

TAGEN FOREFRONT 08

多元研

KUMIGASHIRA, Hiroshi

OMATA, Takahisa

KASAI, Hitoshi

HIBARA, Akihide

MIZUKAMI, Shin

YIN, Shu

MURAMATSU, Atsushi

最前線

いま持続可能な社会づくりへ IMRAM-東北大学多元物質科学研究所

環境問題、エネルギー問題、地球温暖化…。我々は今、地球規模で解決しなければいけない問題に直面しています。東北大学多元物質科学研究所は、まさにこれらの問題を解決し、持続可能社会を実現することを目指しています。将来世代へ負の遺産を残さない「持続可能な社会(Sustainable Society)」の実現。積み重ねる様々な研究により、少しずつ未来へ歩みを進めていきたいと考えています。

Processing

Sustainable Science and Engineering
Process and System Engineering



東北大学 多元物質科学研究所

IMRAM
INSTITUTE OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH
FOR ADVANCED MATERIALS TOHOKU UNIVERSITY

Materials

Inorganic Material
Organic- and Bio-materials

Measurements

Advanced Microscopy
and Spectroscopy



CONTENTS

東北大学多元物質科学研究所 所長あいさつ

03

FOREFRONT REVIEW

04

01 先進的な解析・制御技術から
酸化物ナノ機能創成の新たな未来へ

組頭 広志 教授

05

02 社会の仕組みを変える力を持つ材料
その開発への道筋を探求する

小俣 孝久 教授

11

03 独自の「有機ナノ結晶」の創製技術から
新しい薬剤開発の可能性を拓く

笠井 均 教授

17

04 社会とシームレスにつながる
ナノ・マイクロ分析法の礎を築く

火原 彰秀 教授

23

05 センシング技術の開発とともに
生きた細胞の機能に迫る

水上 進 教授

29

06 ソフトケミカルプロセスによる
機能性環境応答材料の創製

殷 澍 教授

35

07 身近な生活の中の探求から
最先端ナノ材料のサイエンスへ

村松 淳司 教授

41

多元物質科学研究所が推進する研究

47

編集後記

50



多元の可能性が 新しい世界を拓く



東北大学多元物質科学研究所 所長

村松 淳司

MURAMATSU, Atsushi

東北大学 多元物質科学研究所(以下、多元研)は、従来の区別にとらわれない、物質・材料を含む、あらゆる“もの”を多元的に研究する、特徴ある研究所として2001年4月に誕生しました。19年が経過し、おかげさまで、一般社会に次第に認知されつつありますが、その礎は、創立1941年以来受け継がれる、選鉱製錬研究所(素材工学研究所)、科学計測研究所、非水溶液化学研究所(反応化学研究所)のスピリットであり、間もなく80年を迎える伝統の力を、ひしひしと感じます。先人たちが切り開いてきた多くの研究分野と、輝かしい研究成果が、漏れることなく、多元研に引き継がれており、過去から未来への時間軸の中で、研究所のあちこちで、時空を超えて融合していく姿を見ることができます。

研究所内だけでなく、東北大学内外との連携や交流も活発であり、キャンパス内に建設が予定されている次世代放射光施設の実現や利活用に向けた活動の一翼を担っています。理学、工学、医学、生命科学、農学といった幅広い分野の研究者とのグローバルな連携により、新たな研究シーズの誕生も期待されています。

日々刻々と成長していく多元研では、資源から最先端

材料までの垂直方向、そして無機、有機、バイオなどあらゆる物質・材料を含む水平方向の両機軸を、ハイブリッドにカバーした、独創的で斬新な研究が、数多く行われています。そうした多元研の研究者の横顔をシリーズで紹介する「TAGEN FOREFRONT」では、今回も最先端研究の一端に触れていただけます。

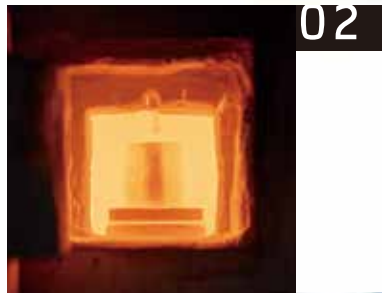
2011年3月の東日本大震災から9年が経過しました。多元研は物質・材料における東北復興への貢献と、未来を背負う新進気鋭の優秀な研究者の輩出を、今後も積極的に担い続けます。

多元研ブランドの浸透を目指す「TEAM TAGEN」も、教職員、研究者、学生らが一丸となって、さらに展開していきます。

今後とも、変わらぬご支援を賜りますようお願い申し上げます。



FOREFRONT REVIEW





FOREFRONT REVIEW

多元物質科学研究所、組頭広志教授の研究室は、2018年4月に開設されました。当研究室では、酸化物などからナノ構造を「つくる」技術とともに、ナノ領域で発現する電子・化学状態を「みる」技術とを高いレベルで融合することで、新たな機能をもつナノ物質の創製を目指しています。このため2つの技術を組み合わせた複合装置を開発し、先駆的な発見への取り組みを進めています。



先端的な解析・制御技術から 酸化物ナノ機能創成の新たな未来へ

性質が一変したり、多彩な物理現象を示したり、何が起こるか予測しがたい酸化物の物性研究において、酸化物を原子レベルで制御して「つくり」その中の電子の振る舞いを放射光を用いた先端計測技術を使って「みる」ことができれば、新しい機能の探索と発見への道筋により確かな明かりを照らすことができるはず。そうした組頭教授の研究アプローチのあり方は、これまでそれぞれの段階でひとつひとつ模索と検証を積み重ね、歩を進めてきた研究キャリアに深く根差しているように思われます。

東北大学において理学研究科物理学専攻で博士号を取得して、研究者としての道をスタート。学生時代は、計測装置の開発と、開発した装置を用いた試料の分光測定・解析に携わりました。あるとき、結晶作製を自ら行う機会があり、「きらきらと光る単結晶をつくったときは感激した、また自分でつくった試料で面白い結果が得られたときの喜びが格別だった」といいます。

ものづくりの面白さに惹かれ、さらに踏み込んで計測結果に基づいて物質を設計するのが面白そうだと感じて、化学の分野に進みました。東京大学工学部応用化学科の時代には、酸化物薄膜を作製する装置と東北大学で培っていた光電子分光装置とを組み合わせた研究に取り組みます。さらに放射光実験の最先端施設、高エネルギー加速器研究機構(KEK)フotonファクトリー(PF)では、測定技術の追求とともに装置開発に携わり、強相関電子に関わる世界初の実証を達成。その後の研究飛躍への大きな基盤となりました。

そして現在、東北大学多元物質科学研究所において、組頭教授はさまざまな自作装置と拠点施設とを自在に使いながら、新しい物理化学概念の発見や応用につながる研究のブレークスルーを目指す追求を続けています。

多元物質科学研究所
有機・生命科学研究部門
ナノ機能物性化学研究分野 教授

組頭 広志

KUMIGASHIRA, Hiroshi

1972年福井県生まれ。1995年東北大学理学部物理学科卒業、2000年同理学研究科物理学専攻博士後期課程修了(理学博士)。2001年東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻助手、2004年同講師、2007年同助教授、2007年同准教授、2011年高エネルギー加速器研究機構(KEK)物質構造科学研究所教授、2013年東北大学大学院理学研究科物理学専攻委嘱教授(併任)、2018年KEK物質構造科学研究所特別教授(併任)、東北大学多元物質科学研究所教授。所属団体/日本放射光学会 評議員、応用物理学会 機能性酸化物グループ幹事。受賞/第3回日本物理学会若手奨励賞など。
<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/kumigashira/html/index.html>

酸化物は高温超伝導や金属・絶縁体転移など多彩な物理現象を示すことで知られています。



たり、多彩な機能物性を示すことで知られています。

劇的な性質の変化が期待される強相関電子系

1986年に発見されノーベル賞の対象となった高温超伝導は、銅酸化物によるものでした。これ以降、電気伝導性を持つ遷移金属酸化物について活発な研究が行われています。

さまざまな物性を示す遷移金属酸化物の研究は、化学の中でも電子・スピン・軌道

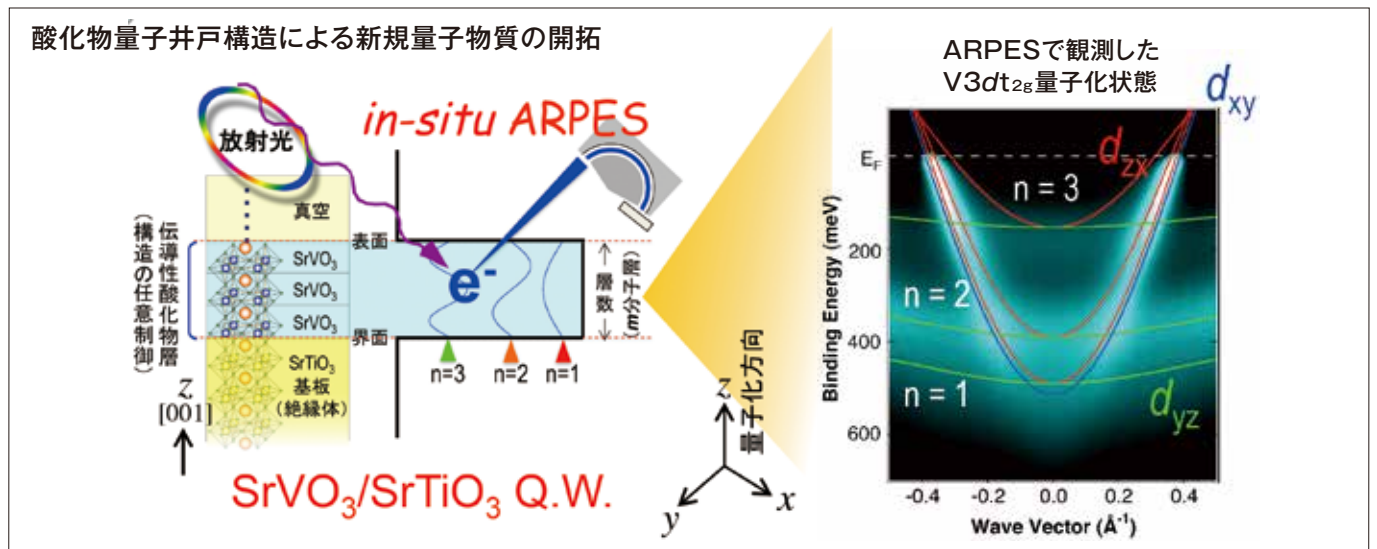
ナノ構造を自在に設計し、新しい機能物質を創造する

興味深い振る舞いを見せる遷移金属酸化物の電子

組頭研究室の研究領域では「酸化物をナノ構造化することにより、さらなる多機能性や新奇物性の創成を目指す」ことが基本的な目標です。ガラスや陶磁器など酸化物は身の回りにあふれている材料ですが、新しい機能性材料をつくり出す土

台として求められているのは、ただの酸化物ではありません。組頭教授は「関心があるのは、天才的な振る舞いを見せる電子を持つ特定の酸化物」と話します。

特定の、というのは主に遷移金属酸化物の群を指します。これらは、たとえばフェライトのように磁性体の代表であったり、チタン酸化物のように光触媒効果を示し



酸化物ナノ構造により強相関電子の2次元閉じ込めに成功

組頭グループは、電子同士が互いに強く影響し合う状態にある「強相関電子」を2次元空間に人工的に閉じ込める「量子井戸構造」をつくり出すことに成功。(※1) 当時、組頭広志東京大学大学院工学研究科准教授、吉松公平日本学術振興会特別研究員、尾嶋正治東京大学大学院教授らグループによる共同研究。論文は、2011年7月「Science」に掲載。

時の流れを感じながら、仙台の街歩き

いつもはバスか車で来ますが、たまに帰りは片平の多元研研究室から八幡の自宅まで歩いて帰ります。日によって違う道、違う交差点を通りますが、だいたい40分から1時間ぐらいかかります。

基本となるルートは片平の正門を出て、裁判所を通り、大町交番から左折して坂をくだります。大橋を渡り国際センターの前を通って、隅櫓を眺めて川内キャンパス東側の道を北上。美術館の横を通り、また広瀬川を渡ると八幡地区に至ります。

八幡は大崎八幡宮の門前町だったところなので、歴史の面影を残す街角や学生のころからあった昔ながらの店がまだ続いていたり、逆にすっかり更地になってしまっていたり。東京赴任時代は時々帰る街でしたが、いままた住んでみるとまったく違う感じ方を覚え、仙台再発見の散策となっています。

MY FAVORITE





かつて酸化物量子井戸の放射光解析で優れた研究成果をあげた吉松公平さんは、現在東北大学多元研講師として組頭研究室に所属しています。現在は酸化物薄膜を用いた新奇物性開拓に取り組み、とくに合成した薄膜に対してさらなるナノ加工・電気化学反応を施すことでナノ構造特有の物性開拓を行っています。

できなければ、新しい機能の発現に向かう道は開かない」と話します。

などを扱うため物性物理学に近い領域です。ふつう金属や半導体の中では、電子は自由自在に動き回っています。これが導電性の元になっています。しかし電子が遷移金属酸化物中のある特定の軌道に入ると、電子が互いに反発しあい独特の振る舞いを見せるようになります。電子が互いに強い相関関係を持つことから「強相関電子系」と呼んでいます。遷移金属酸化物が興味深い性質を示すのは、この強相関電子の働きによるものです。

「ほとんどの酸化物は単なる絶縁体で、お世辞にも面白い物質とは言えないのですが、たまに高温超伝導や光触媒などの驚くべき物性を示すものがあります。いわば天才児達です。もし、この天才児を手なずけることができれば我々の生活は一変します」と組頭教授。ただ、問題は、この天才児とは往々にして気ままであるということ。これらの酸化物では電子の振る舞いがわずかな刺激によって劇的に変化するので、気まぐれに新しい性質が生まれる可能性が出てくるというわけです。

しかし反面、気ままということはどこに行くかわからない、何が起きるかわからないという状態であり、「天才児を自在に制御

困難だった強相関電子のコントロールが可能に

「新しい機能物性を自在に制御するためには、ナノ領域のみに現れる電子の電荷・スピン・軌道の状態を可視化し、その知見に基づいた物質設計が必要不可欠」と組頭教授は解説します。たとえば、これまでに発見された高温超伝導体は、伝導層と絶縁層が交互に重なった層状の結晶構造をもち、強相関電子が伝導層に閉じ込められていることがわかっています。いわば、自然界に存在するナノ構造です。しかし、人工的に層状構造を作製することで強相関電子を制御することは困難で、その性質を設計することはできていませんでした。

組頭教授は、2011年に世界で初めて人工的に強相関電子を2次元空間に閉じ込め、その奇妙な振る舞いを明らかにすることに成功しています(※1)。これは、強相関電子のコントロールを可能にしたということを意味します。

成功の鍵となったのは、酸化物の原子一個レベルの非常に薄い層を「つくる」技術と、放射光による高精度の分光法で電子を「みる」技術を融合させた組頭教授の研究アプローチによるものでした。



酸化物を対象として、さまざまな実験などを行う場合に、独自の装置・器具の開発や調整が必要になってきます。さまざまな装置の開発・自製とともに、そうした補助器具などの作製や調整も研究室メンバーの大切な仕事となっています。



TERM INFORMATION

遷移金属酸化物

遷移金属(鉄や銅などの遷移元素:第3族元素から第12元素)を含む酸化物。様々な物性を示すことで知られている。

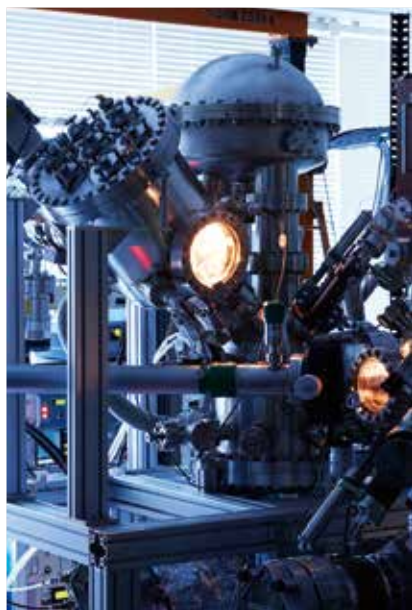
量子井戸構造、2次元閉じ込め

数ナノメートル程度の薄膜のヘテロ接合によって電子を閉じ込めた構造のこと。この構造では、電子は薄膜の面の垂直方向に自由に移動できず、特定の離散的なエネルギー状態をとる。これを2次元閉じ込めという。薄膜の厚さを変えたりすることによって新しい機能をもつナノ構造をつくることができる。

先端計測の技術開発から 新たな機能性ナノ物質の開拓へ

つくる技術と、みる技術を 組み合わせた研究

組頭教授の研究アプローチは、2つの技術を高度に融合させることが基本となっています。1つは、分子線エピタキシー(MBE; Molecular Beam Epitaxy)という酸化物ナノ構造を原子レベルで「つくる」技術。真空中で金属や酸化物を加



(※2) その場光電子分光+レーザー-MBE複合装置。組頭研究室の主力装置で、つくる技術とみる技術を組み合わせるために開発されたものです。

熱蒸発させて、基板表面に付着させ、薄膜を形成します。半導体の結晶成長に使われる手法です。

もう1つは、高輝度放射光を用いた光電子分光計測という電子・スピン・軌道状態を「みる」技術。加速器によるシンクロトロン放射によってつくられる高輝度放射光(電磁波)は、これまで見る事ができなかったナノ世界の物性の探索を可能にします。

この2つの先端的な技術を自在に駆使

して、新しい機能性ナノ物質の開発を目指す、ということが組頭教授の研究の基盤です。

自作開発の装置とともに 内外の施設を自在に活用

多元研の組頭研究室には、主力装置として、その場光電子分光+レーザー-MBE複合装置が設置されています。これは東大工学部、そしてKEK時代に、少しずつコツコツと機械を集め、パーツを自作加工して、立ち上げた装置だといいます。KEK-PF時代には、放射光施設のビームライン設計にも携わり、測定装置の開発から製作、加工、組み立て、稼動運用までメカニックとして対応できるという、大きな強みを持っています。

2018年4月、多元研に研究室が開設さ



(※3) これは組頭研究室で開発してきた、その場光電子分光+レーザー-MBE複合装置の放射光版です。KEKのビームラインに設置されています。

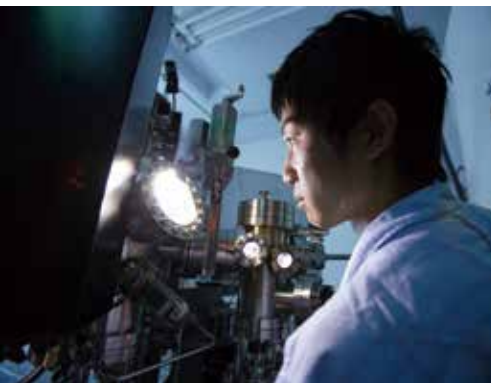
お国柄を感じる、おもしろいできごと

放射光施設での実験や学会での講演など、海外によく行きます。研究姿勢にもお国柄が出るようで、実験は日本人だととりあえずまず実験に着手しようと考えますが、ドイツの人は実験の前にこの場合はこう考えられる、この配置よりこうした方がいいと、いつまでも言い合います。「そんなことするより、やった方が早い」と私などは思うのですが、合理的に進めたいのか、まず議論です。逆に工程がうまく進んで一日余った場合、日本人はもったいないので再度検査確認や次に向けての予備検討をしますが、彼らは余ったらそのまま放ったらかしで終了。おもしろいです。

写真はドイツのWurzburg大学で、私が学生の博士号の審査員を務めた時のこと。合格するとその瞬間から一人前の博士として待遇される(指導教員と対等になる)ので、主役として飾り付けの馬車に乗り、それまでの教官が馬になるという様子が、おもしろおかしくイベント化されていて楽しかったです。この大学はレントゲン博士がX線を発見した大学で、放射光につながる源流です。

OFF TIME





組頭研究室では、さまざまな装置を駆使して「みる、解析する、制御する、つくる、検証する」などの高度な作業によって研究が行われています。これからも国内外の放射光施設をフル活用して、さらに新しいナノ物性を探索していくことが期待されています。



フランスSOLEIL放射光施設

れてから、1年がかりでいくつかの実験装置をKEKから移設しました。最後に運び込まれた光電子分光+レーザーMBE複合装置(※2)について、組頭教授は「放射光施設での放射光実験のビームタイムは、せいぜい2~3週間ですので、ビームタイム前に実験室で試料を十分に調整しておくことが鍵となります。そのための装置として用いていました」と説明します。現在は「この装置で試料の作製と放射光実験前の予備測定を行い、KEKにある放射光の複合装置(※3)で最終的な実験を行うという流れで研究を行っている」そうです。これが、「みて、つくる」「制御して、つくる」しくみの基本となっています。

組頭研究室は、放射光施設としてKEK(茨城県つくば市)のほか、国内ではSPring-8(兵庫県)、海外ではSOLEIL(フランス)、DIAMOND(英国)、SLS(スイス)などの施設を活用しています。

先端計測による物質設計 新しいナノ物性を探索

各種装置を活用することにより組頭研究室では、酸化物量子井戸構造を用いた強相関電子の2次元空間への閉じ込め、酸化物の新奇な量子化状態の光電子分光による解明、酸化物ヘテロ構造を用いた新機能の開発、電子相転移を示す酸化チタン薄膜の開発などに取り組んでいます。

研究室内外の装置を用いて「あっと驚くような物性を示す物質を、先端計測に基づいた物質設計によって、発見したい」というのが組頭教授の研究姿勢です。また、そのためにも「計測技術としては、ナノメーターの領域の電子・化学状態が調べられる分光装置を開発して、ナノ物質でのみ発現する状態などを調べたい」といいます。

いま東北大学青葉山キャンパス内に次世代放射光施設が建設されていますが、組頭教授は「より微細な領域を測定できるようなビームラインや測定装置の技術開発を研究室のスタッフや学生と一っしょにやってみたい」と話します。

TERM INFORMATION

分子線エピタキシー

各原料を加熱し、その分子線を基板に到達させて結晶成長(エピタキシャル成長)を行う方法のこと。高真空中で基板結晶の上に原子1層ずつ結晶を積み上げていくことができる。

酸化物ヘテロ構造

組成元素が異なる酸化物を、分子線エピタキシーなどの技術で接合した構造。

光電子分光

固体に一定エネルギーの光をあて、光電効果によって外に飛び出してきた電子(光電子とよばれる)のエネルギーを測定し、物質の電子状態を調べる方法である。

放射光

光速に近いスピードをもつ電子が磁場で曲げられるとき、その進行方向に放射される電磁波(光)のこと。

KEK-PF

KEKのつくばキャンパスにある放射光施設。放射光を用いて物質・生命の構造から機能発現のしくみを明らかにする研究を推進している。

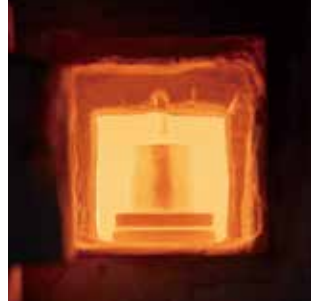
電子相転移

温度や圧力などの外部刺激によって生じる絶縁体状態と金属状態との間の相転移のうちで電子間の強い相関に原因がある相転移。モット転移とも言う。



FOREFRONT REVIEW

小俣研究室は「人類の未来を切り拓くエネルギー・低環境負荷材料を創りだす」ことを目指し、エネルギー・環境・資源に関わる社会課題の解決に資する、太陽電池、燃料電池、照明・ディスプレイなどのエネルギー変換デバイスの心臓部となる新材料の開発を推進しています。このため、準安定物質を中心とした機能性無機材料の物質設計や、可動イオン置換・挿入など化学反応過程の理解に立脚した合成プロセスの開発も併せて行っています。



社会の仕組みを変える力を持つ材料 その開発への道筋を探求する

人類の歴史を振り返ってみると、ひとつの材料が登場することによって世の中がガラッと変わった、ということが幾度か起きている、と小俣孝久教授は切り出します。

紀元前15世紀ぐらいに鋼^{はがね}が登場します。初めて鉄製の農具がつかられ、農業生産性が著しく向上して富の蓄積が進むことになります。現代に至るまで産業上きわめて重要な役割を果たしている鋼が、この時、時代を画する材料として登場したわけです。

現代に近い時代の事例として、小俣教授は、さまざまな工業製品に使われる磁石、半導体の材料、二次電池^(※)の材料などを挙げます。「青色発光ダイオード(LED)が登場し、実用化高輝度LEDの開発によって、照明や電子機器、携帯電話などにおいて低消費電力、長寿命化が一気に進みました。いわゆる電球や蛍光灯が世の中からなくなりつつあるという大きな変化が起きています」。

今進みつつある変革の最も大きな局面は、電気自動車の進展だといえます。「100年以上前から化石燃料でエンジンを動かして走る方式が続いてきましたが、ガソリンもエンジンも使わない電気自動車の登場で、脱化石燃料・CO₂の流れが加速しています」。その背景には、二次電池の開発と性能向上の歩みがあります。

社会の変革というのは、このように鋼や磁石、半導体の材料、二次電池に関わる材料など、ひとつの材料が産業に影響を及ぼすことで大きく動いてきた、というわけです。

今私たちは、エネルギー、環境、資源など深刻で悩ましい問題を多く抱えています。「それらを解決していくには、おそらく世の中の仕組みが変わらないといけない。そうした大きな変化を呼び起こすような材料をつくっていきたい。それが研究のモチベーションです」と小俣教授。さまざまな現代的な課題について、その解決へのひとつの道筋を拓くという目標に向かって、弛まぬ探求が続けられています。

(※)リチウムイオン二次電池の開発に貢献した旭化成名誉フェロー吉野彰氏ら3人が、2019年ノーベル化学賞を受賞した。

多元物質科学研究所
金属資源プロセス研究センター
原子空間制御プロセス研究分野 教授

小俣 孝久

OMATA, Takahisa

1964年神奈川県生まれ。1989年横浜国立大学工学研究科博士前期課程修了、1989年株式会社三井鉱山中央研究所研究員、1991年東京工業大学総合理工学研究科博士後期課程入学、1994年同課程修了／博士(工学)。1994年神奈川工科大学助手、1996～2016年大阪大学助手・講師・准教授、2016年東北大学多元物質科学研究所教授。2014年日本セラミックス協会学術賞、2017年資源・素材学会論文賞、米国セラミックス協会Richard and Patricia Spriggs Phase Equilibria Awardなど受賞。

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/omata/>

小俣研究室の実験室に設置されているボックス炉。約1800℃の処理が可能。ガラスの合成や酸化半導体の焼成に用います。



材料の新大陸、準安定物質で環境調和型材料を探索

追い求める新機能材料は準安定物質の中に潜んでいる

現代社会におけるエネルギー問題においても、それを解決できる新しい機能材料がどこかに潜んでいるはず。オリジナルな自分たちが作り出す材料とその合成プロセスを見つけない、大学らしい萌芽的研究を推進したい。小俣教授は、そんな思いを持ち続けています。

ただ研究の場においては、先人たちの努力で誰もが入手できるような安定な物質は研究しつくされている、と教授は指摘します。こうした判断により、小俣研究室では「準安定物質を材料の新大陸」と位置づけています。たとえばダイヤモンドは炭素の準安定型であり、非常にゆっくりと炭素の別形態であるグラファイトへと遷移することが知られています。追い求

める新材料は、こうした準安定物質の中にある、というわけです。原子のフレームワークをデザインし、望む機能を発現するような準安定無機化合物を、卓抜な合成プロセスによって創製していくことが、小俣教授の研究の基本です。

シリコン製に替わる化合物半導体の薄膜太陽電池

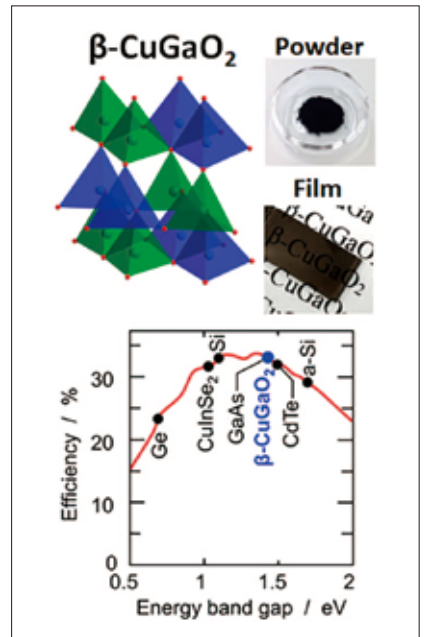
環境調和型材料・デバイスの開発という大きな目標を掲げ、さまざまな研究を



インピーダンス測定装置。酸化半導体について重要な機能をはたす導電性の測定などを行います。

2014年に太陽電池に適したバンドギャップを有する唯一の酸化物(β -CuGaO₂)を発見しました。現在はその素子化などに取り組むとともに、引き続き新たな材料の探索をしています。

"Wurtzite CuGaO₂: A direct and narrow band gap oxide semiconductor applicable to solar cell absorber"
T. Omata, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, H. Yanagi and N. Ohashi,
J. Am. Chem. Soc. 136, 3378-3381 (2014).



ハードなバドミントン、3年前に再開

バドミントンは、中学・高校のときに部活でかなりハードにやっていました。中学は全国大会に何人か出場するような学校で、私も県大会で優勝しました。大学の時には、母校にコーチとして教えにも行きました。それ以降やめていましたが、3年前に多元研に赴任してから東北大学の教職員クラブ活動で再開しました。

始めるにあたっては、すぐに体が動くような生易しいスポーツではないので、半年間ジムに行って体を慣らしてからラケットを持ちました。昼休みは研究所の人たちと、夜は多元研だけでなく他部局の人たちも来て、実戦形式で楽しんでいます。大会での勝利はとてうれしく、練習の励みになっています。怪我には気をつけてやっています。歳なので治るのに時間がかかりますからね。



MY FAVORITE

展開している小俣研究室。そのひとつとして、現在すでに社会の中で多く利用されている太陽電池を、さらに大きく進化させるべく次世代の太陽電池の研究が進められています。

現在主流の太陽電池はシリコン(Si)でつくられています。光の吸収能力が小さく、太陽光をすべて吸収するためには厚いシリコンを用いなければなりません。このため太陽電池パネルをつくるには、たくさんのシリコンを必要とし、重い、価格が高くなる、などの課題がありました。これに対して、CdTe(カドミウムテルライド)やCIGS(銅・インジウム・ガリウム・セレン化物)などの化合物半導体を使った薄膜太陽電池がすでに流通していて、材料が薄くなるというメリットは達成しています。しかし、これらには有害なカドミウム化合物だったり、多くの電力が必要な真空プロセスで製造しなければいけなかったりという課題が残されていました。

「害もなく資源もたくさんあって、かつ薄膜でできるような太陽電池の材料が出てきてほしい。じゃ、つくろう」というのが、小俣研究室の次世代太陽電池の研究テーマでした。「私たちの研究室では、この目的に合う酸化物半導体を設計・探索し、 β -CuGaO₂という新物質をつくり出しました」と小俣教授は話します。これは光の吸収能力がCdTeやCIGSと同水準であり、太陽電池の変換効率が最も高い状態での設計が可能で、何より「有害な物質を使わず、銅とガリウムの酸化物なので空気中にたくさんある酸素を使える。銅やガリウム資源も豊富にあるので、資源的にもいいし、製造プロセスも簡単になる」というメリットを創出できたことは大きな成果と言うことができます。

高い変換効率を実現する 量子ドット太陽電池

ここで太陽電池の変換効率(光を電気に換える割合)のことにふれておきます。シリコンを使った市販の太陽電池の変換効率は約15~20%程度で、理論上の上限も29%とされます。また化合物半導体を使った高性能なものでも30%ほど

です。いずれにしてもこの数字では「私たちが自宅で使う電力を屋根の上の太陽電池だけでまかなうことはできません。もし、より変換効率の高い太陽電池が実現するならば、各家庭で電力を自給自足することも可能となるはず」と小俣教授は話します。そうした飛躍的なブレークスルーの実現のためには、画期的な材料の登場が待たれるということになります。

そこで注目されているのが、多重励起子生成(マルチエキシトン生成/MEG: Multiple Exciton Generation)というメカニズムを用いた量子ドット太陽電池です。量子ドットといわれる大きさ数ナノメートルの半導体単結晶には、光の粒(光子)1つが照射されると2つ以上の複数の電子ができるというユニークな性質があります。この性質を利用すると、光を複数倍の電気に置き換えることができ、変換効率が50%前後に達する太陽電池が実現できると予測されています。

小俣研究室ではこのテーマの研究により、太陽電池に適したInAs(ヒ化インジウム)の量子ドットの安全な製造方法を開発しました。現在は、この製造方法のブラッシュアップとともに、太陽光の照射によって生成した電子を取り出すための量子ドットナノ構造とその作製方法を研究し、超高効率太陽電池の実現を目指して研究を進めています。



たとえば、新しい酸化物エネルギー材料の設計とその合成プロセス、というような研究テーマでもわかるように、小俣研究室は材料工学と合成化学が高度に融合した研究分野とすることができます。

TERM INFORMATION

準安定物質

物質がある環境で安定であるか、あるいは、そうでないかは、その環境の温度と圧力がその物質にとって居心地が良いか否かで決まります。例えば、炭素の一つの状態であるダイヤモンドは、指輪などの宝飾品として使われ、「永遠の輝き」などと形容されますが、それが室温で安定なのは数万気圧の高圧下であり、1気圧下で安定な状態は真っ黒な黒鉛です。ただし、氷が解けて水になる速度とは異なり、室温でダイヤモンドが黒鉛に変わる速度は非常に遅いので、本当は不安定なだけけれど実際には安定な物質と同じように取り扱えるのです。室温、1気圧下のダイヤモンドのように、本当は不安定なだけけれど、あたかも安定な物質のように取り扱える物質を準安定物質といいます。

薄膜太陽電池

2018年の世界の太陽電池の生産量の97%はシリコンで作られたものです。しかしシリコンは光を吸収する能力はそれほど大きくなく太陽光をすべて吸収するには0.1mm以上の厚さが必要です。結果として多くの原料が必要になるので高価になり、また重い設置する場所も限られます。これに対してCdTe、CIGSや β -CuGaO₂は、光を吸収する能力の優れた半導体であり、わずか数 μ mの厚さで十分太陽光を吸収できます。これらの材料で作られた太陽電池は薄膜太陽電池と呼ばれ、シリコン製太陽電池と比べて軽くて安いなどのメリットがあるのです。

酸化物半導体

よく知られるシリコンやゲルマニウムはただ一つの元素からできている単体の半導体。青色LEDに使われる窒化ガリウムなどは化合物の半導体です。化合物が酸化物であるものは酸化物半導体と呼び、例えば酸化インジウムやIGZOなどの酸化物半導体は、液晶ディスプレイに搭載されています。

β -CuGaO₂

銅やアルミニウムのように電気を通す物質は、通常光を通しません。しかし多くの酸化物半導体は透明なのに電気を通すので、その性質を活かして透明電極として使われています。しかし β -CuGaO₂は目に見える光や赤外線を吸収する珍しい酸化物半導体です。このような性質は太陽電池やLEDにピッタリなので、世界から注目を集めているわけです。

マルチエキシトン生成

物質に光をあてると、物質中の電子が光のエネルギーをもらって、エネルギーの高い状態に移ります。太陽電池などでは、この高いエネルギーにある電子を物質の外に取り出して、使用可能な電力としています。通常は、一粒の光(光子)が物質にあたると、一粒の電子がエネルギーの高い状態に移りますが、エネルギーの大きな光(波長の短い光)があたると、一粒の光の照射で二粒、三粒の電子がエネルギーの高い状態に移ることもあります。これがマルチエキシトン生成と呼ばれる現象で、量子ドットと呼ばれる半導体ではマルチエキシトン生成の生じる割合が非常に高くなります。これを太陽電池に応用するとたくさんの電流を取り出せることになり、通常ではできない高出力の太陽電池が実現します。

産業界への応用が期待される 高機能な材料開発

イオン交換プロセスで 新物質をつくり出す

小俣研究室のさまざまな研究の中で、新しい材料の物質設計をしていく化学プロセス手法としてイオン交換が重要な役割を果たしています。「目的の化合物をつ

くるときに、どうしても必要不可欠な元素というものがあありますが、その元素を最初から入れてつくり出すことができない場合があります。その時にその元素の代わりに別の元素を入れてやって、化学構造だけは求めている構造と同じ化合物をつくる。そ

れで後から、替わりに入れた元素を本来の元素に取り替えてやる」と小俣教授は解説します。

たとえば薄膜太陽電池のところ（前ページ）で取り上げた β -CuGaO₂という新物質は、まず β -NaGaO₂を薄膜に成長させ、その後でイオン交換によりNaをCuに置き換えて β -CuGaO₂薄膜を得ています。

電子ビーム蒸着装置。真空中で電子銃から発生する電子ビームを蒸発材料に照射し、加熱・蒸発させ、基板に薄膜を形成する方法で、酸化物半導体や燃料電池の電極の成膜に用いられます。



中温度域で作動する 次世代燃料電池を開発

小俣研究室の主要な研究テーマの中に燃料電池があります。ここでもイオン交換プロセスが使われています。燃料電池に使われるガラス電解質の組成は非常に複雑なものです。合成の際に高温で溶かす必要がありますが、高温にすると水素イオン(H⁺)が水蒸気になって外に出て行ってしまいます。そこで「最初にH⁺の代わりにNa⁺を入れておいて、温度の低い300℃くらいのところでNa⁺を水素イオンに取り替えてやる、という方法を使います」。

さて燃料電池とは、電気化学反応によって燃料（水素など）の化学エネルギーから電力を取り出す電池です。その作動温度については「1980年代から次世代の燃料電池は300℃～500℃で動く必要があると言われていましたが、一向に実現しない」と言います。燃料電池の心臓部にあたる電解質が、300℃や400℃で十分働く材料が世の中になくて、まだ見つからないからでした。「そういう材料がないからダメなんだよね、という状況があったら、じゃ、それをつくればいいんじゃない、というのが私たちの研究室のスタンス」と、小俣教授。

小俣研究室では、こうした中温作動型燃料電池の電解質に適用可能なプロトン伝導性の固体電解質を開発し、発表しました(2016年)。300℃前後の温度域では世界最高クラスのプロトン伝導性のガラス電解質をつくり出しています。

さらに究極の燃料電池は「バイオマスと言われる植物由来・生物由来の有機物を燃料にするのがいいと思う」と話します。なぜなら「植物が空気中のCO₂を取

思い通りの味がつくれた時は、うれしい

東北大学には単身赴任で来ています。というわけで食事は毎日自炊で、食材の買い出しに出かけ、買って来たものを片付け、ゆっくり料理をするという時間を楽しんでいます。食いしん坊なので、どこかで食べておいしいと思ったものを自分でつくってみるというつくり方ですね。だから、お店の名前も料理の名前も詳しく覚えているわけではなく、料理本でつくり方を調べたりもありません。似て非なるものになる可能性もありますけれど、それも含めて料理はおもしろいです。

だんだん自然に調味料や道具も増えてきました。最近自分で気に入っているのは、麻婆豆腐や野菜炒め、イタリアンでは仙台の魚介を使ったパスタやアヒージョ。われながら、腕が上ってきたと思っています。



TERM INFORMATION

イオン交換

水の中にはナトリウムイオン(Na^+)や塩化物イオン(Cl^-)など様々なイオンが溶けています。このような水に浸しておくと、 Na^+ イオンを吸収し代わりに水素イオン(H^+)を放出する物質や、 Cl^- イオンを吸収し水酸化物イオン(OH^-)を放出してくれる物質があります。このような現象をイオン交換といいます。

中温作動型燃料電池

燃料電池は、電池という言葉がついていますが、水素を燃料として電力を取り出す発電装置です。2019年現在の家庭用に市販されている燃料電池(エネファーム)は750~800°Cの高温で発電が進行するタイプの燃料電池です。一方、燃料電池自動車に搭載される燃料電池は、80°C程度の低い温度で運転されるタイプです。これら二つのタイプの燃料電池にはそれぞれ抱える技術課題がありますが、250~500°Cで運転できる燃料電池ができると、その課題が一気に解決されると期待されています。それを中温作動型燃料電池と呼んでいます。

プロトン伝導体

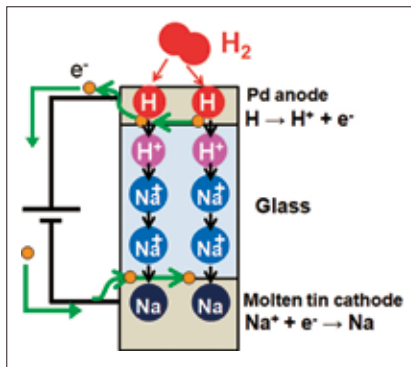
例えば、リチウムイオン電池ではリチウムイオンが電気を運びリチウムイオン伝導体が電解質として使われます。燃料電池では酸化物イオン(O^{2-})か水素イオン(H^+)が電気を運び電解質が必要になります。原子番号が1の水素が電子をひとつ失ってできた水素イオンは、電子をひとつも持たない原子核だけからできたイオンです。水素の原子核は正の電荷をもった陽子からできているので、水素イオン H^+ はまさに陽子そのものになります。陽子は英語でproton(プロトン)と呼ばれるので、水素イオンが電気を運び電解質をプロトン伝導体と呼びます。

アルカリプロトン置換法

アルカリプロトン置換法はその名のとおり、物質の中にある例えばナトリウムイオン(Na^+)のようなアルカリイオンをプロトン(水素イオン H^+)へと置き換える手法です。ガラスの中にはたくさんのアルカリイオンを含ませることができるので、それを後の工程でプロトンへと置き換えてプロトン伝導体を作るのに使われる小侯教授のグループが開発された手法です。

混晶半導体

食塩は化学式で書くと NaCl ですが、天然の食塩にはカリウムやカルシウム、マグネシウムなども含まれています。中でもカリウムはナトリウムと同じアルカリ金属なので、食塩の結晶中のナトリウムの居場所の一部を置き換えて居座っています。これは原子レベルで NaCl と KCl が混ざって、固体の NaCl の中にわずかに KCl が溶けた状態です。このような固体に固体が溶けた物質を固溶体と呼びます。その別名として科学技術分野によっては混晶という呼び方が使われます。本文中の $\text{Zn}(\text{Te,Se})$ は ZnTe という半導体と ZnSe という半導体の固溶体なので、混晶半導体の一つにあたります。



Na^+ が含まれたガラスに H^+ を注入するアルカリプロトン置換法という新しい手法で、中温域(250~500°C)で使える電解質を開発しました。この温度域での伝導度は世界トップレベルに達しています。

り入れて自分でつくったバイオアルコールを使う分には、アルコールを燃やしたところで地表より上の CO_2 は増やさない」と、カーボンニュートラルを実現する次世代型燃料電池の開発を目指しています。

安全で高機能な 画期的緑色蛍光体を開発

前段の燃料電池の話が「まだ発見されていない物質をつくり出すアプローチ」だとしたら、「物質自体はよく知られているが、材料としては使えないと見落とされている物質。その物質の気づかれない性質を探し出して適切な材料に仕立てるアプローチ」も小侯教授は好きだと言います。「量子ドットのディスプレイ材料の話は完全にそのパターン」だそうです。

小侯教授のグループが、テルル化亜鉛(ZnTe)半導体の中のテルル(Te)の一部をセレン(Se)で置き換えた量子ドットにより、単色光に近い緑色を発する蛍光体の開発に成功した、という研究成果のことです(2018年6月)。前ページにも出ていた量子ドットとは、ナノスケールの特殊な状態の半導体結晶で、従来の物質では不可能だった不思議な物性を発現することがあります。

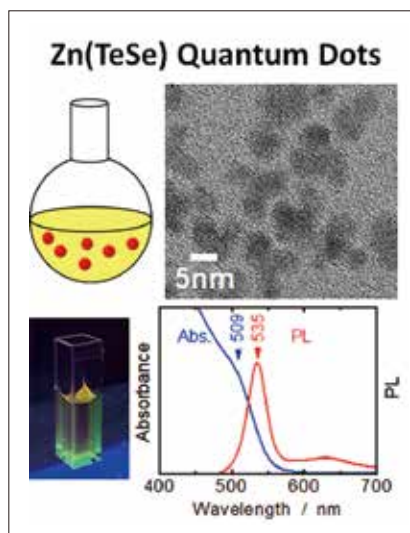
「この化合物があるということは半導体の研究者は誰でもわかっているし、量子ドットの研究者なら《亜鉛とテルル》《亜鉛とセレン》という組み合わせはみんなつくっていた。しかし《テルルとセレン》を組み合わせると今までできなかつ

た緑色の良い色が出るということは、なぜか見落とされていた」と言います。

セレン化カドミウム(CdSe)による蛍光体はすでに流通していますが、カドミウムには毒性があります。またリン化インジウムなどの代替材料の開発が行われていますが、セレン化カドミウムと同等の単色性の実現できていないという課題があります。鉛を含有する化合物から単色性の高い緑色蛍光体が報告されていますが、やはり鉛の毒性が懸念されています。

こうした状況の中で小侯研究室では、混晶半導体と呼ばれる $\text{Zn}(\text{Te,Se})$ 量子ドットによって、カドミウムや鉛のような有害物質を含まず、セレン化カドミウム量子ドットの発光と同等の単色性の高い緑色発光を実現したことは、きわめて意義深いものです。スーパーハイビジョン放送に適合した広い色域を達成する、しかも安全性が大幅に向上した次世代広色域ディスプレイへの応用へ道筋が大きく進展したものとなりました。

現在は、より高性能な可視光を発する量子ドットや、より環境にやさしい新しい量子ドット材料の開発を行い、ディスプレイや各種の光源における省エネルギーの達成を目指して研究を進めています。



溶液法(ピーカーフラスコ)で量子ドットを作っています。量子ドットは2010年代後半から実用化がされ始めていて、ホットな話題となっています。小侯研究室では、 $\text{Zn}(\text{Te,Se})$ 量子ドットの合成により単色光に近い緑色を発する蛍光体の開発に成功しています。本研究成果は、2018年6月20日公開の米国化学会専門誌ACS Omega誌にオンライン掲載されました。



FOREFRONT REVIEW

再沈法を駆使した薬剤ナノ粒子を創製。笠井 均研究室では、腫瘍患部への薬剤移行性を向上させると同時に、副作用も少なくする患者にもやさしい次世代DDS（ドラッグデリバリーシステム）薬剤の開発の基盤を確立することを目指しています。



独自の「有機ナノ結晶」の創製技術から 新しい薬剤開発の可能性を拓く

薬が効くとはどういうことか？ よく効く薬を作るにはどうしたらいいか？
多くの研究者が考え、チャレンジしている問題です。

例えば抗がん剤であれば、どのように腫瘍組織まで薬を届け、どの
ように細胞内に浸透させるか？ どのように副作用を低減させるか？
など様々な超えなくてはいけない課題があります。

その効き目のある抗がん剤開発へのひとつの道筋を切り拓いたの
が、笠井研究室が開発する有機ナノ粒子・結晶の創製技術です。

従来の薬化合物は、薬理効果のある化合物に水溶性の置換基を
付けるというものが一般的でした。ところが、水溶性化合物を血中に
投与すると、腎臓で濾過されやすい上、正常な組織にも拡散しやす
く、また100 nm以上の薬剤の場合はマクロファージに貪食された後、
腎臓に捕捉されてしまいます。

この問題を克服するために笠井研究室が導入したのが、従来の
発想とは真逆といえるものでした。薬化合物にコレステロール誘導体
などの「難水溶性置換基」を化学的に連結することや二量体化な
どを施すというものです。さらに独自の有機ナノ粒子作製手法である
『再沈法』によって、粒径100 nm以下の薬剤ナノ粒子を作製する技
術を確立しました。その結果、腫瘍組織の細胞内にまで効果的なド
ラッグデリバリーが可能な薬剤ナノ粒子が見出されています。

笠井研究室では点眼薬に関してもナノ粒子化に取り組んでいます。
緑内障の治療薬である「プリンゾラミド」(商品名:エイゾプト)の誘導体
を合成し、ナノ粒子点眼薬を作製。プリンゾラミドの約1/5の量で同様
の眼圧降下作用を示すことが明らかになっています。現在は、ナノ粒子
点眼薬の眼内移行メカニズムの解明に取り組んでいます。

「次世代のDDS薬剤を実現する。」この命題に対し、独自の有機ナ
ノ結晶創製技術を駆使して腫瘍患部への薬剤移行性の効率を飛
躍的に向上させることにより、その開発基盤を確立することを目指して
います。

この有機ナノ粒子・結晶の創製技術は、医薬、農業、化粧品、補助
食品など、広汎な産業分野で活用できると期待されています。

多元物質科学研究所
高分子・ハイブリッド材料研究センター
有機・バイオナノ材料研究分野 教授

笠井 均

KASAI, Hitoshi

1967年千葉県生まれ。東北大学大学院理学
研究科化学専攻博士課程後期課程修了。理学
博士。2000年東北大学反応化学研究所助手、
2001年多元物質科学研究所に改組、2004年
同助教授、2007年同准教授、2016年より現職

[http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/
kasai/](http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/kasai/)

副作用の無いドラッグデリバリーシステムを構築すること。この理想に向けて新しい道筋を開いたのが、「水溶性の置換基から難水溶性の置換基へ」という逆転の発想でした。薬理活性部位を有する化合物を水に対する溶解度をより低くするために、二量体化するか、または難水溶性置換基を化学的に付けた化合物へと合成した後、その化合物を再沈法に適用すれば、薬剤ナノ粒子の分散液が得られます。



「難水溶性」をキーにしたプロドラッグ逆転の発想を可能にした「再沈法」

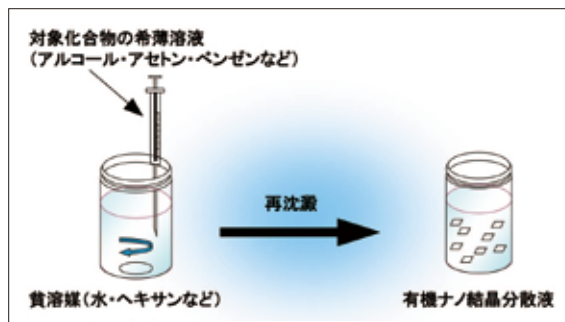
様々な可能性を秘めた「再沈法」で有機ナノ結晶を自由に制御可能

ナノ結晶とは粒径がおおよそ数~数10 nm であるような結晶のこと。量子サイズ効果により特異な物性を発現することや比表面積が増大することが知られていて、光・電子材料や触媒・医薬・農薬品への活用が期待されています。

「私が有機ナノ結晶の作製法の研究をはじめた20年前の時点では、ナノ結晶の研究はほぼ金属・半導体系に関するものでした。これに対して、有機ナノ結晶は未踏分野。作製上いろいろ問題があったのです」と語る笠井教授。トップダウン方式

であるミリング法を用いた場合、500 nm 以下のナノ結晶を作製することが困難。ボトムアップ方式である蒸発法では、熱に弱い有機化合物に対して加熱操作をほどこす必要があるなど、汎用性に問題がありました。

効果的に有機ナノ結晶を作る方法はないか？ 試行錯誤の上、出された答えが「再沈法」でした。対象となる化合物を溶かした良溶媒の溶液を、化合物が溶けない貧溶媒（主に蒸留水）に入れることにより再沈澱させる方法。簡便、迅速、安価に加え、汎用性が高い創製技術であり、世界からも注目された手法です。



様々な制御因子によりサイズ・形状などを制御することが可能な「再沈法」の発見。この再沈法によって、笠井研究室では抗がん活性化合物に難水溶性置換基を化学的に導入するという新しい発想で粒径100 nm以下の「薬剤ナノ粒子」を作製する技術を確立しています。

「さらに再沈法における作製条件を変えることにより、サイズ・形状など様々に制御することが可能になります」と再沈法のメリットを語る笠井教授。笠井研究室でまとめた作製に関する因子は以下のとおり。①注入溶液の濃度と貧溶媒の温度により「サイズの制御」ができる。②貧溶媒の種類により「結晶構造の

制御」ができる。③使用する溶媒の種類（溶媒和結晶の生成）により「結晶形状の制御」ができる、というものです。

「このようにサイズや形状を自由に制御できることにより、今までにない新規の物性を発現することができると期待されています」。

「難水溶性」をキーワードに逆転の発想で抗がん剤を

この制御された有機ナノ結晶はどんなところで活用することができるのでしょうか？ そのひとつの答えが「ナノ薬剤」です。

ナノ薬剤は細胞内まで浸透可能な薬剤で、笠井研究室では、抗がん剤に注目。

「従来の抗がん剤は水溶性プロドラッグ（患部に到達されるまで薬効成分が分解されない薬）が主流です。しかし、水溶性プロドラッグは、全身に回り、重篤な副作用を示すことがあり、細胞膜を透過しづらいという問題もあります」と語る笠井教授が考えたのが、有機ナノ結晶創製技術で、新しい薬を作れないか、ということでした。出した答えは、「水溶性の置換基から難水溶性の置換基へ」。発想の転換でした。

「薬理効果を有する難水溶性化合物のみで構成されたキャリアフリーのナノ粒子を創製すれば、副作用の無いドラッグデリバリーシステムを構築できるはず、と考えたのです。どのように難水溶性化するか？ それは二量体化するか、難水溶性置換基を化学的に付ければ可能になります」。

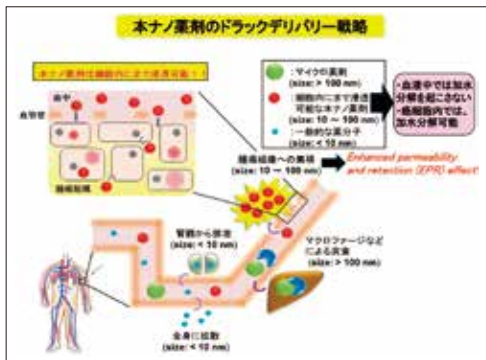
目立ちたいわけではなく、人を楽しませるのが好きなんです

昔から人を楽しませるのが好きでした。宴会でも楽しくワイワイするのが好き。そんな私らしく、「片平まつり」や「サイエンス・デイ」で、カツラをかぶった「博士」の出で立ちで参加しています。もちろん、科学のことを真剣に伝えていますよ。毎回たくさんの小・中・高校生のみなさんや保護者の方が来てくれるので、はりきって準備をしています。

何年もこの格好で参加しているので、近所の方とか子どもたちに覚えられていますね。自分でするものなんですが「博士」人気すごい！私を見かけると「あーハカセだー！」と声をかけてくれます。これからも、次世代の人たちに科学の楽しさを伝えることができたらと思っています。



MY FAVORITE



どうやって腫瘍組織の細胞内に薬を運ぶか？ ポイントは薬剤のサイズでした。100nm以上のマクロ薬剤はマクロファージなどによって貪食されてしまいます。10nm以下の一般的な薬分子では、全身に拡散して、腎臓から排泄されてしまい、がん細胞内まで届きにくくなります。その間の10~100nmの今回のナノ薬剤は、血液中では加水分解を起さず、細胞内まで浸透可能で、がん細胞内では加水分解されます。

現在の市販薬としては、水溶性置換基を導入したirinotecanが、加水分解後SN-38に変換されるプロドラッグとして使用されています。このSN-38の難水溶性を高める目的で二量体化し合成したところ、再沈法により50nm程度のナノ粒子水分散液が作製されました。

そして、作製したSN-38の二量体ナノ粒子をがん細胞培地に投与し、48時間後のがん細胞の生存率をirinotecanの場合と比較。市販のirinotecanよりもはるかに低濃度で、より高い抗がん効果を発揮することができたのです。

「サイズによって身体の中での薬物の動きが違います。まず、100nm以上のマクロ薬剤はマクロファージなどによって貪食されてしまいます。逆に10nm以下の一般的な薬分子では、全身に拡散して、腎臓から排泄されてしまい、がん細胞内まで届きづらくなります。その間の10~100nmであることがポイントです。このレンジのナノ薬剤は、血液中では加水分解を起さないように設計できますし、細胞内まで浸透可能で、がん細胞内ではじめて

加水分解してくれるのです」。

ポイントとなるのは、細胞内への薬剤の取り込み量。irinotecanは極性が高く、細胞内に入りづらいという性質がありますが、50nm程度のSN-38の二量体ナノ粒子では細胞への取り込み効率が著しく向上しました。抗がん剤に新たな光明が生まれた瞬間でした。

SN-38誘導体ナノ粒子の In vivo 活性試験に

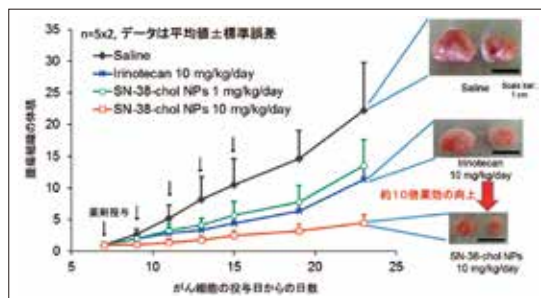
その後、笠井研究室では、副作用の無いドラッグデリバリーシステムに向けて、企業への技術移転を図るとともに、マウスなどの小動物を用いたin vivoの実験を実施しています。

「in vivo 実験を想定した場合、抗がん薬SN-38にどんな置換基をつけるのが正解なのか？」を検討しました。その結果、ナノ粒子化、加水分解速度、分散安定性それぞれを判定し、SN-38の相方としてコレステロール置換基が選ばれました」。

コレステロール基がついたSN-38誘導体ナノ粒子(SN-38-chol NPs)は、in vivo 評価の抗腫瘍性において、irinotecanの薬理効果よりも約10倍高いという結果になりました。

さらに、SN-38-chol NPsにおいて下痢の原因となる腸管損傷を評価したところ、irinotecanよりも抑制されており、副作用が低減する可能性が示されました。このSN-38-chol NPsは、臨床应用到大きな可能性を秘めており、がん治療用の次世代の薬剤になると期待されています。

がんの完全消失が可能なナノ抗がん薬を見出すことが今後の目標だと笠井教授は語ります。「もう1歩抗腫瘍性の高い抗がん剤を見つけたいと思っています。抗がん薬SN-38の夢の相方を探しています」。



コレステロールがついたSN-38誘導体ナノ粒子は、In vivo 評価の抗腫瘍性において、irinotecanより高い活性を示しました。がんの完全消失が可能なナノ抗がん薬を見出すことが今後の笠井研究室の目標です。

TERM INFORMATION

プロドラッグ

そのままでは不活性な、もしくは明らかに活性の低い形態で投与される医薬品。プロドラッグは投与されると、生体による代謝作用を受けて活性代謝物へと変化し薬効を示す。生体内で加水分解することが可能なエステル化合物が代表的な例である。

再沈法

対象化合物の溶液から再沈させる純化学的な実験手法。対象化合物が溶解した良溶媒を貧溶媒中に高速かつ均一で拡散させることで、対象化合物の過飽和度を高め、結果としてナノ粒子を分散液として得る。濃度、温度、溶媒の組み合わせ、また界面活性剤の添加等により粒子サイズ/形状の制御が可能である。簡便、迅速、安価で実施可能であり、適応可能な化合物が多く汎用性が高いことを特徴としている。

ドラッグデリバリーシステム(DDS)

医薬品の効果をよりよく発揮するために設計された投与形態の総称。DDSによって吸収過程、放出過程、分布過程が制御可能であり、これにより、薬効の持続や、標的指向化を実現する。副作用の軽減や薬効増強利便性向上といった利点をもたらすことが期待される。

キャリアフリー

一般的なDDSでは、ポリマー等で作製した粒子(キャリア)に薬剤分子を包摂して薬剤ナノ粒子とする。一方、当該研究では薬剤分子をそのままナノ粒子とすることで、キャリアを使用せずDDSを構築することができる。

難水溶性置換基

難水溶性(水に溶けにくい)の化学構造を持つ官能基。当該研究ではこれまで、ナノ粒子化・分散安定性・加水分解速度の3点をすべて制御したナノ薬剤の創出を目指し、100種類近くの難水溶性の化合物に着目・合成し、薬剤分子との組み合わせを検討してきた。

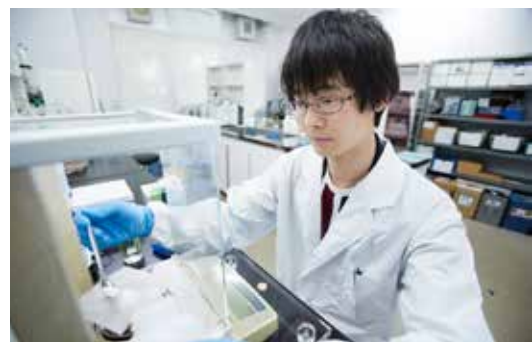
SN-38

ヌマミズキ科キジユ(Camptotheca acuminata)に含まれるカンプトテシンという化合物から開発された抗がん活性物質。SN-38は水に非常に溶けにくいため、irinotecanという水溶性のプロドラッグの形態で使用されている。irinotecanは肝臓や各組織の酵素により、活性体のSN-38に変換され薬効を示す。

in vivo

マウスなどの実験動物を用いて、生体内に直接的に被験物質を投与し、生体内や細胞内での薬物の反応を検出する試験のことをいう。当該研究では、作製したナノ薬剤分散液をマウスに静脈注射し、ナノ薬剤の血中滞留性や抗がん活性の評価を行っている。また点眼薬を志向したナノ薬剤に関しては、直接分散液を点眼し、眼内移行性や眼圧の評価を行っている。

現在、笠井研究室では抗がん活性化合物の他に点眼薬に関してもナノ粒子化に取り組んでおり、「ナノ粒子点眼薬」として、眼疾患への効率的なDDS応用を目指しています。プリンゾラミドを水に溶けにくくした後、独自のナノ粒子化技術「再沈法」を施しました。これにより治療薬が角膜を通過しやすくなり、毛様体など眼の奥の器官にも成分が届きやすくなりました。



点眼薬に関してもナノ粒子化 角膜組織に対する高い浸透性

現在、笠井研究室では点眼薬に関してもナノ粒子化に取り組んでおり、「ナノ粒子点眼薬」として、眼疾患への効率的なDDS応用を目指しています。

「一般的な点眼薬は角膜のバリア機能によって、点眼した薬の0.1%程度しか眼内移行しないことが知られています。この課題に対し、ナノ粒子点眼薬だったら入るのでは? という仮説を立てました」。

そこでラットを使った実験により、眼内(角膜)移行性の評価を行いました。実験は蛍光性ナノ粒子(黄色201号として汎用品、細胞や角膜のイメージングなどで利用)を用いて評価しました。そして点眼30分後に角膜断層(約150 μ m)の蛍光顕微鏡観察をしました。

点眼液にマイクロ粒子を使用した場合、角膜の上皮表層のみで発光。しかし、点眼液に蛍光性ナノ粒子を使用した場合、角膜の上皮および実質層に強い蛍光が観測され、角膜組織に対する高い浸透性が認められました。

「ナノ粒子化による眼内移行性の向上を、世界で初めて視覚的に捕らえることに成功しました」。

次のステップとして、抗がん剤のノウハウをもとに、一般的な緑内障の治療薬

新しい物性を発現する有機ナノ結晶 抗がん剤、そして点眼薬、様々に展開

研究室をあげて 有機ナノ結晶の可能性を拓く

結晶サイズによって様々な特性を示す有機ナノ結晶。例えば、光学特性(光吸収および蛍光発光スペクトル)や反応性(固相重合)も結晶サイズに依存することが分かってきています。さらに、形状と多形も基本的構造パラメータで、多形制御がいかに重要であるかは、顔料や色材、医薬品の世界で良く知られています。

「サイズ・形状・多形を任意に制御することにより、新規物性・機能を発現させることができます。研究室でも研究成果が多彩に広がっています」と笠井教授は語ります。ここに笠井研究室の助教の皆さんの研究を簡単にご紹介します。



Anh T.N. Dao助教

効率的な薬物送達および放出制御が可能な多機能ドラッグデリバリーシステムを開発する研究。バイオセンシングが可能な貴金属ナノ粒子の開発や医療分野など多くの分野での利用が期待されるシルクタンパク質に着目して研究を進めています。



鈴木龍樹助教

生物由来の天然色素をナノ粒子化し、構造解析を通して光学特性を制御し高機能化・高付加価値化する研究。特に、天然色素として希少な「青色」に着目し、食品応用や環境負荷軽減を目指した色素材料への展開を目指して研究を行っています。



有田稔彦助教

粒子共存重合法による高分子表面機能化ナノフィラート、それを用いた高分子材料の性能向上にかかる研究、並びに、セルロースナノクリスタル(CNC)の微粉末化・応用展開を進めています。



小関良卓助教

有機合成を基礎としてナノ薬剤、バイオマス利用、生物活性物質合成等をメインの研究テーマに据えています。がんの根治を目指した画期的な新薬の開発や、廃木材からの医薬品製造の実現を目指して日々研究に取り組んでいます。

ビリヤードで人と人の真剣勝負。多くのことを学べたと思いますね

修士課程2年の頃、研究室から歩いて3分のビリヤード場で、同じ研究室の友人との勝負が熱くなっていき、完全にはまってしまったことがきっかけです。A級にまでいくことができました。精神的に安定していたため、割合よいバランスでやれたと思います。

ビリヤードは人と人の勝負。うまくなってくると、下手な相手なら玉を衝く前、その構えだけで、どのレベルなのかやミスをするかなどがわかるようになります。化学の世界においても、研鑽を積んでいる先輩の考えていることは、後輩の考えに比べて、より深遠であることが多いですね。ビリヤードにおける人と人の勝負実体験から、多くのことを自然に学べたのだと感じます。



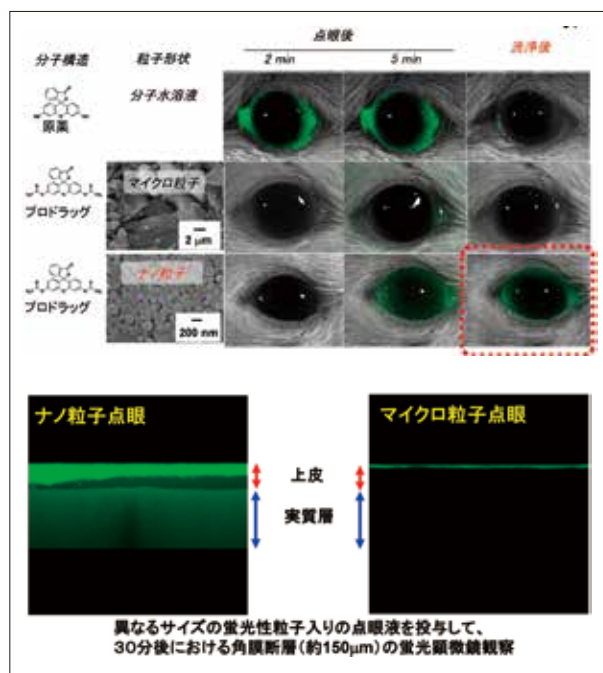
OFF TIME

「プリンゾラミド」の二量体化合物のナノ粒子化を目指しましたが、実現困難と判明。コレステロール基の修飾も試みましたが、眼内で加水分解が進行せずに、薬理効果が発現しないことが分かりました。

そこで、ラットから眼内の前房水を採取し、その条件下、ナノ粒子が加水分解を進行しうる置換基を模索した結果、トリメチルロック(TML)基が有効であることが分かりました。

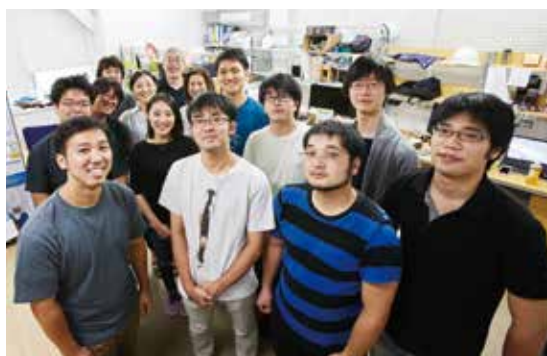
また従来のプリンゾラミド点眼薬は白濁で、点眼後に患者の視野がかすむという使用感の悪さが課題でしたが、作製したプリンゾラミドにTML基を導入したプロドラッグナノ粒子水分散液は薬液の透明度が高く、点眼時の課題も解消できると期待されます。

笠井研究室では今後、眼表面バリア透過性を有する次世代ナノ点眼薬として、臨床応用への展開を模索していきます。



ナノ粒子化により、眼内移行性の向上を世界で初めて視覚的に捉えることに成功しました。

笠井研究室では有機ナノ結晶の創製技術をベースに、有機ナノ結晶型DDSの発展的研究を進めています。農薬、化粧品、補助食品など、極めて広汎な産業分野で展開できる可能性のある研究分野です。



魅惑の有機ナノ結晶材料 作製から応用展開まで

材料化学、生化学、医薬学、物理化学、そして再沈法によるナノ粒子化技術を駆使して、高ロード率に基づく効率的なデリバリーを実現する新規ナノドラッグ分子の設計・合成を追究している笠井研究室。

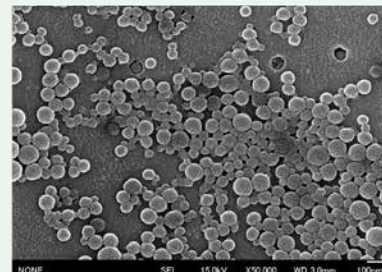
「有機系では、薬効部位のロード率40%以上を実現する難水溶性プロドラッグの設計と合成を目指し、水系では、再沈法の改良でナノ粒子10~20 nmの創製を目指しています。生体内では、分散安定性の向上、ナノ薬剤の細胞内への取り込み機構の解析、副作用の低減を目指し、患部組織・細胞内で加水分解により薬が放出することを実現させようと考えています」と今後の抱負を語る笠井教授。引き続き有機ナノ結晶型DDSの発展的研究を進めていきます。

「化学工学技術を駆使した再沈法の装置化へと展開しています。医薬、農薬、化粧品、補助食品など、極めて広汎な産業分野でナノ結晶化することでの高品質化、高性能化、さらには革新が期待できます。再沈法を用いた有機ナノ結晶は未知の可能性を秘めた大変楽しみな分野であると考えています」。

TERM INFORMATION

有機ナノ粒子・ナノ結晶

有機化合物のみで構成されるナノメートルオーダーの極微小な粒子であり、その粒子サイズは10~200 nm程度。サイズに依存した光学特性や反応性を示すことが知られるが、当グループの研究によりナノ薬剤としても応用可能であることが示されている。(写真:電子顕微鏡像)作製したナノ薬剤の一例。



シルクタンパク質

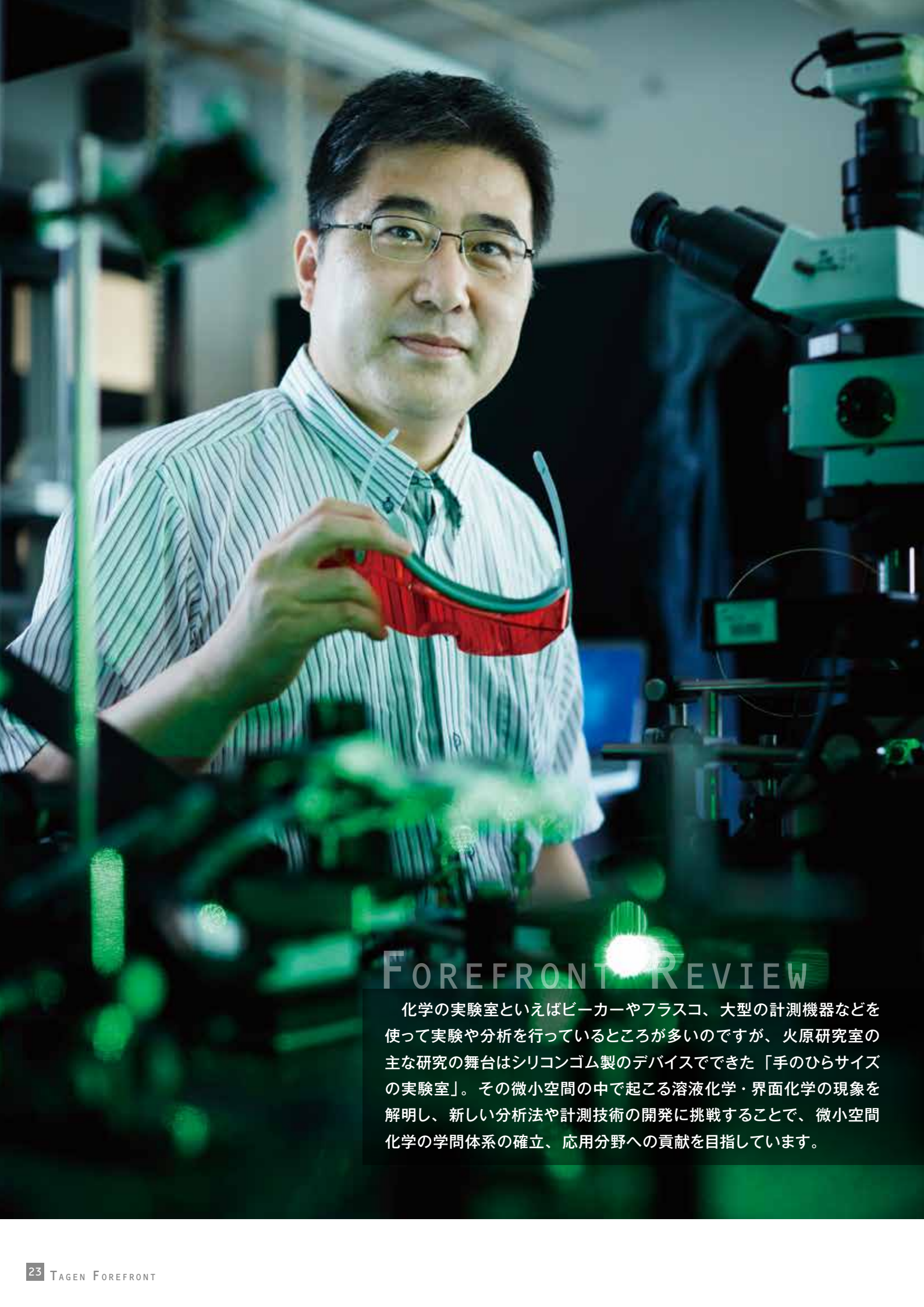
蚕(カイコ)の繭から作られるタンパク質。アミノ酸の結合により繊維となり、機械的強度が高く、且つ生体適合性も良いことから医療分野では縫合糸や包帯として利用されてきた。他の材料との組み合わせにより多機能化も可能であり、ドラッグデリバリーシステムの研究分野においても期待の高い材料である。

角膜のバリア機能

眼の最表面の組織である角膜は、外部からの異物の侵入を防ぐためにバリア機能を有していることが知られている。角膜の最表層の細胞は非常に密に接着しているため、一般的な点眼薬は角膜を透過することが困難である。

トリメチルロック(TML)基

3つのメチル基が互いに反発するような構造とすることで反応速度を高めた置換基。TML基が結合したナノ粒子点眼薬は眼内の酵素に反応して薬物を速やかに放出することが可能となる。



FOREFRONT REVIEW

化学の実験室といえばビーカーやフラスコ、大型の計測機器などを使って実験や分析を行っているところが多いのですが、火原研究室の主な研究の舞台はシリコンゴム製のデバイスでできた「手のひらサイズの実験室」。その微小空間の中で起こる溶液化学・界面化学の現象を解明し、新しい分析法や計測技術の開発に挑戦することで、微小空間化学の学問体系の確立、応用分野への貢献を目指しています。



社会とシームレスにつながる ナノ・マイクロ分析法の礎を築く

日常生活の中でも耳にすることの多い「分析」は、生物、医療、食品などあらゆる場面で必要とされる操作であり、そのためさまざまな手法が、数多くの研究者によって開発・実用化されてきました。例えばがん細胞を検出する際、細胞を培養した溶液の中に試薬を入れて反応を観察するという方法もその一つ。しかしこの場合、細胞の個性までは分かりません。たった一つの細胞が反応しただけの可能性もあり、それがどのような働きをし、全体にどのような影響を与えているのかを詳らかにすることは、技術的に難しいと言われてきました。

細胞を一つずつ丁寧に調べることはできないか。

そこで注目されたのが、マイクロデバイスを使った「単一細胞分析」です。細胞と同程度の $10\mu\text{m}$ の微小油中水滴における界面現象を利用し、その中で一つずつ分析することで、DNAやRNA、タンパク質などの物性を調べたり、内容物を計測することもできるようになります。

マイクロデバイスを使った分析が注目されるようになったのは1993年。電気泳動でデバイスを小さくしたことで、DNA分離の高速化が可能になったため実用性が認められるようになりました。

そんな分野の黎明期に研究をスタートさせた火原教授。未だ解明されていない部分が多い分野だからこそ、基礎研究が重要であると考えています。

〈研究テーマ〉

- ナノ・マイクロ流体デバイスを用いる簡易・自動化化学分析
- 界面化学に基づく液膜型分離・濃縮法
- 顕微イメージング法およびマイクロ空間検出法

多元物質科学研究所
ナノ・マイクロ計測化学研究分野 教授

火原 彰秀

HIBARA, Akihide

1972年、広島県生まれ。1995年東京大学工学部化学生命工学科卒業、1997年東京大学工学系応用化学専攻修士課程修了、1998年博士課程中退、1999年東京大学工学系研究科助手、2003年博士号(工学)取得、2003年東京大学工学系研究科講師、2007年東京大学生産技術研究所准教授、2013年東京工業大学理工学研究科理学系准教授、2016年東北大学多元物質科学研究所教授。

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/hibara/>

より緻密なバイオ分析を可能にする 分離・濃縮の「デジタル」化への挑戦

界面活性剤がつくる 「ミセル」のはたらきがヒントに

微小空間における分析化学では、界面活性剤をまとった液滴一つひとつを検証の対象としています。マイクロデバイスに溶液を流し入れることで同じ大きさの液滴をいくつも生成することができ、この液滴を使って内容物の測定や時間経過によるはたらきの変化の観察など行いま



シリコンゴムやガラスで作られたマイクロ分析チップの中で細胞など微細な対象の分析・検証が可能になる。デバイスを小さくすることで実用性が飛躍的に向上し、以来、盛んに研究されるようになった。

す。「マイクロの世界では重力より表面張力の方が支配的になる。そのためデバイスの中では同じ大きさの液滴が作られる。液滴同士が混ざり合わないようするためには界面活性剤を使用して安定化させる必要があるのですが、このとき液滴の周りには、さらに小さなナノサイズの水滴が無数に発生します」と火原教授。

別の実験中に偶然発見されたこのナノ水滴。これは界面活性剤が作る「ミセル」の働きによるもので、微小空間で分析を行う基礎を形作っていると火原教授はいいます。「界面活性剤には親水基と疎水基があり、油相中で自己集合してミセルを形成した際に周りから水を集めて親水空間を作ろうとする性質があります。乳液を作るときなどに用いられる“自然乳化”として以前から知られていましたが、微小空間で



微小空間におけるミセルのはたらきは、研究室に在籍するスタッフが学生時代に偶然発見したもの。一般的な現象もマイクロデバイスの中で意識的に検証する研究者は意外と少ない。

はミセルが微小液滴から水分を奪い、液滴の周りにナノサイズの水滴を作るようにはたらいていたのです。そこで一つの疑問が生まれました。液滴から水が抜け出ていくとき、中に含まれている溶質はどうなるのでしょうか。

自然乳化を利用して 濃縮と分離をコントロール

そこで火原教授は、蛍光性のルテニウム錯体を使った実験で、自然乳化後の液滴の蛍光強度を測定。20 μm だった液滴は3分後には5 μm にまで縮小しましたが、全体蛍光強度に変化はなく、100~200倍の濃縮に成功したことを示していました。一方、ポリエチレングリコールで同様の実験を行うと、濃縮されず水とともに液滴から抜け出てしまう。溶質の種類によって濃縮するか分離するかが異なるとともに、分析において重要なこの2つの操作が、微小空間ではリモートに行えるということを示唆していました。2つの試薬を混ぜた実験ではこの操作が同時に行えることを確認し、微小空間における分析化学

「何でも見るのが好き」、多種多様なスポーツを楽しみます

野球やサッカー、ラグビー、アメフトなどさまざまなジャンルのスポーツを観戦するのが好きですね。特に広島出身なので、「広島カープ」や「サンフレッチェ広島」が出る試合は積極的にスタジアムに見に行きます。一つ残念なのは、どちらも仙台には年に1回くらいしか来ないこと。野球も交流戦だけなのではないのですが、その分、所長や多元研のみんなと一緒に楽天戦を見に行きます。

スポーツ観戦は昔から好きで、テレビを見ながら熱心にルールを覚えようとしていたり、どうしてこのスポーツはおもしろいのか、選手たちはなぜこんなに真剣に戦うのか、ということを考えるような子どもでした。気になったことはなんでも掘り下げたくなるんですね。おかげで「スポーツ観戦のおもしろさ」について学会誌のリレーエッセイに寄稿したこともあるんですよ。



MY FAVORITE

TERM INFORMATION

ミセル

ミセルとは、衣料用洗剤などに含まれる界面活性剤が溶液中で形成する分子集合体である。界面活性剤は、1つの分子の中に親水部分と疎水部分を持ち、液体に低濃度で溶解しているときは単分子として孤立している。これに対して高濃度溶液では、分子集合体であるミセルを形成する。水溶液中では疎水部分同士が集合して、親水部分を外に向けたら集合体を形成する。ここでは、有機相中で親水基同士が集合して、水や親水性物質を内側に含むことができる親水空間をつくる。

ルテニウム錯体

重金属であるルテニウムのイオンは水溶液中でイオンの周囲にさまざまな物質を配位して錯体を形成する。ここでは、ピビリジンという含窒素有機物を1イオンあたり3分子配位して安定な構造を作る。強い光吸収、弱い蛍光をもつため色素として用いられることがある。

自然乳化

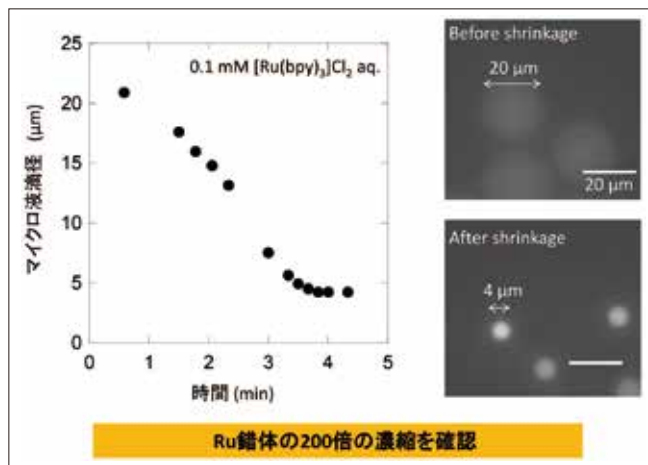
油相中に小さな水滴がある状態、あるいは水相中に小さな油滴がある状態をエマルジョンとよび、エマルジョンを作る過程を乳化という。通常の乳化では機械的な攪拌や、多孔膜を用いる方法がある。これに対して界面活性剤や溶媒の種類によっては二液体の接触のみで乳化が進行することがあり、この現象を自然乳化と呼ぶ。自発乳化とも言う。

イムノアッセイ

動物に、他の動物由来のタンパク質などの物質など(抗原)が入り込むと、体液中に抗体という物質が形成される。この抗原-抗体反応は非常に特異的な反応で、1つの抗体はその対象とする抗原のみと強く結合する。この性質を利用して生体中の目的物質を特異的に分析する手法をイムノアッセイと呼ぶ。大きな分子を目的物質とする場合、酵素標識抗体を用いるELISA (Enzyme-linked immunosorbent assay) が多用される。小分子をターゲットとする場合、目的分子と人工分子の抗体への結合が競合することを利用して競合イムノアッセイが用いられる。

生体高分子

分子量の大きな物質を高分子と呼び、生体関連物質の場合には生体高分子と呼ぶ。DNAやタンパク質を総称したい場合にこのような呼び方をする。



ルテニウム錯体で自然乳化後の濃度の変化を測定。乳化によって液滴から水が抜けていくも、中に含まれていた色素は液中に留まり、時間経過とともに濃縮されている様子が確認できる。

の基礎を着実に固めていくこととなります。「現在は何がどこまで濃縮するのか、しないのか、どんな原理があるのかといったことが分かってきています。濃縮にかかる時間の調整も可能です」。

調整の鍵を握るのがミセルです。例えば、分配平衡を利用して、①水を多く持つミセル ②水をほとんど持たないミセルを作ります。①は既に水を持つため液滴からは水をほとんど抜かず、逆に②は液滴から水を勢いよく吸い上げる。「塩の濃度によってミセルの疎水化・親水化が可能になることから、塩の種類と濃度、分子量の違い、ミセルの通過速度など、水相の条件を変えることで液滴の濃縮をコントロールできるようになります。この原理はイムノアッセイにも応用されています」。

イムノアッセイへの応用で バイオ分析の可能性を広げる

抗原と抗体による免疫反応を利用して微量物質の検出・定量を行うイムノアッセイ(免疫測定法)では、液滴に含まれる溶

質の分離操作が必要となります。しかしタンパク質のように分子量の大きな生体高分子は、液滴から出ていく速度が遅く、これをいかに早くするかで、微小空間におけるDNAやタンパク質を対象としたバイオ分析の可能性が大きく広がります。

「微小液滴とミセルの水相では溶質の濃度が異なるため、濃度勾配によって液滴から出ていく溶質の量が増えるのではないかと。流体の流れが遅ければ出ていきやすく、流れが速いと通過時間が短くなるため出て行きにくくなるのではないかと。その仮説に基づいて流体の速度を変えたところ、遅いときは液滴中の溶質の濃度が下がり、流れが速いと溶質は液滴中に留まって濃縮されることが確認できました」。流速を変えることで分離させる対象をコントロールできるようになるということは、濃縮させたい物質・分離させたい物質をある程度選べる、ということにもつながり、より精度の高い分析が可能となります。



濃縮は、ミセルが液滴の周りを通る時の速度と、液滴中に含まれる内容物の分子量に左右される。その時間スケールは約0.1~1秒。



「タンパク質やDNAのような生体高分子を対象とした分析法の確立が本命」と語る火原教授は、さまざまな分野に技術に応用し、研究の裾野を広げている。

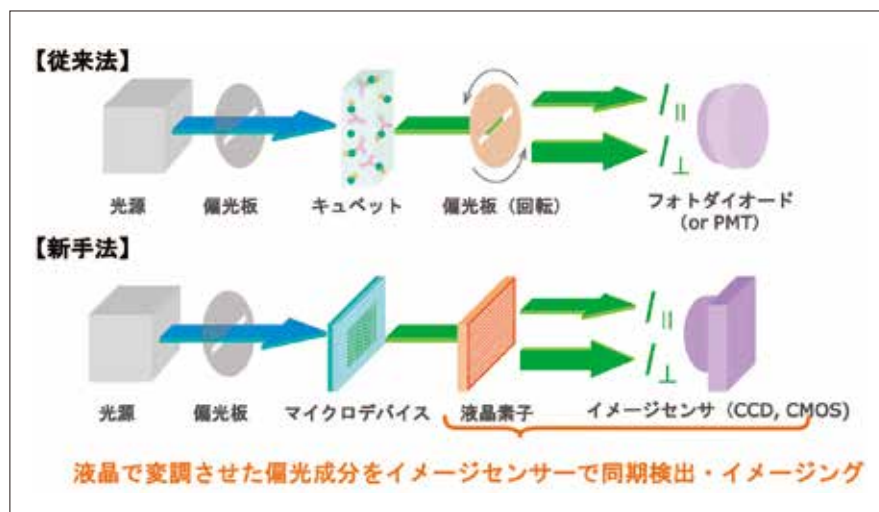
実用的な測定・分析法の確立 他分野への貢献も視野に入れて

「蛍光偏光免疫アッセイ」で 時間短縮・低コスト化を実現

免疫アッセイは、さまざまな成分が入り混じった溶液の中でも、抗体が抗原に引きつけられる性質を利用した分析法です。タンパク質や農薬、抗生物質などに反応する抗体をそれぞれ作り、分析を行います。特にタンパク質のような生体高分子は、抗体を固体表面に固定し、分離と

洗浄を複数回繰り返す「不均一系免疫アッセイ」による手法が一般的。しかし作業が煩雑で時間がかかるという欠点がありました。

そこで火原教授が提案したのが「イメージング蛍光偏光免疫アッセイ」です。この方法では偏光させた励起光をトレーサー分子（蛍光色素標識標的物質）に照射します。蛍光原子団が励起状態のと



液晶素子を利用したイメージングシステム。従来法は偏光板を回転させてフォトダイオードで撮影していたため機材が高額になりやすいという課題があった。



煩雑な作業の繰り返しになる不均一系免疫アッセイに対し、蛍光偏光免疫アッセイは混ぜるだけで濃度測定ができることから「ワンステップ免疫アッセイ」とも呼ばれる。

き、抗体と非結合のトレーサーは高速に回転しランダムな偏光を持つ蛍光を発するのに対し、抗体と結合したトレーサーは回転運動が抑制されるため偏った偏光を持つ蛍光を発します。この蛍光偏光度によって標的物質の濃度を測ることができるようになります。分離や洗浄、抗体の固定化を必要とせず、さらに多サンプルを同時に測定することも可能。画像化には液晶ディスプレイに使われるような液晶素子とイメージセンサーを利用するため、コストを抑えつつ、短時間で測定・分析することができるようになります。

共同研究によって システムの小型化を目指す

火原教授は現在、北海道大学および Tianma Japan, Ltd. との共同研究の中で、この蛍光偏光イメージングシステムを使った装置の小型化を進めています。「目指しているのはスマートフォンサイズの解析機器。小さいと研究室や実験室の中でも場所を取らないし、持ち運びやすく、その場ですぐ測定できる点が利点」

美しい絵画作品、ヨーロッパの風情ある町並みに魅了されて

学会の都合で海外出張が多いのですが、その際には大抵現地の美術館に足を運び、絵画鑑賞を楽しんでいます。レンブラントからモネまで、良いと思った作品やヨーロッパの風情ある町並みを見て歩く時間が好きなんですよね。お気に入りの場所はロシア美術の殿堂・国立トレチャコフ美術館。ロシアの研究者と一緒に仕事をする機会が多いので、モスクワに行くたびに立ち寄っています。

何でも掘り下げたくなるとは言っても、芸術だけは別。絵画は、言葉では表せないことを作品で表現しているのだと思うから、深く掘り下げて研究する対象としては違うのかもしれませんが。

国内にいるときは美術館や博物館で開催している企画展によく行きます。最近では東北歴史博物館で開催されていた特別展「東大寺と東北一復興を支えた人々の祈り」が特に印象的でした。

OFF TIME



TERM INFORMATION

トレーサー

競合イムノアッセイ法において、抗原（分析対象物質）と競合して抗体と結合する分子であるトレーサーを用いる。抗原が非蛍光性、トレーサーが蛍光性の場合、抗原-抗体複合体の蛍光強度が、サンプル中の抗原濃度に対応することを利用して抗原定量が可能になる。

蛍光偏光度

色素分子が光を吸収した後に発光する光を蛍光と呼ぶ。色素分子を直線偏光で励起した場合、励起した光と同じ偏光をもつ蛍光、その他の角度で偏光した光などが放出される。蛍光偏光度は、すべての蛍光のうち、励起光と同じ偏光をもつ光の割合を示す。

蛍光偏光イメージングシステム

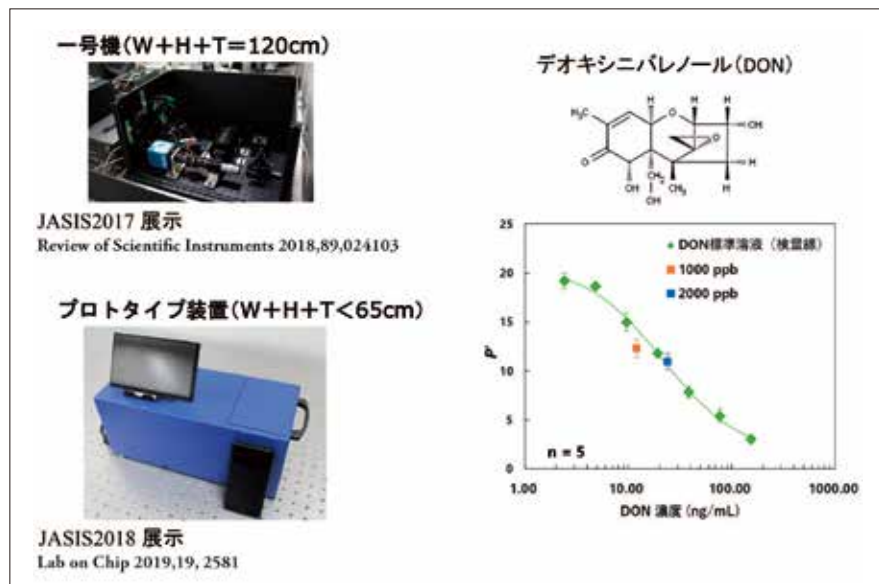
蛍光偏光度を測定するには、通常偏光子や光検出器を組み合わせる光学セル中の試料を測定対象とする。これに対してここで紹介する蛍光偏光イメージングシステムは、液晶素子とイメージング素子（CCDやCMOS）を利用して、蛍光偏光度の分布を一気に画像化するシステムである。回転する機械部品や、光を分割する方式を用いないため、安価・小型で明るい計測システムが実現された。

エアロゾル水滴

気体中に分散した液体または固体をエアロゾルと呼び、そのうち特に液体の水が空気中に分散したものをエアロゾル水滴と呼ぶ。エアロゾル水滴の生成は、雲形成や降水現象とも深く関わっており、その基礎過程解明が望まれている。

自発共鳴

波には波長がある。波を伝える物質の大きさ・長さが、波の波長とちょうど同じだったり、波長の整数倍だったりするとき、波の振幅が大きくなる現象を共鳴とよぶ。ここでは、水面などの自由界面に熱揺らぎにより発生した波が、マイクロ空間で共鳴する現象を自発共鳴と呼んでいる。



北海道大学、Tianma Japan, Ltd.との共同研究では細菌やウイルスといった微細物質を蛍光偏光イムノアッセイによって検出・分析する機器を開発。小型化によってさらに実用性が向上することが期待されている。

だと語る教授に賛同し、北海道立衛生研究所では実機を導入し、小麦に発生するカビ毒・デオキシニバレノールの一次検査に利用可能であることを実証しています。「ほかにもこの機器を使って家畜の病気や鳥インフルエンザの検出にも役立てようという動きがあります。これが実現すれば鳥類の動態を調査する際、どの場所の鳥が病気を持っているかといった検査がその場ですぐに行えるためメリットは大きい」。分析機器の小型化は、マイクロデバイスを使った微小空間での分析が可能としたもの。火原教授が進めてきた基礎研究が徐々に実を結び、さまざまな分野への貢献にもつながりつつあります。

エアロゾルの表面張力測定で環境科学分野への貢献も期待

他分野への貢献という点で火原教授が進めているもう一つの研究が、エアロゾル水滴の表面張力の測定です。「エアロゾル水滴は雲の生成や降水・気象予測に大きな影響を与えます。空気中の水蒸気が上昇気流に乗って上空に持ち上げられるとき、周囲は湿度100%以下のため水蒸気中の水滴から水が抜け出ていき、外に出ていけない物質は固体として濃縮されます。雲は、湿度100%を越えた“過飽和”の環境でこの固体を核に水が凝集したときに生成されます」。ミクロ

の世界では、過飽和か未飽和かに、表面張力が影響します。しかし水滴の表面張力を正確に測る方法はなく、2014年に発表された著名研究者の論文ではミリメートルスケールの水滴を使った表面張力測定を試みるに留まっています。

火原教授が得意とする光による測定法は、これまで難しいとされてきたエアロゾルの表面張力の測定を可能にしました。「準弾性レーザー散乱法」と呼ばれるこの手法は対象の表面張力波の自発共鳴を利用して測定します。さらに小さな液滴を測定するための新たなトラップ法の開発などの課題はありますが、エアロゾルの表面張力を測定するほとんど唯一の計測手法として、近年盛んに研究が行われている環境科学分野を中心に大きく貢献することが期待されています。



イメージセンサーの視野に収まる範囲であれば多サンプルの同時測定も可能。火原教授は東京工業大学勤務時代に世界で初めて同時蛍光偏光測定に成功した。



FOREFRONT REVIEW

2016年に大阪大学から東北大学に赴任してきた水上教授。研究室では、教授が築き上げてきた蛍光色素を使ったタンパク質ラベリング技術を基盤に、生体分子を見ること、光を使って生体分子を操作することで、生命現象や疾患メカニズムの解明を目指しています。さらに生体分子の可視化に必要な機能性分子の開発を応用し、ゆくゆくは創薬研究・開発につながることを期待されています。



センシング技術の開発とともに 生きた細胞の機能に迫る

体内に含まれる細胞や分子が相互に作用しながら、さまざまな機能を発現する私たちの体。その生体分子のはたらきを正確に理解するためには、ほかの生体分子との相互作用が保たれた状態、つまり生きた状態で観察・検証を進める必要があります。この生体分子の「見える化」の研究に長年取り組んでいるのが、生物有機化学、ケミカルバイオロジーを専門とする水上教授です。

現在は多元物質科学研究所の教員であり、東北大学大学院理学研究科、生命科学研究科でも教鞭をとる教授ですが、4年前まで勤めていた大阪大学では蛋白質を蛍光色素で修飾する「蛋白質のラベル化技術」や生体分子や細胞の活性を蛍光顕微鏡やMRIで可視化する「バイオイメーキングプローブ」の開発に携わっていました。生きた動物体内のがん細胞や酵素活性の検出にも取り組むなど、生命の中で分子や細胞が実際にどのように機能しているのかを追求し続けています。

生きた動物や細胞の中で生体分子を直接観察することは非常に難しく、それを可能とするには機能性分子などを用いる必要があります。そこで水上教授は、有機合成化学や蛋白質工学などの技術を駆使して局所レベルで機能する分子を開発しています。レーザーなどの光技術と融合させることで、生体分子のはたらきを「見る」こと、そしてはたらきを理解した上で生体分子の機能を「操作する」こと、この2つのオリジナル技術を飛び道具として用いることで、生命現象や疾患メカニズムを解明し、将来的に産業応用につなげることを目指しています。

多元物質科学研究所
細胞機能分子化学研究分野 教授

水上 進

MIZUKAMI, Shin

1974年、東京都生まれ。1997年東京大学薬学部卒業、2002年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了(薬学)、2002年産業技術総合研究所界面ナノアーキテクトニクス研究センター・産総研特別研究員、2004年スタンフォード大学 化学科・日本学術振興会海外特別研究員、2005年大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻・助手、2007年大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻・助教、2009年大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻・准教授、2009年大阪大学免疫学フロンティア研究センター・准教授(兼)、2016年東北大学多元物質科学研究所教授。

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/mizukami/>

かつて水上教授が取り組んでいた破骨細胞活性のイメージングでは、生きた動物体内の破骨細胞が骨をどのように溶かすのかを観察することに成功している。



低分子とタンパク質を融合したハイブリッドプローブへの道

可視化プローブを細胞内の微小領域に配置する

細胞内には、核や小胞体、ゴルジ体、ミトコンドリアといったオルガネラ(細胞小器官)と呼ばれる構造体があります。細胞内分子はその局在によって機能が制御されていることが分かってきました。近年目覚ましく発展を遂げた超解像蛍光顕微鏡などの技術によってオルガネラの微細構造を観察することは可能になってきましたが、その中で生体分子がどのような動きをし、どのような機能を持っているのかということについてはほとんど解明さ

れていません。そこで、それらの生体分子の機能を明らかにするためには、まずその生体分子を「見る」必要があります。ここで重要となるのが、水上教授が長年研究してきた蛋白質のラベル化技術です。「この技術は生命科学において、ここ数年大きな存在感を示していて、“Halo Tag®”などの技術が市販されています。これはタグ蛋白質と呼ばれる蛋白質を利用したツールで、これに特異的に結合するリガンドを持った可視化プローブを細胞に投与することで、タグ蛋白質が発現する場所に生体分子を見る可視化プローブを局在化させることができます」

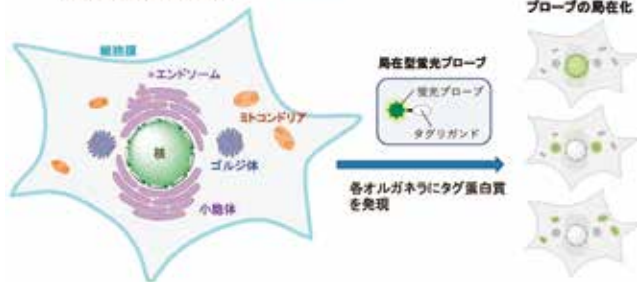
と話す水上教授。核や細胞質、細胞膜など、どこにタグ蛋白質を発現させるかは遺伝子工学技術を利用します。「つまり、タグ蛋白質に集積する分子プローブを開発すれば、核やミトコンドリア内の生体分子を見ることができるのです」。

細胞内金属イオンを長い時間観察する

通常の低分子蛍光プローブは細胞に投与しても数時間で排出されるため、長時間にわたって生体分子のはたらきを測定することは困難でした。長時間の測定ができないことによってそのはたらきが十分に解明されていない細胞内イオンとして水上教授が目をつけたのが、マグネシウムイオンです。「細胞内マグネシウムイオンはこれまで長時間にわたって連続的に見る手法はありませんでした。しかし、蛋白質ラベル化技術を用いれば細胞の中にとどめることができます。発生や抗がん剤の作用機構で重要なカギを握るアポトーシス(細胞死)は数時間以上を要する細胞内現象です。我々の開発したプローブによって、アポトーシスにおいてマグネシウムイオン濃度がどのように変化するかを連続的に見る事が可能になりました。24時間以上の連続的イメージングも

オルガネラ内の生体分子ダイナミクス

細胞質中の分子ダイナミクス研究は進展しているが、オルガネラ内についてはほとんど分かっていない



水上教授が開発したラベル化技術ではペニシリンがリガンドとして使われる。これは、標的タンパク質がペニシリンを付加した機能性分子と結合しやすい性質を利用したもので、ペニシリンに蛍光色素を加えることで標的タンパク質を蛍光色素で修飾できるようになる。

料理得意はケミストの性? ^{さが}ワインとにんにくで本格風

一人暮らしの頃から料理をしていて、日曜日は疲れていなければ自分で料理をすることは多いです。合成化学をやっている人は同意されると思いますが、熱を加えると性質が変わる——色が変わったり、おいしくなったりするところは有機合成と良く似ています。よく作るの子どもからのリクエストが多いパスタです。種類は何でも作りますが、基本的にワインとにんにくを多めに使うのがこだわりポイント。子どもにはやっぱりミートソースが一番人気です。

外でお酒を飲むのも好きです。最近はお酒を飲めない(飲まない?)学生が多いのが少し残念ですが、研究室の飲み会では多国籍な雰囲気を楽しんでいます。

MY FAVORITE



バイオイメージング

生きた細胞や組織、あるいは動物個体中の生体分子を可視化して観察する分析技術。細胞生物学における蛍光イメージングが代表的な手法である。近年、顕微鏡やレーザーなどの技術が著しく進展し、蛍光プローブを用いることにより、生細胞内の分子や微細構造を短時間で高精度に観察することが可能となっている。

蛍光プローブ

プローブ (probe) は探索針の意味で、イメージング研究では対象分子を認識して、機器測定により検出可能なシグナルを発する化合物に対して用いられる。特に蛍光イメージング実験に用いるものを蛍光プローブと呼ぶ。実用的なものは低分子プローブと蛋白質プローブが大半を占めるが、近年の医学・生命科学において欠くことのできない研究ツールとなっている。

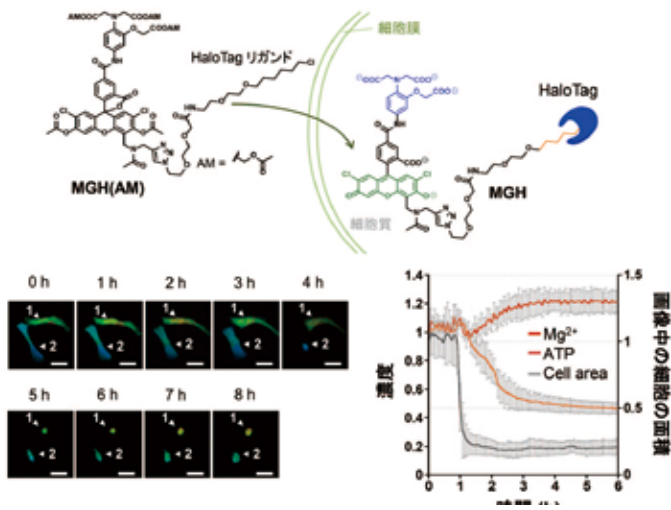
リガンド

蛋白質に結合する分子のこと。細胞膜上の受容体に結合して細胞内にシグナルを伝達する分子などが知られる。

蛋白質ラベル化技術

タグ蛋白質とそれに特異的に結合するリガンドを用いて、特定の機能性分子 (蛍光色素など) を標的蛋白質に選択的にラベルする技術。標的蛋白質は遺伝子工学的手法によりタグを融合させ、プラスミドなどを用いて生細胞に導入できる。HaloTag® (Promega社) や SNAP-tag™ (New England Biolabs社) など市販されているものもある。

アポトーシス時の細胞内Mg²⁺イメージング



(上) 試薬MGH(AM)は細胞内に入ると活性化してMGHになり、マグネシウムイオンセンサーとなる。細胞質に発現させたHaloTagと結合すると、細胞外への排出が抑制され、長時間のイメージング実験が可能になる。
(下) アポトーシスを誘導すると、数時間で細胞は凝縮し、アポトーシスが開始する。細胞体積 (画像中の細胞面積) の著しい減少の後、ATP濃度の減少とともにMg²⁺濃度の上昇が観察された。

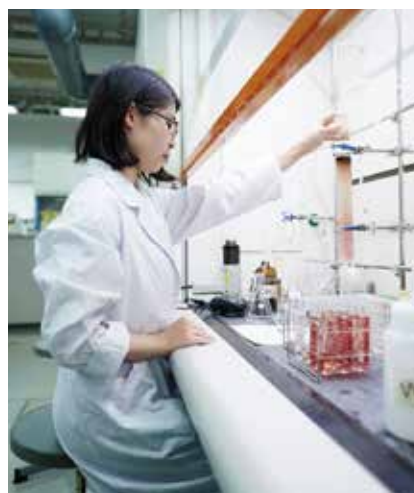
可能であり、蛍光プローブを核に局在させて観察を続けると、細胞分裂を起こす細胞が出てきます。分裂期の細胞と分裂していない細胞のマグネシウム濃度の比較なども可能です」。この技術により、アポトーシスや細胞分裂が起こる際、どちらも細胞内や核内のマグネシウムイオンの濃度が上昇することが確認されました。「細胞分裂が始まるとマグネシウムイオンの濃度は上がり、分裂が終わると元の濃度に戻ります。別の方法で測ることのできるATP (アデノシン三リン酸) の濃度と関連していると考えています」。長時間の測定が可能でセンシング技術として確かな手応えを感じながら、研究を進めています。

低分子-蛋白質ハイブリッド
プローブが拓く高精度測定

学内での共同研究も積極的に進めています。蛋白質ラベル化技術を活用した可視化研究の一つに、オルガネラ内の重

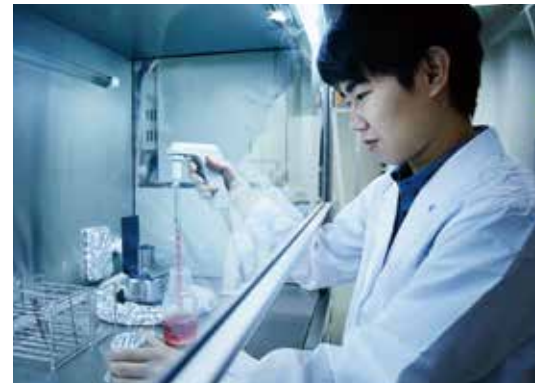
鉛濃度の定量に関するものがあります。これは多元物質科学研究所・生体分子構造研究分野の稲葉謙次教授とともに進めている共同研究で、核・ミトコンドリア・小胞体・ゴルジ体などに存在する重鉛イオンの濃度を測定しています。「これまで、複数の海外のグループによって蛋白質プローブを用いた細胞内重鉛イオンの濃度定量に関する報告はありました。しかし、幾つかのオルガネラ内の重鉛濃度は関連データとの矛盾が見られており、正確な濃度は報告値とは異なる可能性が指摘されています」。共同研究を通して測定された濃度定量データが正しいことを証明できれば、これまでの通説を覆すだけでなく、生命科学の進展を促進する、より高精度の濃度定量技術が確立されたといえるかもしれません。

「今後はマグネシウムや重鉛以外の金属イオンに対するプローブの開発も考えています。また、複数のイオン濃度やpHを同時に測定し、イオン間のクロストーク、例えば一方の金属イオンの濃度が上がったときにもう一方の濃度はどのように変化するのか、といったことを定量的に検証していきたいと考えています」。



有機合成化学と遺伝子工学の技術を応用して分子設計を行うことで、低分子とタンパク質による高機能センサーをつくることできる。

光を使うことで、人工的に再現した疾患が活性時はどのような病態を示すか、どのように阻害できるか、など疾患関連タンパク質のより詳細な検討が可能になるという。



光応答性リガンドを開発し、生体機能を制御する試み

ケージド化合物による蛋白質の動きの光誘導

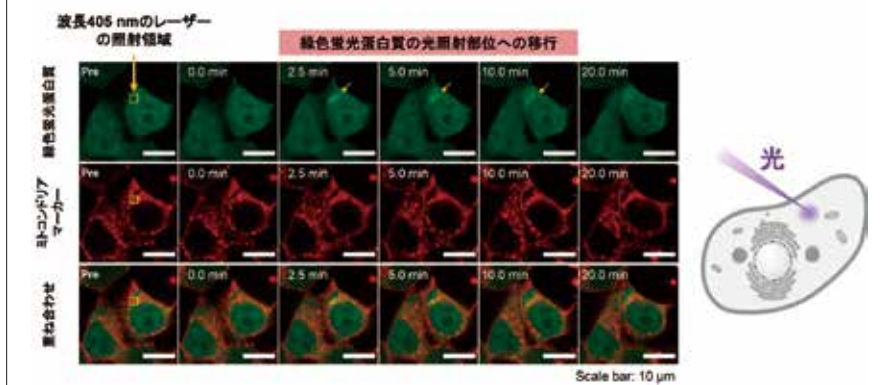
光応答性蛋白質であるチャンネルロドプシンを使って神経細胞を光で操作する光遺伝学(オプトジェネティクス)の研究が、近年盛んに行われています。水上教授は有機合成化学的なアプローチによって光を照射したときに構造変化を引き起こす生理活性分子を設計、「生体機能を光で操作する」試みを続けています。

アプローチ方法は二つあります。その

一つが以前から広く知られていた「ケージド化合物」を使った手法。生理活性分子を光感受性保護基で修飾して一時的に不活性にし、光を照射すると保護基が分離して活性化するという性質を利用して、細胞内の蛋白質の移動を可能にします。例えば、HaloTag[®]と融合させた標的蛋白質Aと、研究室で独自に開発したBL-tagと融合させ別の蛋白質Bをそれぞれ細胞内に発現させ、そこに別途設計したケージド化合物を加えます。この分子は

HaloTag[®]リガンドと光感受性保護基を修飾したBL-tagリガンドをリンカーで連結したもの。こうすることで、初期段階においてこの分子は蛋白質Aとは結合し、蛋白質Bとは結合しない状態をつくります。ここに光を当てると保護基が脱離し、蛋白質Aと蛋白質Bが合成分子を介して連結します。「たとえば蛋白質Aがあるオルガネラに、蛋白質Bを細胞質に発現させ、ここにケージド化合物を加えて光を当てる。すると細胞質にいた蛋白質Bが蛋白質Aの局在する場所に近づく様子を観察することができます。蛋白質の中には局在する場所によってその機能を変化させるものが知られているので、光を当てて蛋白質を自在に移動させることができれば、さまざまな細胞機能を光で制御することができ、病態モデル細胞の作製など様々な応用につながると考えています」。

光を用いた細胞内蛋白質の局所移行制御



ケージド化合物に光を当てると光感受性保護基が脱離し、2種類の標的蛋白質を結合させることができる。このシステムを応用することで標的蛋白質の光照射部位への移行を誘導できる。

光で薬物構造をスイッチする創薬の新たな可能性

もう一つが「フォトスイッチ化合物」を使ったアプローチです。これは光を照射すると構造が変化し、別の光を当てると元の構造に戻るような分子です。たとえ

子どもと一緒に将棋対局。常に真剣勝負です

休日子どもと過ごすことが多いですね。子供に将棋を教えたら打てるようになったので、一緒に将棋をすることもあります。ネット将棋も良くやりますし、YouTubeの対局動画の解説を見ながら戦術を勉強することもあります。

将棋に関連したところでもう一つ。プロ棋士の羽生善治永世七冠が強豪チェスプレイヤーであることは有名な話ですが、彼が「チェスの戦略は将棋でも通用する」といった趣旨の話をしていて聞いてから、チェスも始めました。日本では将棋と比べると人気が無いので、ネットでの対戦相手はほとんど外国人です。





光を使うメリットは、時間や空間、波長、強度などがある程度自由に制御できる点にあるという。体内に光を当てる方法は研究・検証が待たれる。

す。こうしたシステムを利用することで、光照射した部位だけに効くような副作用を抑えられる薬の開発も可能になるでしょう」。水上教授は自信をのぞかせます。

光で、見る 光で、操作する

光を使って生体分子の動きや機能を見るだけでなく、生体分子同士を融合させる、あるいは可逆的に結合と解離を制御する。これにより、光を照射することで生体内の蛋白質の局在を変化させたり、その機能を阻害させたり活性化させたりすることで、様々な細胞機能の制御が可能となります。現在、生命科学や医学では酵素の阻害剤や受容体のアンタゴニストなどのさまざまな試薬を使って細胞機能を調べる研究が盛んに行われていますが、時間分解能と空間分解能を加えられる光を利用することで、より精密な革新技術の開発につながる、と水上教授は考えています。

「将来的には、可視化プローブを使った生体分子機能のイメージング技術と、フォトスイッチ化合物あるいはケージド化合物による生体分子機能の光操作技術とを組み合わせ、生命現象や疾患メカニズムの解明につなげていきたいと考えています」。「見る」と「操作する」ことは古くから生命科学研究手法の根幹となる手法でした。光に応答する有機化合物を

開発することで、さらに高精度な研究が可能となりつつあります。もともと不活性だった薬物を光やpH、低酸素などで活性化させるような機能性薬物が開発できれば、臨床応用可能な創薬にもつながるはず。長期的な産業応用も見据えた研究が医薬関連業界にインパクトを与えられる日も、そう遠くないかもしれません。

TERM INFORMATION

BL-tag技術

薬剤耐性細菌が持っているペニシリンなどのβ-ラクタム抗菌薬を分解する酵素β-ラクタマーゼに基づく蛋白質ラベル化技術。β-ラクタマーゼの一つのアミノ酸を変異させると、β-ラクタム抗菌薬と共有結合を形成し、安定に存在する。そこでこの変異体酵素をタグ(BL-tag)、β-ラクタム抗菌薬をリガンドとして、蛋白質ラベル化技術に応用できる。

ケージド化合物

光をあてると切断される保護基で活性を抑えた生理活性分子。顕微鏡で観察しながら、レーザーを照射することで、サンプルの一部分だけで活性のある分子を発生させることができる技術として、特に神経科学の分野に大きな進展をもたらした。

フォトスイッチ化合物

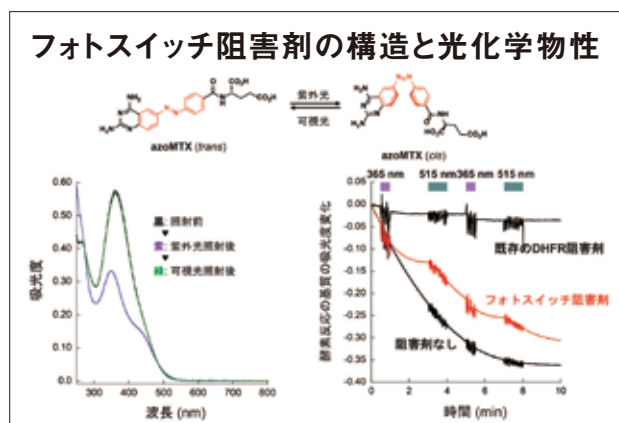
フォトクロミック化合物とも言われる。特定の波長の光を吸収して構造変化を起こすと同時に、色調が変化する。その後は速やかに元に戻るものと、別の光を吸収すると基に戻るものなどが存在する。アゾベンゼンやジアリルエテンなどが代表的なものである。

ジヒドロ葉酸還元酵素 (dihydrofolate reductase: DHFR)

基質のジヒドロ葉酸をテトラヒドロ葉酸に還元する酵素。テトラヒドロ葉酸はDNAなどの合成に必要な分子であり、その活性を阻害することで細胞死を引き起こすことから、その阻害剤であるメトトレキサートは抗がん剤などの用途に使用されている。また、細菌のDHFR(eDHFR)を特異的に阻害するトリメトプリムは抗菌剤として知られる。

ば片方の構造ではある蛋白質に結合する活性を持ち、もう片方の構造では持たないようなフォトスイッチ化合物を設計することで、はじめは蛋白質にくっつかず、光を当てると結合し、別の光に変えると再び解離するといった可逆性をもたせることが可能です。水上教授はこのようなフォトスイッチ化合物を、標的蛋白質・ジヒドロ葉酸還元酵素(DHFR)とその阻害剤である抗がん剤・メトトレキサート(MTX)複合体の結晶構造を参考に開発。光を吸収するとシス体からトランス体へと異性化し、シス体のときはDHFRに結合し、トランス体のときは解離するような分子設計により、365nmの紫外線と560nmの可視光を交互に当てたときに可逆的に結合・解離をスイッチングすることを達成しました。

「フォトスイッチ阻害剤を通常はトランス体が安定で、この状態では低い濃度で存在していてもDHFRは通常通り酵素反応を示します。365nmの紫外線をあててシス構造にすると酵素反応が止まり、515nmの可視光をあてると再度反応が進みま



フォトスイッチ阻害剤の構造は紫外線を照射するとトランス体からシス体に変化し、可視光を照射するとシス体からトランス体に戻る(上:化合物の構造変化、左下:吸収スペクトルの変化)。このうち、シス体のみが高い酵素阻害能を示す。フォトスイッチ阻害剤の存在下でDHFRの酵素反応を行うと、紫外光(365 nm)を照射すると酵素反応は停止し、可視光(515 nm)を照射すると再開する(右下)。



FOREFRONT REVIEW

高温水や非水溶媒を利用するソルボサーマル反応を主とした環境にやさしいソフトケミカル手法による材料合成を駆使して、複合アニオン化合物等の無機材料合成とその電子構造制御、無機ナノ材料の形態・結晶化度・結晶相・粒子サイズの精密制御へ。般研究室では、環境調和・エネルギーの高効率利用・光子や化学物質による応答機能等を持つ無機機能材料の創製及び環境応答機能性の高度発現に関する研究を行っています。



ソフトケミカルプロセスによる 機能性環境応答材料の創製

「環境にやさしいものを開発する」。環境に負荷をかけないものを創製すると同時に、つくる「プロセス」においても環境に配慮することが求められる時代になっています。

殷研究室が行っている研究のポイントは、環境にやさしい「ソフトケミカル的な手法」を利用すること。そしてこのプロセスをもとに、無機粉体材料や薄膜材料のマイクロ・メソ、マイクロ構造制御を行い、新規材料創製及び既存材料機能の高度化を目指し、環境応答機能を有するエコマテリアルの創製とその機能評価・特性の発現機構の解明や制御などに関する研究課題に取り組んでいます。

バルク材料・粉体材料及び薄膜材料合成には、比較的低温で実施可能な溶液プロセス、メカノケミカル処理、酸素プラズマ処理などを利用し、環境負荷の少ない温和な合成プロセスの利用により、無機材料のサイズ・形態・結晶化度・表面性状の精密制御を行い、高い物理・化学機能性を有する無機環境材料の合成を行っており、環境以外の多くの分野での活用も期待できます。

殷研究室が行う研究のトピックスは3つのキーワードから構成されています。①プロセス制御、②環境(光や化学物質)応答機能性制御、③新機能探索です。このキーワードをもとに高い環境応答機能を有する材料を環境負荷の低いプロセスで創製することを目指しています。

サイズや形態が制御された金属酸化物・酸窒化物ナノ粒子及びマイクロ粒子を効率よく合成できる手法を開発し、ユニークな形態を有する無機ナノ材料の創製及びサイズや特異的な形態に基づく新機能発現について検討を行っています。

〈研究テーマ〉

- グリーンプロセスによる無機化合物の創製 [プロセス]
- 窒化物・酸窒化物のナノ構造制御と機能性発現 [機能性発現]
- フォトンエンジニアリングを中心とした機能性創出 [光応答]
- スマートウィンドウの構築とマルチ機能性
- 二次元化合物を利用した環境応答機能材料

多元物質科学研究所
附属新機能無機物質探索研究センター
環境無機材料化学研究分野 教授

殷澍

Yin, Shu

1965年、中国安徽省生まれ。東北大学工学研究科博士課程後期修了。工学博士。高知大学客員研究員、東北大学反応化学研究所助手、同多元物質科学研究所講師・准教授を経て、2016年より現職。

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/yin/>

新しいソルボサーマル反応をもとに、 無機材料合成と電子構造制御を実現

環境時代、求められる 地球にやさしいプロセス

高い技術力と競争力があり、経済の発展を支えている我が国の化学品製造産業。しかし、未来に向けて地球温暖化の問題、環境への負荷など様々な課題を抱えていて、持続的な生産プロセスの構築が急がれています。

「このような状況の中で、我々は環境にやさしいソフトケミカルプロセスに関して研究を重ねてきました。『環境に配慮した合成プロセスで、環境に調和する材料を



無機材料を粒子サイズや粒子形態を効率よく制御できる「ソルボサーマル反応」。殷研究室では、「ソルボサーマル反応」を活用し、新たな機能発現を持つ無機材料の合成に取り組んでいます。

つくる。』そのひとつの答えが『ソルボサーマル反応』です」と自身の研究の方向性を語る殷教授。

「ソルボサーマル反応」は、高温・高圧の溶媒を用いてナノ粒子を合成する方法で、1994年、高松における高温流体の反応に関する国際会議の際に、溶媒 (Solvent) と熱 (Thermal) から造語されたものです。「高温高圧の熱水や有機溶媒のもとで行われる水熱反応やソルボサーマル反応では、固相反応などの高温法に比べ、環境にやさしいというメリットがあります。さらに溶媒性質の変化を利用することによって、無機ナノ粒子の化学組成、電子状態や形態・粒子サイズの制御に有効です」。

無機材料の機能性は、化学組成、イオンドープ、粒子サイズ、比表面積、粒子形態、結晶面等に強く依存するので、自由にそれらのファクターを制御できれば新たな機能発現の可能性が生まれます。しかし、通常の固相反応等の高温合成プロセスでは、ナノ結晶の合成および形態制御は困難。それに対しソルボサーマル反応では、異なる誘電率を有する溶媒を選

択することによって、溶解—再析出プロセスにおける溶質の溶解度制御を通じて、粒子サイズ及び粒子形態を制御することが可能だと殷教授は言います。殷研究室では、ソルボサーマル反応による複合アニオン化合物の合成を行い、窒素やカーボンドープ酸化チタン及びチタン酸ストロンチウム等、数多くの優れた可視光応答性光触媒の創製に成功しています。

新規ソルボサーマルプロセスで 薄膜・粉体機能性材料の創製

殷教授は水やアルコールを溶媒とする通常のソルボサーマル反応プロセスと異なり、高温におけるアルコールとカルボン酸のエステル化反応による水の生成反応を巧みに利用し、水分子を反応溶媒中に精密に放出でき、粒子サイズや形態を精密に制御できる新しいソルボサーマル反応を開発しています。それが Water Controlled-Release Solvothermal Process (WCRSP) です。

「このWCRSPを利用することによって、サイズや形態が制御された酸化チタンベース光触媒ナノ粒子の合成を提案しています。代表的な合成条件として、アルコールと酢酸のエステル化反応進行することによって、水分子が生成し、チタン酸テトラ-n-ブチルとの加水反応が進行し、水熱反応条件下では、酸化チタン微結晶として析出します。水の量は結晶化に大きく影響を与え、溶媒中の酢酸の割合を増やすことによって、生成・放出した水分子の量が増加し、粒子の成長を促進し、粒子サイズが大きくなることが分かりました」。

これまで、エタノールの他、ブタノール、エチレングリコールなどの高級アルコール

MY FAVORITE

「土壌と空間を良くすればたくさん採れる」が家庭菜園の鉄則。研究も同じです

家庭菜園が好きで、ニンニク、ゴーヤ、唐辛子、茄子、エンドウマメ、トマト、きゅうり、ネギ、ニラ、青梗菜、スイカなどを様々なものと作っています。きゅうりが大好きで、新鮮で美味しい！ 毎日食べてもあきることがないですね。

トマトは失敗する時もありましたが、ある年、一株の苗から、1200個以上のミニトマトを収穫したこともありましたが（その年、毎日収穫数を記録しました）。夏の全盛期は真っ赤なトマト。11月中旬ごろになるとさすがに青い状態でしたが3kgの収穫、暖かい室内に保管すれば、そのうち赤くなります。

「たくさんの実を小さくてもいいからたくさん採れるようにしたい」。それが私の願いで、それには、土壌と空間が大事。これは我々の研究にも通じることですね。



ソルボサーマル合成

ソルボサーマル合成 (Solvothermal Synthesis) 高温・高圧の溶媒を用いる合成方法です。フランスの Gérard Demazeau (1943-2018) に提唱されたコンセプトで、溶媒が水の場合は水熱合成と呼ばれます。ソルボサーマル合成は、金属や酸化物、窒化物等の半導体、セラミックス、ポリマーなど、様々な材料を合成する手法に発展し、幅広い応用がされています。通常、1 atm、沸点以上の反応条件で利用され、溶媒の臨界温度以下では亜臨界、臨界温度以上では超臨界とも呼ばれています。ソルボサーマル合成は、薄膜、バルク粉末、単結晶、ナノ結晶など様々な形状を作るのに使用できます。ナノ粒子の合成に関して盛んに研究されており、更に、異なる誘電率を有する溶媒や添加剤の利用、溶媒の過飽和、溶質の濃度、反応速度などの精密制御により、球状や立方体(3D)、板状(2D)、ロッドやファイヤ(1D)など様々な粒子形態を有する熱力学的安定状態・準安定状態の結晶を形成することができます。

酸素プラズマ処理

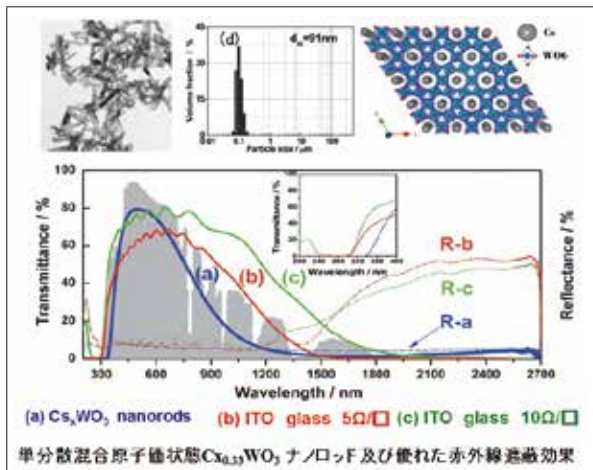
プラズマとは、気体を構成する分子が電離し陽イオンと電子に分かれて運動している状態であり、電離した気体に相当します。酸素プラズマは低温プラズマの一種であり、物理表面処理などとして利用されます。処理ガスとして減圧酸素ガスを用いることにより、例えばポリプロピレンを酸素プラズマで処理した場合、酸化反応により水酸基(-OH)、カルボニル基(=CO)、カルボキシル基(-COOH)といった官能基が表面に生成され、同時にエッチング反応による表面の粗化が起きます。100℃以下の低温で施すことが可能です。

メカノケミカル処理

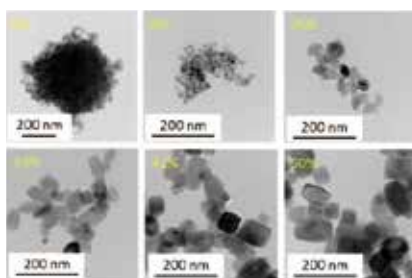
物質に機械的エネルギーを与えると、物質の結合状態が変化し、表面が活性化されます。衝撃、圧縮、せん断、摩擦などの機械的エネルギーを与えることにより、物質の結晶構造変化をもたらす、周囲の物質と化学反応を起こすことがあります。メカノケミカル処理は室温で操作可能ですが、局所温度が高く、そのエネルギーレベルは、熱化学を上回るといわれ、これまでも多くのユニークな現象が報告されました。反応機構については不明な点が多いですが、無定形化と物質の相転移、メカノケミカルドーピング、固相反応、鉱物処理、レアメタル回収、脱塩素等の化学反応など、多岐に渡り応用されている手法です。

複合アニオン化合物

複数のアニオンを同一化合物中に含む物質が複合アニオン化合物です。これまで酸化物を中心とした材料は様々な産業を支えてきました。水素や酸素、窒素、ハロゲンなどの軽元素アニオンは周期表で近い位置にあっても化学的性質が大きく異なるため、複合アニオン化合物は、単一アニオン化合物にはない特異な電子構造や結晶構造が得られ、アニオンの組成・局所構造、アニオン秩序度などが精密制御されることにより、斬新な結晶構造および電子構造を創り出し、革新的な新機能を導きます。



WCRSPIによるマイクロ粒子の写真。優れた赤外線遮蔽機能を実現しています。



酢酸-エタノール混合溶媒中(数字は酢酸の割合)で合成。酸化チタンベース粒子のサイズ制御を可能にしています。

と酢酸やブタン酸、ヘキサ酸、オクタン酸等の高級カルボン酸の混合物を反応溶媒として利用することによって、高温でのエステル化反応による水の生成と放出を精密に制御し、光触媒粉体や赤外線遮蔽機能粉体材料の合成に成功。また、サイズが制御されたタングステンセシウムや酸化チタン球状粒子等を効率よく合成できるとともに、優れた物理化学特性を実現しています。

窒化物・酸窒化物をナノ構造制御し新たな環境応答性を生み出す

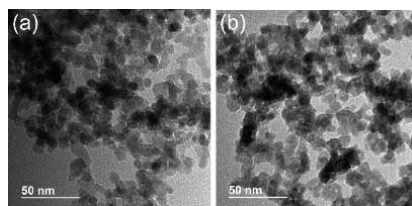
「現在、金属窒化物・酸窒化物は、サイズの制御や形態を制御することで、様々な新規機能性が見出されたということで注目されています。我々は、比較的低い温度で粒子形態やサイズの制御された窒化物や酸窒化物の合成条件の探索を行っています」。

ガリウム源とアセチレンブラックおよびヘキサメチレンテトラミンからなる水溶液を水熱処理することで得られる中間体を焼成することでGa₂O₃ナノ粒子を得たの

ち、窒化反応することによって、ガリウム酸窒化物ナノ粒子を得ることに成功。得られたガリウム酸窒化物ナノ粒子は、アセチレンブラックを用いず水熱反応を行い窒化したガリウム酸窒化物よりも高表面積で、酸素含有量が多いことも示されています。「酸素含有量が多いことにより、バンドギャップが

小さくなっていることがわかっていて、この高表面積および狭いバンドギャップによって、高い光触媒NO_x分解能が示されています。従来、窒化物・酸窒化物のナノ構造体の合成例は少なく、本手法が他の物質のナノ構造化へ貢献すると考えられます」。

さらに、窒化物の形態制御を実現し、新たな機能性を発現する研究も行っています。「形態が制御された水酸化物を前駆体として利用し、アンモニアガス中での窒化処理及び窒化におけるヒドラジンの添加等によって、比較的低い温度で板状、ファイバー状及びナノサイズ等、様々な形態の窒化物・酸窒化物の合成に成功しました。この形態制御により、高温焼結特性、優れた水素やトルエンガスへの応答機能を発現することを実現しています」。



ガリウム源とアセチレンブラックおよびヘキサメチレンテトラミンからなる水溶液を水熱処理することで得られる中間体を焼成して精製した(a)Ga₂O₃ナノ粒子。さらに窒化することにより、(b)ガリウム酸窒化物ナノ粒子の合成に成功。その透過電子顕微鏡(TEM)像です。



無機ナノ材料を制御することから 光や環境に応答する無機材料創製へ

フルタイムでフル波長 効果ある光触媒システムを

「我々の研究室では『環境に調和する材料をつくる』というテーマをさらに発展させ、現在、環境、エネルギーの高効率利用に貢献できる高度光機能性材料の創製、フォトンエンジニアリング(Photon Engineering)を中心とした機能性材料創出に取り組んでいます」とさらなる研究の展開を話す殷教授。

紫外線・可視光・赤外線といった光の波長別に応答機能の高度化を目指して



光触媒は太陽光や蛍光灯の紫外光をエネルギー源として、空気を浄化するなどの機能が永久に持続するので、究極の省エネといえます。この光触媒の機能をさらに向上させることが殷研究室が研究を進めているものの一つです。

います。例えば、紫外線であれば、DNAを損傷したり、皮膚にダメージを与えることを防ぐ日焼け止め化粧品、紫外線・可視光であれば太陽電池、そして光を吸収することにより特定の反応を促進させる「光触媒」に注目しています。

「これまでの『光触媒』は全体の約5%の紫外線や可視光の一部しか利用できないため、弱い光及び長波長光による触媒活性が非常に限定的でした。95%を占める可視光や赤外線に対応する新物質、または新機能物質を合成し、フルタイムでフル波長を利用すれば、浄化機能が飛躍的に向上することが期待できます」。

環境にやさしい制御されたコア・シェル構造ナノコンポジット創成プロセスにより、様々な可視光触媒及び蛍光材料との組み合わせが可能となり、マルチ機能を持った光触媒を創製することができます。フルスペクトル光に対応できる高感度光触媒、そして夜でも働く蓄光型光触媒システムの実現を目指しています。

空気の清浄化&赤外線カット スマートウィンドウへの展開へ

汚染大気を継続的に浄化できることが注目されている光触媒ですが、さらに殷研究室ではマルチな機能を持たせられないかと考えています。「窓ガラスに特殊なコーティングをして空気を清浄化する機能を持たせる。さらに同じコーティング剤で紫外線や赤外線を防ぎ、可視光だけを透過させるなどの機能が複合されたらどうでしょうか？ マルチ機能を持つ窓、スマートウィンドウとなるわけです」。

赤外線の遮蔽・制御機能。優れた光触媒活性を持つ光触媒を、精密な形態と粒子サイズが制御されたタングステンブロンズベース赤外線遮蔽機能粉体材料 $\text{Cs}_{0.33}\text{WO}_3$ と複合することにより、マルチ機能を持った光触媒を実現できることが分かってきました。この技術により、機能材料の低コスト化やエネルギーの高効率利用に貢献し、窓材及び建材等を始め、幅広い環境分野に応用するという可能性が広がります。

さらに、赤外線遮蔽機能材料について、サーモクロミック機能を持つアニオンドーブ二酸化バナジウムを利用することにより、夏に涼しい、冬に暖かいという優れた機能材料であると同時に、光触媒機能による環境浄化・セルフクリーニング機能などのマルチ機能性が期待できます。

「二酸化バナジウムは70℃付近で絶縁体-金属相転移を起こし、高温相が熱線遮蔽能を持ちます。高温時には太陽光の室内への侵入を防ぎ、寒冷時には太陽光を室内に取込むという発想。ソルボサー

リフレッシュはドライブで素敵な風景を。ペットの散歩も癒されていますね

ドライブが好きで、若い頃は1日700~800km走っていました。地域ごとの素晴らしい風土や風景に出会えるのがいいですね。東北でもいろいろ回りました。秋田の祭り、青森の祭り…。津軽海峡まで仲間と3日間かけて走ったのも、いい思い出です。最近はなかなか遠出しなくなりましたが、この前のゴールデンウィークに栃木県足利市にある「あしががフラワーパーク」に行ってきました。藤の花がきれいでしたね。きれいな風景を見ると心も体も癒やされ、リフレッシュできます。

癒やされるといって、身近なところでは犬の散歩。最初は娘が面倒をみるという約束で飼いだめたのに、今は私の仕事になっていますね。時間があるときは、20~30分程度近場を散歩しています。きれいな空気を吸いながら仙台の風景を見ながら歩く。リフレッシュできる時間ですね。



OFF TIME

スマートウィンドウ

スマートウィンドウは、電気・光・熱・ガスなどの外部の刺激に応じてその光学的特性が変化する窓材料のことです。調光ガラスということが多く、近年、省エネルギー等の機能材料として期待されている材料で、特に赤外線（熱線）を遮蔽する効果が期待されます。赤外線遮蔽材料を窓ガラスに塗布すると室内温度上昇を大幅に抑制でき、エアコンの消費電力を削減できます。可視光領域に高い透過率と、800～1200nm範囲の近赤外線領域に対する高い吸収能力が求められます。赤外線吸収材料として知られるITO（酸化インジウム）、ATO（アンチモン酸化スズ）、LaB₆（六ホウ化ランタン）等があります。

サーモクロミック

温度変化により、物質の色が可逆的に変化する現象をサーモクロミズムといい、その性質を示す材料がサーモクロミック材料です。温度変化により材料は導電体と半導体の相転移が生じ、電磁波の一種である赤外線を遮蔽・通過することができますので、窓材料として利用する場合、夏に涼しい、冬に暖かいという優れた機能材料です。

紫外線 (UVA、UVB、UVC)

紫外線は、波長の長さによってUVA、UVB、UVCの3つに分類されます。UVCはオゾン層に吸収されるため、地表には届きません。地表に降り注ぐ紫外線の約9割がUVAです。波長が長く、透過性が高く、窓ガラスも透過し、「生活紫外線」とも呼ばれます。UVAを浴びると、肌は黒くなり、シワやたるみを引き起こします。短い波長のUVBは、日焼けの主な原因となり、「レジャー紫外線」とも呼ばれます。浴びすぎると、皮膚が赤く炎症したり、シミや色素沈着を引き起こします。

グラフェン

(2010年ノーベル物理学賞受賞対象、イギリスマンチェスター大学)

グラフェン等の2次元シート状化合物は、高い配向性・高いキャリア移動度・三次元バルク積層構造を有し、驚異的な電子物性・機械的物性・化学的性質を示し、様々な機能材料やデバイスへの応用が行われており、大変注目されています。グラフェン(graphene)は、1原子の厚さのsp²結合炭素原子のシート状物質であり、炭素原子からなる蜂の巣のような六角形格子構造をとっています。グラフェンは炭素同素体(グラファイト、カーボンナノチューブ、フラーレンなど)の基本的な構造です。

グラフィティック・カーボンナイトライド—Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)

グラフィティック・カーボンナイトライド—Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)は、水素、炭素、窒素のユビキタス元素からなるメタルフリー光触媒であり、水の分解、有機物除去、センサーなどの特性を持つことから、近年非常に注目を浴びている材料です。g-C₃N₄はグラフィティック層状化合物として注目され、固体潤滑材としても利用されます。



優れた光触媒活性を持つ光触媒と、精密な形態と粒子サイズが制御されたタングステンブロンズベース赤外線遮蔽機能粉末材料Cs_{0.33}WO₃との複合化。赤外線遮蔽、光触媒機能を併せ持つマルチ機能性スマートウィンドウを実現できると殷研究室では考えています。

マル反応による二酸化バナジウムのナノ粒子の合成と「イオンドープによる」絶縁体-金属相転移温度の制御について検討しています」。

二次元機能性層状化合物を利用した機能性発現

「わが研究室でさらに注目しているのが、二次元機能性層状化合物の環境応答機能。例えば、複合型光触媒、ガスセンサー材料、室温応答センシング材料などです」とさらなる展開を話す殷教授。

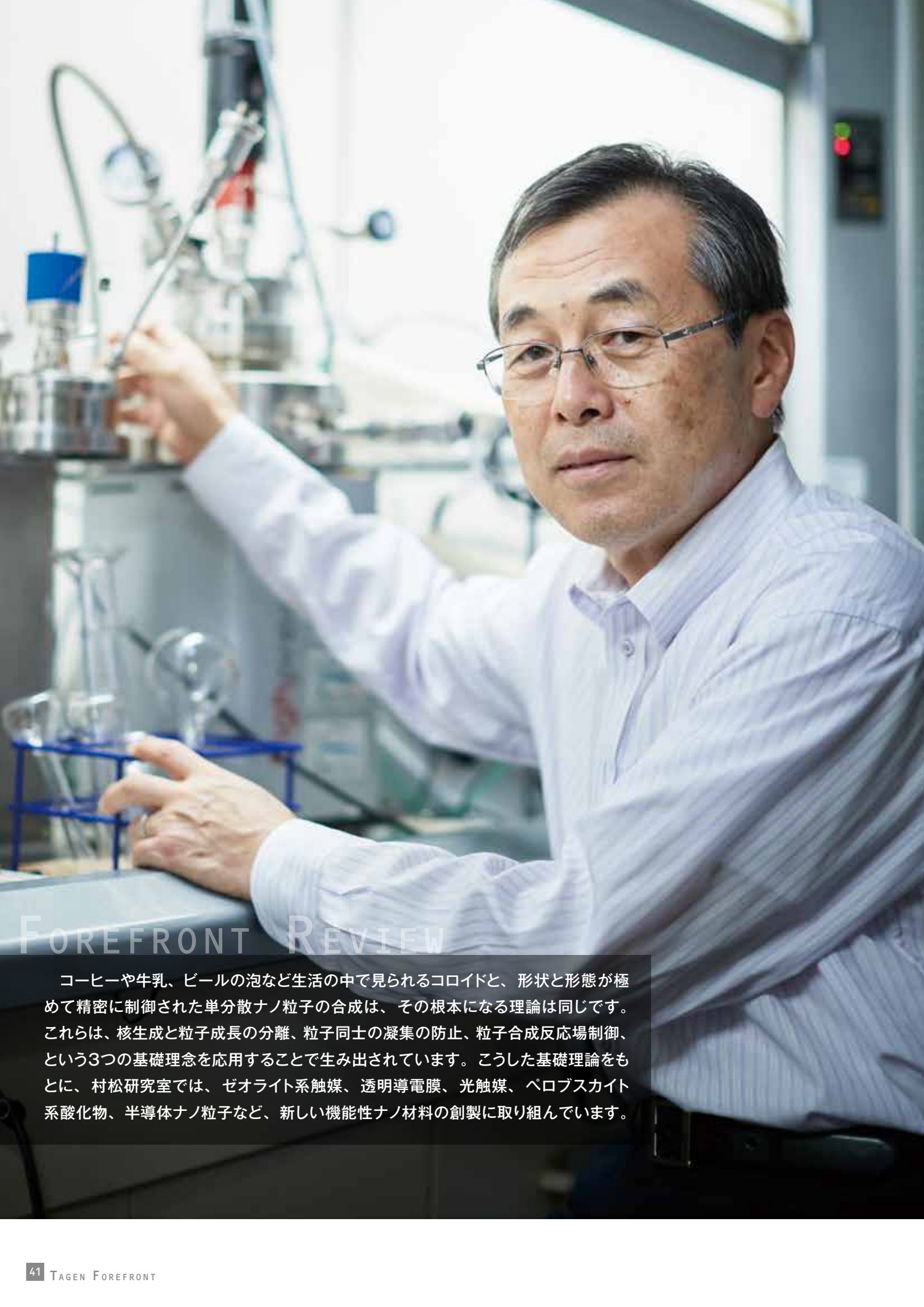
近年、ナノテクノロジーやナノエレクトロニクス技術の進展に伴い、世界的に注目されているグラフェンを始め、グラフィティック・カーボンナイトライド—Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄)、遷移金属ジカルコゲナイド(transition metal dichalcogenides, TMD)、層状金属炭化物MXene(メクセン)等、二次元機能性層状化合物。特異な物性が明らかになりつつあり、新規機能性材料、イノベーション・革新デバイス用新材料として、注目を浴びています。「カーボンをドープした酸化チタン(C-TiO₂)は優れた可視光吸収を持ち、NO_x分解に高い活性を示します。g-C₃N₄やグラフェンなどの高表面積を持つ二次元層状物質と光触媒を複合化することで光触媒活性のさらなる向上を実現できます」と語る

殷教授。様々な観点から、環境にやさしいプロセスで、環境に調和する材料をつくることを実現しています。「さらに、より世の中の役に立つ材料創製を目指したいと考えています。様々な材料を環境にやさしいプロセスで合成し、そこからこそ現れる機能性の実現に力を入れたいと思っています」。

環境にやさしい元素の利用、汎用的な元素の利用など、本当の意味の「機能性エコマテリアル」創製を目指したいと意気込みを見せている殷教授。環境調和・エネルギーの高効率利用、マルチ機能性エコマテリアルの創出と応用に関する研究を展開しています。



さらに、環境にやさしいプロセスの開発と、そこから生まれてくる新しい機能。殷研究室は、本当の意味の「機能性エコマテリアル」創製を目指しています。



FOREFRONT REVIEW

コーヒーや牛乳、ビールの泡など生活の中で見られるコロイドと、形状と形態が極めて精密に制御された単分散ナノ粒子の合成は、その根本になる理論は同じです。これらは、核生成と粒子成長の分離、粒子同士の凝集の防止、粒子合成反応場制御、という3つの基礎理念を応用することで生み出されています。こうした基礎理論をもとに、村松研究室では、ゼオライト系触媒、透明導電膜、光触媒、ペロブスカイト系酸化物、半導体ナノ粒子など、新しい機能性ナノ材料の創製に取り組んでいます。



身近な生活の中の探求から 最先端ナノ材料のサイエンスへ

学部生への講義や学外の講演などにおいて、村松淳司教授は「生活の中のコロイド」のことから話し始めるといいます。コーヒー、お茶、牛乳、ビール、ウイスキー、それから温泉のお湯なども、みんなコロイドと言われるものです。簡単に言うと、溶液の中に微粒子が入っている状態ですが、霧や煙のように溶液ではなく気体の場合もあります。「コロイドがコロイドたる由縁は、安定に分散するという言い方をしますが、くっつかないで漂っているということ」だそうです。「くっつかないようにしている、いちばん大きな理由は、コロイド粒子の表面に表面チャージがあって、お互いに反発し合って、それで漂っているんです」。

たとえばコーヒーの場合、コーヒーの微粒子がお湯の中で互いに反発し合って均一に分散しているので、コーヒーは一様に黒褐色に見えています。コロイド粒子が電荷を帯びていると、互いの粒子は反発しあいます。「ビールの泡の場合は、泡の周りにビールのホップの原料が吸着しているんです。だからその泡が非常に丈夫でくっつかないコロイド状態になっています」。

コロイド理論に基づいて「コーヒーの分散の仕方やビールの泡の立ち方でより良く分散させる方法を使えば、実際に美味しくなる」といいます。

「このコロイドのサイズが小さくなるとナノ粒子です。最先端ナノ材料の開発も、その基礎のところはこうした自然の現象から学んで行っています。くっつかないように漂っているような条件でナノ粒子をつくらないと、結局ナノ粒子にはなりません。そういう条件にするのがまず最初に重要」といいます。

「画用紙のように丸められる液晶テレビとか、太陽光をエネルギーに変えて自動運転で走る自動車、そんな夢のような技術も、みんなナノ材料が基本になっています」。村松教授はナノ材料探求の、その先の未来を見つめています。

多元物質科学研究所 所長
金属資源プロセス研究センター
ハイブリッドナノ粒子プロセス研究分野 教授

村松 淳司

MURAMATSU, Atsushi

1959年愛知県生まれ。1979年東京大学理科1類入学、1983年同工学部合成化学科卒業、1985年東京大学大学院工学系研究科(化学エネルギー工学専攻)修士課程修了、1988年同博士課程修了(工学博士)。1988年東北大学選鉱製錬研究所助手、1993年東北大学素材工学研究所講師、1995年東北大学多元物質科学研究所教授、2001年東北大学多元物質科学研究所教授、2015年東北大学多元物質科学研究所所長(併任)、2016年物質・デバイス領域共同研究拠点 拠点本部長(併任)、2019年東北大学副理事。所属団体/石油学会副会長、日本化学連合理事、ナノ学会理事、みやぎ・環境とくらし・ネットワーク理事。
<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/muramatsu/html/>

コロイドや界面化学を基盤に ナノ粒子合成へ

ナノ粒子合成のために 基礎理論を学ぶ

身の回りのコロイドや界面化学に理解を深めることが、結局はナノ粒子合成という最先端の研究の基盤になる、と村松教授は講義の中で力説します。微粒子の合成に関わる基礎的な理論については、重要な3つの条件がある、粒子合成への

3つの指針ととらえてもいい、と話します。

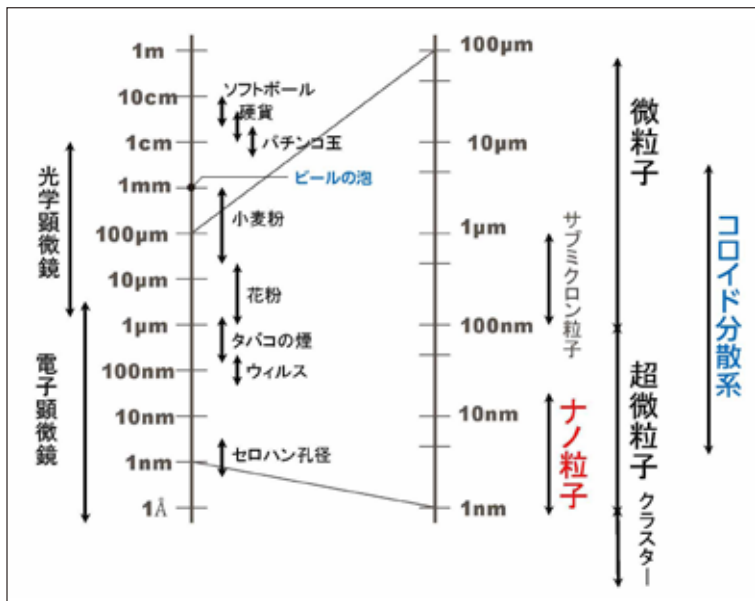
1つめは、前ページで紹介した「安定して分散していること」。これはコロイドの状態から見て「分散と凝集」というテーマで、専門的にはDLVO理論といいます。「安定して分散」とは、言い換えると「溶媒中にコロイドが凝集せずに漂っている」ということです。しかし物質というのは、そ

もそも分子間力(ファンデルワールス力)によって本来は凝集するものです。これを凝集しないように、粒子を分散させ、コロイドが漂っている状態にすることが第1の条件です。

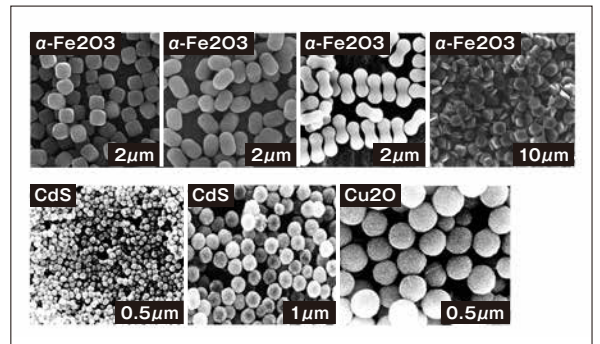
「分散は、ビールの泡のようにほかの成分が周りを取り巻いてくっつかない状態。牛乳のように粒子の表面が界面活性剤状のもので覆われている場合。それから粒子表面の電荷による反発でくっつかない状態、などがあります。それから速度論的に言うと、粒子が不規則に動き回っている状態ということもできます」。

分散から核生成へ そして粒子成長は分離して

2つめが「核生成」。「これもビールの泡の実験で理解できます。ビールの泡は時間が経つとなくなってきますが、炭酸ガス自体はコップの中で過飽和状態になっています。そこに割りばしを入れてやると、また泡が復活するんです。これが核生成と言われるもの」。この過飽和状態が何か生まれる土台になり、何かの衝撃で泡ができたり、結晶ができたりすることになります。「水を氷にする時も0度ですぐ



粒子径による粒子の分類
村松研究室で扱うコロイド分散系の粒子は、おおそ数nm~数µm。ナノ粒子はおおよそ1nm~10nm程度のサイズです。



村松研究室で合成した粒子
酸化鉄(III) (Fe₂O₃)、硫化カドミウム(CdS)、酸化銅(Cu₂O)などゲルゾル法で合成した粒子のサンプル。サイズは、ほぼ10µm~0.5µm。

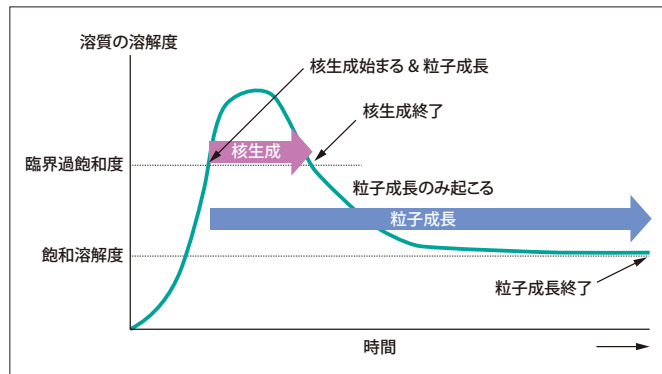
仲間と楽しむ日本酒、それがいちばん

コロイドの試料としてビールの泡の話をよくしますが、日本酒もちろん重要な試料なので、いろいろ取りそろえてあります。取材で「趣味は何ですか?」と聞かれたら「スポーツの後の飲酒」と答えることにしています。実際には今はスポーツもできないので、仲間が集まって楽しむ、というのが主眼になります。ビールよりも、大好きなのは日本酒ですね。

福島県の日本酒も好きですが、宮城県の日本酒はかなりグレードが高いと思います。県内の蔵元から相談を受けて開発の一端に携わったことがあります。熟成の方法と期間、温度管理の仕方など、化学の知識や論理が必要になってきますが、それでも日本酒の世界には科学を超えた面白さを感じます。ともあれ「みんなで楽しく飲む」それがいちばんのおいしさです。



MY FAVORITE



核生成と粒子成長の分離 / LaMerモデル図

溶質の添加によって溶解度は時間とともに上昇し、臨界過飽和度を越えると核の生成が開始されます。核の生成が進行し、一定量の核が生成されると溶解度は急激に低下し、核成長はストップします。核生成と粒子成長を分離させるためには、核生成期を粒子成長期より格段に短くするなど、核生成期間の制御が必要になります。

氷になるわけではなく、マイナス10度ぐらゐに冷やして(過冷却、つまり過飽和)、ポンと衝撃を与えるとピシピシと氷ができます。あれも同じ理屈です。材料合成の際は、こうした「核生成」ができるように過飽和の状態を制御することが第2の要件になる、というわけです。

3つめの条件としては「核生成と粒子成長を分離」してやることです。「できた核について、もっと粒子を大きくしたいという時に重要なのは、成長させる段階で粒子同士が凝集しないこと。そして粒子成長の間に新たな核が生まれにくいこと。これをコントロールしてやる必要がある」といいます。この3つめの過程は、自然の中でヒントになるようなものはないので残念ながらビールの泡のようには見せられないのですが、粒子をつくるには人工的に核生成と粒子成長を分離させる必要がある、と村松教授は説明します。

物理吸着は“ハ工的吸着” 化学吸着は“蚊的吸着”

粒子合成の基礎についてコロイドの現象から3つの条件を確認しましたが、もうひとつ「表面」についての理論として「物

理吸着と化学吸着」というテーマをおさえておきたい、といえます。

「物理吸着」というのは固体表面に、何かの吸着質がファンデルワールス力でくっついたり、離れたりすることで、自然界どこにでもあることです。「物理吸着のことを私たちは“ハ工的吸着”と呼んでいます。ブンとまってまた出て行くので、下地表面に何も影響を与えず単にとまるだけ」。

では、もうひとつの「化学吸着」とは、どんなことでしょうか。「こちらは“蚊的吸着”と言っています。蚊がとまって血を吸ったり、少なくとも何かゴショゴショやっていく。叩かれて死んだりもしますが、それも含めて下地との相互作用になります」。蚊がとまるだけなら最初は物理吸着、いったん血を吸い出すと下地との関連性が生まれるので化学吸着になります。

いわゆる触媒反応とは、この化学吸着がきっかけにはなりますが、蚊が血を吸っただけでは触媒反応にはならず、物理吸着が起これ、化学吸着が起これ、その後さらに血を吸った蚊と別の蚊がインタラク션을起こして何か新しいものが生まれるようなパターンを「触媒」と言う、と村松教授は触媒の初歩について解説します。



村松教授は、ナノ粒子の基礎について、コーヒー、ビール、温泉といった身の回りにあるもので説明し、研究の面白さを学生やスタッフ、全国の大学や講演会の聴講者にも伝えます。講義や講演などで使われる多くの資料の基本になっているのが、コロイド理論。コロイド状態から「分散と凝集」についての科学的根拠を学びます。目に見えない世界の不思議が身近になる時、先端的な研究の扉から新しい光が見えてきます。

TERM INFORMATION

DLVO理論

Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theoryの頭文字をとってDLVO理論と呼ばれる。元々別に出された論文によるもの(Derjaguin, B.; Landau, L.(1941), "Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes", Acta Physico Chemica URSS 14: 633. Verwey, E. J. W.; Overbeek, J. Th. G. (1948), Theory of the stability of lyophobic colloids, Amsterdam: Elsevier.)で、液中のコロイドの安定性(凝集するか分散するか)を、分子間力(ロンドンファンデルワールス力)と表面チャージによる静電的反発力の和だけで考慮できるとし、溶液中の塩濃度で表現できるため、食品工学などで応用されている。

ファンデルワールス力

この力はヨハネス・ファン・デル・ワールスが実在気体の状態方程式を定式化した際に導入された凝縮による力のことを指しており、彼の名を冠してファンデルワールス力と呼ばれている。分子間力とも呼ばれ、基本的に引力が働くが、異なる組成の粒子間で斥力が働く場合もある。

ゲル-ゾル法

東北大学名誉教授・杉本忠夫教授とともに開発した、単分散粒子合成法の一つ。金属水酸化物ゲルを出発物質として最終的に微粒子(ゾル)を合成するところから、ゲル-ゾル法と名付けた。濃厚で高粘性ゲルが微粒子を捕捉し、微粒子間の凝集を防止して、サイズが均一に揃った単分散粒子が合成される。ゾル-ゲル法とは根本的に概念が異なる。

速度論

平衡論とともに熱力学の重要な理論。平衡論が基本的に唯一無二の式を与えるのに対して、速度論は条件に応じて速度式を与える。ものが生成するときには必ず何らかの速度式があり、その背景には速度論という理論がある。

過飽和

きれいな水を冷やしていくと氷が生成するが、このときゆっくりと冷やしていくと、0度になっても凍らず、温度はもっと下がっていく。下がった状態で、揺すったりして外部から刺激を与えると一気に凍り出す。これが過冷却現象であるが、固体粒子が溶液から析出するときも同じ現象があり、溶解度を大きく超えたところで析出が始まるが、その溶解度を過飽和度と呼び、過飽和状態にあるという。

触媒

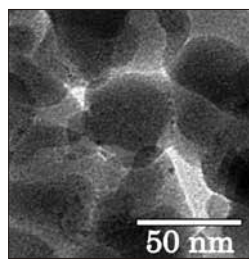
化学反応のときに、反応速度を変える物質を触媒と呼んでいる。触媒自身は反応の前後で何ら変化していない。自動車触媒や光触媒が有名で有り、自然界では酵素が触媒と同様な働きをしている。

大きな社会変革にも波及する 先端的な材料合成

先端材料創製で注目される ゼオライト触媒

村松研究室の研究テーマの基盤は、前ページで紹介したように各種ナノ粒子の合成法の開発研究ということです。そして高機能なナノ粒子の合成は、最先端の触媒や透明導電膜、電極材料などとしての応用展開が期待される、重要な研究分野となっています。

現在、村松研究室の大きな研究の柱のひとつになっているのがゼオライト触媒です。ゼオライトはすでに200種以上の構造が合成され、さまざまな用途の触媒として応用されている注目度の高い材料ですが、村松教授は多元研究室での研



CRESTプロジェクトでは、メタンから低級オレフィンへの直接転換を可能にする複合酸化物触媒材料の創製を目指し、村松グループはメタン反応システムのための触媒物質合成を目的として、高活性なCe-Fe-ZSMなどのゼオライト系+金属超微粒子触媒の研究を行っています。

村松教授がリーダーを務めるグルー

プは、北九州市立大学、東北大学、東京大学、東京工業大学から6人の研究者が参加し、2016年から10年計画で取り組んでいます。

画像はナノ微粒子が付着したゼオライト

究のほか、科学技術振興機構(JST)のCREST(科学技術イノベーションチーム型研究)において「複合酸化物触媒材料の創製」プロジェクトのリーダーを務めています。「簡単に言うと、メタン(天然ガスの成分)から触媒を使って化学合成品をつくるという計画です。もっと直接的に言うと、天然ガスから燃料や化学製品ができるような夢の触媒をつくらうという計画で、それが実現すれば石油の中東依存をしなくて済み、たとえ石油が枯渇しても国産の原料で化学製品がつくれる、ということになります」。

メタン CH_4 はCが1つなのでC1化学と呼ばれ、重要な有機合成化学の一分野となっていて、各種合成には触媒が重要な役割を果たしています。「たとえば CH_4 から直接C-C bondはつくれなかったんですが、特殊な触媒によっていきなりC-C bondができるようになる。そこさえできれば、あとはC-C bondを増やしていくのはそんなにハードルが高くない。そういう触媒が

いま求められていて、いちばんできそうなのがゼオライト系」と村松教授は話します。

ただし単純なゼオライトではなく、ケイ素とアルミニウムの複合酸化物のアルミニウムを各種の金属元素と置き換えるメタルドープという手法で「キャラクターを一変させてC-C bondをつくる触媒に変化させていく」。その時には、計算化学を使ってシミュレーションを行っているといいます。

酸化インジウムスズで 透明導電膜を作製

さて、村松研究室のもうひとつ大きな研究の柱が透明導電膜と言われるものです。一般に電子機器の回路や電極には金属が用いられますが、液晶(LCD)や有機ELなど電子ディスプレイとして使うには適さず、透明な電極や回路が必要です。画面上の電極や回路が画像のじゃまになったり、着色しては困るからです。これを解決するために、透明でかつ電気を通す材料が開発されてきました。現在、最も広く用いられている透明電極、つまり透明導電膜材料は、酸化インジウムスズ(ITO)です。

「骨格は酸化インジウムです。その酸化インジウムの中に酸化スズを少しだけ混ぜてITOをつくります。この混合物は粉末では灰色っぽいんですが、可視光領域の透過率が高く薄膜ではほぼ透明になります。もうひとつ大事なことは、インジウムは酸化数+3、スズは+4なので、インジウムの代わりにスズを入れてやると電子が足りなくなるので、電荷中和のためにキャリア電子が発生することになります。ということは電子はn型半導体になって自由に動けるようになり

スポーツの楽しさ深める、スポーツボランティア

1980年代から仙台、宮城のスポーツボランティア活動を続けています。地元利府町では利府町サッカー協会の会長を務めています。活動を通して、県内プロスポーツの誕生から発展への道のりにも関わらせていただきました。現在は、ボランティアそのものより、ボランティアさんをどう動かしていくか、どこにどのくらい配置すればいいのかなど、私とあと数人で全体のコーディネートをするという役割です。ベガルタ仙台や東北楽天ゴールデンイーグルスでのボランティアをはじめとして、2019年5月の仙台国際ハーフマラソン、6月利府町の宮城スタジアムでのサッカー日本代表戦、それからツール・ド・東北、東北・みやぎ復興マラソン(2019年は中止)などに携わっています。

いま動いているのはTOKYO2020です。とくに都市ボランティアの方は県と一っしょにいろいろやっていて、ボランティア研修も始まっています。

OFF TIME



「仙台のスポーツとボランティア」という題での講演の様子(2019.10仙台市太白区文化センター)

TERM INFORMATION

ゼオライト

水の石が起源で、小さな孔(ナノ孔)や比較的大きな孔(メソ孔)などが発達している多孔性の結晶性酸化物で、酸化ケイ素と酸化アルミニウムなどが組み合わさった複合酸化物が多い。触媒として使用されるものは、多く人工的に合成されるが、自然界には多くの天然ゼオライトがある。身近では歯磨き粉や洗剤などにも多く使われている。

メタン

天然ガスの主成分で、化学式は CH_4 と表す。化石資源の中では最も安定な化合物だが、日本近海に多く存在するメタンハイドレートなど、その資源量は非常に豊富であり、石油、石炭の代替物質として注目を浴びているが、その安定性のために化学原料としてはこれまであまり使われてこなかった。

C-C bond

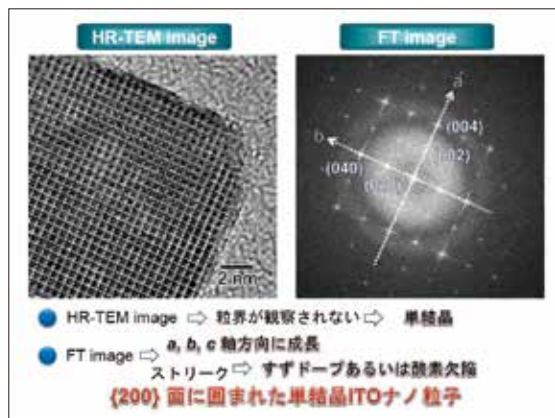
炭素2つが結合すること、あるいは、その結合のことを指す。メタンからエタン、エチレンが合成されるためには、この炭素結合ができることが必須である。

メタルドープ

結晶性酸化インジウムの構造のインジウムの代わりにスズが入ると、インジウムの3個の一部がスズの4個になることから、電荷中和のためにキャリア電子が発生する状態となり、この電子は自由電子となり、電導性を示す。透明な酸化物ITOが電導性を持つのはこの理由である。

n型半導体

n型半導体とは、電荷を運ぶキャリアとして自由電子が使われる半導体。ITOなどがその例。正孔(ホール)がキャリアになるのが、p型半導体。



単結晶ITOナノ粒子の透過型電子顕微鏡の画像。メタルドープで種々の複合酸化物をつくる際には、金属材料研究所の新スーパーコンピューティングシステムMASAMUNE-IMRも活用し、計算化学を使ってシミュレーションします。

ます。つまりITOは、透明でありかつ導電性を持つようになるんです」と村松教授はITO合成の面白い特徴を解説します。

このITOを材料としてつくられるのが透明導電膜です。「つくり方は、ITOターゲット材からスパッタリング法で粒子をガラス基板に飛び散らせ薄い膜を蓄積させる、という手法です」。なぜガラス基板なのかというと、この成膜法では加熱されるからです。「約500度程度の熱がかかります。だから基盤は熱で溶けないガラスが使われます。液晶ディスプレイや液晶テレビはみんなガラスなんです」と話します。

夢の世界に近づく ITOナノ粒子

「いま説明した話は、高温の熱をかけてつくっているうちは、基盤はガラス以外は使えない。熱をかけて溶けるような柔らかいものは使えない、ということです」と村松教授は続けます。その先にどんなことを考えているのかというと、たとえば「可搬型の液晶テレビ」です。薄型になったとは言えサイズが大きければガラス製なので重い。持ち運ぼうなどとは思わないという現実に対して、村松教授は「4つくらいに畳めるとしたら、だいぶ近いのではないかな。最終的には画用紙のようにクルクルッと巻いて運んで、開いて貼りつけたらテレビになる」という世界を思い描いているといいます。

これが「ITOナノ粒子」という技術です。すでに2007年に村松教授をリーダーとする研究グループは、ITO作製の主流となっ

ているスパッタ法に代わるインクジェット法に使えるITOナノ粒子合成法を開発しています。これはITOナノ粒子をインクにしてやわらかいポリエチレンなどプラスチックに塗布できるようにする技術です。この技術によれば、テレビはクルクルッと巻かれているものとなり、また太陽電池として電動自動車の窓ガラスに貼っていつまでも走ることができるなど、「夢の世界」に近づくことになります。

「ITOナノ粒子は、材料の最適の配合や作製温度の低減など材料開発サイトでできることは、現在までさまざまな検討を加えてきました。あとはこちらの手を離れて実用化できるぐらいの価格にできるかどうか、などの検討段階になります」と、村松教授はナノ粒子合成の未来への扉を力強く開きつつあります。



村松研究室では、単分散粒子を得る手法の開発から各種の無機材料合成まで、さまざまな装置を使って実施しています。

大型リアクターでは、透明導電性ナノ粒子の大量合成も可能にしています。これら合成物の幾つかは先端的な材料としての応用が期待されています。

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
有機・生命科学研究部門	
ナガツギ フミ 永次 史 生命機能分子合成化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●細胞内での遺伝子発現制御を目指した架橋反応性核酸の開発 ●核酸高次構造に結合する人工分子の開発 ●RNAを標的とした新規化学ツールの開発 ●核酸を標的とした分子認識機構に基づく新規高機能人工分子の開発
ワダ タケヒコ 和田 健彦 生命機能制御物質化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●外部刺激応答型人工核酸の開発 ●がん細胞特異的核酸医薬分子の開発 ●細胞内環境応答性生命機能制御材料の創製 ●生体高分子を不斉反応場とする超分子不斉光反応 ●高感度高時間分解円二色スペクトル測定装置の開発
クミガシラ ヒロシ 組頭 広志 ナノ機能物性化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●酸化物ナノ構造の機能設計・制御 ●酸化物超構造における機能物性の開拓と新規デバイスの開発 ●表面・界面における電子・スピン・軌道の可視化 ●放射光電子分光装置の開発
イナバ ケンジ 稲葉 謙次 生体分子構造研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●タンパク質品質管理に関わるジスルフィド結合形成・開裂ネットワークの構造、作用機序、生理的機能 ●細胞内金属イオン濃度恒常性維持に関わる膜トランスポーターの構造、作用機序、生理的機能
ミスカミ シン 水上 進 細胞機能分子化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●生物活性を可視化する蛍光センサーの開発 ●疾患機構や生命現象を調べるための蛋白質—小分子ハイブリッド材料の開発 ●光を用いて生体分子活性を操作する技術の開発 ●高輝度レーザー顕微鏡技術に有用な光耐性蛍光色素の開発 ●酵素機能の解明と新規機能性蛋白質の創出
タカハシ サトシ 高橋 聡 生命分子ダイナミクス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●一分子蛍光分光法を用いたタンパク質のフォールディングダイナミクス ●癌抑制タンパク質 p53 の DNA 探索機構の解明 ●一分子ソーターを用いた新しいタンパク質デザイン手法の開発
無機材料研究部門	
オオタニ ヒロシ 大谷 博司 計算材料熱力学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●準安定状態を利用した材料設計基盤の確立 ●合金系融体の熱力学物性に関する研究 ●モンテカルロシミュレーションによる相変態の理論的研究 ●CALPHAD法を用いた状態図の熱力学解析 ●結晶中の不均一構造に関する熱力学的検討 ●遺伝的アルゴリズムを用いた理論状態図の構築に関する研究 ●実験手法を用いた合金状態図に関する研究
タカハシ ユキオ 高橋 幸生 放射光可視化情報計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●X線光学技術を用いた次世代のコヒーレント回折イメージング法の開拓 ●タイコグラフィ—X線吸収微細構造法の開発と機能性材料の構造—機能相関解析への展開 ●マルチスライスX線タイコグラフィによる電子デバイスの三次元ナノ構造可視化 ●情報科学的手法を活用した新規位相回復アルゴリズムの開発 ●X線自由電子レーザーを用いたシングルショットX線イメージング法の開発と応用
サトウ タク 佐藤 卓 スピン量子物性研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●中性子非弾性散乱分光器の開発 ●中性子磁気非弾性散乱スペクトル解析法の開発 ●量子スピン系における巨視的量子現象の研究 ●遷移電子系における反強磁性と超伝導の研究 ●非周期スピン系における磁気秩序とダイナミクスの研究
キタカミ オサム 北上 修 ナノスケール磁気デバイス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ナノサイズ粒子の結晶相安定性 ●プローブ顕微鏡によるナノ加工技術 ●巨大磁気異方性材料の設計・開発 ●超高感度磁化検出技術開発 ●単一磁性ナノ粒子の物性・スピンダイナミクス ●新規超高密度メモリー技術の提案・開発
カニエ キヨシ 蟹江 澄志 ハイブリッドナノシステム研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●有機無機ハイブリッドナノ粒子のデザイン・合成 ●サイズ・形態制御無機ナノ粒子の精密液相合成法開拓 ●ナノ粒子精密合成に基づくプリンテッドエレクトロニクス向けナノインクの開発 ●刺激応答性人工リソ脂質の設計・合成とマクロ自己組織構造制御 ●機能性イオン液体の分子設計によるあらたな抽出プロセス開発
アブカワ タダシ 蛇川 匡司 固体表面物性研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●新しい表面構造解析法の開発 ●表面構造ダイナミクスの研究 ●2次元原子層物質の成長と物性研究 ●マイクロ／ナノ構造の表面
プロセスシステム工学研究部門	
アジリ タダフミ 阿尻 雅文 超臨界ナノ工学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●超臨界場でのハイブリッドナノ粒子創成 ●ナノフルイドの熱力学（超分子構造形成・相挙動・粘弾性） ●超ハイブリッド材料創製（ポリマー／ハイブリッドナノ粒子） ●低温エネルギー改質触媒
サトウ シュンイチ 佐藤 俊一 光物質科学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●高強度光の場における物質変換プロセス ●高強度光の場におけるナノ粒子作製 ●ベクトルビームの発生とビーム特性の解析 ●微小レーザースポットの形成と新規レーザー加工法の開発 ●ベクトルビームを用いたナノイメージング
アメザワ コウジ 雨澤 浩史 固体イオニクス・デバイス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●燃料電池／蓄電池の高性能化・高信頼性化 ●電気化学エネルギー変換デバイス評価のための高度オペランド分析技術の開発 ●ヘテロ界面における電気化学現象に関する基礎研究 ●新規固体イオニクス材料の設計と創製
ノガミ ヒロシ 埜上 洋 環境適合素材プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●素材製造プロセスの多相反応シミュレータ開発 ●新規エネルギー変換・貯蔵・回収プロセスの開発 ●反応・伝熱高効率化のための境界制御技術開発 ●鉄鉱石の還元溶融現象の解明 ●固体表面の液体流動の解析
シバタ ヒロユキ 柴田 浩幸 材料分離プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ケイ酸塩融体およびガラスの物理化学的性質と構造 ●次世代材料シリコンカーバイドの溶液成長 ●金属および酸化物過冷却液体の凝固メカニズム

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
計測研究部門	
ウエダ キヨシ 上田 潔 電子分子動力学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●反応における量子干渉と量子もつれ ●光励起状態の電子ダイナミクス・分子ダイナミクス・分子イメージング ●分子動画と電子波束観測による反応追跡と反応制御 ●短パルス光学レーザー・シンクロトン放射光・X線自由電子レーザーを光源とした分子イメージング・分子動画・電子波束観測を旨とした光電子分光法・多粒子計測法の開発
タカハシ マサヒコ 高橋 正彦 量子電子科学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●配向分子の電子運動量分光の開発による分子軌道イメージングと電子状態研究への応用 ●多次元同時計測法の開発による電子・分子衝突の立体ダイナミクス ●時間分解電子運動量分光の開発による物質内電子移動の可視化
モモセ アツシ 百生 敦 量子ビーム計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●X線干渉光学に基づくX線位相計測法の開発 ●X線位相イメージング法の開拓とその応用 ●動的X線画像計測による機能イメージング法の開発 ●X線位相差顕微鏡／トモグラフィの開発 ●デコヒーレンス型極小角X線散乱イメージング法の開拓とその応用
キムラ ヒロユキ 木村 宏之 構造材料物性研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●中性子4軸回折装置とその応用法の開発（JAEA 東海3号炉 JRR-3M:T2-2 FONDER） ●位置敏感検出器を用いた高効率中性子結晶構造解析装置の開発（J-PARC BL18:SENJU, 韓国研究用原子炉 HANARO 2D-PSD） ●多重極限下（高圧、極低温、高磁場、高電場）におけるX線・中性子散乱手法の開発 ●強誘電体、磁性体、マルチフェロイック物質および有機伝導体の構造と物性研究 ●水素結合系誘電体物質の電子密度分布と核密度分布
ヒバラ アキヒデ 火原 彰秀 ナノ・マイクロ計測化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ナノ・マイクロ流体デバイスを用いる簡易・自動化学分析 ●界面化学に基づく液膜型分離・濃縮法 ●顕微イメージング法およびマイクロ空間検出法 ●高出力パルス ESR による生体分子の構造と機能の相関
ジundai ヒロシ 陣内 浩司 高分子物理化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●“多次元”電子顕微鏡法の開発 ●3次元構造解析法の開発（界面形態の幾何学に基づく解析） ●ブロック共重合体の自己組織化ナノ構造の3次元観察とその分子論的解析 ●有機・無機ハイブリッド材料の構造と物性の解明 ●エネルギー関連材料（燃料電池など）の3次元観察と物性解明
タカワ ユウジ 高桑 雄二 表面物理プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ナノ炭素材料の気相合成プロセスの開発 ●次世代 CMOS ゲートスタックの絶縁膜形成機構の解明と制御 ●機能性金属酸化膜の表面反応機能の解明と制御 ●電子回折による固体表面構造解析と応用 ●低速イオンを用いた表面の原子スケール平坦化手法の開発
チチバ シゲフサ 秩父 重英 量子光エレクトロニクス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●環境に優しい(AI,In,Ga)Nおよび(Mg,Zn)O系ワイドバンドギャップ半導体微小共振器を用いた、励起子と光の相互作用に基づく新しいコヒーレント光源の研究 ●フェムト秒レーザーおよびフェムト秒電子線を用いた(AI,In,Ga)Nおよび(Mg,Zn)O系ワイドバンドギャップ半導体量子ナノ構造の時間空間分解スペクトロスコピー ●有機金属化学気相エビタキシーによる(AI,In,Ga)N系量子ナノ構造形成と深紫外線発光デバイス形成 ●(Mg,Zn)O系酸化物半導体のヘリコン波励起プラズマスパッタエビタキシーと機能性酸化物薄膜形成
非鉄金属製錬環境科学研究部門	
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之（兼）	<ul style="list-style-type: none"> ●製錬・精錬技術の体系的理解に基づくプロセスの高効率化 ●低品位鉱石対応製錬技術の開発 ●非鉄金属製錬における基礎的熱力学データの検証と拡充 ●金属の超高純度精製と超高純度材料の物性
放射光次世代計測科学連携研究部門	
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之（兼） タカタ マサキ 高田 昌樹（兼） ナカムラ テツヤ 中村 哲也	<ul style="list-style-type: none"> ●次世代放射光施設における先端ビームライン技術の研究開発 ●産学ミクスチャーの普及と強化のための自動計測技術の研究開発 ●次世代放射光の活用分野の情報収集・展開と利活用の推進 ●第2期の新規ビームライン構想の構築 ●施設活用における国際的な評価制度の策定
金属資源プロセス研究センター	
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之 高温材料物理化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●窒化物半導体の結晶成長と物理化学 ●超高温熱物性計測システムの開発 ●高温反応場における材料プロセス創製 ●超高温材料の熱物性計測 ●多機能性膜の高機能化と新規デバイスの開発
キタムラ シンヤ 北村 信也 基盤素材プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●上昇気泡によるメタルエマルジョンの生成と固体酸化物の熔融スラグへの溶解速度に関する研究に基づく高効率精錬プロセスの設計 ●硫化によるマンガンの回収と浸出による燐の分離を用いた製鋼スラグからの有価金属の分離・抽出 ●介在物組成変化のシミュレーションと加熱による酸化物の組成変化に関する研究に基づくクリーンスチール製造のための鏡片品質向上 ●地震と津波で被災した水田の製鋼スラグを利用した復興
カノウ ジュンヤ 加納 純也 機能性粉体プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●コンピュータシミュレーションによる粉体プロセスの高度化 ●機械的微粒生成プロセスのシミュレーションの創成 ●粒子・流体プロセスシミュレーションの創成 ●メカノケミカル法による機能性粉体の創製と希少金属の回収 ●バイオマスおよび樹脂廃棄物からの高効率水素製造プロセスの創製
クリシマ アキラ 桐島 陽 エネルギー資源プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●放射化学アプローチによる原発事故廃棄物のバックエンド工学研究 ●プロトアクチニウム溶液化学研究への再挑戦 ●深部地下ならびに表層環境中の放射性核種の移行挙動研究 ●素材や製品に含まれる天然放射性物質（NORM）問題の研究
ホンマ イタル 本間 格 エネルギーデバイス化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●高容量・高出力型リチウムイオン電池 ●全固体電池 ●マグネシウムイオン電池 ●超臨界流体プロセスを用いた機能性ナノ材料の創製 ●水熱分解プロセスを用いた単原子層電極材料の合成

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
金属資源プロセス研究センター（つづき）	
シバタ エツロウ 柴田 悦郎 金属資源循環システム研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●銅製錬における高濃度不純物対応技術に関する基礎的研究 ●ヒ素含有鉱物分離のための新規浮選剤のスクリーニング ●その他、金属リサイクルシステムの最適化に向けた各種要素技術開発に関する基礎的研究 ●その他、金属資源循環における環境負荷元素の処理等の各種環境技術開発に関する基礎的研究 ●スコロダイト合成によるヒ素の安定固定化技術の開発 ●海底鉱物資源の乾式製錬プロセスの開発
ムラマツ アツシ 村松 淳司 ハイブリッドナノ粒子プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●有機-無機ハイブリッドナノ粒子の合成 ●シングルナノサイズ金属粒子の合成と機能性材料への応用 ●部分硫化による可視光応答性光触媒材料の開発 ●液相還元法による新規触媒材料
オマタ タカヒサ 小俣 孝久 原子空間制御プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●機能性無機材料の物質設計と合成プロセスの開発 ●ナローギャップ酸化物半導体の開発と光電素子への応用 ●中温域で動作する燃料電池の要素材料の開発 ●半導体量子ドットの溶液合成プロセスの開発 ●高エネルギーイオンビーム照射を用いた無機・有機ハイブリッドナノ構造体誘起と機能制御
先端計測開発センター	
タカタ マサキ 高田 昌樹 放射光ナノ構造可視化研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●広視野・高分解能軟X線顕微鏡の開発と応用 ●極紫外リソグラフィ・マスクの実波長観察 ●生物試料の軟X線分光顕微鏡観察 ●軟X線用高反射率多層膜ミラーの開発
テラウチ マサミ 寺内 正己 電子回折・分光計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●機能性ナノ粒子の物性解析 ●角度分解 EELS による物性評価手法の開発 ●電子顕微鏡用 SXES 装置の開発と応用 ●収束電子回折法およびビームロッキング電子回折を用いた局所構造解析
テラウチ マサミ 寺内 正己(兼) 電子線干渉計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●高分解能電子顕微鏡法による表面・界面での原子配列の解析 ●電磁場制御と伝導性評価のための電顕内探針操作技術の開発 ●ローレンツ顕微鏡法と電子線ホログラフィーを用いた磁区構造・磁化分布の解析 ●エネルギーフィルター電子顕微鏡を用いたその場観察による相変態機構の解明 ●複数探針を活用した電子線ホログラフィーによる電池材料の電場解析
コメダ タダヒロ 米田 忠弘 走査プローブ計測技術研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた分子観察・計測 ●トンネル分光を用いた分子振動・スピン計測などのナノスケール化学分析 ●微細加工素子と分子素子の融合に向けた界面計測・制御 ●スピントロニクス・量子コンピューターの基礎となるスピンの制御 ●環境触媒の基礎解明に向けた表面・分子相互作用の研究
高分子・ハイブリッド材料研究センター	
ミ ツイシ マサヤ 三ツ石 方也 高分子ハイブリッドナノ材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●高分子超薄膜をテンプレートとした金属/半導体ナノ粒子などのナノ物質の配列集積技術開発 ●有機・無機ハイブリッドナノ材料による光電子機能デバイスの創製 ●ナノ接着・ナノ界面の自在構築 ●ナノコンタクト技術を利用したソフト系ナノデバイスの開発
オイカワ ヒデトシ 及川 英俊 有機ハイブリッドナノ結晶材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●有機・高分子ナノ結晶のサイズ・形態制御と光学特性評価 ●有機-無機ハイブリッドナノ結晶の新規作製法の開発と物性評価 ●ナノ結晶・粒子のカプセル化、集積化ナノ構造体制御と光機能物性 ●励起子-局在型表面プラズモン相互作用の解析 ●有機半導体薄膜のポラリトン特性/電子物性
キョウタニ タカン 京谷 隆 ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ナノカーบอนをベースとした水素貯蔵 ●炭素材料エッジサイトの高度分析と構造制御 ●単層グラフェン多孔体の合成とエネルギー貯蔵および変換への応用 ●炭素被覆メソポーラス構造体を用いた燃料電池・バイオセンサーなどへの応用 ●水分散性カーボンナノ試験管を用いたバイオ応用 ●カーボン材料を利用した高性能蓄電池の開発
アタガワ トモユキ 芥川 知行 ハイブリッド材料創製研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●超分子ローター構造を利用した強誘電体・焦電体・熱伝導体の開発 ●電荷移動型分子集合体デバイスの開発 ●新規な分子性導体・磁性体の開発 ●有機-無機ハイブリッド型ナノ構造を用いた分子デバイスの開発 ●巨大ポリオキサメタレート化合物の材料化
ナカガワ マサル 中川 勝 光機能材料化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●光ナノインプリント技術のレジスト材料の開発と一桁ナノ造形 ●レーザー加工孔版印刷法の開発と光硬化性液体の位置選択的塗布 ●蛍光干渉縞による精密位置合わせと積層化 ●金属ナノ構造体の光学・電子デバイス応用
カサイ ヒトシ 笠井 均 有機・バイオナノ材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●サイズ制御された有機ナノ粒子の作製 ●新たなデザインが施された抗癌性ナノ薬剤の創製とその薬理効果 ●ナノ点眼薬の創製とその薬理効果 ●バイオプロセスを巧みに活かした薬効化合物の合成
新機能無機物質探索研究センター	
ヤマネ ヒサノリ 山根 久典 無機固体材料合成研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●新規多元系無機固体物質探索と構造解析および結晶化学的研究 ●活性金属を利用した非酸化物系セラミックスの新規合成プロセスの開拓 ●多元系窒化物および酸化物蛍光体の探索 ●多元系金属間化合物を対象とした熱電材料の開拓
ヤマネ ヒサノリ 山根 久典(兼) 金属機能設計研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●準結晶合金の合成と準結晶分散 Mg 合金の作製 ●準結晶構造の数理的な解析 ●合金化による電子構造と触媒機能の制御 ●複合組織化による触媒機能の創出 ●金属間化合物を前駆体とした触媒作用の発現起源
イン ショウ 殷 澍 環境無機材料化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●環境に優しいプロセスによる機能性無機材料の開発 ●無機紫外線/赤外線遮蔽及び透明導電性薄膜の開発 ●半導体ナノ材料のガスセンサー特性評価 ●複合アニオン型高感度可視光応答光触媒の合成とマルチ機能性の実現 ●自動車排ガス浄化触媒の開発 ●窒化物・酸窒化物のナノ構造制御と機能性開発
カキハナ マサト 垣花 真人 無機材料創製プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●フォトセラミックス開拓を目指した新物質合成 ●エネルギー変換のための高効率な光触媒の構築 ●溶液法を利用した高機能フォトセラミックスの合成 ●機能性金属錯体のケミカルデザイン ●金属錯体を利用したハイブリッド材料の創製および形態制御

編集
後記

TAGEN FOREFRONT 第8号では、本誌を企画・創刊した村松淳司教授と、この数年間に着任した6名の教授にフォーカスしました。これまで毎号7名ずつ、定年退職した教授を含めて56名の教授を紹介してきました。

第8号でも、真剣な表情で研究をしている教授の「顔」を前面に出し、それぞれの研究についてわかりやすく紹介する一方で、「MY FAVORITE」「OFF TIME」といったコラムも掲載しています。コラムでは、真剣な表情の研究者としての「顔」とはまた異なった、それぞれの教授の人柄をご覧ください。

多元研は、2001年の設立から今年で20年目となります。魅力ある行事や企画等、多元研の活動を紹介する機会も増えることでしょう。

本誌第1号を発刊した2013年からは、7年が過ぎました。改めて、是非1~7号もご覧ください。TAGEN FOREFRONTを通して多元研の歴史を感じていただければ幸いです。(加納純也)

■編集・発行

国立大学法人東北大学
多元物質科学研究所 広報情報室
〒980-8577
宮城県仙台市青葉区片平2丁目1番1号
TEL 022-217-5204
FAX 022-217-5211
www.tagen.tohoku.ac.jp
2020年1月31日発行

広報情報室

室長 加納 純也
副室長 小俣 孝久
芥川 智行
雨澤 浩史
蟹江 澄志
篠田 弘造
矢代 航
志村 玲子
安達 正芳
丸岡 伸洋
菊地 隼哉
小玉 航史
高橋 慶
渡辺 直子
佐藤 佳
伊藤 智恵



取材を終えて

今回、さまざまな研究テーマについて、ほんとうにわかりやすく、飽きずに聞ける解説をしていただきました。ひとつの事柄を状況に合わせていろんな角度から言説することができる、さらには誌面づくりのために惜しみなく協力していただける、スーパーなセンスとも言えるでしょうか。

加えて一様感じたのは、研究室メンバー・学内の連携から、他大学や研究機関・海外研究者との交流、さらに地域や社会との関わりを、皆さん非常に大切にしているということ。

研究に使うエネルギーとともに、ふだんのコミュニケーション力や調整能力がすごい。そんなスーパーな存在の力で、この雑誌はできているのだと感じました。



この冊子は、環境にやさしい「水なし印刷」
「植物油インキ」を使用しています。



東北大学 多元物質科学研究所

IMRAM

INSTITUTE OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH
FOR ADVANCED MATERIALS TOHOKU UNIVERSITY