

前田大光教授（前2列目左から2人目）と羽毛田洋平助教（右隣）と研究室の皆さん

# 新しい機能性を持つ 次元制御型集合体の 開発にチャレンジ

正・負の電荷種の並びを自在に制御した材料設計。  
粘り強さを武器に、羽毛田洋平さんは、  
誰も実現したことのない次元制御型集合体の機能発現に挑む。

立命館大学  
生命科学部応用化学科 助教

## 羽毛田洋平

はけた・ようへい 1984年、長野県生まれ。  
立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程  
修了（博士（理学））、日本学術振興会特別研  
究員、旭化成㈱、立命館大学専門研究員を經  
て、2017年4月より現職。2011年に井上研  
究奨励賞、2017年に日本化学会第97春季年  
会優秀講演賞を受賞。「子どもの頃は勉強よ  
りも、昆虫や水晶とりばかりしていた」とか。  
趣味は登山とキャンプ。登山を通じて知り合  
った裕子夫人と2017年に結婚した。

「第35回松籙科学技術振興財団研究助成 受賞」

## 最初に目指したのは人工細胞？

——羽田さんは、松籟科学技術振興財団の第35回（2017年度）の研究助成を受けています。立命館大学の方としてこの助成を受けられるのは3人目となるようですが、そもそも立命館大学を選んだ理由は？

小さい頃から生物に興味がありました。高校時代に細胞はいろいろな分子の集合体から成り立っていて、高度な機能を発現していることを学び、大学では細胞の勉強をしたいと考えました。そこで、微生物の多様な機能を実社会へ応用する研究に力を入れていた立命館大学理工学部（当時）へ。大学入学後、勉強して理解を深めるうちに、細胞は分子の集合体だから、分子の集合化を人工的に制御できれば細胞をつくることのできるんじゃないかと、ふと考えました。人工細胞という、夢物語のようなことも想像していました（苦笑）。でも、そのためには分子の設計、合成や分子間の相互作用を徹底的に理解する必要があると知り、今の研究テーマの分野に進んでいきました。

——人工細胞はもう諦めたのですか。

高度な機能を示す細胞を一からつくることはあまりにも複雑なので、まずはもっとシンプルな分子の集合体を用い、機能を発現させるということが現在の基本的な考えです。生体には学ぶべきことがたくさんあるので、常に参考にしながら展開を考えています。

——人工細胞をつくれるようになったら、自分の設計した生物ができるのでしょうか。

細胞を模倣した、単純な組織構造をつくれたとしても、実際に機能を発現させるのは、とても難しいことです。だから、まずはその前段階の、

どうすれば分子がこちらの意図通りに並び、そして、それらがどのような機能を発現するか、そこを追究しています。分子間相互作用をいかに制御して機能を発現するか、超分子化学分野のひとつのトピックです。

## 電荷種分離配置型集合体と電荷積層型集合体

——では改めて、今の研究についてお話しいただけますか。

現在は、立命館大学前田研究室に所属し、新しい $\pi$ 電子系イオンの合成と、それらからなる次元制御型集合体の創製、機能発現が主な研究テーマです。材料の合成から集合体の形成、物性評価まで幅広く行っています。具体的には、新しいイオンを設計・合成し、それらの集合体における特徴的な配列に依存した機能の発現を研究しています。たとえば、塩化ナトリウムの結晶構造では、プラスとマイナスのイオンが規則的に並んでいます。一方、人工的に合成した有機イオンでは、化学合成による修飾を加えることで、液体やゲルをはじめとしたさまざまな形態へと変化します。例として、イオン液体は工業的にもさまざまなところで使われています。私たちは特に $\pi$ 電子系からなる新しいイオンを設計・合成し、それらの基礎物性を明らかにし、適切な条件下で集合体をつくることで、たとえば、電気伝導性や強誘電性といった機能を発現させることに挑戦しています。

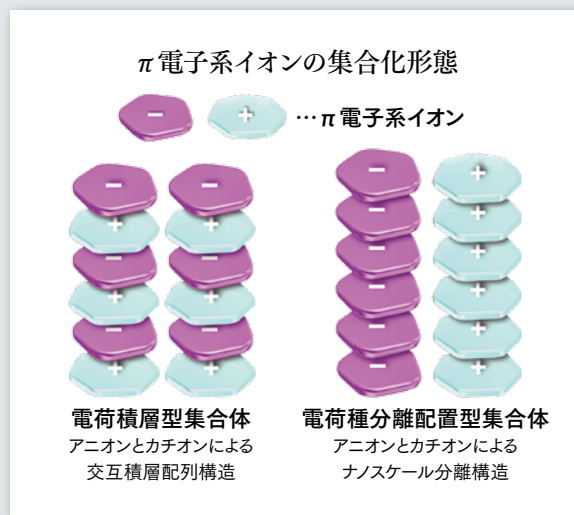
——イオンをつかって、その並び方を変える、ということですか。

そうですね。平面状 $\pi$ 電子系のアニオンやカチオンは静電的な相互作用

のはたらきで交互に積層しやすく、規則的に並びます。このような異なる電荷種が交互に並んだ構造を電荷積層型集合体と呼びます。一方、アニオンとカチオンがそれぞれ分離して配列した構造の形成も可能で、私たちはこれを電荷種分離配置型集合体と呼んでいます。すなわち、静電的相互作用を基本として、適切な分子間相互作用を組み込むことで、電荷種の並びを制御することができます。こうした電荷種の配置が明確で、秩序的な構造からなる液晶・ゲルをはじめとした次元制御型集合体の報告例は世界的に見ても多くはありません。

——それを材料として使うと何ができるのですか。

たとえば、 $\pi$ 電子系イオンからなる電荷種分離配置型集合体の場合、アニオンの配列では正孔が流れやすく、カチオンの配列では電子が流れやすいという性質を示すことが予想されています。一般的な電荷的に中性の分子では、正孔と電子の両方を効率的に流すのは難しいとされますが、電荷種分離配置型集合体のようにアニオンとカチオンが共存し、かつそれぞれ分離して秩序的に集合化することで、正孔と電子の輸送をひとつの材料で同時に発現する両極性型半導体材料として機能することが



期待されます。こうしたイオンペア集合体の構成ユニットの構造に特有の性質を利用した機能の発現例はこれまでほとんどありませんでした。

## 有機半導体材料としての利用を見込む

—つまり、世界初ということですか。

そうですね。ただ、実際には私たちもこのような集合体の形成を完全には制御できていません。構成ユニットを一つひとつ設計して、集合体構造と機能性の関係性を理解し、材料を創製する指針をつくらうとしていくところです。

—そういう材料ができたとしたらどういう場面で使われると想定できますか。

たとえば、有機半導体材料ですが、設計次第では適切な条件下において流動性を持たせることができるので、たとえば小さなすきまにペースト状の材料を流し込んでいくことができ、その場で分子が規則的に並ぶことで電気伝導性を示す集合体を形成します。わざわざ加工して接着させる必

要がないので、工程が省略できるようになるでしょう。次世代の電気伝導性の材料としての利用が見込めます。

一方、電荷積層型集合体は、外部から集合体に電場をかけたとき、アニオンとカチオンのペアの間に双極子が誘起されることから、それを規則配列することで強誘電性材料として、たとえばメモリー機能の発現が可能になるとみています。そういったことがこれらのイオンペア集合体のモデルでは可能になるのです。

—機能性材料の創製が効率的になる可能性もあるのですね。

異なる機能を持つ正電荷種と負電荷種からひとつのイオンペアを形成するため、それらの組み合わせによって多様な機能性材料の創製が可能であることも利点です。つまり、10種類の負電荷種と10種類の正電荷種から形成されるイオンペアは理論的には100種類になります。要するに、ひとつのイオンペアに複数の機能を付与できるので、機能の細かなチューニングや、使用する材料の量を少なくすることができるかもしれませ

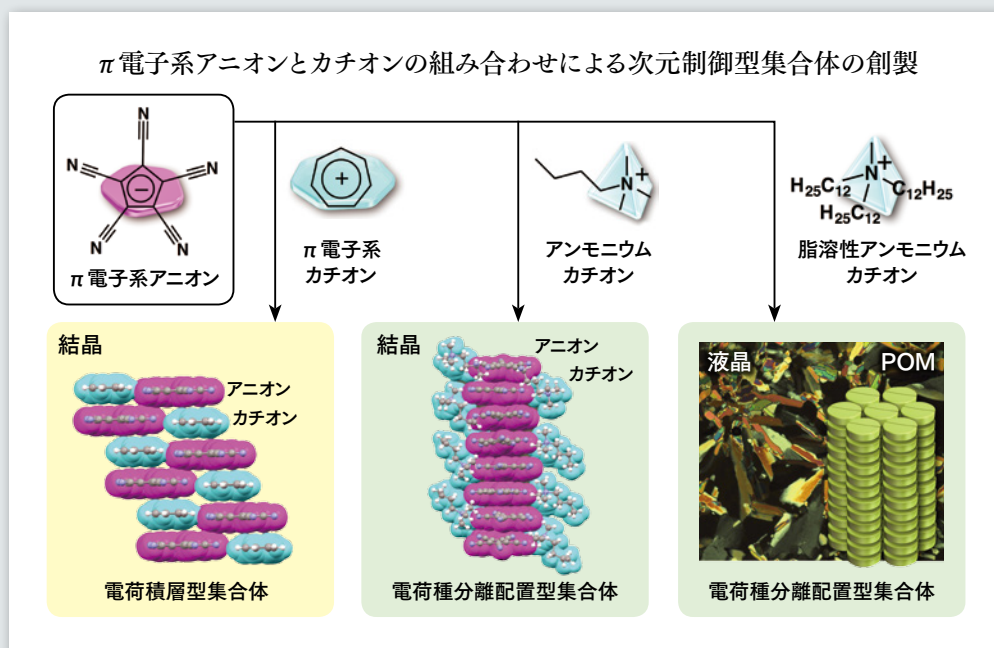
ん。最近、こうした機能を有するイオンペア集合体はいくつか研究が行われているのですが、分子の並び方を緊密に制御することは容易ではありません。構成ユニットの構造にこだわり、アニオンとカチオンの間にはたらく静電的相互作用を適切に集合体に組み込むことで、イオンを規則的に並べることができます。これによって、たとえば、加熱して集合体を融かして流動性を持たせても、冷却し固まると自発的に特徴的な組織構造を形成することができるようになります。

## 聞く耳持たない分子たち

—現在の研究では、電荷積層型集合体と電荷種分離配置型集合体のどちらにウエイトを置いているのですか。

ちょっとした分子構造の違いで集合体構造は変わりうるので、どちらの集合体にも力を入れています。しかし、異種電荷種の交互積層構造からなる電荷積層型集合体は分子設計次第である程度つくることができるのですが、分離配置型集合体は極めて難しい。学会などにおいて頻繁に

他の先生方から「そんな構造は無理なのでは？」などと指摘されます（苦笑）。たとえば、磁石のN極同士が反発するのと似ていて、同種の電荷は静電的に反発して近づかないのです。しかし、これまでの研究によって、異種の電荷が適切な配置にあると、積層方向における静電的な反発を緩和できることがわかっており、これをうまく利用することで電荷種分離配置型集合体の実現できそうな手ごたえを感じています。実際に、これまでに発表した論文の中で、 $\pi$ 電子系アニオンに適切なカチオンを組み合わせることで、同



適切な形状や電子状態のアニオンとカチオンの組み合わせによって電荷積層型集合体や電荷種分離配置型集合体の形成が可能となる

電荷種のみでの配列を達成し、高い正孔輸送特性を示すことを明らかにしました。電荷種分離配置型集合体を自在につくる分子設計が確立できれば、さまざまなエレクトロニクス材料の創製に役立つと思います。でも、目的とする構造になってほしいとこれまでの経験をフル活用してあれやこれやと分子設計するのですが、うまくいかないことが多いのが実情です。分子はそう簡単には言うことを聞いてくれません。だからおもしろい。

——完全な電荷種分離配置型集合体からなる材料ができるとしたらいつ頃になる見込みなのでしょう。

うーん……。

——できるという可能性は見えてきているのですか。

もちろん、見えています。さまざまなイオンの設計・合成を行い、組み合わせを実施し、得た材料の構造と機能の解析を進めています。登山でいえばまだ3合目か4合目といったところでしょうか。

——いつ頃からこのテーマの研究をされているのですか。

今の研究は、立命館大学の学生のと組み取り組んでいたアニオン応答性分子の集合体に関する研究のエッセンスを発展させたものです。そういう意味では軸となるテーマとしてだいぶ長く取り組んでいることとなりますね。もちろんこのテーマの他にも複数の研究を手がけています。

## 粘り強さは負けない

——分子設計・合成と解析を繰り返す、根気のいる作業ですね。

そうですね。でも、その過程で新しくわかってくることがとても多くあります。特に、 $\pi$ 電子系イオンを

形成する方法としては、電荷的に中性の $\pi$ 電子系のイオン集合体を使う方法と、もともとが $\pi$ 電子系イオンであるものを用いる2つの方法があります。アニオンとカチオンをそれぞれ合成し、形成したイオンペアの中には、カラフルな色彩や発光特性を示すものもあります（溶液発光のデモンストレーションを示しながら）。他にも、イオン添加刺激に応答する分子を用いて、刺激応答により発光特性の変化と合わせて、ゲルからゾルへと溶解する集合体に関する研究も行っています。

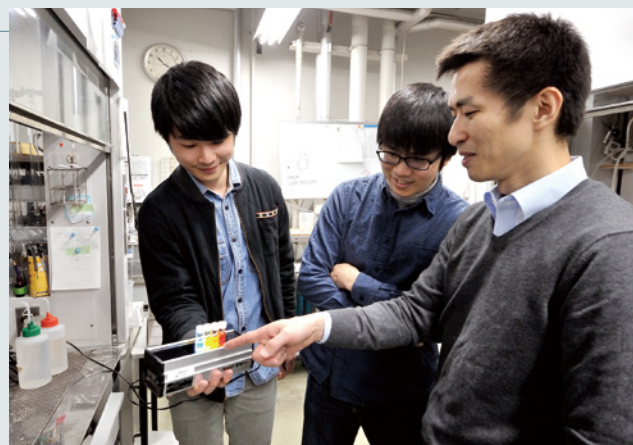
——博士課程を修了し、博士研究員として勤務されたあと一度、民間企業に就職され、そのあとまた大学に戻られていますね。

大学での研究とは異なり、より具体的なものを実社会に送り出すには企業はとてもパワフルだと感じていたこともあり、企業へ行き、3年間にわたり研究開発の仕事に従事しました。仕事はとてもやりがいがありおもしろかったのですが、機能性材料の開発において、分子レベルの基礎的理解をさらに深める必要があると感じ、大学での研究を再開したいと考え、復帰しました。

——復帰においても母校の立命館大学を選ばれたのですか。

環境をよく知っているということがありますが、何よりも学生の頃から指導していただいた前田先生がいっぱいいます。有機化学・超分子化学を研究している研究室は他の大学にもありますが、分子にこだわり、幅広い研究を活発に展開しています。ここでしかできない研究を大いに発展させたいと思います。

——研究者として羽毛田さんの強みは



どういふところにあるとお考えですか。

諦めない粘り強さでしょうか（笑）。これは合成化学者に限らず研究者全般に大事な要素のひとつだと思います。一方で、諦めが悪いという言い方もできますが、大事なものはバランスでしょうか。あと、合成した分子がどういふ集合体構造をつくるかイメージするのも負けれません。

——研究において大切にしていることは？

日中は研究室で学生と一緒に過ごす時間が多く、研究の議論を行っています。このとき、学生との会話の中にあるちょっとした情報も漏らさないように心がけています。すべてのネガティブなデータにも研究を進めるヒントが隠れているので、徹底的に話を聞きます。また、他の人が発案しないような新しい実験を組み込みたいといつも考えています。

——最後にこれからの抱負をお聞かせください。

これまでではどちらかという結晶性のある硬めの材料を扱ってきましたが、もう少し柔らかい材料に展開したいと考えています。将来的には、ポリマーをはじめとした共有結合性材料を凌駕する高機能超分子材料を世の中に提供したいです。分子集合体からなる柔らかな細胞が、これだけ高度な機能を発現しているのですから、きっと何か独自の展開があると考えています。