電池技術の普及を早め、地球環境を維持するために、皆さんと一緒に材料システムのご概念を適用し、世界の燃料電池研究をリードする新規概念、新電池開発を行っていきます。

バイオマテリアル

従来の人工材料では分離・反応など一定の機能を定常的に示しますが、生体では時間・環境によって同じ細胞や生体膜が異なる機能を示します。生体自身を人工的に作ることは困難ですが、生体の持つシステムから発想して新しい人工材料を作ることは可能です。未来の人工臓器、薬物送達システム、医薬品合成のために、生体システムを良い見本として材料システム開発を進めています。

我が国が高齢化社会を迎えているなかで、健康上の問題がなく日常生活を送れる期間を延ばすためには、健康な状態を持続する医療の充実が今後ますます求められます。

健康な生活が持続できる社会の構築へ向けて、本研究室では在宅で簡単に健康状態を確認できるバイオセンサーの研究開発に取り組んでいます。生体膜が特定の分子を認識して膜の透過性を制御していることに着想を得て、超分子や生体分子による物質認識機能と温度応答ポリマーによるアクチュエータ機能をナノ多孔体内部で協調的に組み合わせることで、特定の分子だけを認識して膜細孔の開閉を行う分子認識ゲート膜の開発に成功しています。また、材料が自律的に特定物質を認識して捕捉・脱離を行う分離材料の開発にも成功しています。

健康な生活を持続するためには、歩行等を補助する医療用補助具を活用して、寝たきりを避けることも重要です。そこで、人体の近くで用いる医療用補助具などの電源として、安全・安心な燃料であるグルコースなどを用いて発電を行うバイオ燃料電池の研究開発にも取り組んでいます。バイオ燃料電池では、生体内におけるエネルギー変換過程から着想を得て、酵素を触媒に用いることで燃料の化学エネルギーを電気エネルギーへ変換します。生体内で多様な分子の酸化還元反応に携わっている酵素を用いることで、従来の燃料電池では充分検討されてこなかった燃料

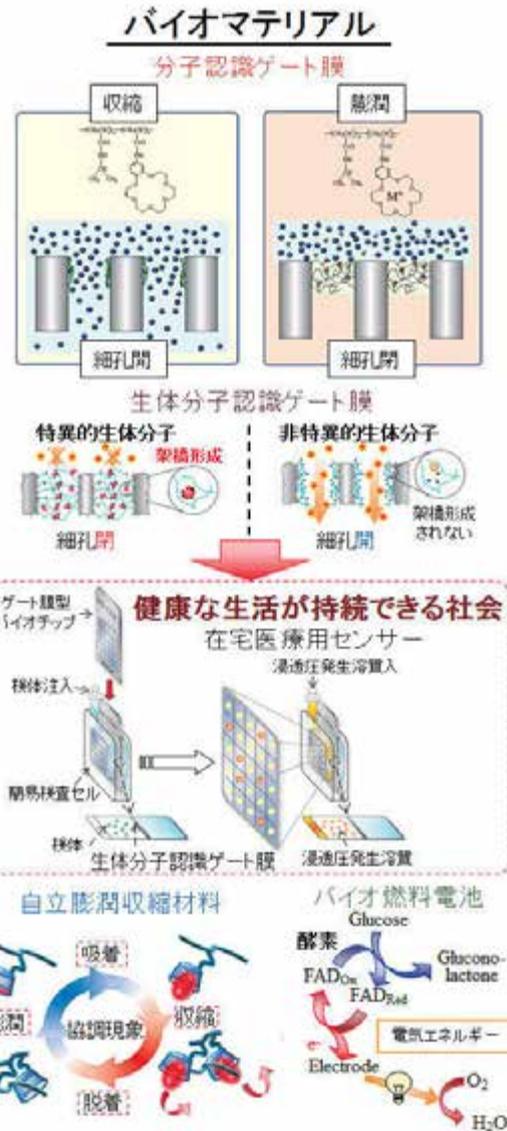


図2 バイオマテリアルにおける材料機能のシステム設計

が利用できます。一方で、バイオ燃料電池は出力密度、特に電流密度が低いことが課題でした。本研究室では、材料機能のシステム設計の考え方をを用いて、従来のバイオ燃料電池における律速過程を解消する電極構造を提案し、実験およびモデル計算から、提案した構造が高電流密度化に有効であることを示しています。

いずれも、まだ始まったばかりの研究領域ですが、材料機能のシステム設計の概念を用い、誰も実現できなかった新しい科学技術分野を開拓しましょう。

山元・今岡研究室

集積金属錯体の精密合成化学：新物質「超原子」創製への挑戦

研究キーワード 精密樹状高分子、 dendroliマー、集積金属錯体、ナノ粒子、クラスター
触媒、量子サイズ効果、機能材料化学、ナノ空間物質、原子数制御



教授 **山元 公寿** 主：A 工学博士
准教授 **今岡 享稔** 主：A 博士(理学)
助教 **神戸 徹也** 主：A 博士(理学)

ナノ粒子は、ナノテク素材の中でも最も重要な材料の一つとして、化学の研究対象としてのみならず工業的にも幅広く利用されており、世界的に激しい開発競争が繰り広げられています。ところが、このナノよりも小さいサブナノメートルスケールは、その構成原子数がわずかに数原子から十数原子となる世界であり、これまでの科学の概念では説明できない現象が発現する未知分野です。その中でも特に、サブナノ粒子を構成する原子の総数や比がある特定の数となるときに、その特性が大きく変化し、元来の構成元素とは全く異なる特性を持つ物質、いわゆる「超原子」となる可能性は、「元素の性質は不変」という従来の化学の概念を覆すものとして、大きな期待と関心を集めています。周期表の中には金属元素が90種類以上存在し、そのいくつかを取り出し、粒子に組み上げる組み合わせは無数にあります。しかしながら、このようなサブナノ粒子を、異種金属原子の原子数を決めて集積、配合したり、さらには、有機合成化学のように意のままに組み立てたりする方法は未だ確立されていません。

我々はこの大きな可能性を秘めた新物質群の自在創製を目指し、種類豊富な金属元素を原料に、原子単位で精密にハイブリッド(複合化)する方法を世界にさがかけて開発してきました。これを発展させて、合成および構造解析や新物性・機能の探索を展開しています。

デンドリマーへの金属の自在集積とプログラミング

デンドリマーは分岐型高分子の中でも最も分岐度が高く、対称性が高い、分子構造と分子量の分布を持たないユニークな特徴を持っています。分子の直径は設計によって変わりますが2~5 nm程度であり、電子顕微鏡(TEM)であれば実際に見ることもできます。この分子は高分子で有りながら厳密に化学構造を決めて合成することができ、きちんと分子設計することが可能です。また性質においても低分子や普通の直鎖高分子には無い多くの特徴を有しており、これを活かした機能材料へ展開を行っています。その中でも私たちの扱っているデンドリマーが持つ大きな特徴は金属の精密集積機能です。

構成原子の数を1原子刻みで決定

Nature. Commun. 2017, 8, 688.

多種の金属を1nm粒子にハイブリッド

Science Adv. 2017, 3, e1700101.

最高の活性をもつ白金 Pt19 の発見

Nature. Chem. 2009, 1, 397.
Angew. Chem. Int. Ed. 2015, 54, 9810.

夢の物質 超原子の創製へ

Nature. Commun. 2017, 8, 2046.

ナノ空間の創出と精密反応場の利用

Nature. 2002, 415, 509.
Nature. Nanotech. 2008, 3, 106.

デンドリマーリアクター法

仮想原子の結合による超分子創製

Science Adv. 2016, 2, e1601414.

元素の選択・原子総数比率・配列…自在精密制御



助教
塚本 孝政
主: A
博士 (工学)



従来の化学の常識を破る興味深い現象として、私たちは2002年に dendrimer 型配位子への段階的な精密金属集積を世界で初めて報告しました (Nature, 2002)。私たちが合成した dendrimer には金属イオンと錯体をつくる配位サイトが多数存在し、さらにその内部には電子的な勾配が自発的に生起しています。これが駆動力になって金属をより内側へ集めようとする性質を有していることが明らかになっています。この手法の大きなアドバンテージは、様々な金属に対して錯形成の当量数を予めプログラムすることで簡単に、単一の集積構造を得られるという点にあります。従来の集積型錯体や自己組織化超分子、微粒子の化学はあくまで最終生成物の安定性に頼って超構造が勝手にできる化学だったわけですが、私たちの方法は当量数を任意に変えることによって連続的に、自在に構造や組成を制御することが可能です。より能動的に物質を設計(デザイン)し、それをプログラムすることで新物質を無数のバリエーションで創り出すことができる点が大きな特徴です。

ナノからサブナノへの展開で見えてきた新しいサイエンス

私たちが知っている金属の性質(電導性・磁性・触媒活性)はあくまでバルク結晶としてのものであり、数個から数十個の原子だけで構成される構造体がどのような性質を示すのかは非常に興味深い問題です。気相中でほんの一瞬生成した「超原子」の兆候とみられる性質が捉えられたという報告は出てきていますが、世界中でまだこれらの物質を実際に手にした研究者はおらず、その素性は依然として明らかにはなっていません。

dendrimer に自在精密集積した金属塩やイオンを化学的に還元あるいは加水分解することで、従来の方法では合成出来ないような単分散で、様々な金属元素の原子数や配合比を精密かつ自在に制御されたサブナノサイズの金属、半導体、酸化物、多元素合金などの新しい粒子を得ることができ、ユニークな触媒活性や量子サイズ効果の発現などが次第に明らかになってきました。

例えば白金は電導性があり、それ自体は目立った磁性は示さず、燃料電池の触媒として利用することができることは知られていますが、ここに12原子の白金で出来ている構造があったとしたらそれはどんなものなのでしょう? その答えを知るためには、実際に12原子の集合体(クラスター)を、他の大きさが混ざらないように選択的に、それなりの量で合成する方法が必要です。

白金は次世代のエネルギーデバイス向け素材として欠かせないものですが、その埋蔵量が限られている「レアメタル」です。その量を劇的に減らすためにはナノサイズまで小さくして表面積を稼がなくてはなりません、残念ながら小さくすると活性が落ちてしまうというジレンマがこれまでありました。しかし、dendrimer 内に集積した白金を還元する方法で12原子のクラスターを選択的に作り出したところ、驚くことに活性が逆に増加し、従来の燃料電池触媒に比べてその酸素還元触媒活性/白金質量が13倍にもなることを発見しました。さらにこの方法を応用して20原子までの白金粒子を一つ一つ評価していくと19原子のものが最も高活性となり、これまで知られていなかった原子数特異的なサブナノ粒子の特性が明らかになりました。

アトムハイブリッド法で挑む次世代元素戦略

原理的には価電子数の異なる各種金属原子を組み合わせることで粒子を構成すればあらゆる性質の人工超原子が構築できると期待されます。2017年、ついにハロゲンのような性質を示すというアルミニウム13原子からなる超原子が、化学的に合成できることを実証しました。これを足がかりとして新物質探索の研究を加速していきます。

現在、プロジェクトのスタッフも合わせ、総勢47名でこの課題に挑戦しています。プロフェッショナルな雰囲気の中で研究者としての実力を磨く環境を用意しています。興味を持たれたら是非、見学にお越しください。



日頃の研究成果を学会発表:
毎年多数の賞を受賞しています

見学歓迎 R1 棟 7 階でお待ちしています!

※説明会以外の日も対応できます。
ご連絡ください。

<http://www.res.titech.ac.jp/inorg/>



ゼミ合宿にて:
勉強したらあとは楽しめます



5年に一度のPacifiChem(ハワイ)には全員で参加・発表

豊田研究室

化学で迫る微量気体の環境動態

研究キーワード 大気化学、地球環境化学、物質循環学、分析化学、安定同位体比、地球温暖化、オゾン層破壊、海洋酸性化



准教授
豊田 栄
主：A 副：E
博士(理学)

温暖化ガス、オゾン層破壊ガスなどの微量気体やその関連物質が地球表層でどのように循環しているのか、化学を道具として解析する研究を行っています。さまざまな環境試料中の微量成分の濃度や安定同位体比を高精度で測定する方法の開発、陸域・大気・海洋などの試料採取と分析、模擬実験による反応機構解析に取り組んでいます。

微量気体の濃度・安定同位体比の分析法開発

大気中には窒素、酸素などの主成分の他にさまざまな微量気体が存在していますが、存在度が少なくても環境に大きな影響を与える成分が多数知られています。濃度を調べることでその分布や正味の生成または消滅速度に関する情報が、安定同位体比($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ など)を調べることでその起源や反応機構、生成・消滅のバランスに関する情報が得られます。そこで、さまざまな環境試料中の N_2O (温暖化ガス、およびオゾン層破壊ガス)、 H_2 (水素エネルギーの利用に伴って大気中濃度が増えるとさまざまな大気化学反応に影響を及ぼす可能性があります)などの濃度や安定同位体比を高感度、高精度で迅速に分析する手法の開発を行っています。市販の分析装置をそのまま利用するだけでなく、ガラスや金属など種々の素材を用いて試料の前処理装置を自作することもあります(図1)。

フィールド観測に基づく物質循環解析

微量気体は土壌、陸水・海水中の無機化学反応や、微生物、植物、動物(人間を含む)の活動などにより生成あるいは消滅し、大気中ではさまざまな化学反応を受けて変質します。また大気と水の間では溶解度に応じて気体の交換も起きています。土壌ガス、河川・湖沼水、海水、離島や北極圏の清浄大気、都市大気、高度30kmまでの成層圏大気などの多様な環境試料を採取して研究室に持ち帰り、微量気体の濃度および安定同位体比を分析します。これらの分布や時間変化から、その循環を解析しています。試料の採取は学外の大学・研究機関の協力を得て行っていますが、できる限り自らフィールドに出て、分析する試料の性状を実感しながら採取するように努めています(図2,図3)。

模擬実験による反応機構解析

環境中ではさまざまな物理過程や化学・生物学的反応が起き複雑に関係しているので、個々の過程を分離して考えることも必要です。気体成分の燃焼・光化学反応による生成・分解過程や、微生物による物質代謝過程などを制御された条件の下で再現して、微量成分の生成・消滅速度を調べたり、安定同位体比の特異的な変化から、反応機構を推定したりする研究を行っています(図4)。

以上の教育・研究活動は、応用化学系山田研究室と協同して行っています。



図1. 大気試料中 N_2O 濃度・安定同位体比分析に用いる自作の自動前処理装置



図2. JAMSTEC/東京大学の研究船を利用した海水試料の採取



図3. JAXA大気航空宇宙実験場(北海道)における大気球を用いた成層圏大気試料採取実験

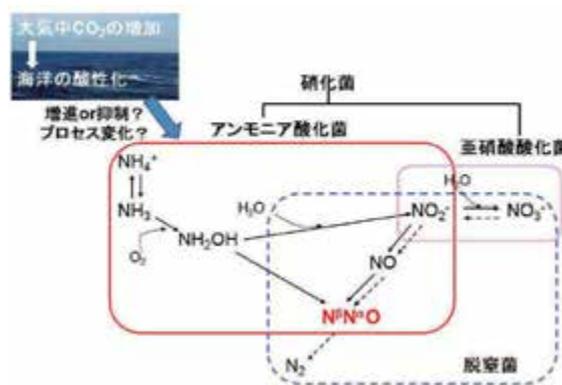


図4. 微生物培養実験による、海洋酸性化が N_2O 生成過程に及ぼす影響の評価

最近の研究成果

Breider, F., C. Yoshikawa, A. Makabe, S. Toyoda et al. (2019), Response of N_2O production rate to ocean acidification in the western North Pacific, *Nature Climate Change*, 9(12), 954-958. Toyoda, S. et al. (2019), Identifying the origin of nitrous oxide dissolved in deep ocean by concentration and isotopocule analyses, *Scientific Reports*, 9(1), 7790. Toyoda, S. et al. (2018), Vertical distributions of N_2O isotopocules in the equatorial stratosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 833-844.

山田研究室

有機分子の起源・反応履歴を明らかにする

研究キーワード 環境有機分子、代謝物、安定同位体組成、分析化学、有機地球化学、疾患診断



准教授

山田 桂太
主：A 副：B
博士(理学)

有機分子を構成する水素・炭素・窒素・酸素等の安定同位体組成は、物理変化・化学反応を受けることによってわずかに変動します。その変動を精密に計測・解析することで、有機分子が受けた物理変化・化学反応や有機分子の起源に関する情報を得ることができます。

本研究室では、有機分子の安定同位体組成変動の計測・解析法を開発し、大気・海洋などの環境中に存在する有機分子から、食品・飲料中、さらには生体・細胞中の有機分子に適用することで、様々な有機分子の起源や反応履歴を明らかにする研究に取り組んでいます。

大気中有機分子の安定同位体組成の計測・解析

大気中には、様々な有機分子が微量成分として存在しています。それらの中でも反応性が高い有機分子は、存在がpptからppmオーダーと極微量ながらも、大気化学反応を通じて大気環境に多大な影響を及ぼしています。大気中の有機分子がどこから来て、どのような大気化学反応に関与し、どこに消えていくのかを、安定同位体組成を計測・解析することで明らかにする研究を行っています。これまで、温暖化ガスとして知られているメタン(CH₄)について、水素・炭素安定同位体組成を計測・解析し、CH₄の発生源の特定や各発生源の相対的な寄与の見積もりを行ってきました。最近では、人体に有害であるだけでなく、大気質や気候に影響を与えるとされる、揮発性有機化合物(VOCs)の発生源や大気反応過程を明らかにする研究に取り組んでいます。

食品・飲料中有機分子の安定同位体組成の計測・解析

食の安心・安全や価値保証の観点から、食品・飲料中の有機分子が天然物か化学合成物か、産地はどこか、を化学的に判別する方法の開発を行っています。

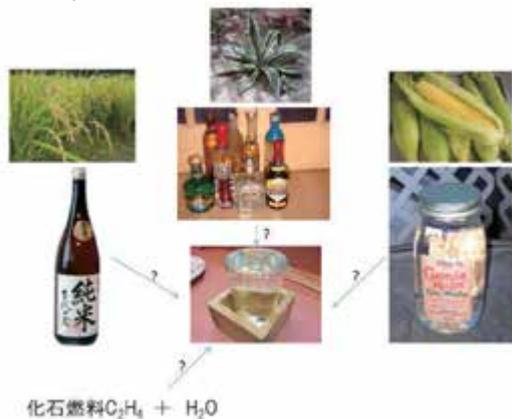


図1. アルコール飲料に含まれるエタノールの炭素安定同位体組成計測から、その原料(米、トウモロコシあるいは石油化学合成など)が詳細に区別することが出来ます。

代謝有機分子の安定同位体組成の計測・解析

血液、尿、呼気などのヒト生体試料には代謝物として様々な揮発性有機化合物(VOCs)が含まれています。それらのいくつかは特定の代謝と関連しており、その代謝に変化を引き起こす疾患や生理学的状態を反映するバイオマーカーとしての利用が期待されています。特に、尿や呼気中のVOCsは、健康状態のモニタリング、病気の発見、治療効果の予測等に対する新たな、非侵襲的な方法を提供する可能性から注目されています。これらVOCsの安定同位体組成の変動を計測・解析することで、代謝の異常を鋭敏に検知できる可能性があることがわかってきました。この代謝異常の検知による、あたらしい疾患診断方法の開発を目指しています。

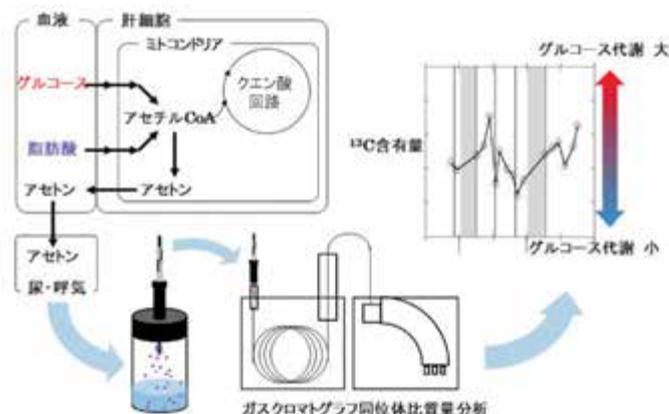


図2. 呼気・尿中アセトンの炭素同位体組成の変動を計測することで肝臓におけるグルコース代謝の変化を検知できる可能性があります。

有機分子の安定同位体組成の計測法開発

複雑な有機分子の混合物から極微量の目的有機分子を取り出し安定同位体組成を計測する方法の開発を行っています。また、これまでは有機分子の全体値を計測(例えば、炭素同位体組成であれば、有機分子を構成するすべての炭素を一まとめにして計測)していましたが、1つ1つの構成元素について同位体組成を計測する方法の開発を行っています。この計測方法を用いることで、より詳細な有機分子の起源・反応履歴情報を読み取ることが可能となります。このような計測技術を基盤にして、上述した様々な環境での有機分子の起源・反応履歴を明らかにする研究に取り組んでいます。

以上の教育・研究活動は、応用化学系 豊田研究室と協同して行っています。

長井研究室

太陽をつくる、太陽光を利用する

研究キーワード 光エネルギー変換材料、有機半導体、可視光光触媒、レーザープラズマ、量子線発生、低密度材料、マイクロ流体デバイス、環境浄化



准教授

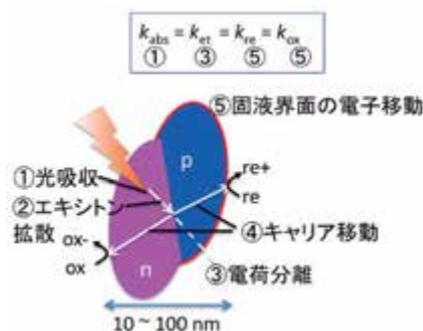
長井 圭治

主: 副:
博士 (理学)

21世紀は光の世紀といわれて久しいが、先端科学技術における光の役割はますます重要になっている。一つは従来の光の利用であり、ナノテクや材料科学の進歩と共に高精度、多機能化が著しく、次々と新概念の材料が生み出されている。またもう一つは新しい光の出現であり、極限物性の探索から応用まで、ここからも新概念が日々生まれている。長井研究室では、広い意味の光エネルギー変換材料の研究に取り組んでゆく。特に、環境・エネルギー応用を視野に入れ、「太陽をつくる。太陽光を利用する。」ために分子集積体を組み立てて、光エネルギー変換材料を構築することを目指す。

■光エネルギー変換有機材料化学

自然に降り注ぐ太陽光や室内の弱い光を利用する光エネルギー変換はエネルギー問題や環境問題に直結する重要な研究課題である。光合成において、励起エネルギー移動反応、光誘起電子移動反応、更に多電子酸化還元反応が一方向的にナノスケールで配置されているが、これを人工的に構築することは極めて困難である。長井研究室では、その基本概念をまねて、高効率な光エネルギー変換のためには、このような一方向的な電子移動と両端に酸化還元反応を空間的に配置することが重要だと考えている。さらにこれら各プロセスの反応速度をマッチさせることが必要である。この観点に立ち、有機半導体p-n接合体太陽電池を、電極を用いずに、気相や水相中において、光反応を調べるところから、研究を始めた。



左: 水中に分散した有機半導体のp-n接合体のナノ粒子。そのままスプレーで壁などに塗布できる。このナノ粒子は流体デバイスでキログラム単位の合成も容易であり、ベンチャー企業に技術移転して、社会実装に向かっている。
右: 高分子膜化した光触媒では、酸化還元サイトを膜の裏表で分離することが可能となった。

膜型にした可視光応答光触媒は、従来の可視光光触媒と異なり、全可視光によく応答することが明らかとなっている。太陽電池との類似点もあるが、いまでは、相違点も多く明らかになり、より効率的にするための設計指針をたてて、研究に取り組んでいる。また、同時に、社会実装を目指して、加工性の向上や、低価格化、スケールアップ合成にも取り組んでいる。

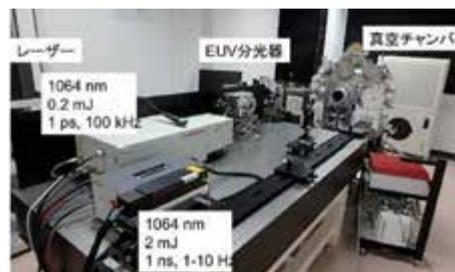
その先には、膜の表裏に酸化還元反応サイトを置いた高分子型人工光合成膜を視野にいれている。電極との組み合わせにより、外部電圧のアシストを受けて、水からの酸素発生や水素発生が可能なことを、世界に先駆けて実証してきた。現在は、外部電圧フリー、化学バイアスフリー、またデバイスとしてシンプルな構造の高効率な光エネルギー変換素子の構築を目指している。

極端紫外線をコンパクトに発生

高出力レーザーは、出力(=強度×繰り返し数)の増加と小型化の面で日進月歩であり、市販化も進んでいる。こうした高強度の光は、穴あけやパターン形成という加工ではなく、高温高密度のプラズマ状態の形成とそこから発生する量子線発生に应用可能である。

この考え方が最初に実用化されたのは、半導体産業における、微細加工技術である。レーザープラズマ方式と呼ばれ、ここでは、レーザー光を物質に集光し吸収させ、加熱させてプラズマを作る。次世代半導体リソグラフィでは、400W程度の波長13.5nm(EUV、極端紫外光)の光源が求められている。長井は、大阪大学在籍時に、低密度スズにレーザーを照射することで著しく13.5 nmの発光が高効率化するという、この基本特許を出願し、権利化された。現在の次世代実用光源試験機で採用されている。しかし、一台100億円を超え、大学の研究室で購入するのはほぼ無理である。

長井研究室では、極端紫外線を発生できるレーザーと計測装置を備えており、簡便に13.5nmの光を発生させることができる。学生が合成した材料に、レーザーを照射することにより、実際に13.5nmの発光が増加する様子が見られている。現在は、小型の極端紫外光源化するために、10Hz以上で供給する実験に注力している。世界的にも類をみない独自の材料と方式で発生させている、我々は、13.5 nmの光源を、半導体産業への応用だけでなく、基礎研究に利用することも目指している。



次の新しい光、量子線の発生

上に述べたように、レーザーの大出力化と相まって、極端紫外線だけでなく、さらに高エネルギーの光や量子線の発生を行うことが可能である。材料化学の視点から、その発生の高効率化と安定運転化に取り組み、世界各国の次世代の量子線源の開発に寄与してゆきます。

脇研究室

電気デバイス材料をナノレベルで構造制御する

研究キーワード カーボンナノチューブ、ナノ構造、構造制御、燃料電池、リチウムイオン電池、太陽電池、電極触媒、新エネルギー技術開発



准教授

脇 慶子

主: 副:
博士(工学)

私たちの研究室では、化学的な手法を用いて、カーボンナノチューブなどの材料をナノレベルで構造制御し、燃料電池、リチウムイオン電池、太陽電池などの電気化学デバイスの性能向上を目指しています(図1)。従来の方法論などに捉われずに、教員・学生一同で頭をフルに回転させ、新規電池電極材料の創製を目指しています。新しい世代・日本・世界のために、エネルギー・環境・資源問題の解決に少しでも貢献できるように頑張っています。



図1 脇研究室の研究範囲

多層カーボンナノチューブ(MWCNT)の構造制御

・燃料電池における非白金系電極触媒の開発

燃料電池とは、水素と酸素が結合して水になるときに生じるエネルギーを電気エネルギーとして取り出すことができるものです。化学エネルギーを直接電気エネルギーへ変換できることから、高効率な発電が可能なデバイスとして期待されています。特に私たちの研究室では、固体高分子型燃料電池(以下、PEFC)のカソード電極における高活性な電極触媒の開発に取り組んでいます。PEFCは自動車や携帯電話など私達に身近な製品への応用が期待されていますが、コストの高さが問題となっています。そこで、高コストの原因である白金触媒に代わるものとして多層カーボンナノチューブ(以下、MWCNT)に注目し、その表面構造を変化させることで材料の高活性化を試みています。本研究室で開発した新規手法を用いて細孔などの欠陥構造を持つMWCNTという炭素の新構造体を実現させました(図2)。一般的に炭素のみでは触媒活性がほとんどないと考えられていますが、この欠陥構造の形成が高い触媒活性をもたらすことを発見しました。この新規材料の電気化学測定を行い、表面反応のメカニズムを検討しながら電極材料の高性能化を図っています。

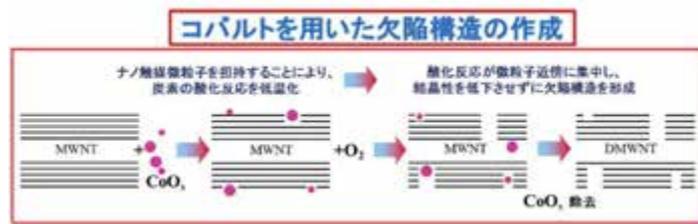


図2 欠陥構造作製プロセス

・リチウムイオン電池における電極性能の向上

リチウムイオン電池とは化学電池の一種であり、充放電を繰り返す行うことが可能な電池として、今後電気自動車や定置用電源の普及に伴いさらなる性能向上が期待されています。本研究室ではリチウムイオン電池の炭素材料としても注目を集めているMWCNTを用いて、構造制御を行い電極材料とすることで電極性能を研究しています。リチウムイオン電池の負極活性物質として、欠陥構造を持つMWCNTを用います。充放電容量の向上を目指すだけではなく、構造制御した材料であることで、これまでに十分に理解されていなかった電池の反応メカニズムを解明することを目指しています。更に、この新規材料の構造や電気化学特性を理解しながら、可能な分野を探索しています。

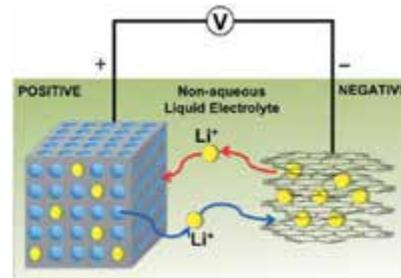


図3 リチウムイオン電池の動作原理

太陽電池の電子移動過程の研究

太陽電池は太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する電気デバイスです。高い変換効率の太陽電池の代表格としては、シリコン系太陽電池が挙げられます。しかし、製造工程が難しく、高コストであるといった欠点が挙げられます。そこで、シリコン系太陽電池よりも低コストで製造が可能であると期待されているのが、色素増感太陽電池やペロブスカイト太陽電池です。これらの新規の太陽電池は、低コストで高効率を実現することを期待されています。そこで、本研究室では、基礎的なメカニズムである光励起子の挙動を明らかにすることで、さらなるパフォーマンス向上を目指しています。

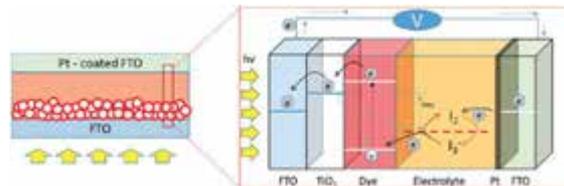


図4 色素増感太陽電池の構造とメカニズム

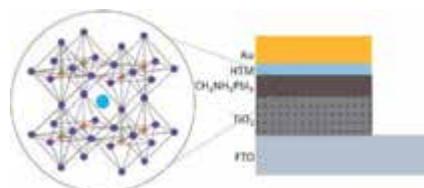


図5 ペロブスカイト構造とペロブスカイト太陽電池の構造

和田研究室

機能性ナノ粒子（コロイド）を創り、光学的に利用する

研究キーワード ナノ粒子、コロイド、蛍光、アップコンバージョン、長残光、レーザープロセス、がん治療、バイオイメージング、太陽電池、発光ダイオード



准教授
和田 裕之
主: 副:
博士(工学)

私達の研究室では、光を用いて各種ナノ粒子を創製し、この光学特性を用いた各種応用を検討しています。「光」は今後の重要な研究分野の1つとして注目されています。同様に興味深い研究対象である「ナノ材料」とこの「光」の融合領域の研究を進めています。

これまでこれらの分野でのバックグラウンドがなくても、興味を持っている方を歓迎します。このため、セミナーによる基礎学力の向上、ディスカッションによる思考力の養成、学会発表等によるプレゼンテーション能力の習得をサポートします。

ナノ粒子の創製:液中レーザープロセス

ナノ粒子の作製方法には様々なものがあり、近年開発された手法に液中レーザーアブレーション法があります。これは図1に示すように、液体中に配置したターゲットに集光したレーザー光を照射することによってナノ粒子分散溶液(コロイド)を得るもので、簡便であることから各分野への展開が期待されています。私達はこれまでこの方法で各種ナノ粒子を作製してきました。ナノ粒子が無機物の場合

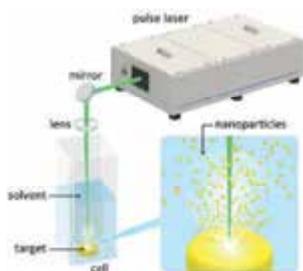


図1. 液中レーザーアブレーション法

は一般的な手法である溶液法に比べて、高い結晶性のナノ粒子が得られることが分かっています。有機物の場合は、難溶性の物質でもナノ化により安定な懸濁液が得られ、医薬品等への応用が期待されています。

別のレーザープロセスに液中レーザー溶解法があります。これは、ナノ粒子分散溶液にレーザー光を照射して凝集体を溶解・固化することにより結晶性の球状ナノ粒子を生成するもので、図2の様な結晶性の球状ナノ粒子が作製でき、各分野で応用が期待されています。

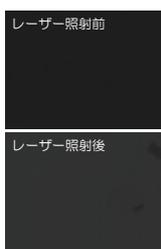


図2. 液中レーザー溶解法

低侵襲性がん治療:光線力学的療法

患者への負担が少ないがん治療法の1つに光線力学的療法があります。これはがん細胞に投与した光感受性物質に対して体外から可視光を照射することによりがん細胞を死滅させるものですが、可視光の生体透過性の低さから大きながんを治療できません。

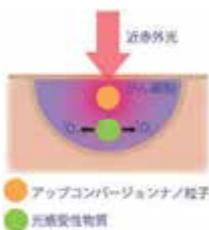


図3. 新規がん治療法

そこで、アップコンバージョンナノ粒子と光感受性物質に生体透過性の高い近赤外光を照射することが検討されています(図3)。私達は、アップコンバージョンナノ粒子を作製し、培養がん細胞(図4)を用いてがん治療の効



図4. 培養がん細胞

果を確認してきました。このナノ粒子は結晶性が高いため、高い発光特性を示すことが分かっています。

バイオイメージング:光音響イメージング

生体内をイメージングする方法の1つに光音響イメージングがあります。これは、図5に示す様に、生体内に投与した造影剤にパルスレーザー光を照射して、光熱吸収により造影剤を膨張・収縮させることにより超音波を発生させ、複数の検出器により画像化するものです。このレーザー光に生体透過性の高い近赤外光を用いると、生体内の深部まで解像度の高い画像が得られます。私達は近赤外光を吸収する各種中心金属を有したフタロシアニンやナフトロシアニン等のナノ粒子を作製し、その基本的な光学特性の評価、および、マウス等を用いたバイオイメージングのための光音響信号計測の研究を行っています。



図5. 光音響イメージング

次世代太陽電池:量子ドット増感太陽電池

広く普及しているシリコンのpn接合型の太陽電池に比べて、半導体ナノ粒子を用いた湿式の量子ドット増感太陽電池(図6)は、作製法が簡便であるだけでなく、光電変換効率が著しく高い可能性があり、次世代太陽電池として期待されています。私達はシリコ

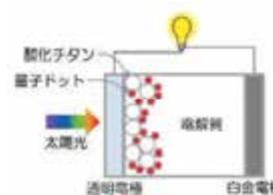


図6. 量子ドット増感太陽電池

ンや化合物半導体InPのナノ粒子を作製し、これらにより量子ドット増感太陽電池を作り、ソーラーシミュレータを用いてナノ粒子の効果を確認してきました。

白色発光ダイオード:黄色蛍光体

白色発光ダイオードは、ノーベル賞で話題となった青色発光ダイオードと黄色蛍光体を組み合わせて疑似的に白色光を発光する素子で(図7)、近年、照明やディスプレイのキーデバイスとして注目されています。青色発光ダイオードからの光は黄色蛍光体を通過するので、散乱損失により青色光が減衰してしまいます。一般に、散乱体の粒径が小さくなる程、散乱損失を低減できるため、青色光を有効に利用するために黄色蛍光体のナノ粒子化が広く研究されています。私達は代表的な黄色蛍光体である $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ のナノ粒子化を行い、発光特性向上の研究をしています。また、演色性向上のために、赤色や緑色蛍光体のナノ粒子化も研究してきました。

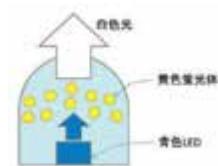


図7. 白色発光ダイオード

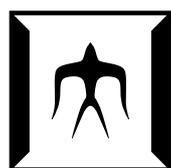
MAP

- 大岡山キャンパス 東京急行大井町線-目黒線（大岡山駅下車徒歩1分）
- すすかけ台キャンパス 東京急行田園都市線（すすかけ台駅下車徒歩5分）
- 田町キャンパス JR山手線-京浜東北線（田町駅下車徒歩2分）



すすかけ台キャンパス





Tokyo Tech

東京工業大学

物質理工学院 応用化学系 (境界領域化学)

〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259

TEL 045-924-内線番号 (P.1参照)