



TAGEN FOREFRONT 09

多元研

TAKAHASHI, Yukio

UEDA, Shigeru

KAMEOKA, Satoshi

KANIE, Kiyoshi

NISHIHARA, Hirotomo

KATO, Hideki

ABUKAWA, Tadashi



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、持続可能な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X線顕微技術を駆使して
未知のナノ構造の可視化へ

高橋 幸生 教授

05

02 多様に変化する課題に応えるため
高温反応プロセスの新展開へ

植田 滋 教授

11

03 金属学との分野融合により
触媒研究のブレークスルーを

亀岡 聡 教授

17

04 ヘテロ界面の自在な精密設計・制御から
新たな機能性ナノ粒子材料の開発へ

蟹江 澄志 教授

23

05 次世代電池の未来を切り拓く
新規カーボン材料

西原 洋知 教授

29

06 社会のエネルギーシステムを変える
“人工光合成”への挑戦

加藤 英樹 教授

35

07 ナノ世界の表面構造を探索し、
表面を舞台にした相互作用の解明に挑む

虻川 匡司 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

寺内 正己

TERAUCHI, Masami

多元物質科学研究所(以下、多元研)創立から20年が過ぎました。従来の区別や枠にとらわれない、物質、材料だけでなく、それを生み出すプロセスや評価技術までも含む、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月に発足しました。そして「多元物質科学」は一般社会にも浸透しつつあります。その礎は、創立1941年以来受け継がれてきた多元研の前身である、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ます。もうすぐ80年を迎えようとする伝統の力は漏れることなく多元研に引き継がれております。

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、先駆的なネットワーク型共同利用・共同研究拠点である「物質・デバイス領域共同研究拠点」、産学連携の拠点となる共同研究部門、さらには、青葉山キャンパス内に建設が進められている次世代放射光施設の利活用を目指した国際放射光イノベーション・スマート研究センターの設置やその運営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。

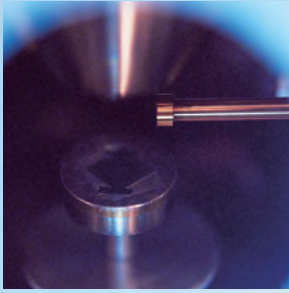
日々刻々と成長していく多元研では、資源から最先端素材までの“プロセス軸”、無機・有機・バイオなどあらゆる物質を含む“物質軸”、そして、ナノからマクロまでの“評価計測軸”を、ハイブリッドにカバーした、独創的で斬新な研究が数多く行われています。そうした多元研の研究者の横顔をシリーズで紹介する「TAGEN FOREFRONT」では、現在の最先端研究の一端に触れていただけます。

2011年3月の東日本大震災から10年が経過しました。多元研は物質材料研究による東北復興への貢献と、東北大学そして日本の未来を背負う新進気鋭の優秀な研究者の輩出を、今後も積極的に担っていきます。

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、どうぞよろしくお願いいたします。



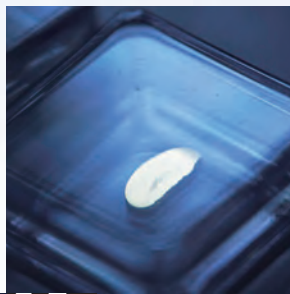
FOREFRONT REVIEW



01



02



03



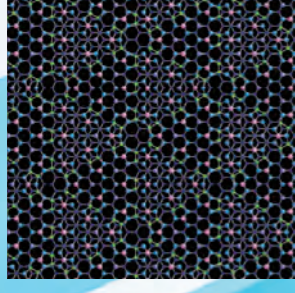
05



04



06

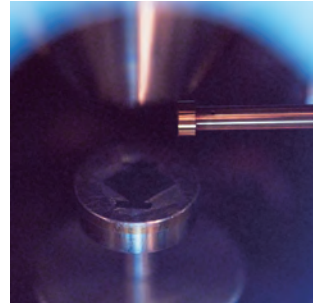


07

A man with short dark hair, wearing a dark blue polo shirt, is looking slightly to the left. He is standing in front of a large screen that displays a 3D molecular model with various colored atoms and bonds. The background is a light blue wall.

FOREFRONT REVIEW

実用材料の多くは、原子からミリメートルまでの空間階層構造を有する複雑系と言えます。したがって、広い空間スケールでの微細構造と機能の相関を解明し、材料設計へと還元していくことが重要です。高橋幸生研究室では、様々な先進的 X 線顕微技術開発の独創的な取り組みを進め、次世代の放射光イメージングの応用展開に即応できる基盤を整えています。新規計測・解析法の提案と実証、そしてそれを用いた材料計測・分析の応用研究まで一貫して行えることが研究室の大きな強みとなっています。



先進的X線顕微技術を駆使して 未知のナノ構造の可視化へ

X線顕微法の基本を理解するために、わかりやすく電子顕微鏡とX線顕微法を比較することから始めてみます。電子顕微鏡では、原子が並んでいる様子も見るができます。しかし、電子線は透過性が悪いので、分厚いものを見るできません。試料の構造を観察したいなら、試料を薄くスライスしなければいけない。つまり非破壊観察にはほど遠いものになります。

一方、X線はレントゲン写真に使われているように、透過力が高く、電子に比べて厚いものを見るができます。試料を壊すことなく、試料の内部構造を観察できるという圧倒的な強みを持っています。ただ、適切なX線を取り出すためには、装置や技術など課題もあり、電子顕微鏡ほどの高い分解能はまだ実現できていません。

電子顕微鏡が高い分解能を実現できるのは、波長が短いので細かいものが見えるということと、電子に磁場をかけて進行方向を変えるため、光学顕微鏡におけるレンズの機能を用いて試料の像を明瞭に結ばせることができる、という2つの強みによります。X線は基本として、電子線同様に高いエネルギーを持ち、透過力があるものの、進行方向を変えるのが難しく、電子顕微鏡のように像を結ばせることが困難です。しかし、原理的にはX線顕微法においても、高い分解能を持って見ることはできるはずです。

学生時代から高橋教授はX線による観察・計測の方法を徹底して追求してきました。コヒーレントX線に着目し、従来の手法に独自の改良を加えた高橋教授は、X線による2nmの分解能という未踏の記録を達成しました。

X線による観察・計測の方法を次々に進化させることによって、いま微細構造観測の世界が大きく広がっています。

国際放射光イノベーション・
スマート研究センター 教授
多元物質科学研究所 計測研究部門
放射光可視化情報計測研究分野 教授

高橋 幸生

TAKAHASHI, Yukio

1977年石川県生まれ。東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻 博士課程修了 博士(工学)。2005年理化学研究所播磨研究所基礎科学特別研究員、2011年大阪大学 大学院工学研究科准教授、2014年～理化学研究所放射光科学総合研究センター チームリーダー、2019年～東北大学多元物質科学研究所教授、大阪大学大学院工学研究科招へい教授、2020年7月東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター教授

所属団体／日本物理学会・日本放射光学会・日本金属学会・日本顕微鏡学会。受賞／2011年文科省若手科学者賞、2013年本多記念研究奨励賞

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/takahashi-y/html/index.html>

追求してきたのは コヒーレントX線イメージング

光学現象と計測法について 追求を続けてきた研究

高橋教授は「大学の工学部で勉強していた時から、ずっと関心をもって研究してきたのは、光学現象と計測法そのものでした」と話します。「計測法は、何かちょっとした工夫をすると、性能が飛躍的に向上するという経験がいくつかあって、そこに惹かれていたところがあります。いままでずっと研究手法の開発、改良という面に力を入れてきました」。

様々な光学素子や光学機器をどのよ

うに設計して、どのように設置するかという実験についても、高橋教授は「自分たちで設計して、組み立てることが、とても面白かったですね」と語ります。自らが計測法を提案し、そして実証する。これまで、高橋教授は、さまざまなX線顕微法に挑戦してきました。

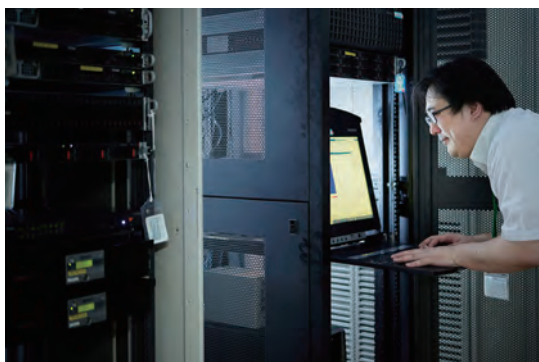
非破壊で物質内部を観察する X線顕微法への取り組み

X線は高い透過力を有することから、物体の内部を非破壊で可視化する検査

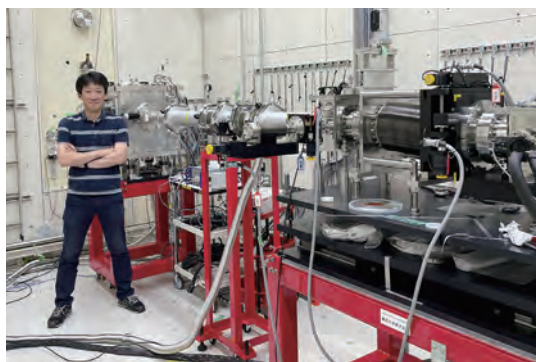
装置として用いられてきました。「医療診断や空港の手荷物検査におけるX線写真が代表的な例です。しかしながら、高い空間分解能で観察することは簡単ではありません」と、高橋教授は説明します。「X線は進行方向を変えることが難しいので、レンズをつくるのが技術的に難しいんです」。

レンズを使わないで高い空間分解能を有する試料像を得るためには、「コヒーレント回折イメージング」の手法が使われます。「コヒーレント光とは、光の位相、つ

まり波の山と谷がきれいに揃った光のことです。X線のコヒーレント光、すなわち、コヒーレントX線を試料に照射すると、明瞭な干渉縞が回折強度パターンとして観測されます。ただし強度情報は得られるけ



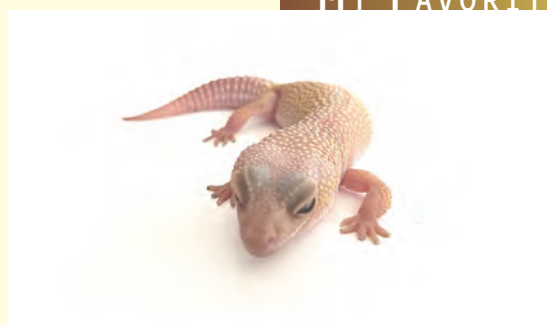
高橋研究室の中でも光学現象に関する計測法や計算・解析は重要な研究テーマとなっています。近年の情報処理技術の発展に伴い、3次元空間に分布する元素・電子状態の情報から、構造と機能に関する特徴的な情報を抽出することも可能になりつつあります。



現在開発中のシングルショットコヒーレントX線回折イメージング装置。SPring-8のビームラインに自らが設計・デザインしたもの。

人気のペット ヒョウモントカゲモドキ

子供の情操教育が目的で、数年前よりヒョウモントカゲモドキ(通称:レオパ)を飼っています。ケージ内を25℃から30℃程度に保つ温度管理が必要ですが、動きが遅く、小さいため、とても飼いやすい爬虫類です。生餌のコオロギも同時に飼育するため、年中、鳴き声(秋の風情)を感じることができます。



MY FAVORITE

TERM INFORMATION

空間分解能

位置的に接近した2点を独立した2点として見分ける能力。顕微鏡によってどこまで細かい物が観えるのかを表す指標となる。

コヒーレントX線

波と波が重なり合うとき、打ち消し合ったり、強め合ったりする性質を可干渉性(コヒーレンス)と言う。コヒーレントX線とは、ビーム全体に渡って可干渉性を有するX線。

回折強度パターン

物体(試料)によって散乱された波の干渉した様子を光の強度情報として画像化したもの。

位相回復計算

光の強度情報から光の位相情報を回復する計算。回復法が用いられることが多い。

全反射集光鏡

X線の全反射現象を利用して、X線を集光する鏡。屈折や回折を利用した集光素子に比べて高い効率でX線を集光できる。また、全反射現象にはほとんど波長依存性はないため、色収差がほとんどないのが特長である。



空気中では不安定な固体・粉体・液体などを扱う真空式グローブボックス。リチウムイオン電池の材料の分析などに使われます。このような電池内部の化学反応をX線によって可視化する試みも研究テーマの一つになっています。

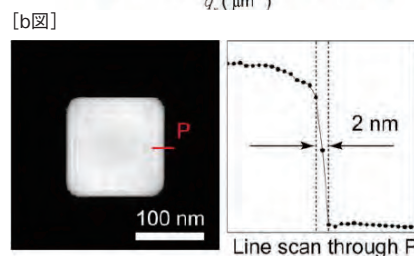
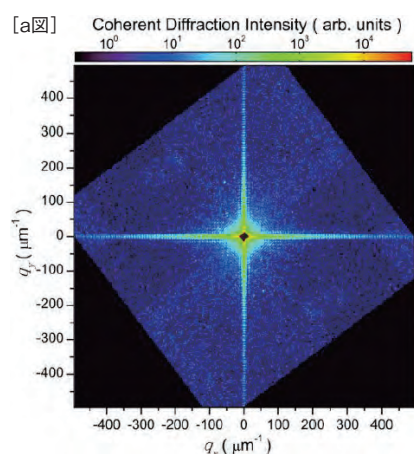
ども、位相情報は欠落している。そこでレンズの代わりに回折強度パターンから位相回復計算をすることによって試料像が再構成されます」。

高強度コヒーレントX線で空間分解能の世界記録

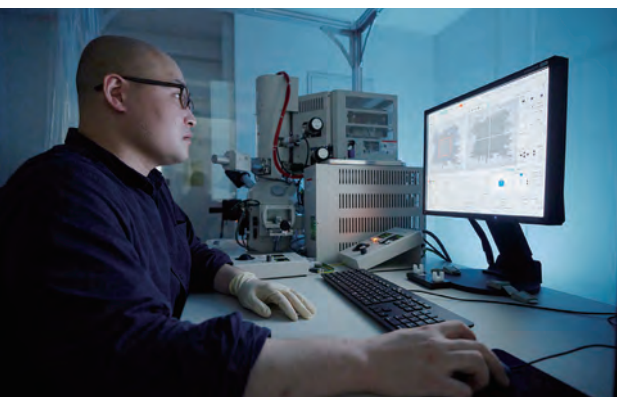
コヒーレントX線回折イメージングで実現可能な理論上の空間分解能は、X線波長(0.1nm)程度とされていました。「実際にそれを達成するのは容易なことではなく、SPring-8のような高輝度X線源を利用して、10nm程度の空間分解能が限界でした」と高橋教授は振り返ります。

高橋教授のグループは、既存の放射光源を活用して高強度のコヒーレントX線を得るには集光するしかないと考え、2007年ごろから全反射集光光学系を用いた高

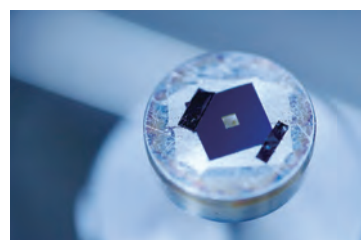
分解能コヒーレントX線回折顕微法の研究に取りかかりました。最終的にSPring-8のビームラインにX線全反射集光鏡を備えたコヒーレントX線回折イメージング装置を開発製作して、実証実験を行ったと言います。「その結果、二次元分解能～2nmという世界最高水準の空間分解能を達成することができました。これは今でも破られていません」と高橋教授は話します。全反射集光鏡を用いた高分解能コヒーレントX線回折イメージングについては、2009年に論文発表されました。



a図は、試料として用いられた銀ナノキューブからの回折パターン。これに位相回復計算を施すと、b図に示された再構成像が得られます。再構成像の断面プロファイルから、銀ナノキューブの端が2nmで分解できていることがわかります。



SPring-8での実証実験に臨む前に、現地での作業効率をアップさせて速やかに稼働させることができるように、多元研究室での事前準備が欠かせません。ガリウムイオンを集束ビームにして試料を加工しています。



次世代放射光施設で X線イメージングの未来を拓く

X線タイコグラフィに 新技術を加えて高機能化

高橋教授が高分解能の世界的記録を出したコヒーレントX線回折イメージングは、平面波照明型に分類されるものです。ただこの手法には、X線ビームサイズより小さなナノ粒子しか測定できない、という限界がありました。常に測定・解析技術の追求を続けてきた高橋教授は、2007年に海外で実証されていた「X線タイコグラフィ(走査型コヒーレントX線回折イメージング)」に着目し、2010年ごろからX線ビームサイズよりも大きい試料を見る

ことができる新しい手法の開発に取り組み始めました。

X線タイコグラフィとは、大きな試料をX線ビームで走査しながら測定しますが、高い空間分解能を実現するためにX線の強度を上げると試料の形状を再構成できなくなってしまうなどの課題がありました。様々な試行錯誤と実験を繰り返し、高橋教授は「暗視野X線タイコグラフィ」と言われる手法を考案しました。「試料の前に微小な構造体を設置すると、それにX線ビームが当たって一部が散乱し、結果的に回折パターンが満たされ、

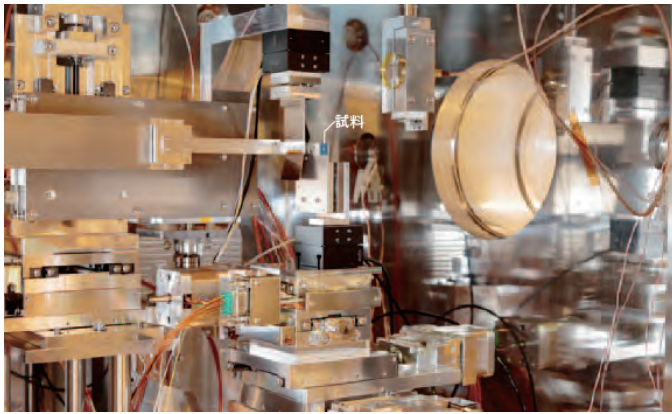
従来のタイコグラフィより格段に感度の高い画像を得ることができました」。

高橋教授は、さらにX線タイコグラフィの多機能化や高機能化を果たしていくことによって、コヒーレントX線イメージングの応用研究を目指しています。

触媒、電池材料など 高分解能で可視化が可能に

たとえば触媒材料や電池材料など、内部構造が複雑な先端材料の働きについては、未だ不明な点が多く、内部の形状だけでなく化学状態を高解像で可視化するツールが求められています。

高橋教授は、放射光施設で実施されているX線吸収微細構造(XAFS)法の技術とX線タイコグラフィを組み合わせることによって、従来より高い分解能で試料の化学状態を可視化することに成功しました。「元素というのは種類ごとに特定の波長のX線を吸収するので、見たい元素が吸収する波長のX線を照射すると、その元素や価数分布の像を得ることができる」という技術を使ったものです。触媒が



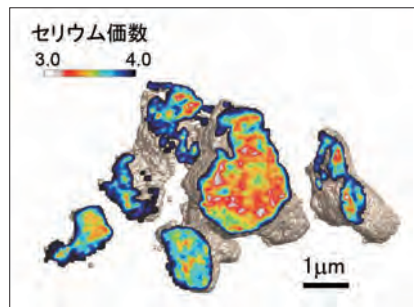
試料や光学素子の位置を高い精度で調整するため、装置は多数の自動ステージで構成されている。写真は、暗視野X線タイコグラフィ装置の内部。

スマートウォッチで健康管理

40歳を過ぎてから健康には気を付けるようになりました。愛用しているスマートウォッチで、歩数、心拍数、睡眠時間、皮膚温度、血中酸素レベルなどを計測し、値が正常でないときは、何かと相関があるのではと考えてしまいます。朝晩に自宅周辺を3キロほど走るのが日課になりつつあります。



OFF TIME



元素は種類ごとに特定の波長のX線を吸収するという特性を利用し、見たい元素が吸収する波長のX線を照射すると、その元素や価数分布の像を得ることができる。この原理を応用して取得した触媒材料中のセリウムの価数分布を表すX線タイコグラフィ画像。

働いて化学状態が変化する、といった時にそれを高解像で可視化できるようになります」。

この研究は、SPring-8で行われましたが、「現状のSPring-8におけるタイコグラフィ測定の課題は、測定時間が長いこと」と高橋教授は指摘します。数 μm サイズの試料について、そのナノ構造と化学状態を可視化するために必要なデータ収集に数日を要していると言います。次世代放射光施設では、測定時間が実に10分の1以下に短縮され、触媒材料、電池材料、高分子材料、磁性材料など様々な実用機能性材料のより高度な分析が可能になると予想されています。

次世代放射光施設の ビームラインをデザイン

東北大学青葉山新キャンパスで2024年度より本格的な運用開始が予定されている次世代放射光施設は、学術研究の面でも、また産業界でも、大きな期待が寄せられているイノベーション基盤とすることができます。



研究室のスタッフ、大学院生たちと。SPring-8のビームラインにて。

これまで日本では兵庫県にあるSPring-8が硬X線領域の高輝度放射光施設として世界中の研究者が利用していましたが、高輝度軟X線を扱う放射光施設が国内にはないため、最新鋭の放射光施設の整備が求められていました。

高橋教授は、コヒーレントX線イメージング装置のプロジェクトメンバーとして、ビームラインの設計デザインに携わっています。「運用が開始されれば、特性の優れたX線が提供されるわけですから、それを最大限に活かす光学系装置をセッティングする必要があります。ビームラインの挿入光源から実験ハッチ、エンドステーションまでの数十mの間に、様々な光学装置と計測・分析装置を設置します。われわれはSPring-8でも何回も経験がありますので、細かいところまで納得のいく設計をしてつくっていきます。これも新しい研究の展開のために欠かせない作業です」。

次世代放射光施設は、SPring-8と波長領域や地域性などにおいて相互補完的な役割を担い、これからの日本の科学技術と研究開発力を飛躍的に高めるものと期待されています。



東北大学青葉山新キャンパス内に建設中の次世代放射光施設のイメージ。官民地域プロジェクトにより整備が進められており、2024年度の本格運用開始を目指しています。

写真:光科学イノベーションセンター提供

TERM INFORMATION

タイコグラフィ

コヒーレントX線回折イメージング手法の一つ。X線照射領域が重なるように試料を二次元的に走査し、各走査点からのコヒーレント回折パターンを測定する。そして、回折パターンに位相回復計算を実行し、試料像を再構成する。

X線吸収微細構造(XAFS)

X線吸収スペクトルの吸収端付近にみられる固有の構造。XAFSの解析によって、X線吸収原子の電子状態やその周辺構造などの情報を得ることができる。XAFSは、X-ray Absorption Fine Structureの略。

放射光施設

電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げたときに発生する強力な電磁波のことを放射光という。放射光施設では、放射光を利用した様々な計測・分析を行うことができる。

軟X線

低エネルギー領域のX線。明確な定義はないが、数十eVから1keV程度までを軟X線、1keVから5keV程度までを tender-X線、5keV以上を硬X線と呼ぶことが多い。



FOREFRONT REVIEW

植田滋研究室は、金属製錬分野の国内有数の教育研究拠点を
目指して立ち上げられた多元物質科学研究所金属資源プロセス
研究センターの中で、基盤素材プロセッシングの研究に取り
組んでいます。特に社会基盤を支える鉄鋼製造において重要な
課題となっている、環境負荷低減や副産物・廃棄物有効利用
などの現代的・戦略的ミッションに挑戦しています。



多様に変化する課題に 대응するため 高温反応プロセスの新展開へ

2020年データでは、全世界で年間約18億6400万トンの鉄鋼（粗鋼）が生産され、1位は中国で10億5300万トン、2位がインドで9960万トン、3位が日本で8320万トンとなっています。

世界の鉄鋼生産量は年々増加してきました。特に中国は1990年代以降に急速に生産量を増大させ、1996年には世界一の生産量となり、以後トップの座に君臨しています。中国の生産量は実に世界の50パーセントを超えてきました。またインドなど新興国の生産量増大が目覚ましく、2018年にはインドが世界2位の生産国となっています。

日本の鉄鋼製品は、その技術力の高さ、品質の高さにより、世界的な信頼を得てきた実績がありますが、中国や新興国を中心とした旺盛な資源需要を背景に、いくつかの問題点が顕在化してきました。1つは、急激な需要増により、原料の鉄鉱石価格が変動を起し、結果として不純物成分を多く含む低品位鉄鉱石が流入してくる可能性が高まっていること。日本は鉄鋼の原料となる鉄鉱石を全量輸入しているため、価格上昇や原料の品質低下の影響を強く受けることになります。

もう1つは、鉄鋼生産段階におけるCO₂や有害な副産物発生の問題です。もともと日本の鉄鋼業は、世界最高水準のエネルギー効率と最小の環境負荷で生産してきましたが、環境負荷低減はいまや新しい局面の大きな課題です。

植田滋教授は「持続可能な社会が求められる中で、高度な文明を維持するためには社会基盤となる素材供給を維持することが基本」と捉えます。その上で「様々な課題が出てきたこの情勢の中で、安全かつ安定な社会を構築していくためには、どのような視点が必要なのか」との問いを投げかけ、「社会的な境界条件が様々にある中で、低環境負荷、資源の活用、副産物の削減といったそれぞれの切り口で新しい高温反応プロセス構築に向けた研究の進化が求められている」のだと、植田教授は考えています。

多元物質科学研究所
金属資源プロセス研究センター
基盤素材プロセッシング研究分野 教授

植田 滋

UEDA, Shigeru

1972年新潟県生まれ。博士(工学)東京大学大学院工学系研究科金属工学専攻博士課程修了。2001年日本学術振興会特別研究員(PD)東北大学多元物質科学研究所、2001年米国カーネギーメロン大学客員研究員(兼任)、2002年岩手大学工学部助手、2006年東北大学多元物質科学研究所助手、2007年同研究所助教、2010年同研究所准教授、2020年同研究所教授。
所属団体/日本鉄鋼協会、日本原子力学会、日本学術振興会製鋼第19委員会・同製鉄第54委員会。受賞/日本鉄鋼協会澤村論文賞・同学術記念賞(西山記念賞)・同俵論文賞

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/ueda-s/>

鉄鋼製錬プロセスの 新たな高付加価値化を目指す

原料資源の変化に対応した 製鉄プロセスの開発

基盤素材プロセス研究において扱う金属は、鉄とベースメタル（銅・鉛・亜鉛・スズなど）ですが、メインは鉄（鉄鋼）です。そしてこの鉄鋼を基本テーマとして、高温物理化学、反応プロセス工学などの基礎をもとに、資源、エネルギー対応、副産物の削減および利用といった社会基盤構築に必要な反応プロセスの構築を目指します。

「研究の目標としては、鉄鋼製錬プロセスの高付加価値化、低エネルギーコスト化のために、副産物の有効再利用方法およびプロセス中の物質の移動、反応の最適化に向けた研究」ということになります。

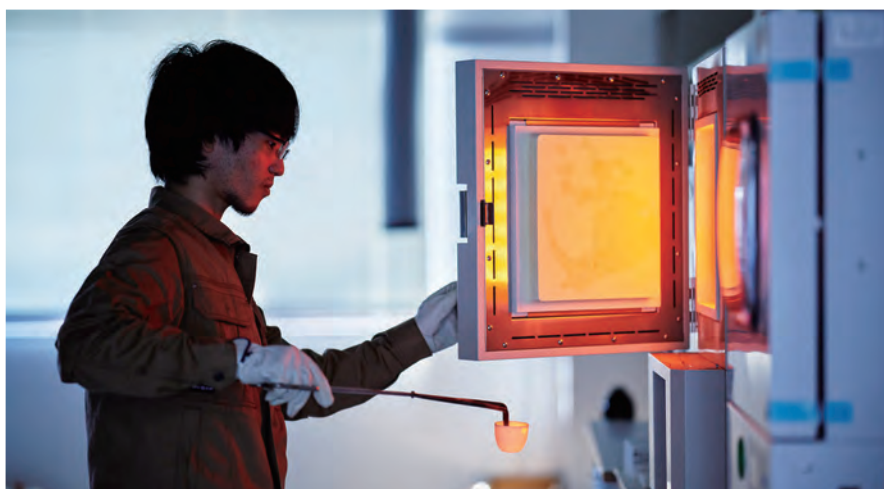
「プロセッシングという名前の通り、素材をどのようにつくるかというのが研究テーマで、そこまでがわれわれの勝負なんです」と植田教授。研究の中身としては鉄鋼を例に挙げると、鉄鉱石を反応させて鋼

を取り出す際に、鋼の規格が決まっている中で、原料を反応させて、「効率よく操業して効率よく物をつくり出す、経済性と効率性をいかにコントロールするかということがプロセス研究の特徴であり、役割だ」と話します。

日本は原料資源となる鉄鉱石をすべて輸入しているため、「採掘先によって鉄鉱石成分も異なり、仕入れ価格も世界的な市場競争にさらされています。価格が高騰すれば、取引はより低価格のものを仕入れることになり品質も低下するなど、様々な変化が出てくる中で、そのような変化に対応した新たなプロセスを開発していくこと」を模索していると言います。

反応、物質移動と平衡 高炉の中の挙動を制御

鉄は、鉄鉱石とコークスと石灰石を、高炉と呼ばれる巨大な反応装置の中で燃焼反応させて、銑鉄を得るのが基本です。鉄鉱石は酸化鉄で、還元によって酸化鉄の酸素とコークスの炭素を結合させて一酸化炭素が生じ、溶解した鉄が高炉



約1600度の発熱が可能な電気炉を使った金属・熱処理の実験。熱力学、熱化学などの基礎学問の知見を活用して高温素材プロセスを研究しています。

隅田川のほとりで江戸庶民に想いを馳せる

私は生まれてすぐから小学校に入るまで東京にいて、その後高校までは千葉県でしたが、大学はまた東京でした。祖父は神田、父は下北沢生まれで江戸っ子気質の人でした。自分で勝手に江戸庶民の末裔とっていて、記録にも残っていないような江戸の庶民の人たちがどんな生活をしてたのかと、よく思いを巡らせていました。

荒川の支流である隅田川の下流は、江戸時代に大川と呼ばれました。そのほとり、吾妻橋や駒形橋あたりの風景が気に入っていて、東京の実家に帰った時は、そのあたりをよく走ったり、散歩したりします。下町風情を一部にほんの少し残しながらも昔とはだいぶ変わった川沿いの表情を感じながら過ごすひとときです。

MY FAVORITE



駒形から吾妻橋方面を望む（筆者撮影）

TERM INFORMATION

鉄と鋼

鉄は元素の鉄（純鉄）と炭素を多く含む銑鉄（～4% Cの鉄炭素合金）の両方を表す。一方、鋼は約2%以下の炭素を含む高強度の鉄合金を表す。「鉄と鋼」と対に呼称する場合、銑鉄と鋼のことになるだろうか。また、日本鉄鋼協会発行の和文論文誌の名称でもある。

高炉

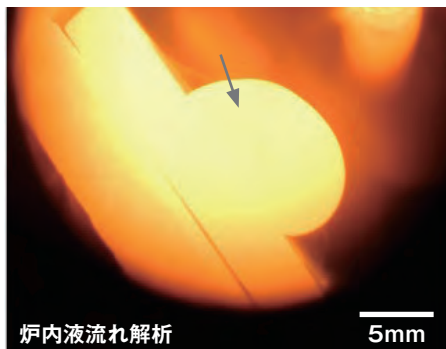
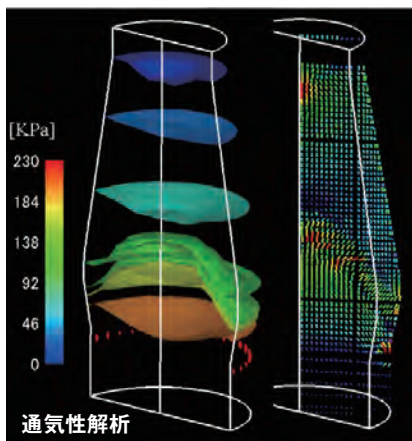
溶鉱炉のこと。鉄鉱石、コークスと空気を入れると熔融銑鉄が得られる、中空の構造物。付帯設備を含めると100mほどの高さとなり、名の通り高い炉である。

コークス

石炭を蒸し焼きに（乾留）して作る。石炭に揮発分が抜けるため、構成成分は主に炭素、灰分が少々。高炉内に積み込んだ際に、破碎されてはいけないため高い強度がある（木炭の比ではない）。

製鉄と精錬

鉄鉱石から鉄を作ることと鉄の成分を調整すること。



高炉における様々な反応によって生じる溶液の流れや、高炉下部から吹き入れるガスの流れの解析は、高炉操業を円滑に進めるために重要な役割を担っています。

反応プロセスを 速く効率よく実行するために

鉄の精錬工程では、スラグとメタルが共存する反応容器にガスを吹き込み、融体を強撹拌して反応を促進するという工程があります。しかしその時、スラグ-メタル界面では撹拌やガスの通過により、スラグ中に鉄粒子が取り込まれたり、あるいは溶鉄中にスラグ粒子が取り込まれたりする現象が発生してしまうことがあります。

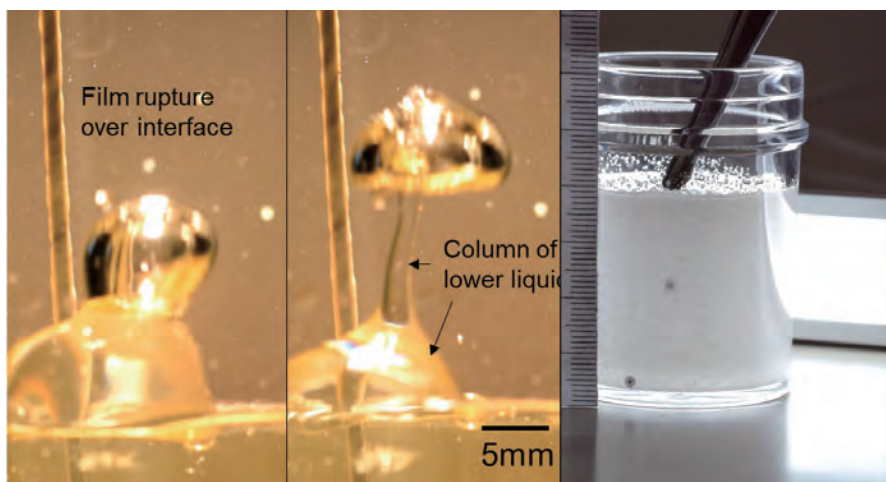
このため、反応性と分離性を制御するために、液相内の界面の生成および分離性に関する研究を行っています。「たとえば、ゲルや高粘度流体を少ないエネルギーで均一に撹拌するにはどうすればいいのか。粒子の動きをコントロールしながら混ぜるにはどうしたらいいか。など反応プロセスを効率よく展開するための基礎研究が欠かせません」と、植田教授は話します。

鉄の精錬工程では融体の撹拌によって反応が進行するため、反応プロセス中の反応界面の制御と分離の研究が重要になります。写真左はエマルジョンの生成と分離性の測定、右が懸濁液中の粒子の移動現象。

下部に流れ落ちます。一方鉄鉱石の中の不純物は石灰石と反応してスラグ（金属酸化物）となって流れ落ちます。鉄はスラグより比重が重いので、分離させて鉄を得ることができます。

この高炉内のような反応の解析や制御は、植田研究室の基本的な研究テーマです。高炉による製鉄では、低炭素製鉄が重要な課題となっています。このため高炉操業は、低コークス操業およびH₂系ガス利用に移行することが求められています。

「たとえば低コークス化を実行しようとすると、炉内の通気性・通液性が低下して、操業が困難になる場合が多くなります。溶けた酸化物の液体が順調に流れないと、ガスもうまく流れません。したがって低コークス状態においても高炉内全体の通気性・通液性、そして安定した荷下がり確保する方法や条件を開発することが、1つの研究課題になります」と植田教授は指摘します。

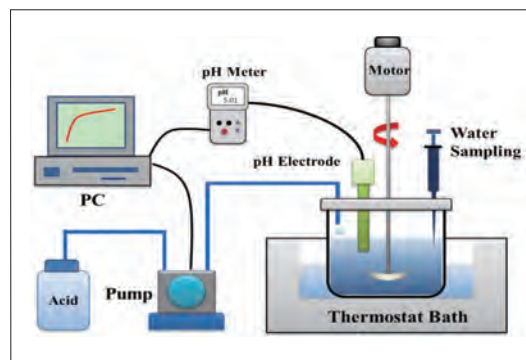


新たな課題への挑戦と 未来展望を広げる人材育成

製鋼スラグからの リンの回収で資源確保

銑鉄から鋼を製造する製鋼工程で生じるスラグは製鋼スラグと呼ばれ、産業用資材として転用されます。様々な成分が含まれていますが、その中でリン成分に注目する必要があります。「リンというのは、国内で消費する全量を輸入に依存している。一方で、良質の鉄鉱石の調達が難しくなっていて、鉱石中のリン濃度の上昇が問題になっている」と植田教授は指摘します。

リンは農業用肥料のほか、リチウムイオン電池の電解液に必須な元素であるため、十分な供給が望まれています。「もともと鋼にとっては、リンは割れる要因となるため入ってはいけない成分なので、スラグとして除去されているわけです。一方、製鋼スラグの中には、日本が輸入するリン鉱石に含まれるリンの量にほぼ匹敵するほどのリンが生じているんです。つまり製鋼スラグからリンを高濃度に回収する技術があれば、リン資源の確保という社会的役割に応えることができるわけです」。



スラグの溶出性、反応速度の解析の仕組み図。鉄鋼業においては、溶銑予備処理および酸化製錬段階で製鋼スラグからリンを除去することが重要な役割となります。



電位差測定装置を用いて、溶液内の目的成分の濃度を2電極の電位差から情報を得る分析手法です。溶液中のイオン濃度や酸化還元電位の測定に利用します。



植田教授が取り組んでいるのは、スラグの反応を解析し、高温での鉱物相の制御を基にした、特定元素の選択溶出技術の開発という研究です。

また高炉ではなく電気炉プロセスにおいては、鉄鉱石の代わりに鉄スクラップを用いますが、スクラップ利用による鉄リサイクルを繰り返すと、精錬工程では除去できない銅、スズ、モリブデン、コバルトなどの元素が次第に濃縮されてきて、使えなくなってしまいます。「使える期間を長くするために、それらの元素が製品となる鉄合金の方に分離せず、できるだけ酸化物の方に分配されるように基礎データを測定して、限界値を探る研究もしています」。



ジャケットや100着のシャツをカスタムメイド

手を動かすのが好きで、いろいろなものを自分で作ります。今着ているシャンブレージャケットも、自分のサイズを採寸して型紙を調整し、ミシン裁縫で作ったものです。生地は、布地屋さん好みのものを探しに行って調達しました。(見せていただいたが、何かほつれとかよじれなど破綻が見えるわけもなく、細部まで驚くほどいい仕上がりでした:記者)。シャツは消耗品なので今まで100着以上作ってます。何着も作っていると、だんだんうまくなるもんです。

オープンを使って焼き菓子も作ります。材料の調合と熱処理に気をつかうのは研究と同じで、面白い。ただ手を使うことでも向き不向きがあるのか、高校からやっているギターは全然うまくなりませんよ。

OFF TIME





精錬の際に生成したスラグ有効利用を図るために、またスラグ量低減を図る上で、スラグから有価元素を回収することは、重要な研究テーマとなります。回収方法を計画するために、スラグ成分の基礎的な分析から探っていきます。

廃炉に関わる放射性物質の 取り出しにも貢献

植田教授は、冶金の高温反応技術の知見から、福島第一原子力発電所事故による廃炉にも関心を持ってきました。いま廃炉という困難な工程に向けた取り組みが始まった中で、植田教授は、高温素材プロセッシングにおける様々な研究によって廃炉プロジェクト参加への取り組みも進めています。

「大きな課題になるのは、原子炉格納容器の内部にある放射性物質の燃料デブリをどのようにして取り出すか、ということ」と植田教授は話します。デブリは、高温で溶融し、冷却し凝固したものです。「原子力工学は専門としていませんが、素材プロセスではやはり高温で溶融した金属や酸化物の反応や、冷却し凝固した素材を扱います。その点で、シビアアクシデント（過酷事故）の際の炉心の溶解挙動と反応プロセスは共通の部分があり、研究を進めることができます」。研究手法は変わらなくても、対象を変えると新たな社会貢献ができるのではないかと植田教授は考え、プロジェクト全体の役割の中で一つずつ取り組みを進めています。

「社会的な境界条件が様々にある中で、劣質化した鉄鉱石にどう対応できるか、スラグをどう利用するか、そして福島の廃炉にどう関わるのか、それぞれの切り口に対して研究を通して探索を続ける、というやり方で私は貢献していきたい」と話します。

目の前のことではなく 行き先について思想を持つこと

今後の展望についてという問いに対して、植田教授は「人材育成です」と即答します。多くの場合、研究機関にとって人材育成とは一つの大きな使命とも言うことができます。植田研究室では、研究スタッフ、大学院生が志を持って研究している姿勢を強く感じました。

植田教授は、研究の流行りや世間での受け取られ方などに左右されず、自らの主体的な考え方や研究の視点というものを大切にしてほしいと考えています。「今していること、目の前のことではなく、行き先について自らの思想がなければいけない。そこに、どうつなげていくかという道筋を考えるのが大事」と語ります。

社会に役立つプロセス、ものづくりとは何だろうと、エネルギー的にも資源的にも全体系を見ながら物事を考えることが大切だと植田教授は話します。「工学で社会に貢献できるようになってほしいとはもちろん望んでいますが、まずは人間として健康に幸せに生きる知恵を身に着けてほしいと思っています。その上で俯瞰的にもものを見て、自分の考える正しいことを行って社会貢献してほしい」と。

研究室では、共に研究してきた中国人准教授が、2021年1月に中国中南大学に教授として赴任し、中国人Dr.が同じく3月に中国の鉄鋼会社に就職されました。「一緒に学んだ仲間が、新しい夢を持って、その先の進路や環境に立ち向かっていくのは、とてもうれしいこと」と話していました。



高温物理化学、反応プロセス工学をもとに資源、エネルギー対応、副産物の削減および利用といった社会基盤構築に必要な反応プロセスの構築を目指す植田研究室。研究者それぞれの主体的な考えに基づいて、研究探査への道を自ら切り拓いていくことが期待されています。

TERM INFORMATION

電気炉

電気抵抗炉の略。アルミナなどを断熱材として用いて、二珪化モリブデンやシリコンカーバイドの抵抗体に通電し発熱し、炉内を高温にする。

スラグ（高炉スラグと製鋼スラグ）

鉄を生成する際に発生する、酸化物の副産物。鉄中の不純物をスラグに吸収させ、鉄の純度を向上する。スラグの有効利用が課題となる。高炉スラグと製鋼スラグは組成が異なるため、異なる用途開発が必要。

スクラップ

ここでは工場において製品にならなかった素材（鉄など）と、市中での使用済みの素材を総称している。成分が明らかなものを集積すれば、貴重な資源となる。

燃料デブリ

原子炉に用いるウランを含有する燃料と構造材料等が溶融した後凝固したもの。原料→溶融→凝固という過程が製鉄でのスラグや鉄の生成プロセスに似ている。

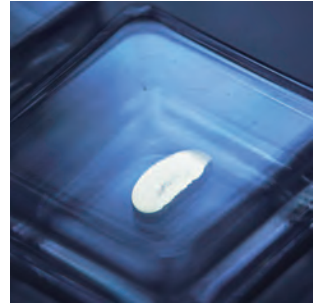
シビアアクシデント

原子力施設の大規模事故のこと。1986年にチェルノブイリ原子力発電所や2011年に福島第一原子力発電所で発生した。



FOREFRONT REVIEW

触媒材料として以前から使われていた金属や合金。しかし、驚くことにこれまで金属学の視点で触媒機能を扱った研究は少なかったと言います。合金組織の制御と選択的溶出処理あるいは酸化・還元処理を組み合わせることにより、従来の触媒調製法では得られないユニークな複相合金組織・形態と触媒機能（活性、選択性、安定性、環境負荷）を持つ新しい合金触媒の創製を亀岡研究室は目指しています。



金属学との分野融合により 触媒研究のブレークスルーを

人と人との出会いというものは、未来を拓く大きなチカラになることがあります。触媒の研究を続けてきた亀岡聡教授と、準結晶研究の世界的な第一人者である故蔡安邦教授との出会い。「触媒と金属学」という違う視点が融合した時、新しいブレークスルーが生まれました。

触媒は資源・環境・エネルギー分野におけるグリーン・イノベーションを実現するためのキーマテリアルであり、そのニーズはますます高まっています。特に最近、脱貴金属化や貴金属代替合金触媒は、有用な化学品の合成、排ガス浄化、エネルギー物質の創出を可能にしてくれるということで、その開発は重要課題の一つとなっています。しかし、金属や合金は触媒材料としてよく用いられているにもかかわらず、これまで金属学の視点で触媒機能を扱った研究は非常に少なく、系統的に金属・合金触媒材料の設計・開発は行なわれていないと言います。

亀岡研究室では、蔡教授との共同研究以来、一貫して金属材料と触媒化学を融合させた新奇な機能を発現する金属触媒材料の研究を行っています。準結晶関連では、新しい準結晶合金や単準結晶の合成、準結晶と類似した骨格構造を有する近似結晶の構造解析、構造転移メカニズムや構造数理などの基礎研究と並行して、準結晶を前駆物質とする触媒や準結晶分散型の高強度Mg合金などの材料開発を進めています。最近では、Cd-Mg-希土類系で新種の近似結晶を発見しています。特に、従来の金属触媒研究のようにナノ粒子金属を扱うのではなく、バルクの金属・合金を研究対象にしているのがユニークなところ です。

「触媒材料のための金属学」という世界で唯一の研究テーマ。研究室は触媒研究へのブレークスルーを目指しています。

<研究テーマ>

- ・金属間化合物とその組織制御を用いた新奇触媒材料の創製
- ・箔型金属触媒材料のメタラジー
- ・貴金属代替合金触媒材料に関する研究
- ・ハイパーマテリアルの新規創製・構造解析・物性評価
- ・準結晶関連物質の電子構造と構造安定化メカニズム

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
金属機能設計研究分野 教授

亀岡 聡

KAMEOKA, Satoshi

1966年福島県生まれ。筑波大学大学院工学研究科博士課程物質工学専攻修了。1996年(独)科学技術振興機構 科学技術特別研究員、1999年筑波大学物質工学系助手、2002年(独)物質・材料研究機構特別研究員、2004年東北大学多元物質科学研究所助手、2006年同助教授、2007年同准教授、2020年より現職。所属団体／触媒学会(代議員、会誌編集委員を歴任)、日本金属学会(会誌編集委員、第二分科会委員等を歴任)

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

「触媒材料のための金属学」による合金触媒の設計と作製へ

新しいブレークスルーは蔡教授との出会いから始まった

有害な物質に「触れる」ことで無毒な物質に化学変化をさせたり、自然界にない化学物質を作り出す「なかだち(媒)」をする触媒。亀岡教授は大学院時代から一貫して触媒材料研究に携わってきました。特にテーマとするのが「金属触媒」という分野です。

「1970年代に自動車の排ガス規制が強化されてから、自動車メーカーは独自の技術開発をしてきました。どんな仕組みで対応しているかという、排出された有害なガス分子が触媒の表面に吸着し、化学

反応を起こし、無毒化した状態になって排出される、というものです。この時に触媒として使われているのが金属なんです。特に貴金属は劣化に強く、あらゆる環境下で同じ性能を出すことができるので、重宝されています」と語る亀岡教授。

古くから金属が触媒になることは良く知られていて、金属をナノ粒子にして、酸化物に担持することで触媒として使われてきました。金属によって、反応するものが異なりますし、合金にすれば、機能が向上することもあります。どの反応にどの金属を組み合わせるのか、無限の可能性が広がっています。

「しかし、金属と触媒機能とは密接に関係しているにもかかわらず、金属学の視点から金属・合金触媒材料を設計・作製されることは少なかったのです。現在、この『触媒材料の金属学』を極めることが、研究室の研究の柱となっています。このきっかけとなったのが、実存する準結晶のほぼ9割を発見したとも言われる準結晶分野の権威である蔡教授との出会いでした」。



金属は触媒分野において有効な触媒活性種として古くから利用されています。亀岡研究室では「触媒材料のための金属学」という世界で唯一のテーマを掲げ、研究を進めています。

触媒化学研究者と蔡教授との視点の違い

つくばの物質・材料研究機構(NIMS)で準結晶研究を進めていた蔡教授と出会ったのは2002年でした。蔡教授が触媒と一緒に研究してくれる人を探していたことがきっかけでした。そして、触媒分野のブレークスルーが生まれたのです。新しい発想はどこから生まれたのか、亀岡教授は当時のことを感慨を込めて語ります。

「メタノールの水蒸気改質反応 $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$ について2人で研究していた時のことです。この反応は、銅Cuを触媒とすると容易に進行するのですが、パラジウムPd単体を触媒にすると反応が進みません。しかし、パラジウム・亜鉛PdZn合金はメタノール水蒸気改質反応に極めて高い選択性かつ高い活性を示します。触媒の銅Cuとパラジウム・亜鉛PdZn合金とでなぜ同じ反応が起こるのか?ということが議論になりました」。

触媒研究者である亀岡教授は「触媒表面吸着種(反応中間体)」に着目しました。触媒反応の選択性はどのような「中間体」をつくるかで決まるとするのは触媒の分野では定説です。担持Pd触媒上ではメタノール脱水素および水蒸気改質はHCHOを「中間体」として進行します。HCHOは、PdZn合金上ではメタノールまたは H_2O との反応によりそれぞれギ酸メチルまたは CO_2 と H_2 を生成するのに対し、金属Pd上では脱カルボニル化してCOと H_2 に分解するという反応の違いが生まれる、ということで上述の説明がつかます。

「しかし、蔡教授はPdZnを“金属間化合物”としてその価電子帯に着目したので

「#福島の桃デリシャス」が世界トレンド。実家の桃も喜んでます

私の父の実家は桃農家なんです。小さい頃からいっぱい食べてましたから、桃が高級な果物という認識はなかったですね。福島の桃はずっと全国で2位の収穫量を誇る特産品なんです。東日本大震災の風評被害では残念な想いをしていました。

そんな中、今年開催された東京オリンピックで、桃を積極的に売り込みましたね。そうしたら、世界中のアスリートから絶賛の嵐。「福島のモモが食べたくなった」「世界一おいしい」。相次ぐ投稿で、「#福島の桃デリシャス」のハッシュタグがトレンド入りするほど話題を集めました。うれしかったですね。少しは復興ができたのかなと思います。



MY FAVORITE

準結晶

結晶、アモルファスに次ぐ第3の固体物質。結晶で定義づける並進対称性を持たず、高い秩序を持った原子配列を持つ物質群。蔡安邦教授らによって100種余りの熱力学的に安定な準結晶が発見されている。最初の発見者であるD.シエトマンが“準結晶の発見”により2011年にノーベル化学賞を受賞した。

反応中間体

化学反応において反応物質と生成物質を結び反応経路の間で形成される物質のこと。反応中間体の振る舞いで生成物が決定するため、反応中間体は反応経路や反応機構を解明するうえで非常に重要である。

金属間化合物

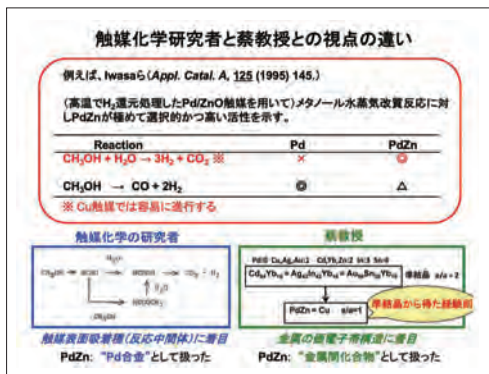
2種以上の金属元素から形成される化合物。通常は2種以上の金属元素が簡単な整数比で結合し結晶を形成したもの。金属間化合物はもとの金属とは異なる結晶構造と原子結合様式を持つため特有の物理化学的性質を示すことが多い。新しい触媒材料として魅力的な物質群。

価電子帯構造

物質を構成する原子の(最)外殻電子である価電子により満たされるエネルギーバンド構造のこと。金属では価電子を含むバンド中にフェルミ準位があるため価電子がそのまま伝導電子となる。価電子は化学結合などに深く関わっているため、価電子帯構造は物性を大きく左右すると言っても過言ではない。

バルク型

物質全体で表面が占める割合が小さい物質のこと。ここでは、ナノ粒子と対比して使用しており、担体を用いない非担持型の金属微粒子もバルク型金属として扱っている。



Cu触媒では容易に進行する水蒸気改質反応が、Pdでは進まず、合金化したPdZnでは進むという現象。触媒の分野では反応中間体の違いで定説化されていた現象が、金属学の発想では、価電子帯の構造の違いで説明できることが解明されました。

す。これは私にとって『目から鱗』でした」と語る亀岡教授。

蔡教授は、これらの反応性の違いは、PdとZnが合金化することで、その電子状態が大きく変わることに関与すると考えました。そして、共同研究者の石井靖教授(中央大学)にCuとPdZnの電子状態を計算してもらったところ、その価電子帯構造が極めて似通っていることを突き止めたのです。

「金属間化合物を用いて価電子帯構造を制御することで、触媒機能制御ができることが示唆されたわけです。この概念を拡張すると、合金化によって価電子帯構造を制御することにより、パラジウム、白金やロジウムなどの貴金属と同様な価電子帯構造をもつ金属間化合物を見出すことができれば、新たな触媒材料が創出できる可能性が出てきました」。

金属学との融合から
新奇の合金触媒の創製へ

金属学をベースに触媒設計ができるという可能性。大きなかたまりであるバルク型の合金触媒の設計に活かさない手はないと亀岡教授は考えました。

触媒には高い活性(Activity)・高い選択性(Selectivity)・高い安定性・耐久性(Stability)が求められますが、この安定性を与えてくれたのが合金化です。合金

亀岡研究室で提唱し研究を進めているのが「触媒化学と金属材料の融合研究」という領域です。従来の「形態制御+構造制御+電子状態制御」という触媒化学的アプローチに「組織制御(表面・バルク)」というものを加えた新しいアプローチを開拓しています。

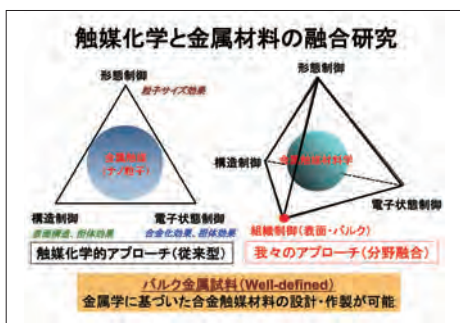


触媒として不活性と思われていた金は、ナノ粒子化することで極めて高い触媒活性を発現することが報告されています。さらに、ナノ粒子や担体を有しない貴金属ポーラス体においても高い触媒活性が発現。亀岡研究室では、ナノ粒子化とポーラス化に共通する、貴金属触媒の起源を再考する研究を進めています。

化により、単一金属の場合とは異なる幾何学的効果・電子的効果・触媒作用を与えることができます。しかし、触媒分野では合金触媒に関する具体的な原理原則が確立されておらず、合金における金属間の相互作用の形態を区別せずにかなり曖昧に“合金”として扱っていたと言います。

「それに対し、金属学分野では、金属原子間の相互作用が親和力の違い(分離・混合効果)により分類・区別されています。さらに合金安定化に関する優れた経験則も良く知られており、これに関する固体電子論からの理論的な説明もなされています。この金属学での知見を用いれば、よりWell-definedされた合金触媒材料の設計・作製が可能となるはず」と金属学との融合により触媒分野の可能性を広げる重要性を語ります。

亀岡研究室では、さらに、バルク合金自身だけでなく、これを触媒前駆物質として扱い、合金組織の制御と選択的溶出処理あるいは酸化・還元処理を組み合わせる研究も進めています。「従来の触媒調製法では得られないユニークな複相合金組織・形態と触媒機能を有する新奇合金触媒の創製を目指しています」。



双晶が活性点を形成するという新しいメカニズムの発見。双晶を導入することにより、表面積の小さなバルク金属であっても、高い触媒活性を生み出すことができるわけで、例えば、双晶を利用した新しい触媒材料開発にも拍車がかかります。大きな社会的意義を持った発見がなされました。



バルク型金属触媒の調製法によりユニークな触媒特性を発現

ナノ粒子化やポーラス化すると金が触媒活性を示すという謎

「触媒性能を向上させるもう一つの改善方法があります。ポーラス化をすることです。ある金属とアルミニウムとの合金を作ってから、リーチングという手法で、アルミニウムだけを溶液で溶かすと、金属に無数の小さな穴が開きます。このリーチング処理を活用することで、ユニークな特性を持つバルク型触媒が容易に調製できます。多孔質体であるため表面積が格段に大きくなり、より多くの化学反応を起こすことが可能になるのです。分散させるよりもより均一に触媒性能が発揮されることわかりました」。

亀岡研究室では、様々な金属や合金のポーラス化による触媒効果を研究しています。活性の高い触媒を安定的に加工できるようになったことで多くのバルク型の金属触媒を作製できる可能性が見えてきました。

その1つが金です。金は古くから宝飾品、貨幣などの用途に用いられてきましたが、これは金が極めて反応性に乏しい物

質であり、腐食されにくいことに由来します。一方で、金のサイズをナノスケールにまで小さくし、酸化チタンなどの酸化物の表面に担持させると、通常の金とは正反対の高い触媒活性を示すことが知られていました。

「ではなぜ、ナノ粒子化すると金が触媒性能を持つのか?この点は十分に解明されていませんでした。さらに我々は2008年にポーラス化したバルク金でも高い活性を示すことを見出しました。金の触媒性能について謎が深まったのです」と語る亀岡教授。

つまりナノ粒子や担体を有しない貴金属ポーラス体においても

ポーラス化した金のナノ界面には多くのナノ双晶が観測され、この双晶境界には配位数の低い突起が生まれます。ナノ粒子リーチング処理で創製したバルク間にある共通の特徴は配位数が小さいということ。触媒活性のひとつのメカニズムの解明の糸口が見つかりました。

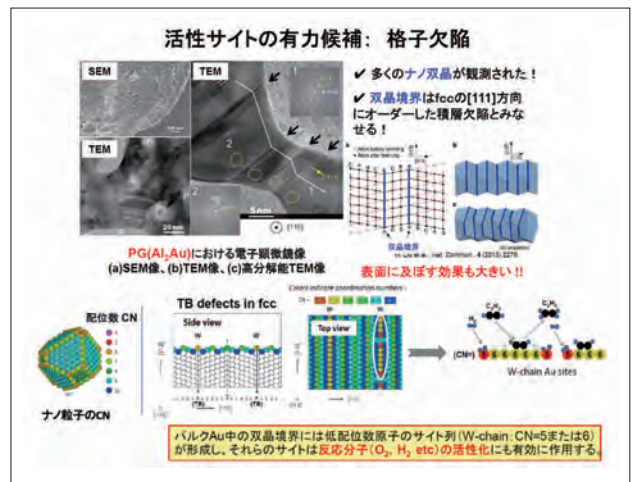
高い触媒活性が出現することが明らかになったわけです。貴金属触媒の起源を再考する必要が生じました。

双晶が活性点を形成するという新しいメカニズムの発見

試行錯誤で様々な研究を続ける亀岡研究室。そして、この金の活性化の謎を解く、ひとつの糸口が見つかりました。

「ポーラスAuのリガメント上に双晶が存在するという面白い現象を確認しました。触媒活性サイトの有力候補として『格子欠陥』が見つかったのです」。

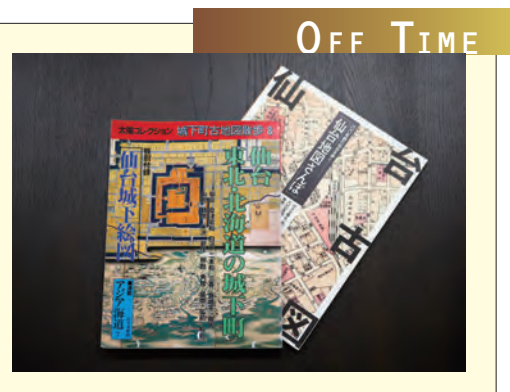
双晶とはナノスケールでかつ高密度の2つ以上の同種の単結晶が、ある一定の角度で規則性を持って接合した状態です。この双晶は金属材料中では敬遠され



昔の町割りの痕跡が残る仙台の町を、古地図片手にめぐっています

学生時代はつくばで過ごしたのですが、筑波研究学園都市ということだけあって人工的に造られた町なので歴史的情緒をあまり感じることはなかったですね。そんな中で、仙台に越してきて「本当に歴史があっていい町だな」「東北出身でありながら仙台に目が向いていなかったな」と改めて仙台の良さを感じています。

それで持ち出したのが、仙台の古地図なんです。伊達政宗公によって開府されて400年以上という歴史。楽しくて古地図と照らし合わせながら、いろいろ調べて歩き回っています。仙台城や伊達藩重臣屋敷跡、御譜代町、小田原、鉄砲町、子平町、宮町、広瀬町……。当時の町割りの痕跡が残っていて、タイムスリップしたような気分になりますね。



ポラス化

物質の表面積を増やすために多孔質化(小さな穴やくぼみが沢山ある形状)すること。ポラス化することで物質の吸着能力や触媒活性などが増すため重要な役割を持っている。穴(細孔)のサイズによってマイクロポラス、メソポラス、マクロポラスに分けられる。ポラス材の代表例として活性炭がある。

リガメント

本来は、腱や繊維状の束の意味であるが、ここではポラス体の柱の部分の部分を指している。

双晶

2つ以上の同種の単結晶が、ある一定の角度で規則性を持って接合したもの。接合部が軸の場合は、その軸を双晶軸と呼び、平面の場合は、その平面を双晶面と呼ぶ。双晶境界はある意味で積層欠陥と見なすこともできる。

格子欠陥

結晶における結晶格子(原子列)の乱れのこと。結晶格子欠陥には、点欠陥(0次元)、線欠陥(1次元)、面欠陥(2次元)および体欠陥(3次元)に分類されている。格子欠陥と触媒作用との関係については充分解明されている訳ではない。

活性サイト

活性点あるいは活性中心とも言い、触媒反応において反応が起こる特定の場所のこと。触媒の働きや触媒作用を説明する時によく使われるが、固体触媒では活性サイトの構造が明らかでない場合も多い。



融合研究には、それぞれの分野の専門家とそれをつなぐ存在が不可欠です。亀岡研究室では、スタッフ一丸となって広い視野を持って研究を進める若い研究者を育てています。

る格子欠陥です。そして理論計算をする、と、双晶境界に存在する原子は通常の表面原子に比べて、配位数(6以下)が小さくなるのがわかりました。

「配位数が小さい」これはナノ粒子化した時にも発生する現象です。金を約5ナノメートル以下の粒子にしていくと配位数と言われる原子の数が変わり、粒子が小さくなればなるほど、分子と結合しやすい「手」が余った状態になります。そしてこの配位数の低さが特異な触媒活性サイトを生み出します。

「ポラス化した金でもナノ化した時と同じようにこの配位数の変化が起きていたということです。双晶は面欠陥のために双晶境界が必ず表面に突き出て多数の活性点を形成します。これらのサイトでは酸素とCOの吸着エネルギーが低くなっており、触媒活性サイトになることが明らかになりました」。

双晶は金属学の分野ではよく知られていますが、触媒化学ではほとんど知られていませんでした。この双晶が触媒に多く活性サイトを形成することは、触媒活性の起源に新しい概念を与えることとなります。

「この発見は、金属と触媒の両分野において新しい融合分野を形成するという意味で、大変学術的意義が存在するわけです。表面積の小さなバルク金属であっても、大量の双晶を導入することで高い触媒活性を達成するという、高活性のバルク金属触媒の開発に新しい指針を与えてくれるはずです」。

亀岡研究室のメンバー。それぞれが金属触媒材料の未来を目指して研究を進めています。

触媒の可能性を拓く鍵は
多角的視点での分野融合

「今回の研究では、活性点と配位数を重ね合わせたときにメカニズムが解明できたわけですが、物理の理論家と組まないと得られなかった知見で、これは触媒と金属の分野を融合させたからこそ実証できたのです。活性のメカニズムを明らかにすることで確実にさらなる性能の向上や問題の改善に繋げることが可能になるのです」と語る亀岡教授。

分野融合には柔軟性と双方の知識を持つ人材の存在が欠かせません。この分野を確立するために、亀岡教授たちは金属学会で「触媒材料の金属学」という研究会を立ち上げました。「触媒学会と金属学会というともに伝統のある学会を結ぶ新しい組織です。まだ小規模ですが、企業や両分野の研究者と一緒に新たな展開を考えていきたい」と新たな融合研究の方向性を示します。

「金属触媒」は無数の組み合わせと、たくさんの可能性に満ちています。「性能の向上・材料開発には、異分野から多角的に、双方向的に見ていくことが重要」と、亀岡研究室では今、触媒機能発現に対する新しいメカニズムを追究するために、触媒化学、金属学(金属材料、材料組織)、固体物理等の新たな分野融合を目指しています。





FOREFRONT REVIEW

「いかにナノ粒子を精密配列するか？」この蟹江研究室の追究が、独自のナノ粒子についての調製手法や機能性・自己組織性付与の道を切り拓き、有機無機ハイブリッド化に結びついています。そしてこの技術が、超高密度メモリ、光制御材料、メタマテリアルなどの次世代機能性材料開発において新たな展開を生み出しています。



ヘテロ界面の自在な精密設計・制御から 新たな機能性ナノ粒子材料の開発へ

「機能性ナノ材料」。それは、私たちの豊かな生活を支える縁の下の力持ちであり、その機能性材料の開発は、未来をより豊かなものとする上でとても可能性に満ちています。

蟹江研究室では、有機合成化学・材料化学の分野での研究実績を基盤とし、有機無機ヘテロ界面の精密設計・制御に着目しつつ、「液相からの単分散無機ナノ粒子のサイズ・形態制御合成法」の開拓を行ってきました。

キーとなるのは、無機ナノ粒子表面への有機物の吸着。金属酸化物やペロブスカイトなどのナノ粒子のサイズ・形態精密制御法の開発を行うと同時に、その生成機構解明に関する学術研究も行っています。この成果は、光触媒、ガスセンサー、蛍光材料、リチウムイオン電池などグリーンイノベーション研究開発につながっています。

さらに研究の領域は広がっています。研究開発してきたナノ粒子の精密表面修飾をベースにすれば、ナノ粒子自身にソフトマテリアルとしての特性を付与できることが分かってきました。複数の材料の長所を“ハイブリッド化”することは、長所の単なる重ね合わせに留まらず、予想を超えた相乗機能の発現につながります。

この思想のもと、これまでに、i) 無機ナノ粒子への自己組織性付与による量子効果の制御、ii) 塗ることで機能性薄膜となるナノインク、iii) 可逆的な刺激応答性を有する脂質二分子膜材料 など、“ハイブリッド化”に基づく機能性材料を世に送り出してきました。蟹江研究室では、豊かな将来のため、これからも新たな機能性材料の発見に取り組みます。

<研究テーマ>

- ・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トエレクトロニクス向けナノインクの開発
- ・刺激応答性人工リン脂質の設計・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

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
ハイブリッドナノシステム研究分野 教授

蟹江 澄志

KANIE, Kiyoshi

1971年愛知県生まれ。京都大学工学専攻博士課程後期課程修了。1998年東京大学大学院工学系研究科 助手、2002年東北大学大学院工学系研究科 助手、2007年同助教、2008年同准教授、2019年より現職。2020年より東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター 教授(兼任)。
所属団体 / 日本化学会、日本液晶学会、高分子学会、ナノ学会、文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術動向研究センター 専門調査員

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

培ったきた知見と独自の発想で 有機無機ハイブリッド材料を創製

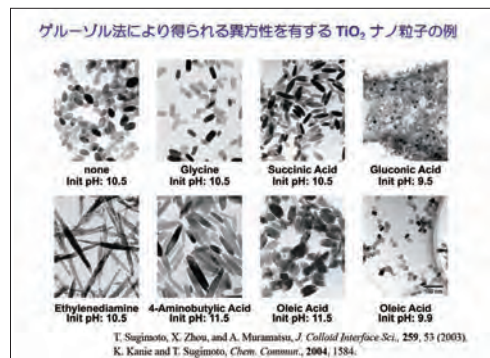
液相合成法でサイズ・形態を 精密に制御した無機ナノ粒子

「機能性無機粉体というものは、産業を支える基幹材料なんです。ただ、従来のような焼結体を粉碎してつくる粉体は、数十から数百マイクロンという幅で不均一な粒子になってしまいます。『もっと均一なナノ粒子がつかれないか?』というナノのオーダーでの界面の制御がこの分野での最先端なんです」と話す蟹江教授。粒子のサイズ・形態や結晶露出面の制御が自在にできれば、触媒活性や反応選択性の向上

につながると言います。そして、東北大学赴任前に取り組んでいた有機合成化学・有機材料化学の分野での知見をもとに注目したものは、粒子の核生成・粒子成長を化学的に制御する「溶液プロセス」です。

液相からの均一核生成・粒子成長を特長とした「液相合成法」は、液相において生成した核の凝集を防止することにより、サイズが極めて良く揃った「単分散ナノ粒子」を得ることが可能となります。さらに、液相での粒子の成長段階において、ある特定の結晶成長面に吸着する物質を共存させることで、粒子の形態に「異方性」を付与することができることが分かってきました。

「私たちはこれまでに、“ゲルゾル法”をはじめとした超濃厚系におけるナノ粒子のサイズ・形態制御液相合成法の開拓を行ってきました。その結果、非鉛系の次世代圧電アクチュエーター素材であるチタン酸ビスマナトリウム等の新しい単分散粒子のサイズ・形態制御合成法を見出してきました」。



無機、有機金属塩の溶液を加水分解・縮重合反応によりコロイド溶液 (Sol) にして、さらに反応を促進させることにより固体 (Gel) を形成させる“ゲルゾル法”。この手法により得られた異方性を持つTiO₂ナノ粒子の例。

培ってきた知見と独自の発想で 有機無機ハイブリッド材料を創製

長年にわたり研究開発してきた無機ナノ粒子の液相精密合成。この固有技術から逆転の発想で新たな展開が生み出されることになりました。

蟹江教授は語ります。「サイズ・形態制御無機ナノ粒子の液相合成を振り返ると、無機ナノ粒子への形状異方性の付与は、無機ナノ粒子表面への形態制御剤の吸着により実現されていることで説明されます。そしてサイズ・形態制御無機ナノ粒子の液相合成での形態制御剤は、アミン、カルボン酸などの有機分子が有効であることが多いのです。この点を逆手に捉えるとどうなるか?無機ナノ粒子表面へさまざまな有機分子を吸着させることが可能となるのでは、と考えました」。

アミノ基を有する液晶分子と針状酸化チタンナノ粒子をそれぞれ合成し、両者のヘテロ界面接合を意識しつつ混合すると、液晶分子がアミノ基を介して酸化チタンナノ粒子表面に強固に吸着し、酸化チタンナノ粒子がサーモトロピック液晶状態となることが分かりました。蟹江研究室が世界に先駆けて開発した“有機無機ハイブリッド液晶”はこの発想から生まれたのです。「得られた“有機無機ハイブリッド液晶”は、有機材料単独では達成困難な高い屈折率を示すとともに流動性や配向制御時の光散乱性・透明性を示してくれました」。

この発見は“相反機能性ソフトマテリアル”開発の代表例となり、これまで国内外で50件以上の招待講演を行うなど高い注目を集めました。

コロナ禍でおうちキャンプ。家族とプチアウトドアクッキング

なかなか家族で外に行くことができないので、今の我が家のブームはおうちキャンプです。バルコでカセットコンロを用意してプチアウトドア気分でバーベキュー。ものづくりが好きなので、料理も好きですね。なので、料理の担当は私。バルコを掃除してビニールプールをプチ露天風呂にしたりしながら、気持ちよく楽しんでいます。あと、東北に来てずっとはまっているのが、海鮮です。活きのいい海の幸を買ってきて、プチ寿司職人をやっています。これは子どもたちにも大人気ですよ。特にマグロ好きなので、マグロ多めです(笑)。

MY FAVORITE



TERM INFORMATION

有機無機ハイブリッド材料

ナノ分子原子レベルでの有機-無機界面制御に着目した複合機能材料です。有機物と無機物の相反する機能、例えば有機物の柔軟性と無機物の高耐久性をオンデマンドに発現するような材料や、全く新しい相乗機能・物性の発現・創出に繋がるのが期待されています。

ナノ粒子

粒径が 1-100 nm の範囲にある粒子。バルク（目で見えるような固体）状態での性質とは全く異なる性質を示すことがあります。例えば、金のナノ粒子は、赤ワインのような色を示すようになります。このことから、様々な分野でその活用に関する研究開発が行われています。

サーモトロピック液晶

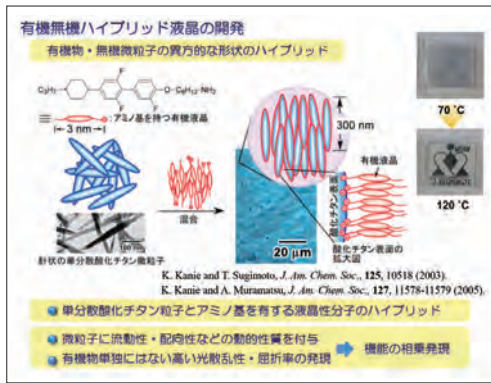
液晶とは、固体の規則構造と液体の流動性を併せ持つ物質あるいは状態を意味します。なかでもサーモトロピック液晶は、温度変化により液晶性を示す液晶です。溶液中での濃度変化により液晶性を発現するものをリオトロピック液晶と呼びます。

デンドリマー

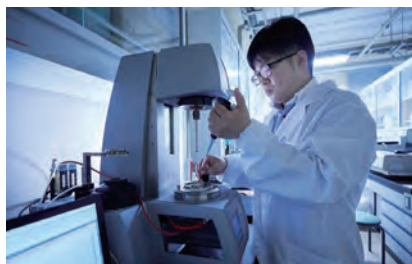
中心から規則的に分岐した構造を持つ樹状高分子です。デンドリマーの側鎖部分の構成要素をデンドロンと呼びます。デンドリマーは、コアと呼ばれる中心部分とその周りにデンドロンが修飾された構造を有します。温度変化により液晶性や様々な組織構造を自発的に形成するものが見出されています。

量子ドット

ナノサイズの半導体ナノ粒子は特に量子ドットと呼ばれます。化学的に安定であり、外部からの紫外光照射により発光する（フォトルミネッセンス）特性を有します。量子サイズ効果と呼ばれる、量子ドットのサイズに応じて発光波長が異なる性質を示すことが特徴です。



単分散化チタン粒子とアミノ基を持つ液晶性分子のハイブリッド化を行うと、微粒子に流動性や配向性などの動的性質を付与できると同時に、有機物単独にはない高い光散乱性・屈折率を発現させることができました。まさに機能の相乗発現がなされた有機無機ハイブリッド液晶の開発に成功したのです。



逆転の発想から生まれた「有機無機ハイブリッド液晶」。現在研究室ではこの成果のもと、新たな展開を追究しています。

液晶性を有する有機無機ハイブリッドデンドリマーを開発

ナノ粒子の精密配列は、超高密度メモリ、光制御材料、メタマテリアルなどの次世代機能性材料開発において必要不可欠な技術です。しかし、ナノ粒子が十数ナノからシングルナノレベルの間隔で精密に配列・集積し、超格子構造を形成するという事は、ボトムアップ・トップダウンアプローチ双方が困難とするはざまの領域でした。

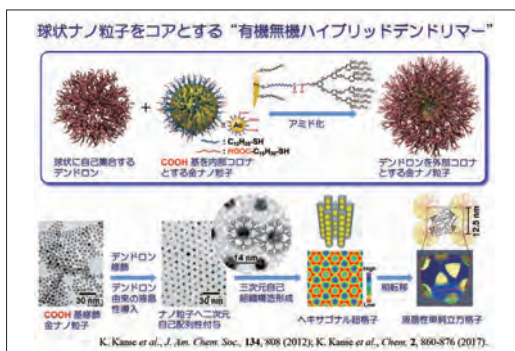
そこで、蟹江研究室が目にしたのが、有機分子によってナノ粒子に自己組織性・自

己集積能を付与すること。「どのようにしたら、有機分子の自己組織性をナノ粒子に付与することができるか？我々の研究室では、球状金ナノ粒子表面に自己組織性有機デンドロン分子を精密化学修飾することにより、デンドロンの自己組織性を金ナノ粒子に転写することを目指しました。」

蟹江研究室が新たに開発したものは、COOH(カルボキシル)基を有する球状金ナノ粒子表面に-NH₂(アミノ)基を有する樹状高分子である液晶性有機デンドロン分子を共有結合させるといもの。デンドロンのソフトマテリアルとしての特性をナノ粒子に付与することで、ナノ粒子の規則配列構造を熱的に制御できるようになっています。これが新たに開発された「液晶性有機無機ハイブリッドデンドリマー」です。

「粒子表面に存在するデンドロン修飾チオールは、ナノ粒子界面でダイナミックに振る舞うことが分かってきました。例えばCdS量子ドットをコアとする場合は、量子ドット界面に存在するチオール配位子の動的な再配列性に基づきハイブリッドデンドリマーの構造が球状から卵状へと変化します」。

その結果、コアに存在する量子ドットの発光-消光がダイナミックかつ可逆的に制御されます。これは、ナノ粒子界面での修飾有機分子の自己配列構造の制御によりナノ粒子固有の特性が制御された世界で初めての現象です。「すなわち、ヘテロ界面の動的制御は、今後の新規機能創製の一つの切り口となり得ることを示しています」。



カルボキシル基を有する球状金ナノ粒子表面に液晶性有機デンドロン分子を共有結合させると、二次元・三次元と自己組織していきます。デンドロンのソフトマテリアルとしての特性をナノ粒子に付与できたこととなります。



蟹江研究室では、独自に開発した精密なヘテロ界面の動的制御により、サイズ・形態制御疑似ポリマー粒子の合成やイオン液体中で磁場配向性を有するリオトロピック液晶などの新規機能材料の創出を実現しています。

ナノ粒子精密合成で 産業技術の高度化に貢献

ミストデポジション法

どのような分野で応用できるのか？

蟹江研究室では、ナノ粒子の制御により、様々な分野の産業技術の高度化に貢献してきました。そのひとつが、プリントドエレクトロニクス。印刷技術に応用し、さまざまな機能性インクを用いてフィルム上に電極などの機能を形成するというもので、医療用電極・センサー、回路基板、ヒーター、アンテナなどに用いられています。

従来、インクを調製する際には分散安定剤の添加が必要不可欠でした。これに対し、蟹江研究室が液相法で新たに開

発したのがインジウムスズ酸化物 (ITO)。「ITOナノ粒子表面へ突起形状態を付与し、親水性界面をより多く露出させることにより水分散性を劇的に向上させ、分散剤レスの条件で水に長期安定分散する ITOナノ粒子を開発しました」。

ナノ粒子表面には親水性界面が存在することから、分散剤レスで安定なインクとなる点も特長であり、従来の多くの問題を一気に克服しました。

そして、この知見をもとに民間企業との共同研究も推進。例えば(株)ニコンとの共同研究では、ITOナノ粒子の水分散液

を“霧”状にし、常温常圧条件で実用的ITOフレキシブルフィルムとする「ミストデポジション法」を開発。「この手法では、ナノ粒子を含む“霧”を用い、常温・常圧下の環境に優しい条件で、基板上にナノ粒子を緻密に堆積させることが可能です。ITOナノ粒子の水分散液を用い、透明導電性薄膜を製造したところ、常圧下、低温熱処理(150℃)の条件で、実用的なフレキシブルフィルムが得られました」。

この製造法は、従来のスパッタ法やインク塗布法に比べ、はるかに低環境負荷であり、カーボンニュートラルに大きく貢献することが期待されています。

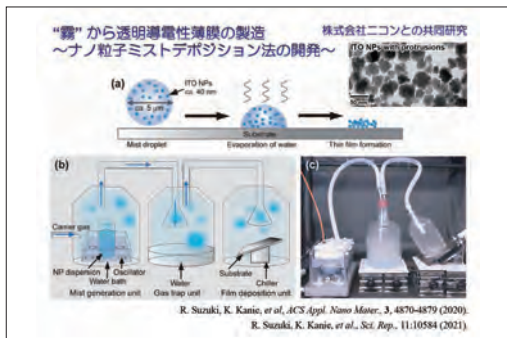
次世代パワーデバイス接合は銅の時代へ

現在世界中で、プリントドエレクトロニクスと既存のIC製造技術を組み合わせた領域の研究開発が進んでいます。「フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス」。有機半導体を活用して、曲がるフィルム上に回路基板を構成する技術などは日本でも進んでおり、今後の半導体産業の一翼を担うと考えられています。

「この領域でブレイクスルーしなくていけない課題が、新たな金属ペーストを用いた金属配線手法の開発。金属ナノペーストとしては従来、銀ナノペーストが用いられてきましたが、コストの面から、銅ナノペーストを用いた配線手法開発が強く求められています。しかし、従来の銅ナノ粒子調製法では凝集抑制と酸化防止のために高分子類を使用するため銅粒子表面に有機物が残存してしまい、低温焼結を阻害していました」と話す蟹江教授。



共同研究によって生み出されたプリントドエレクトロニクスで活用できる新たな ITOナノ粒子の創製技術。蟹江研究室の独自のナノ粒子の制御が様々な産業領域の高度化に貢献しています。



ITOナノ粒子の水分散液の霧から透明導電性薄膜を製造。常圧下、低温熱処理(150℃)の条件で、実用的なフレキシブルフィルムが得られました。

学生にも知られてますが、近所を愛犬散歩しています

休日の夕方は、だいたい犬の散歩。飼いはじめのきっかけはさておき、週末の散歩とお風呂は私が担当です。大学の近くを散歩するので学生にもばれて、「先生、見ましたよ」って言われて、ちょっと恥ずかしいですね。小さいころ、とてもかわいがっていた手乗りのセキセイインコに死なれてとても悲しい想いをして、それ以来ペットは飼わないことにしていたんですが…。ふと気がつくと、愛犬も12歳。人間の年齢に換算すれば私よりオジサンです。そのせいか、最近ではだいがヨボヨボですが、まあ、でも私だけに忠義を示すので、かわいいです。出張で家を空ける際にはすぐに気がついて、気が狂ったように、「行かないで〜」と暴れます(苦笑)。



ITOナノ粒子

ITO薄膜は可視光領域における透明性をもちつつ電気伝導性を合わせて持つ材料であり、ディスプレイ、太陽電池などの電極素材として広く用いられています。本粒子はITOをナノサイズ化した粒子であり、インクを用いることで高価な真空設備を用いずにITO薄膜の形成が可能になります。透明電極、熱線反射など、一般的なITO薄膜と同じような使用方法が可能です。

ミストデポジション法

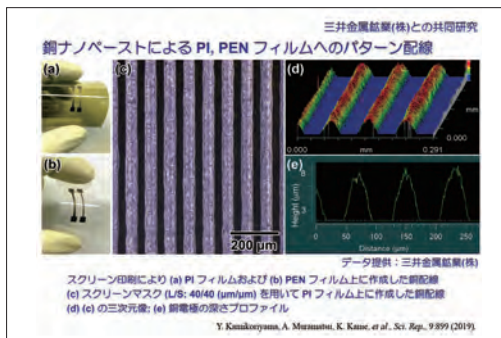
溶液に特定範囲の周波数を印加させることで数μm以下のミストを生成し、これらを原料とする気液混合の成膜方法です。生成したミストは気体によって基材まで搬送されるため、気体の流路設計により様々な形状への塗布成膜が可能です。また、ミストの生成量と搬送気体の流量を精密に制御することで、Roll to Roll方式に代表される連続成膜工程への安定した原料供給も可能です。

プリンテッドエレクトロニクス

電子デバイスの回路配線や絶縁膜等を印刷技術によって作製する技術です。必要な箇所に必要な量だけ金属粒子又は金属酸化物粒子を含むペースト(インク)を印刷し、加熱や紫外線等で硬化させ導体・絶縁体等を形成するため、環境に優しい製造技術と認識されています。

次世代パワーデバイス(パワー半導体)

パワー半導体は、交流を直流に変換したり電圧を昇圧・降圧したりし電力を制御するデバイスです。現在は半導体のシリコン(Si)が使われていますが、次世代パワーデバイスではシリコンカーバイド(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を使用することで、電力損失を大幅に削減できると期待されています。



銅ナノペーストによるPEN(ポリエチレンナフタレート)フィルムやPI(ポリアイミド)フィルム上へのパターン配線。開発した銅ナノ粒子から調製した銅ナノペーストは、プリンテッドエレクトロニクスによる回路形成や次世代パワーデバイスの接合材料として用いられている銀ペーストに置き換わる材料となることが期待できます。

感度・高選択性の分子型センサーとして機能しています。このようなマイクロメートルサイズの高機能セン

サーを人工的に合成できたら、優れた機能をもつバイオ素子としても応用範囲が広がるはずだ。

リン脂質はこれまでも注目されてきましたが、リン脂質自身に機能を付与しようという試みは例を見なかったと言います。これに対し、蟹江研究室では、フッ素系・アゾベンゼン液晶性部位を導入したリン脂質誘導体を合成。その結果、外場応答性リोटロピック液晶・ジャイアントリボソーム(脂質二重層を持つ球形の小胞)となることを見出しました。これらは1分子内に正電荷と負電荷の両方を持つツビッターイオン型であることから、ナノ粒子界面との相互作用による生体親和性材料への発展が期待できると言います。現在、細胞分裂のモデルや光駆動物質移動材料としてもさまざまな共同研究に発展しています。

「ずっとモノづくりにこだわって研究をしてきました。ここで面白いモノを作れば世の中を変えられるのではと思っています。ナノ粒子、裾野が広いです。さらにナノ粒子の創製が、新しい産業技術を生み出していければと思っています」。



独自に創製した有機無機ハイブリッド材料は、刺激応答性や相反機能性を示すソフトマテリアルを生み出します。蟹江研究室では、従来の有機化学・無機化学などの枠を越えた分野横断的な新学術の創成を強力に推進しています。

フッ素系・アゾベンゼン液晶性部位を導入した光応答性人工リン脂質。電場や光応答性を持つリोटロピック液晶となることが分かりました。

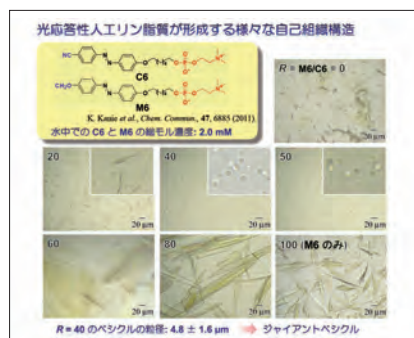
この課題に対して三井金属鉱業(株)が蟹江研究室との共同研究により出した答えが液相法により銅ナノ粒子のヘテロ界面および結晶子サイズの精密制御。この手法により耐酸化性と低温焼結性を実現しました。「新たに開発した合成プロセスは、水中、大気下、室温という極めて低環境負荷の条件において、低温焼結性を有する銅ナノ粒子の調製が可能です」。

今回開発した銅ナノ粒子をペースト化することで、180°C程度の低温焼成でPEN(ポリエチレンナフタレート)フィルムやPI(ポリアイミド)フィルム上への銅粒子間が焼結した良好な厚膜銅配線形成が可能となりました。「フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス」に提示された新たな解。IoTセンサーの回路形成材料などとして銀ペーストやハンダ代替が期待できると言います。

ナノ粒子の創製から
予想を超えた新しい領域へ

蟹江研究室が進めるナノ粒子界面の自在な制御技術が、さらに広い研究分野のブレークスルーを生み出そうとしています。そのひとつが、ナノ粒子と生体材料との融合を目指した研究です。

「細胞や細胞内小器官の膜は、リン脂質膜とタンパク質とで構成されていて、高





FOREFRONT REVIEW

「若手が活躍できる研究室」をモットーに掲げる西原洋知研究室では、燃料電池やヒートポンプ、新規エネルギーデバイス、機能性吸着剤、ヘルスケアなど幅広い分野に応用できるような新しいカーボン系構造体や複合材料の調製を行っています。有機合成や化学気相蒸着の手法を取り入れることで有機結晶のように構造を規定できる金属カーボン構造体や、電池の性能を高めるグラフェン多孔体の開発を進めています。



次世代電池の未来を切り拓く 新規カーボン材料

私たちがよく耳にするカーボン素材は、タイヤや工業用のゴム製品、乾電池など日常のさまざまな場面で使われています。その種類や性質は多岐にわたり、数多くの研究者によって研究されてきました。2010年には、炭素原子がシート状に結合した「グラフェン」に関する先駆的な実験により2人の科学者がノーベル物理学賞を受賞し、関連する研究が現在も盛んに行われています。

西原教授もまた、日常生活に役立つ材料として無限の可能性を秘めたカーボン材料に魅了された研究者の一人。多元物質科学研究所の助手として配属された2005年から有機結晶のように構造を制御できるカーボン素材の研究を続けてきました。「ノーベル物理学賞をきっかけに、私もこのグラフェンを使って何か革新的な材料をつくることはできないか、と考えるようになりました」と当時を振り返る西原教授。そこから、自動車に使われている燃料電池を長持ちさせられるカーボン素材の研究が本格的にスタートします。

西原教授の研究を後押しするきっかけとなったのは、2013年、科学技術振興機構が実施している研究プログラム「さきがけ」に採択されたことでした。「さきがけ」は、独創性があり国際的に高い水準の発展が見込まれる先駆的な基礎研究を行い、その成果を社会に還元することを目的としたプログラムです。世界的に活躍している科学者の方々に直接レクチャーしていただく貴重な機会となり、とても刺激を受けました」。若手時代にこうした経験を積んだことで研究のモチベーションにつながることを実感した西原教授は、自身の研究室の若手教員たちにもものびのびと研究を進めてほしいと考え、「若手が活躍できる研究室」をモットーに掲げるようになったと言います。

グラフェンシートを手掛かりに0から研究を積み重ね、2016年には開発した「グラフェンメソスポンジ」で特許を取得。現在は10以上の企業にサンプルを配布して性能評価を行うと同時に、ベンチャー企業を立ち上げ生産体制の強化を目指しています。

東北大学材料科学高等研究所 教授
多元物質科学研究所
マテリアル・計測ハイブリッド研究センター
ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野 教授

西原 洋知

NISHIHARA, Hirotomo

1978年生まれ。長野県出身。2000年京都大学工学部工業化学科卒業。2005年同工学研究科化学工学専攻博士後期課程修了。2005年東北大学多元物質科学研究所助手、2007年同助教、2011年同准教授、2013年JSTさきがけ研究員(兼任)、2020年東北大学多元物質科学研究所教授(兼任)、同材料科学高等研究所教授。

所属団体/日本吸着学会 評議員・運営委員、炭素材料学会 副編集委員長、酸化グラフェン研究会 運営委員。受賞/ゴットフリート・ワグネル賞2019、2020新化学技術研究奨励賞ステップアップ賞、第17回日本学術振興会賞、リアルテックファンド賞、ディープテックグランプリ2021最優秀賞など

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/nishihara/html/index.html>

導電性・耐食性・多孔性を併せ持った新素材を開発

燃料電池の弱点を克服する新素材への挑戦

グラフェンシートを使ったカーボン材料の開発のきっかけは、長年、日産自動車株式会社で開発に携わってきた伊藤仁氏からの提案でした。「自動車に搭載されている燃料電池には主にプラチナとカーボンブラックが使用されています。どちらも発電に欠かせない素材で、重量比はおおよそ50%ずつ。しかしカーボンブラックは劣化しやすいため長持ちせず、プラチナも無駄になってしまうという問題がありました。そこでプラチナの使用量を抑えるため、「長持ちするカーボン」を作ろうということになったのです」。

2nmという非常に小さなプラチナ粒子はカーボンの細孔に嵌る形で結合するため、耐久性(耐食性)に加え活性炭のような多孔性も兼ね備えている必要がありました。しかし従来のカーボン素材は細孔を増やすと耐食性が下がるというトレードオフの関係にあり、両立が難しかったと言います。耐食性が高いカーボン素材といえば黒鉛が挙げられますが、こちらは逆

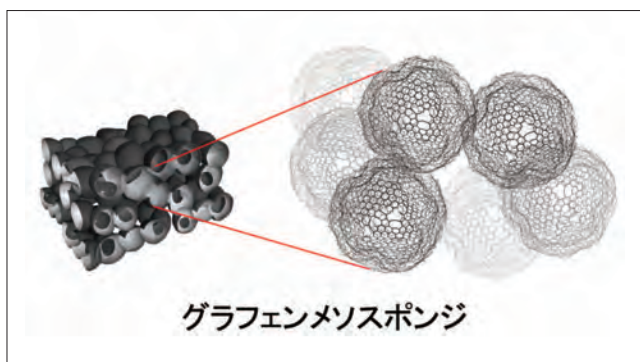
に細孔がなくプラチナを固定させることができません。活性炭と黒鉛のいいとこ取りをした新素材が求められていました。

ナノバブル状の3次元構造を持つ「グラフェンメソスポンジ」

「プラチナの粒子が入るような細孔を持つ泡状のグラフェンを作ることができれば、活性炭と黒鉛の性質を併せ持つカーボン素材を作ることができるのではないかと思った」と語る西原教授は、1年日にして合成に成功したこの材料を「グラフェンメソスポンジ」と名付け、2016年に特許を取得しました。「合成するためにはまず、

炭素原子1個分の厚さしかないグラフェンシートを3次元に組み立てる必要がありました。そこで酸化マグネシウムやアルミナナノ粒子などの鋳型をグラフェンシートでコーティングするような高度な技術を開発。積層数や格子欠陥の量、細孔径、官能基、異元素ドーブなど、応用用途に応じたカスタマイズも可能です」。

「つくる技術」だけでなく、合成した素材がきちんと機能するかどうかなどを「分析する技術」も非常に重要です。「グラフェンシートには必ず端があり、炭素原子が水素や酸素などの不純物と結び付いています。それがカーボン素材が劣化し



グラフェンメソスポンジの模型。細孔サイズは約5.8nmですが、スポンジのように柔らかく、0.7nm以下にまで可逆的に変形させることができます。

週末のルーティンは、家族と一緒に日帰り温泉

家族3人で温泉に出かけることが多いです。今は新型コロナウイルス感染症の流行で県外には出かけられませんが、それまでは毎週、週末になると近隣の温泉に足を運んでいました。

特に好きな温泉は山形の蔵王温泉です。pH2という酸性泉なので化学を学んだことのある方には「え、大丈夫なの!?!」と驚かれるかもしれませんが、殺菌作用があり傷を治す効果があると言われています。宮城県内だと遠刈田温泉(蔵王町)など比較的近場の温泉を選びます。最近気に入っているのは大崎市にある三本木温泉。日帰り入浴できる施設が2軒ほどあるのでおすすめです。露天風呂に入っていると研究のアイデアがふっと浮かぶ瞬間もありますし、ゆっくり湯に浸かって日々の疲れを洗い流す時間はやはり至福ですね。



MY FAVORITE

TERM INFORMATION

グラフェンシート

炭素六角網面から成る炭素原子1個分の厚さのシート状物質。グラフェンとも呼ばれる。グラフェンシートが規則的に積層したものが黒鉛。グラフェンシートの端(エッジ)は水素や酸素官能基で終端されているが、このエッジが劣化の原因サイトとなる。

昇温脱離

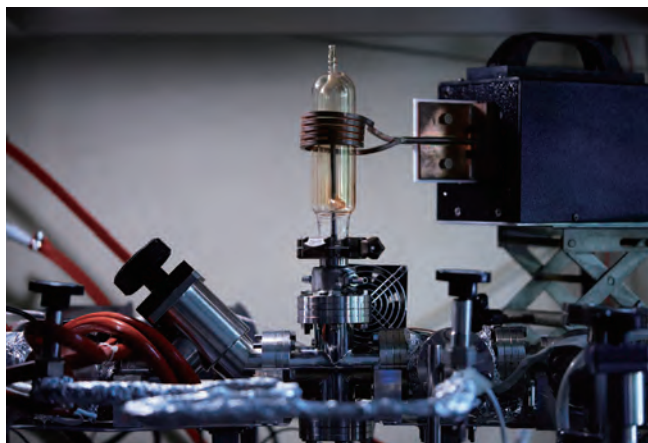
サンプルを一定速度で加熱し、放出されるガスを連続的に分析する方法のこと。触媒の分野で広く使われる手法。従来の昇温脱離は上限温度が1000℃程度であったが、京谷教授らは上限温度を1800℃に引き上げ、さらに感度を従来より大幅に向上させたシステムを構築、これによりカーボン材料のエッジサイトに微量存在する水素と酸素をppmレベルで定量分析できるようになった。

電池用カーボン

カーボン材料は導電性があり、軽量で、耐食性があり、イオンを蓄える性質があるため、あらゆる電池の内部に使用されている。電池の種類に応じて、黒鉛、カーボンブラック、活性炭、炭素繊維といった異なる性質のカーボン材料が使い分けられているが、これら従来の電池用カーボン材料には得手不得手があり、特に耐久性と多孔性を両立したカーボン材料は合成が困難であった。

次世代電池

リチウム硫黄電池、全固体リチウムイオン電池、多価カチオン電池、リチウム空気電池などの開発が進んでいる。これら次世代電池にもカーボン材料は必ず使用され、なおかつカーボン材料の性能がこれら次世代電池の性能を左右する。



ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野の前任・京谷隆教授が開発した昇温脱離分析システムを利用し、極微量の酸素・水素原子の定量分析を行っています。これによりグラフェンメソスポンジが泡状であることが証明されました。

やすい原因ですが、泡状にすることで端をなくすことができます。しかし端がないことを証明するためにはppmレベルで定量分析する必要があります。従来の元素分析では0.1%程度の精度しかなく、分析は不可能とされてきましたが、西原教授の研究室では感度を1000倍にまで高めた分析システムを開発。「前任の京谷隆教授がつくったシステムで、グラフェンメソスポンジに不純物が含まれていないことを証明できる、世界で唯一のシステムです。今はこのシステムの精度をさらに上げ、窒素やホウ素など他原子も分析できるような研究を同時に進めています」。

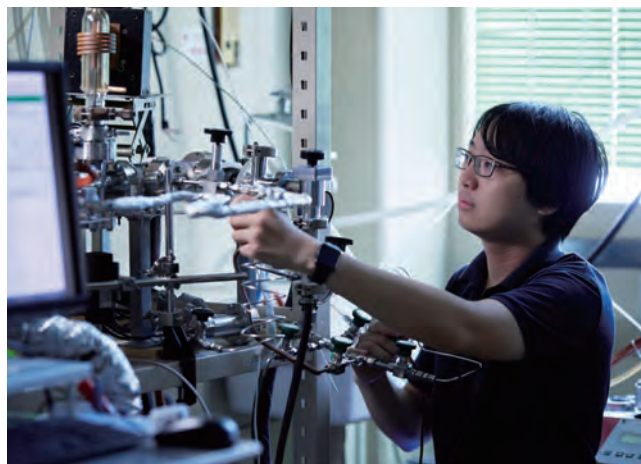
次世代電池開発の鍵を握るのは“柔軟性”を持つ電池用カーボン

リチウムイオン電池やキャパシタ、燃料電池など、種類や用途によって電池用カーボンは使い分けられています。例えば、導電性と耐食性に優れた黒鉛は多孔性がまったくないため、リチウムイオン電

池の負極材料として主に用いられます。活性炭は細孔が多くイオンが吸着しやすいためキャパシタの電極として使われていますが、劣化しやすいという問題を抱えています。カーボンブラックはカーボン素材の中でも導電性・耐食性・多孔性のバランスがよく、燃料電池の白金担体として使われてきました。西原教授によれば、「電池に必要なこれらの三大要素に加え、グラフェンメソスポンジは柔軟性を持つ」という点でも特徴的だと言います。「カーボン以外の電池材料には、充電時に膨張し、放電時に収縮する物質が数多く含まれています。スポンジのように柔軟に形を変えることができるということは、他の物質の動きに追従しやすいということ。繰り返し充放電を行える素材として、次世代電池の開発も加速しています。電気自動車の走行距離を伸ばすことも可能になるでしょう」。



1800度まで熱することで試料から発生した微量のガスを分析します。分析の精度としては世界最高レベルの水準を誇ります。



世界初の製造技術で サステイナブル社会を実現

「グラフェンらしさ」の指標は 比表面積の大きさ

炭素原子が網目のように結び付いた単層グラフェンは、2004年に初めて黒鉛のかたまりから分離することに成功した物質です。その厚さは0.34nmと極めて薄く、他のカーボン系材料と比べて導電性・柔軟性・耐久性の面で非常に優れているため、アメリカやイギリス、カナダなど多くの

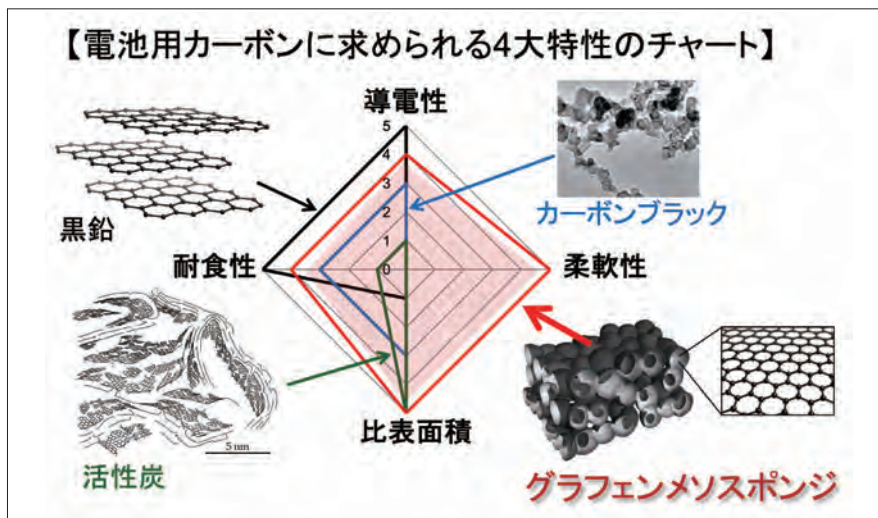
国でベンチャー企業が立ち上げられ、グラフェン系材料が製造されています。近年は3次元的な構造を持つ多孔体に関する研究も多く、吸着や触媒、電池などのエネルギー分野で応用する検討が活発に行われています。

「グラフェン多孔体」や「3次元グラフェン」といった名称で開発されるこれらのグラフェン系材料ですが、大部分は積層、

もしくは50nm以上のマクロ孔が主体となっており、西原教授は「本来のグラフェンらしさを引き出せていない」と話します。「グラフェンらしさの指標に“比表面積”、つまり多孔性が挙げられます。黒鉛が10m²/gだとしたら、そこから作られるグラフェンシートの比表面積はおよそ2630m²/g。しかし大量生産しようとするシートが再積層してしまうため多くても800m²/g程度にしかならず、幅広い分野で実用できるとは言えませんでした」。

粉末状で製造できる 世界初のグラフェン製造技術

西原教授が開発に成功したグラフェンメソスポンジは、世界各国で作られるこれらのグラフェン系材料に対し約2000m²/gの比表面積を有しています。その理由は、「泡状にすることで製造時も積み重なることがないため、グラフェンが持つ本来の比表面積を維持することができるから」だと言います。「粉末で量産できる世界初の“グラフェンらしい”材料といえるでしょう。これにより、期待されていた電池用カーボ



電池用カーボンには導電性・耐食性・比表面積が求められてきましたが、グラフェンメソスポンジの登場により新たに「柔軟性」が加わり、次世代電池開発の要となることが期待されています。

友人直伝のパエリアは家族にも好評です

以前、同じ研究室に所属していたスペインの研究者に本場のパエリアを作ってもらったことがあり、それがとても美味しかったため作り方を教わり、自分でも作るようになりました。今はスーパーで「パエリアの素」を買うことができるので、手軽に作るができるのがありがたいですね。もともと料理はあまりしない方だったのですが、今でも1か月に1回は作って家族に振る舞っています。「おいしい」と言ってもらえるのがうれしいです。

ほかにも週末は家族で出かけたり庭仕事をしたり、研究から離れて家族と一緒に過ごす時間を大切にしています。



OFF TIME



空気を使ったリチウムイオン電池の性能実験。研究室では実際に電池を作製し、耐久性やキャパシティを調査します。



TERM INFORMATION

グラフェン系材料

近年、「グラフェン」という商品名で販売されている材料においてはグラフェンシートが積層しており、1枚のグラフェンシートが積層をせずに存在している粉末状の材料は存在しない。本来「グラフェン」は積層していない1枚のシートの名称であるが、積層している材料もグラフェンと呼称されているため、世界的に混乱が生じている。

比表面積

物質の表面積(m²)を物質の重量(g)で割った値(m²/g)のこと。無限に広い1枚のグラフェンの表と裏の面積をグラフェンの重量で割った値がグラフェンの理論比表面積であり、2627m²/gとなる。グラフェンが2枚積層すると比表面積は1/2、n枚積層すると比表面積は1/nに低下する。したがって、あるグラフェン系材料の比表面積をS[m²/g]とすれば、2627/Sがその材料の平均グラフェン積層数となる。「グラフェン」という商品名で市販されている材料の比表面積は、高々800m²/g程度。すなわち、平均すると3層以上積層している。

単層グラフェンナノ多孔体

平均積層数2未満のグラフェンで構成される、50nm以下のナノ細孔を持つ多孔体のこと。比表面積は1314m²/g以上あり、吸着特性に優れる。また、積層の殆ど無いグラフェン壁は柔軟であるため、単層グラフェンナノ多孔体は応力にตอบสนองして可逆的に変形することができる。

潜熱

固体、液体、気体と物質の相が変化する時に、物質から出入りする熱のこと。液体が気体に変化する時の潜熱は「気化熱」として知られており、周囲から熱が奪われ温度が低下する。ナノ細孔内部には気体分子が液体密度で自然に凝縮される「吸着」という現象が生じる。吸着は気液相転移に近い現象であり、吸着した液密度の物質が脱着(再び気体となること)する際には、潜熱により周囲の温度が低下する。柔軟な単層グラフェンナノ多孔体を利用すると、応力でこの吸着・脱着を行うことができる。物質に力を加えると脱着が生じて温度が低下し、力を加えると脱着が止まると吸着が生じて温度が上昇する。

ンとしてだけでなく、スマートフォンやパソコンなどの半導体機器や浄水・環境浄化、触媒、医薬品などさまざまな分野で応用することが可能になります」。

単層グラフェンナノ多孔体はスポンジのように可逆的に圧縮と復元を繰り返すことのできる材料のため、ナノサイズの細孔内部に取り入れる物質の量を外力によって調節することができます。「例えば、液体を含ませた多孔体を絞ると気体が放出され、潜熱が発生します。これにより冷却・加熱の制御が可能でヒートポンプになるため、水やアルコールを使った環境に優しい新型エアコンの開発につながれないかと研究中です」と、カーボン素材の新しい使い方の提案にも意欲を見せています。

製品寿命を伸ばして環境負荷を抑える

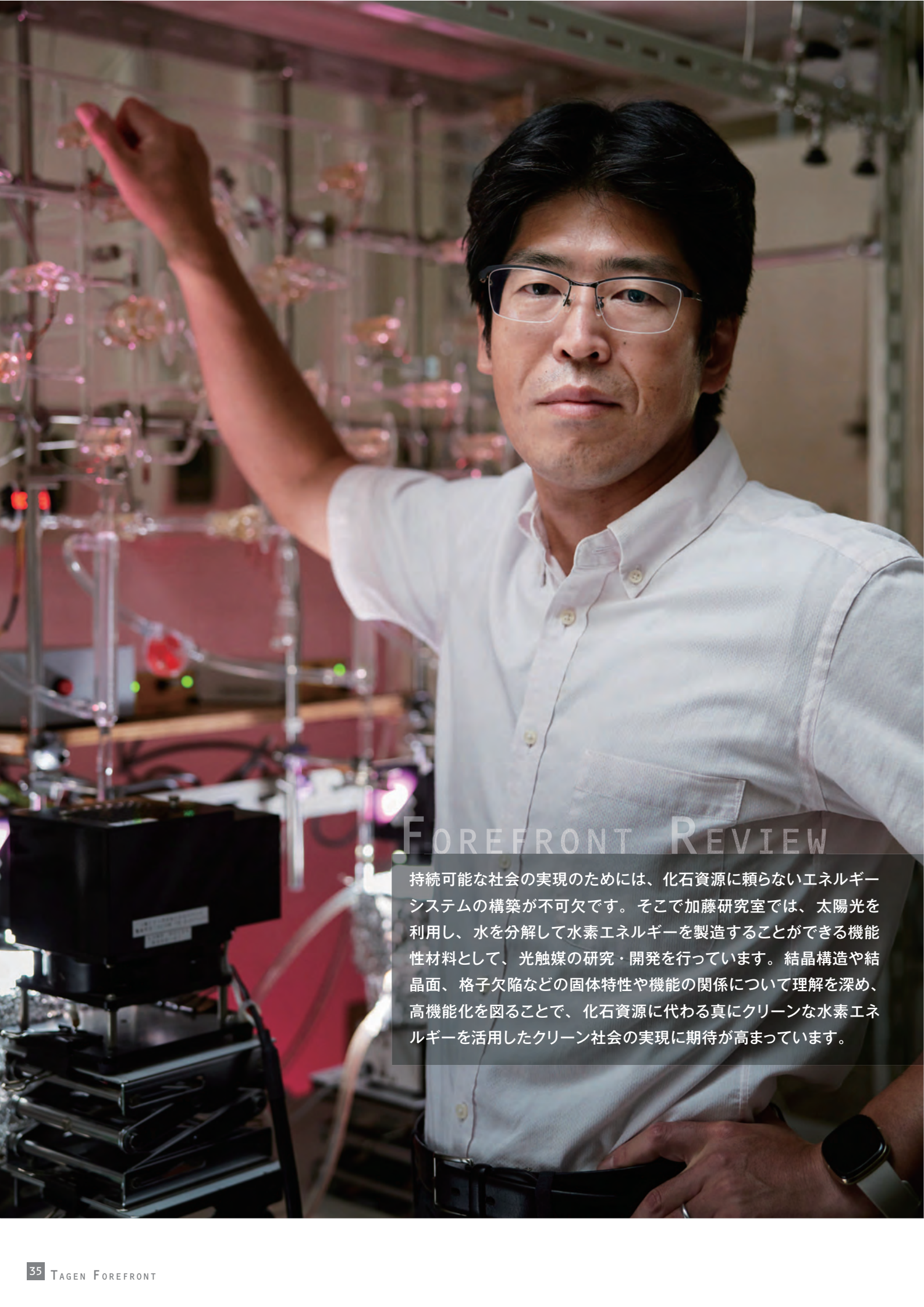
「サステナブルな社会の実現を目指す上で重要なのは、つくったものをリサイクルするだけでなく、長持ちさせること」にあると考える西原教授は、耐久性の高

いグラフェンメソスポンジがその一助になることを見据えています。「グラフェンメソスポンジによって電気自動車やスマートフォンなどの製品寿命を伸ばすことができれば、製造・リサイクル時に投入するエネルギーを軽減することができます。エネルギーを減らすということは環境負荷がかからなくなるということ。だからこそ、真にサステナブルの社会を実現できる可能性を秘めているのです」。

また、グラフェンメソスポンジは不純物を含まないため他のカーボン材料と比べて燃えにくい性質を持っています。使用済み電池から分離させやすく、簡単にリサイクルできるという点で、まさにエコな素材と言えるでしょう。「既に10社以上の企業にグラフェンメソスポンジのサンプルを出荷し、用途の開拓を行っています。2021年3月には東北大学ビジネス・インキュベーション・プログラムに採択されました。今後は東北大学発のベンチャー企業を立ち上げてグラフェンメソスポンジの生産体制を強化し、新用途の開拓を進めていきたいと考えています」。



アルミナナノ粒子や酸化マグネシウム粒子を鋳型としてグラフェンを成長させ、試用した鋳型は酸を使って取り除きます。最後に1800℃の高温で熱処理することでグラフェンメソスポンジを製造します。



FOREFRONT REVIEW

持続可能な社会の実現のためには、化石資源に頼らないエネルギーシステムの構築が不可欠です。そこで加藤研究室では、太陽光を利用し、水を分解して水素エネルギーを製造することができる機能性材料として、光触媒の研究・開発を行っています。結晶構造や結晶面、格子欠陥などの固体特性や機能の関係について理解を深め、高機能化を図ることで、化石資源に代わる真にクリーンな水素エネルギーを活用したクリーン社会の実現に期待が高まっています。



社会のエネルギーシステムを変える “人工光合成”への挑戦

1970年代に世界中を襲った「オイルショック」の波は、エネルギーの大半を化石資源に頼り切っていた人々にその有限性を突きつけ、新エネルギーの研究・開発を急速に推し進めるきっかけの一つとなりました。その際に注目されたのが、同時期に日本で発明された「光触媒」による水分解とそこで生成される水素でした。しかし水分解によって高効率に水素を生成できる光触媒の開発は非常に難しく、オイルショックの影響が落ち着いて以降、水分解光触媒の研究は日本国内で細々と続けられる程度となりました。

そんな中、かねてよりエネルギー問題に関心のあった加藤教授は東京理科大学在学中に高効率な光触媒を開発。光触媒では効率的な水分解ができない、という従来の定説を覆しました。「研究を始めた頃は光触媒の種類が少なく、水分解もなかなかできませんでした。どの物質に活性があるのかも分からないため、学生時代は物質探索が主な仕事でした」と話す加藤教授ですが、このときの成功体験が研究のモチベーションにつながっていると言います。

近年では「カーボンフリー」や「カーボンニュートラル」を合言葉に二酸化炭素の排出量0をめざした取り組みが世界でも注目されていますが、石油や石炭、天然ガスなどの化石資源がエネルギーの大半を占める状況は変わっていません。水と太陽光という自然エネルギーを活用して水素を生成することができるようになれば、化石資源に代わる真にクリーンなエネルギーとして利用することができ、社会のエネルギーシステムそのものが変わることになります。そのため加藤教授は、さらに高効率で駆動する光触媒の構築のために「新規合成法の開拓」、「形態・露出結晶面の制御による高効率化」、新規光触媒を指向した「バンドエンジニアリング」をキーワードとして研究を進め、太陽光水素製造の実用化を目指しています。

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
物質変換無機材料研究分野 教授

加藤 英樹

KATO, Hideki

1975年茨城県生まれ。1997年東京理科大学理学部化学科卒業、2000年日本学術振興会特別研究員(DC2)、2002年同理学研究科化学専攻博士課程修了、日本学術振興会特別研究員(PD)、2004年東京理科大学理学部応用化学科助手、2007年東京工業大学応用セラミックス研究所特任講師、2009年東北大学多元物質科学研究所講師、2012年同准教授、2020年同教授。

所属団体／触媒学会 東日本地区代議員、カーボン・エネルギーコントロール社会協議会半導体光触媒ネットワーク副代表。

受賞／触媒学会奨励賞など

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

可視光応答性光触媒の開発で 太陽光による水分解も可能に

化石資源に代わる クリーンエネルギー

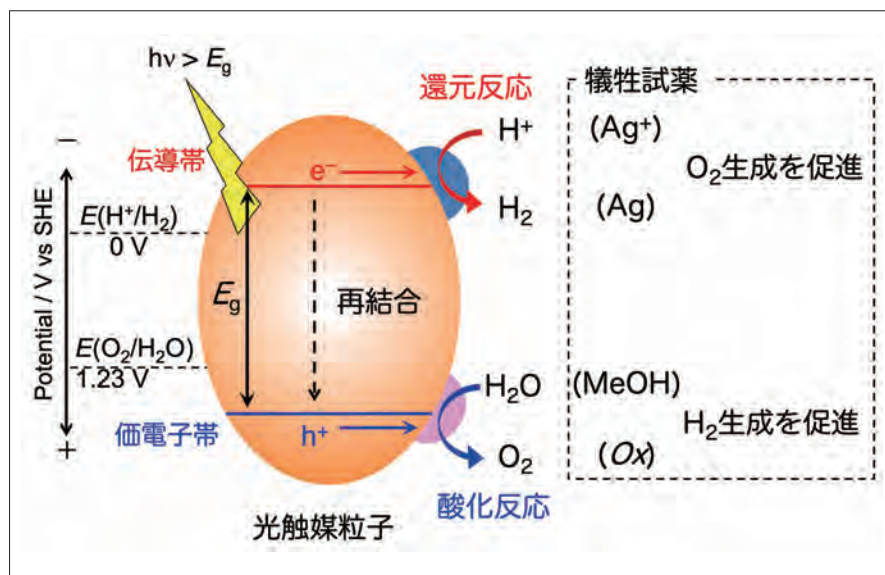
エネルギーの大半を占めている化石資源は、燃料としてだけでなく、プラスチックや衣類の原料になっていたりと、製造業などの現場で活用されていたりと身近な生活の中にあふれています。大規模農業で使用される化学肥料の原料となるアンモニアは窒素と水素から作られており、その水素もまた化石資源から製造されているため、間接的には食べ物も化石資源から作られていると言えるかもしれません。しかし、これらが環境問題やエネルギー問題の発端となっているのも事実。加藤教授はこの問題について、「クリーンエネルギーの代表である“水素”をクリーンな方法、つまり太陽光で生成できるようになることが解決の糸口となる」と強調します。「日本では現在、二酸化炭素の排出量を2050年までに実質0に抑えることを目標に掲げています。二酸化炭素を地中に埋めることで大気への放出量を減らすことも可能ですが、これでは根本的な問題解決にはなりません。化石資源を使わずに

水素を生成する技術の確立が求められており、その基幹技術となるのが光触媒による水分解なのです」。

太陽光を活用して 水を分解する光触媒技術

光触媒は光を吸収してさまざまな化学反応を駆動する機能材料で、金属錯体

系と半導体系に大別されます。半導体光触媒はルチル型酸化チタン(TiO₂)電極により発見されたホンダーフジシマ効果を起源とする“日本発”の科学技術分野で、水素を効率的に生成できる可能性のある技術として研究が進められてきました。例えば、加藤教授が学生時代に高い活性を確認したタンタル酸ナトリウム



光触媒反応の概要。光生成した電子と正孔によって光触媒表面で還元と酸化反応が進行します。

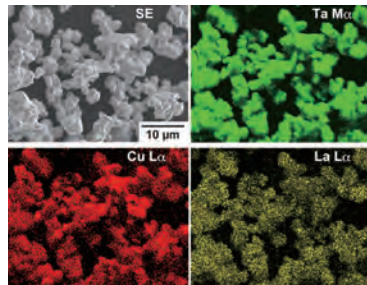
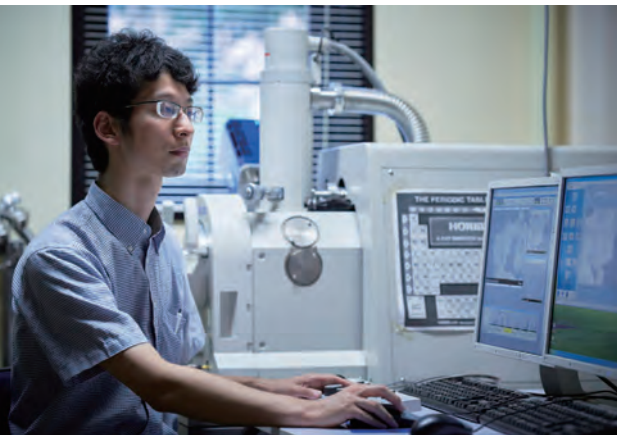
学生時代からの愛車でツーリングへ

大学生の頃からバイクが好きで、学生時代はよくサークルのメンバーと一緒にツーリングに出かけていました。1日で東京から猪苗代湖を経由して新潟まで行って帰ってきたこともあります。そのときの移動距離は約700kmでした。当時愛用していた1995年製バイクは今も手元にあり、整備は欠かしていません。最近は遠出をしないので動かなくなる程度に走っていますが、3年前には那須に出かけました。

バイク自体古いのでいろいろな箇所に不具合がでてきますし、いつ動かなくなるかも分からない状態ですが、買い替えようと思ったことはないですね。「実用できる骨董品」といったところでしょうか。愛着があるのでこれからも大事に乗り続けたいと思っています。

MY FAVORITE





電子顕微鏡を使って酸化物や窒化物などの合成粒子の微細な形状や元素の分布を観察し、ターゲットとなる物質が正しく合成されているかどうかを確認します。

(NaTaO_3)は、粉末を塗ったガラスに紫外線を照射するだけで水を分解し、水素と酸素が発生している様子を観察することができます。「最初は、結晶構造に着目した恩師の工藤昭彦教授の勧めで“ニオブ”を含む物質を合成し、その活性を測定していたのですが、活性が現れることはありませんでした。そこで同じ結晶構造を持つ“タンタル”に着目し、同様の工程で検証したところ、高活性で水分解できることが確認できました」。

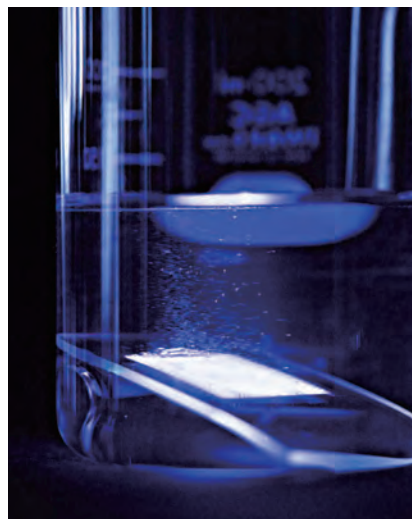
しかし、 NaTaO_3 は紫外光にしか反応しないというデメリットがあるという加藤教授。「紫外光は太陽光のスペクトル分布よりも波長が短いため、太陽光を照射しても NaTaO_3 は活性を示しません。太陽光水素製造を視野に入れた場合、太陽光に含まれる紫外光や可視光でも活性を得られるような長波長応答の光触媒開発が急務となります」。光触媒はさまざまなファクターが複雑に絡まり合っているため、条件が揃わなければ活性を得ることができないという点でも難しさが際立っています。

可視光で駆動する光触媒物質探索の難しさ

光触媒開発の難しさは、「かつては構造や組成が既に知られている物質の機能評価によって光触媒が開発されてきたが、今となっては知られている物質の性

能評価は既にされ尽くしてしまっている」点にもあると言う加藤教授。幸い可視光を吸収・利用できる物質の構成イオン候補は絞られており、現在は非酸化物や低酸化金属イオン含有酸化物など可視光応答性光触媒として有望な材料群をベースに元素置換などによるバンドエンジニアリングを駆使して特性制御や新物質開拓を行い、高性能な光触媒構築を目指して研究を進めています。「元素置換によって合成する物質は、入れ替えるイオンの電荷の和が等しくなるように意識しながら設計します。ベースとなる物質に対し何の元素をどのように入れ替えるかは何パターンも考えられるため、これまでの知見を生かしながら少しずつ検証を積み重ねる必要があります」。

同じ物質でも合成の仕方が異なるだけで活性に変化が現れることもあるため、物質の種類の検討だけでなく合成方法の開拓も重要です。



ガラス板に塗布した光触媒による水分解のデモ。導線や電極を使わずに水を分解して水素と酸素が発生する。

TERM INFORMATION

光触媒

光エネルギーを利用して様々な化学反応を駆動する機能性材料のこと。“触媒”という字が含まれているが、いわゆる触媒とは異なる。広義には葉緑素等の光合成色素や金属錯体も含まれるが、光触媒作用を示す半導体材料のことを指すことが多い。半導体光触媒では、光励起で生成した還元力を有する電子と酸化力を有する正孔がそれぞれ還元反応と酸化反応を引き起こす。

ホンダーフジシマ効果

光励起した半導体電極を用いると、通常の電気分解では水分解が絶対に進行しない小さい電圧でも電気分解が進行する現象のこと。n型半導体を電極に用いると、熱力学的には水の酸化が進行しない電位でも水の酸化が進行する。一方、p型半導体を用いると、熱力学的に水の還元が進行しない電位でも水の還元が進行する。n型半導体では光生成した正孔の強い酸化力を、p型半導体では光生成した電子の還元力を利用する。つまり、光エネルギーのアシストによって小さい電圧での電気分解が可能になる。

太陽光のスペクトル分布

地表に届く太陽光の内、波長が短くエネルギーの高い紫外光が約5%、可視光が約52%、残りが赤外光となっている。300nmよりも波長の短い紫外光は地表には届かない。水分解光触媒で太陽光エネルギーを有効に利用するためには、太陽光に豊富に含まれる可視光の利用が不可欠となっている。

バンドエンジニアリング

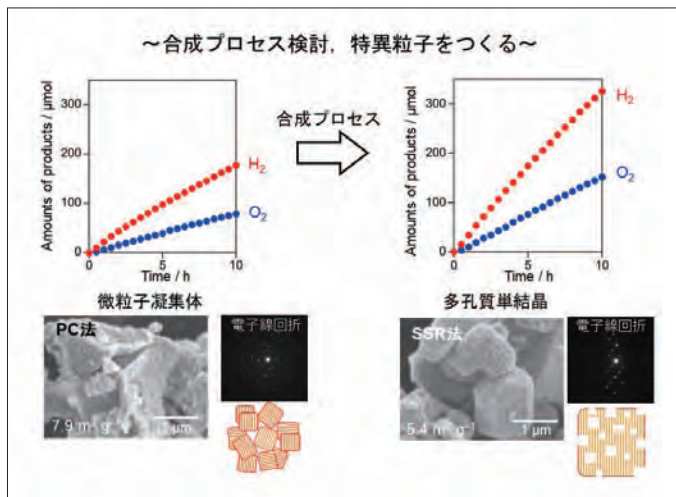
半導体光触媒の特性を変化させるために行う伝導帯および価電子帯の位置の制御のことで、可視光にตอบสนองする光触媒を設計する際に重要な方法である。元素を置換して構成イオンが有する電子軌道の特徴を利用したり、サイズの違う構成イオンが引き起こす結晶構造の変化を利用する。

高効率の“人工光合成”で 太陽光水素製造技術の確立を目指す

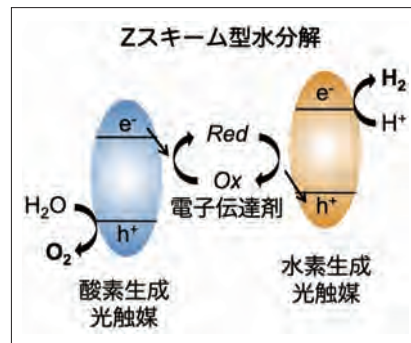
化学反応を促す “助触媒”の重要性

光触媒粒子には電子が詰まった価電子帯と電子が空の伝導帯が「バンドギャップ」と呼ばれる間隙を隔てる形で存在しており、光を吸収することで価電子帯の電子が伝導帯へと励起され、そのとき発生するエネルギーによって酸化・還元反応が行われます。これが光触媒による水分解の原理ですが、これには問題もあると言います。「励起自体は簡

単にできますが、エネルギーが高い状態は不安定なためすぐに再結合して元の状態に戻ろうとします。そうすると活性がなくなってしまうので、再結合を抑制するための仕組みや工夫が必要になります」。そこで重要となってくるのが“助触媒”です。「助触媒は酸素や水素の生成反応を促進する物質で、その微粒子で光触媒を修飾することで活性を増大します」。助触媒を使用することによってもともと不活性な物質でも高活性な水分解が



活性のある物質の合成プロセスを変えることによって、光を照射したときの水素と酸素の発生量が変化。このような合成プロセスが光触媒特性に与える影響についての知見を蓄積して高効率な光触媒の構築を行います。



2種類の光触媒で水素生成と酸素生成を分担するZスキームでも水素分解を実現できます。

できるようになります。水分解光触媒において非常に重要な役割を果たすため、新しい助触媒や修飾法の開発にも取り組んでいます。

植物と同じ“Zスキーム”で 水素生成の効率化を図る

光触媒と似た原理を持つものは、実は自然界にも存在しています。「緑色植物の光合成です。植物は葉が太陽光を吸収し、光励起によって高まったエネルギーで水から電子を奪って酸素を生成(酸化反応)すると同時に、還元反応によって二酸化炭素を糖に変換します。太陽光と水の電子を利用しエネルギー(水素もしくは糖)を得るという共通点があることから、水分解光触媒は“人工光合成”とも言われているんですよ」。

2種類の光触媒に水素生成と酸素生成を分担させ、光励起を二段階で行う反応システムは特に植物の光合成と類似していることから「Zスキーム」と呼ばれ、1種類の光触媒で水分解する単一系とは区別されています。単一系に比べて2倍の

研究室の卓球台で学生たちと全力勝負

オンとオフのメリハリは大事にしているので、学生たちにも「研究には全力で、飲み会などの息抜きではめいっぱい楽しく」と伝えています。リフレッシュする時間を設けるとパフォーマンスも上がりますからね。研究室には卒業生から贈られた卓球台があり、打ち上げなどのイベントのときには皆で卓球します。私自身、中学時代は卓球部だったため当時のラケットを使って学生たちと一緒にプレーします。もちろん手は抜きません。運動は苦手という学生でも少しずつ上達していきます。そういう成長を目の当たりにするのも楽しいです。

研究室での日頃の実験は個人プレーのようなところがあるので、なるべくみんなで交流して楽しめるような環境を整えることも大切だと感じています。





合成した試料を実験に向けて細かくすりつぶします。これは可視光を吸収するため黄色い試料となっています。

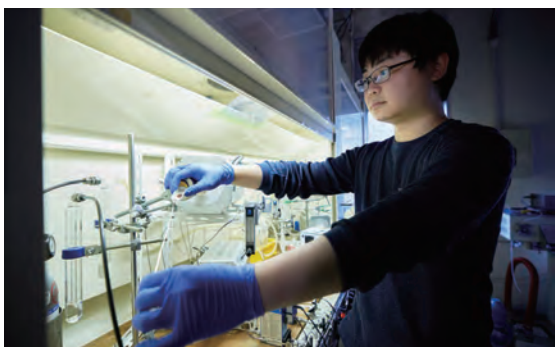
光子を必要とするだけでなく、電子伝達剤が必要となるため反応が複雑化しやすいというデメリットがある一方、単独では水分解できない酸素生成触媒と水素生成触媒を組み合わせることによって水分解が実現できるようになるため、高効率化の一つの手法として検討が進められています。「植物が自然に行っている原理を人工的に再現しているというおもしろさがありますね」と話す加藤教授からは、研究を楽しむ姿勢も伺えます。

エネルギーシステムのあり方に 変革を促す可能性も

世界的に深刻化している地球温暖化やそれに伴う気候変動は、化石資源を

活用することによって生じた二酸化炭素が原因であることは言うまでもありません。「太陽光を使った水分解光触媒の技術で水素をたくさんつくり出せるようになれば、燃料としてだけではなく大気中の二酸化炭素を使って有用化合物を生成できるようになります。経済産業省では、排出された二酸化炭素を回収・貯留するCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)や、回収した二酸化炭素をさまざまな場面で有効利用するCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)という取り組みを推進していますが、光触媒は二酸化炭素の有効利用(Utilization)の一助となる可能性を秘めています」。

光触媒の実用化に至る道筋は、光触媒の種類、合成プロセス、助触媒を少しずつ変えるとといったように幾通りもあり、それらを一つ一つ検証していく必要があります。「地道な作業でも、得られる意義が大きいからこそ長く続けられる」と語る加藤教授は、水分解光触媒の実現によって社会のエネルギーシステムそのものが変わるほど大きな成果につながることを確信しています。



窒化物などを合成する際は雰囲気制御できる焼成炉を使って合成します。

TERM INFORMATION

バンドギャップ

電子が詰まった価電子帯と電子が空の伝導帯の差のこと。光触媒反応に利用できる光の波長はバンドギャップで決まる。バンドギャップが小さい光触媒の方が長波長の光を利用できるが、励起電子と正孔のエネルギーが小さくなり反応性が乏しくなってしまうため適切なバンドポテンシャルを持ち、かつ小さなバンドギャップとなる光触媒が求められる。

助触媒

光触媒反応を促進するために光触媒表面に付ける微粒子のこと。助触媒は反応を促進するための反応場(反応活性点)を光触媒に提供する。また、助触媒によっては光触媒中に光生成した電子または正孔を捕捉する能力を有し、結果として光触媒での電子・正孔の再結合を抑制することで活性向上に相乗効果をもたらすものもある。水分解光触媒では、生成した水素と酸素による水の生成が容易に進行するため、水分解のための助触媒には水の生成を抑制する特性が必要となる。

Zスキーム

2段階の光励起で対象とする酸化還元反応を行う反応システムのこと。天然の光合成がZスキームで水の酸化とNADP+の還元(とそれに続く暗反応で二酸化炭素の還元)を行っている。光触媒でも天然の光合成を模倣して二種類の光触媒を組み合わせることでZスキームを構築することで単独では成し遂げられない反応を進行することができる。原理上、単一系よりも長波長の光にตอบสนองする光触媒を使うことが可能となる。

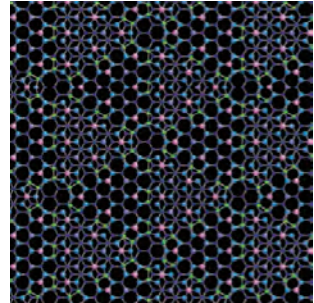
電子伝達剤

2種類の光触媒を使用するZスキームでは、酸素生成を担う光触媒の電子が水素生成を担う光触媒へと運ばれて正孔で消費される必要がある。その電子移動を助けるものが電子伝達剤であり、鉄イオン、コバルト錯体イオン、ヨウ素イオンなど可逆性の酸化還元対が用いられる。電子伝達剤は、光触媒間の電子伝達を助けるだけなので消費されない。



FOREFRONT REVIEW

ナノテクノロジーの基礎となる微小構造では、表面の割合が大きくなるため、表面の理解や制御が欠かせません。表面を舞台にした原子・分子の反応や相互作用は、固体触媒や腐食問題など省エネルギーやグリーンテクノロジーに関わる未来課題に直結するため、表面物性研究の重要性が高まっています。虻川匡司研究室では、固体表面上での物理プロセスを理解し、複雑な原子配列の解明と制御を目指した基礎研究とともに、新しい機能を持った表面の創成など先端的な応用研究にも挑戦しています。



ナノ世界の表面構造を探索し、 表面を舞台にした相互作用の解明に挑む

ある固体物質を目の前に置いたときに、必ず表面が存在します。固体が、気体や真空と接する界面のことを表面と呼びます。表面とは、固体が外部とエネルギーや物質をやりとりする場であり、固体内部(バルク)とは状況が大きく異なります。表面に特有の原子配列の発生や、外からの物質の物理吸着・化学吸着によって新たな反応が起こり、状態が変化しやすい脆い部分でもあります。例えば、金属の錆や腐食もその脆さを示す例です。そうした不安定さから、1945年にノーベル物理学賞を受賞したパウリは「固体は神がつくったが、表面は悪魔がつくった」と語ったと言われます。それほどまでに脆くて複雑な表面ですが、超高真空技術の発展に伴い、実験装置の中で一定時間保つことが可能になり、表面物理学と言われる研究ジャンルを形成するようになりました。

表面科学の重要性が次第に認知され、1979年には日本表面科学会(現在は日本表面真空学会)も設立されました。「なぜ、表面に注目するのかと言えば、物質をどんどん小さくしていくと、重さあたりの表面積がどんどん大きくなります」と虻川匡司教授。「つまり、小さいスケールの単位では、表面の寄与する割合が無視できなくなるほど大きくなるからです」。例えばナノスケールの粒子の研究とは、すなわち表面の研究、とすることができるわけです。

虻川教授は「若い頃に物性物理の中で表面に着目したのは、表面構造の原子配列が非常に美しかったこともあり、新しい原子配列を発見するのが楽しいと感じて、表面を探索していく研究につながった」と話します。

現在では、表面物性に着目すべきもう1つの大きな理由があります。「それはエレクトロニクスやフォトニクスなどナノテクノロジーの根幹を担う素子のほとんどが、異なる素材が界面で接する構造になっている」からだと言います。表面・界面は、固体物質が外界または別の物質と接する場所であり、原子や分子の反応の場、結晶成長の場でもあります。ここで起きる様々な相互作用の解明や制御を目指し、先端的な手法を駆使して挑戦的な研究が続けられています。

国際放射光イノベーション・
スマート研究センター 教授
多元物質科学研究所
計測研究部門
固体表面物性研究分野 教授

虻川 匡司

ABUKAWA, Tadashi

1964年秋田県生まれ。1987年東北大学理学部卒業、1992年東北大学大学院理学系研究科物理学専攻修了、博士(理学)。1992年東北大学科学計測研究所助手、2001年東北大学多元物質科学研究所助教授、2007年同研究所准教授、2019年同研究所教授、2020年東北大学多元物質科学研究所教授(兼任)、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター教授。所属学会/VUV・SX高輝度光源利用者懇談会会長(2020・2021年度)、日本表面真空学会フェロー、日本表面真空学会、日本放射光学会、日本物理学会、応用物理学会
受賞/日本表面科学会論文賞(2000年)

<http://surfphys.tagen.tohoku.ac.jp/>

複雑な表面構造を理解し 先端的な目標課題に挑み続ける



虻川研究室では様々な回折装置などをほぼオリジナルで製作しています。写真は電子回折装置の一部。アルミホイルは超高真空排気時に装置全体を均一に加熱するため。

固体と真空が接する表面 固体と固体が接する界面

一言で“表面”と言っても、身の回りを見渡しただけで様々な表面が存在することがわかります。表面とは「物質が外界に曝されている場所」と言えます。水が外界に曝される場所が水面であり、人間の表面は皮膚となります。かたちのある物の場合、私たちが目で見ているものはその物の表面ですし、私たちが触ってい

るのはやはり表面です。「すなわち物質と外界との界面と捉えることができます。界面、つまりインターフェースです」と虻川教授は説明します。

主に固体が気体と接する境界面のことを表面と言います。また、異なる2つの固体が接する場所は界面と呼びます。「私たちの研究室で研究対象としているのは、固体と真空(気体)の境界面である固体表面と、固体と固体の界面です」。

整った結晶の表面を調べることが 材料表面を理解する近道

表面は、例えば金属の錆のことを思い浮かべるとわかるように、アクティブに反応が起こる場所です。金属は錆びつきませんが、これは外界の酸素が表面の金属原子と化学反応を起こして酸化するためです。「外界から来る物質との反応はほぼ表面から始まります。結晶も、やはり表面から成長が起こります。私たちは、

物理的・化学的性質がよくわかってい
る結晶を超高真空中に準備し、その表面を調べることが、
表面の基本的な性質を理解する近道
であると考えています。結晶には、鉄の
ように金属であるもの、塩のように電気



固体表面の構造を探索する電子回折装置。試料に電子を当て、その反射によって表面構造を解析します。余計な大気分子などを完全に排除した超高真空環境の中で、加熱、スパッタ、真空蒸着などによって目的の表面を作って観測します。



超高真空の数値や、試料温度、電子の反射位置測定など様々なモニタリングを行いながら、電子回折装置で得られたデータを解析して表面構造を探索していきます。

サイエンスの面白さを伝える

それほど頻繁に活動しているわけではないですが、子供たちに身近にあるサイエンスの面白さを伝えることに喜びを感じます。写真は仙台市のNPO法人が毎年主催しているイベントに参加し、子供たちに水をはじく表面の実験を体験してもらっているところです。この他にも真空に関する実験も用意しました。子供たちの驚く顔を見るのが本当に楽しくて今後も続けていきたいと思っています。

また、青葉山キャンパスに建設が進んでいる次世代放射光施設に関しても、一般の方や子供たちにもわかりやすく伝えていきたいと考えています。

MY FAVORITE



TERM INFORMATION

結晶

原子や分子が規則正しく配列した固体である。ルビー、サファイア、ダイヤモンドの結晶は宝飾品として有名である。金、銅、鉄などの金属も結晶であるが、小さな結晶が集まった多結晶体であることが多い。成長条件を整えると大きな単結晶を作成することもできる。シリコンは、ダイヤモンドと同じ結晶構造を持つ。

シリコン

シリコン(Si)は、地球の地殻中では酸素に続いて2番目に多いありふれた元素である。ダイヤモンドと同じ結晶構造を持ち、半導体として現在の情報産業を支える重要な元素である。半導体産業では直径30センチを超える大きな単結晶ロッドが作成され、薄く切り出されたSiウエハー上に多数の集積回路チップが刻まれる。

原子配列

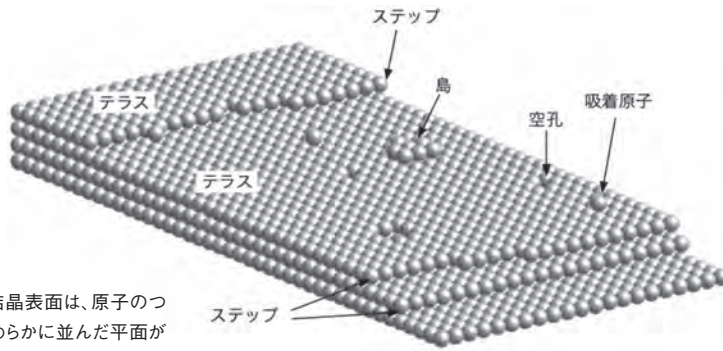
結晶や分子では、原子同士が価電子によって結合し、それぞれの物質に特有の配置で原子が配列している。物質の性質は、価電子の結合に対応した一つ一つの原子の配列が支配している。物性物理学では原子配列を知ることが研究の第一歩である。

触媒

化学反応の際に、それ自身は変化せず、他の物質の反応速度に影響する働きをする物質と定義される。固体表面は、気体や液体に曝されると、その反応を促進させる効果があり、アンモニア合成や自動車排気ガスを無害化する触媒など様々な分野で利用されている。

トランジスタ

不純物を添加したP型半導体、N型半導体を積層し、電気信号の増幅やスイッチングを行う素子。集積回路は、微細な電界効果トランジスタの集合体である。



原子レベルで見た結晶表面は、原子のつづつが単純になめらかに並んだ平面が続いているわけではなく、段差(ステップ)、島、穴など複雑な様相を示しています。

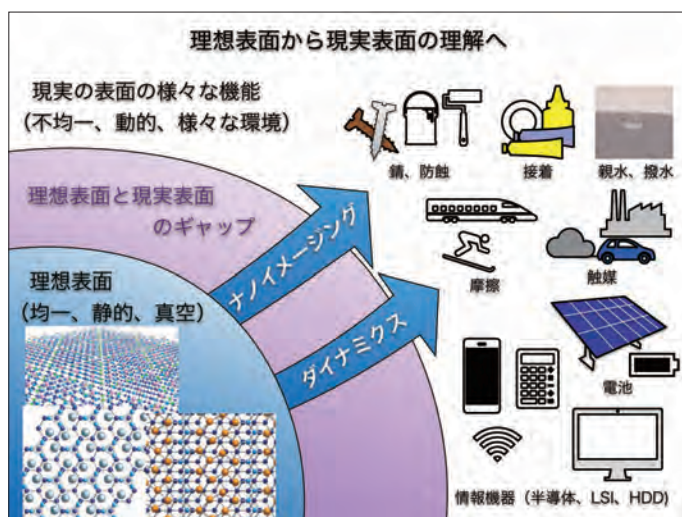
を通さないもの、シリコンのように半導体であるものなどがありますが、いずれも原子が規則的に並んでいます」と、虻川教授は研究アプローチについて話します。

理想表面と実際の表面はどのように違うのか

原子や分子が同じ向きに規則正しく整列した大きな結晶を単結晶と言いますが、仮に原子と原子の間をスパッと切れる魔法のナイフがあったとして、単結晶を仮想的にそのナイフで切ったときに現れる表面を“理想表面”と言います。虻川教授は「仮想的にというのは、実際に切ってしまうと切る前と原子の位置がずれてしまうので、原子の位置を動かさずに切ったとしましょうということです」と解説します。結晶は、結晶表面での原子配列の模式図(上の図)のように、原子の並んだ平面(板)が積み重なったものと考えられます。「表面は原子レベ

ルで見ると滑らかな一枚の板ではなく、ところどころ原子1個分または数個分の段差(ステップ)が存在します。板状に平らになった場所はテラスと呼びます。テラスの上にもところどころ穴(空孔)や原子の島があり、それほど平坦ではありません」と虻川教授。

模式図は非常に単純な例であり、結晶の種類や結晶をどの向きで切るかによっても異なった表面が生じると言います。「非常に単純なはずの結晶の表面でも、相当複雑であり、調べなければいけないことはたくさんあるのです」と解説します。均一で静的な“理想表面”と異なり、“現実の表面”は不均一で、常にダイナミックに変化し、環境の影響を大きく受ける難解な課題であるため、虻川教授は実表面の理解を深めることが、触媒やトランジスタ、接着、摩擦など先端的なテーマの応用研究を追求していく指針ととらえ、両者にまたがる研究を進めています。



虻川研究室では、理想表面の基礎研究とともに、現代の先端技術の開発などに結びつく表面の応用研究にも力を入れています。

回折手法と装置を独自に開発 高度な技術で未知の表面解明へ

先進的な技術やデバイスに直結する表面研究

虻川教授が近年取り組んでいる実表面の研究は、触媒や接着、防錆など社会生活と密接に関わるものです。「表面科学の知見は、すでに私たちの生活のいろいろな場面に役立てられています。例えば、排気ガスの分解に使用されている固体触媒反応。白金触媒が使われ、白金ナノ粒子の表面が触媒として排気ガスの有害分子を分解しやすくしているのです。例えば高価な白金ではなく、もっと安価な材料元素で触媒が実現できる表面はつくれないか、というアプローチも今後の研究の方向性としてあり得るわけです」と説明します。

これらの研究テーマは、いわば現代の先進的な技術やデバイスに直結するものであり、また共通した特徴としては、すべてナノテクノロジーの領域であるということです。こうしたナノの世界の観測を追求するためには、ナノイメージング技術が重要になります。虻川教授は次のように話します。「ナノスケールの表面物性を計測・観測

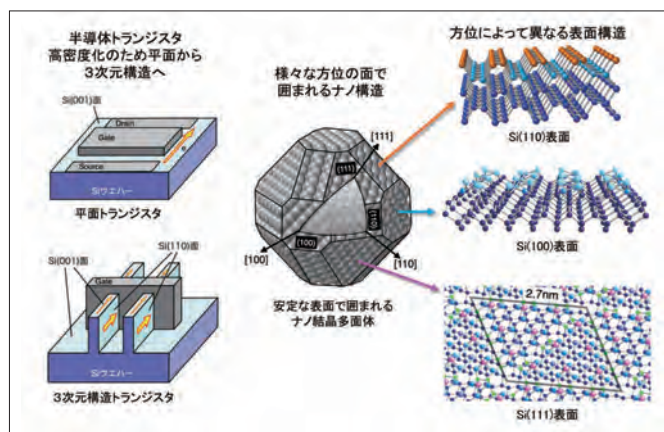
する“ナノイメージング”と反応の一連の動きの中で把握しようとする“ダイナミクス”。この2つのアプローチによって半導体、触媒、接着など新奇表面機能開発につながる応用研究も探索していきたい、というのが近年のモチベーションとなっています」。

電子デバイスに不可欠なシリコン素子その未知の表面構造を解明

例えば、CPUは、膨大な数のトランジスタが高速でスイッチングを行うことで動作しています。大規模集積回路(LSI)では、かつては数十nmスケールの平面的な

トランジスタがシリコン(Si)基板上に敷き詰められていましたが、高密度化に限界が生じ、10年ほど前からSi基板を3次元に加工して表面積を稼ぐことのできる3次元的な構造を持つトランジスタが主流となっており、スケールは数nm単位まで微細化しています。「つまり立体構造の表面を作成しないといけないんですね。従来は1種類の方向を向いた界面しかなかったものが、複数の界面を作らないといけない。そうするとトランジスタの素子を作成するにあたって、どの面を使ったらいいのか、あるいはどの面を使ってはいけないのか、という設計の指針がなければいけません。表面構造を正確に理解しなければ、それは得られないということになります」と虻川教授は解説します。

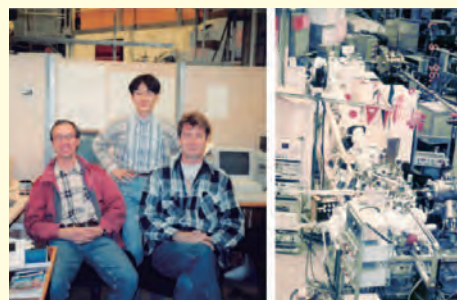
しかしSi結晶の表面はエネルギー的に不安定なため、切断面である表面は安定化に向かい、理想表面とは異なる原子配列で構成されるようになります。これに関連した近年の成果として、虻川教授は次のように話します。「結晶は切断する方位で様々な表面が現れます。方位の異なった表面は、ミラー指数という3桁の数



最新のシリコントランジスタは3次元構造でつくられているため、複数の面で囲まれています。Siでは基本的な表面として(100)表面、(111)表面、(110)表面が知られていますが、(110)面の構造は未解明です。

海外放射光施設でのエピソード

若い頃はスウェーデンの放射光施設(MAX Lab.)で海外の研究者と共同実験を行う機会がありました。写真は25年前にLars博士(スウェーデン)とErick博士(米国)と実験したときのものです。スイス人の学生Lucさんが撮影したものです。右の写真は利用した実験施設(ビームライン)を写したのですが、様々な国の国旗が飾られているのがわかると思います。利用した研究者がそれぞれの国の国旗を持ち寄ったものです。日の丸は私が持参しました。青葉山に建設中の放射光施設にも様々な国の研究者が利用しに集まるものと期待しています。



ミラー指数

ミラー指数は結晶における結晶面や方向を記述するための指数である。英国の鉱物学者ウィリアム・ハロウズ・ミラーによって考案された。Siなどの立方体の格子をもつ結晶では(100)面、(111)面、(110)面などが基本的な面としてよく現れる。通常、大規模集積回路は(100)面を向いたSiウェハーの上に作成される。

電子回折法

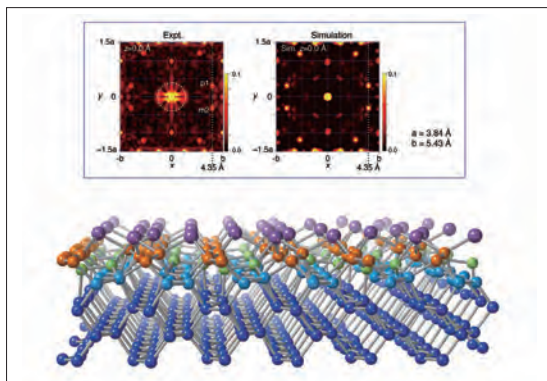
細く平行な電子ビームを結晶に入射すると、規則正しく配列した原子によって散乱した電子は、電子の波の性質により干渉し特定の方向に回折斑点を生じる。その回折斑点から、結晶中の原子の配列を知る方法が電子回折法である。電子は表面付近で散乱されるため、電子回折法は表面の観察に適している。

超高真空

大気中では毎秒数え切れない数の気体分子が表面原子に衝突する。大気の10億分の1の真空でも表面のすべての原子に毎秒1個の気体分子が衝突する計算になる。超高真空は、さらにその1000分の1から10万分の1の真空領域で、真空中に残留した気体分子が表面に衝突することを気にせずに実験を行うことができる。

光電子分光

元素は原子番号と同じ正の電荷を持つ原子核と、同数の電子で成り立っている。様々な物質では複数の元素が、価電子を使って結合して配列し、その電子の状態が性質を決定する。光電子分光では、紫外線やX線を物質に当てることで光電効果により内部の電子を直接取り出して観測することができる。取り出した光電子のエネルギーを調べる(分光)することで、物質に含まれる元素の種類や量、物質の性質を支配する価電子状態を知ることができる。



長い間知られていなかったSi(110)表面の構造に関して、その表面の原子配列の解明に繋がる虻川教授グループの研究事例です。

分子が常にぶつかり、吸着したり、反応を起こすので、これらの影響を排除するために超高真空下で測定を行

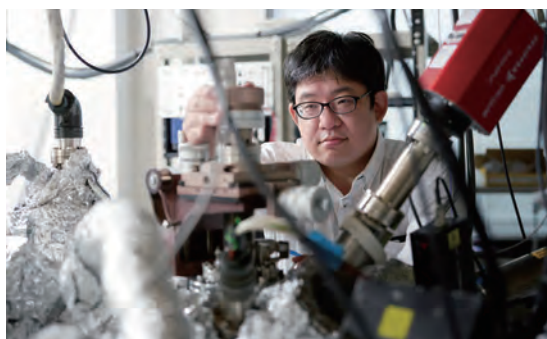
います。ステンレス製の実験真空槽を真空排気しながら高温で丸一日以上熱して、終わったら一日かけて冷やす。装置をアルミホイルでグルグル巻いているのは、真空槽全体をムラなく熱するためです。実験中に何かトラブルで大気圧に戻すと、再び実験するまでに3~4日無駄になることになるので、よく『人工衛星を上げるつもりで実験の準備をするように』と学生には声をかけます」。解析が難しいとされる電子回折法ですが、虻川研究室では、簡単な解析で表面の構造解析が行える独自の電子回折法など、新手法も含めて多くの回折法・装置を開発しています。

研究手法と装置を独自に開発
放射光のリモート計測も目標

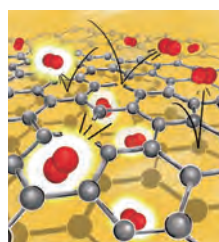
虻川研究室の大きな特徴は、固体表面の形状や構造を観測・理解するために、様々な電子回折法を開発し、装置もオリジナルに製作していることです。「結晶構造を観察するために電子回折装置を使い、試料に電子ビームを照射して干渉パターンから構造を理解します。結晶表面の実験は、大気中では表面に気体

分子が炭素の網をすり抜ける現象を発見しました。虻川研究室における各種研究手法と装置の開発のノウハウは、現在青葉山

新キャンパスに建設中の放射光施設でも活かすことができると虻川教授は考えています。さらに教授は研究におけるDX化にも意欲を持っています。「超高真空中での実験は、リモート化が難しいと言われていますが、実はその場においても真空槽の外から中へは直接アクセスできずいわばリモートです。今後リモート計測技術を発展させて研究スタイルのDX化にも貢献していきたい」と話します。



光電子分光の研究を行う小川助教。一枚の炭素原子の網(グラフエン)に空いた小さな穴のところで、速度が遅い酸素分子は跳ね返されるが、超高速の酸素分子は通り抜けることができることを発見しました。



Shuichi Ogawa, Hisato Yamaguchi, Edward F. Holby, Takatoshi Yamada, Akitaka Yoshigoe, and Yuji Takakuwa, J. Phys. Chem. Lett. 11, 9159-9164 (2020)

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旨と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
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為の蛋白質—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 ●一分子センサーを用いた新しいタンパク質デザイン手法の開発
ナンゴ エリコ 南後 恵理子 量子ビーム構造生物化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●X線自由電子レーザーによるタンパク質構造解析 ●動的構造解析ツールの開発 ●G-タンパク質共役型受容体の活性化機構 ●動的構造情報による合理的分子設計
ヒバラ アキヒデ 火原 彰秀(兼) 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／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 ●励起子／増強光電場相互作用の解析 ●π共役系有機ナノ結晶を用いたエネルギー変換
ニシボリ マイコ 西堀 麻衣子(SRIS) 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—セラミックスハイブリッドナノ材料の合成 ●機能性無機材料表面へのポリマーブラン修飾と界面相互作用の解明 ●X線分光法と計算科学の融合による材料中の原子拡散挙動の追跡 ●放射光X線を用いた不均一材料の元素選択的反応解析
無機材料研究部門	
ヤマダ タカヒロ 山田 高広 無機固体材料化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●多元系金属間化合物を対象とした熱電材料の開拓 ●固体窒素源を用いた金属窒化物の合成プロセスの開発と応用 ●新規ジトル化合物の探索と、機能性材料への応用 ●計算材料学に基づく新規材料設計 ●統計熱力学計算に基づく理論状態図の研究
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
オカモト サトシ 岡本 聡 ナノスケール磁気機能研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●超高密度磁気記録技術の開発 ●高性能永久磁石材料の原理研究 ●高周波磁気応答の挙動解明 ●超高感度スピンダイナミクス計測技術開発 ●新規高機能磁性材料開発
カニエ キョウシ 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トドエレクトロニクス向けナノインクの開発 ●刺激応答性人工リン脂質の設計・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
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 ●放射光電子分光装置の開発
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 ●X線異常散乱を利用した結晶構造中のサイト・元素解析
カメオカ サトシ 亀岡 聡 金属機能設計研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●金属間化合物とその組織制御を用いた新奇触媒材料の創製 ●金属箔型触媒材料のメタラジ— ●貴金属代替合金触媒材料に関する研究 ●ハイパーマテリアルの新規創製・構造解析・物性評価 ●準結晶関連物質の電子構造と構造安定化メカニズム
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 ●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 ●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 ●希土類含有有機機能性ナノ材料の合成
カトウ ヒデキ 加藤 英樹 物質変換無機材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●光触媒による水分解 ●光電気化学的エネルギー変換 ●バイオマス変換のための固体酸塩基触媒の開発 ●物質変換のための新物質開拓

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
プロセスシステム工学研究部門	
アジリ タダミ 阿尻 雅文 (AIMR) 超臨界ナノ工学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●超臨界面による材料プロセスの高度制御 ●ナノ粒子の熱力学（構造形成・相挙動・粘弾性） ●低温高熱で駆動する革新的化学プロセス ●超臨界面でのハイブリッドナノ粒子創成 ●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）
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 ●構造化した光の発生とビーム特性の解析 ●構造化した光を用いたナノイメージングと新規レーザー加工法 ●フェムト秒パルスレーザー加工 ●レーザー光と電子の相互作用
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ベラント分析技術の開発 ●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 桒上 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 ●反応・移動現象高効率化のための膜制御技術開発 ●相変化を伴う融体の界面ゆらぎ構造形成メカニズムの解明 ●新規エネルギー変換・貯蔵・回収プロセスの開発 ●充填層内分散相挙動の幾何的・トポロジカル解析
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 ●金属および酸化物過冷却液体の凝固メカニズム ●高効率な硫化スズ太陽電池の実現 ●次世代材料シリコンカーバイドの溶液成長 ●鉄鋼スラグのリサイクル ●放射性廃棄物の安定化・固定化技術開発
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 ●液相還元法による新規触媒材料の調製 ●放射光を用いた結晶性ナノ粒子の機能—構造に関する評価 ●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 ●メカノケミカル法による新規金属含有ゼオライト触媒の開発
計測研究部門	
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"> ●干渉光学に基づく位相計測法の開発 ●X線および中性子の位相イメージング法の開発とその応用 ●動的X線位相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発とその応用
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 ●超高圧合成法を用いた新規物質探索と構造物性研究
ジンナイ ヒロシ 陣内 浩司 高分子物理化学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●有機・無機接着構造の原子レベル解析 ●有機・無機複合材料のナノスケール変形機構の解明 ●結晶性高分子材料のナノスケール構造解析 ●高分子単一分子鎖の電子顕微鏡直接観察 ●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
ヤシロ フタル 矢代 航 量子フロンティア計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●ミリ秒X線CTの開発 ●X線エラストグラフィの開発 ●イメージングと構造解析の融合技術の開発 ●量子ビーム光学素子・システムの開発 ●量子現象を利用したイメージング技術のフロンティアの開拓
チチブ 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(Al,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(Al,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(Al,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
タカハシ ユキオ 高橋 幸生 (SRIS) 放射光可視化情報計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●タイコグラフィ-XAFS法による電池／触媒材料の化学状態分析 ●テンダーX線タイコグラフィの基盤技術開発と硫酸化合物の化学状態分析への展開 ●シングルショットコヒーレント回折イメージング法の開発と動画イメージングへの展開 ●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 ●オベラント結像XAFS法による電池材料系のマルチスケール化学状態分析
アブカワ タダシ 蛇川 匡司 (SRIS) 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
サトウ シュンイチ 佐藤 俊一 (兼) 電子線干渉計測研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●電子線ホログラフィーによるナノスケール電磁場計測の高精度化 ●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 ●電場解析による帯電現象と電子の集団運動の動的観察 ●先端磁性材料のナノスケール磁区構造解析とその場観察 ●高温超伝導体、強相関電子系新物質の磁束イメージング
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による光物性評価手法の開発 ●電子顕微鏡用XES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
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 ●微細加工素子と分子素子の融合に向けた界面計測・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 ●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 ●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
タカタ マサキ 高田 昌樹 (SRIS) 放射光ナノ構造可視化研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●次世代放射光施設の推進 ●軟X線顕微鏡の開発および生体試料への応用 ●軟X線光源・光学素子・検出器など要素技術の開発 ●X線可視化技術の高度化による構造科学の革新 ●軟X線オベラント計測による表面界面化学反応の解明

多元物質科学研究所が推進する研究

研究室（教授）／研究分野	主な研究テーマ
非鉄金属製錬環境科学研究所	
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之(兼) ムラマツ アツシ 村松 淳司(兼) シバタ ヒロユキ 柴田 浩幸(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
製鉄プロセス高度解析技術共同研究部門	
ノガミ ヒロシ 埜上 洋(兼)	<ul style="list-style-type: none"> ●極低炭素製鉄プロセス技術の開発 ●充填層プロセス内における多相流動の体系的解明 ●製鉄プロセス内の熱・物質流動と反応の解析技術開発 ●高炉の高度数学シミュレーターの開発
次世代電子顕微鏡技術共同研究部門	
テラウチ マサミ 寺内 正己(兼) ジンナイ ヒロシ 陣内 浩司(兼) ヨネクラ コウジ 米倉 功治	<ul style="list-style-type: none"> ●ソフトマテリアル対応電子顕微鏡技術の開発 ●クライオ電子顕微鏡技術に関する応用研究 ●エネルギー分析技術の精度向上
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"> ●次世代放射光施設の推進 ●軟X線顕微鏡の開発および生体試料への応用 ●軟X線光源・光学素子・検出器など要素技術の開発 ●X線可視化技術の高度化による構造科学の革新 ●軟X線オヘアンド計測による表面界面化学反応の解明
ウエダ シゲル 植田 滋 基盤素材プロセス研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●製鋼スラグからのりん資源回収 ●界面における物質移動と化学反応 ●金属-酸化物-気相間の平衡と反応速度 ●新素材プロセス開発
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 ●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
ケリシマ 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"> ●レアメタルフリー型リチウムイオン電池 ●二酸化炭素の有用化合物への電気化学的変換プロセス ●3次元プリンティング技術を用いた電池デバイスのオンデマンド作製 ●マグネシウムイオン電池 ●機能性ナノ材料のプロセス研究
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 ●スコロタイト合成によるヒ素の安定固定化技術の開発 ●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 ●塩基性廃棄物を利用した二酸化炭素の固定と有効利用 ●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
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 ●環境に適合した太陽電池材料の開発と素子への応用 ●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
マテリアル・計測ハイブリッド研究センター	
タカハシ マサシコ 高橋 正彦 量子電子科学研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●反応過渡系の電子および原子核運動のイメージングと化学反応の駆動原理の可視化 ●分子軌道の運動量空間イメージングと分子振動による電子波動関数形状の歪みの研究 ●原子運動量分光による原子核の分子内運動のイメージングと分子内力場の研究 ●運動量空間化学の開拓とその創業研究への展開 ●多次元同時計測分光による電子・分子衝突の立体ダイナミクス
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"> ●微小界面を計測する顕微レーザー分光法 ●蛍光偏光分光装置の開発とワンステップイムノアッセイ法 ●マイクロ水滴を用いるバイオアッセイ法 ●ナノ粒子を集積したペーパーマイクロ分析デバイス
ニシハラ ヒロトモ 西原 洋知 (AIMR) ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野	<ul style="list-style-type: none"> ●単層グラフェンから成るナノ多孔体の創成 ●先進カーボン材料を利用したエネルギー貯蔵・変換 ●カーボン材料エッジサイトの高度分析 ●弾性変形するナノ多孔体が引き起こす新しい物理化学現象 ●有機化学的手法に基づく結晶性カーボン材料の創成と応用 ●カーボン系材料のヘルスケア分野への展開
アタガワ トモユキ 芥川 智行 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 ●新規な分子性導体・磁性体・強誘電体の開発 ●酸化還元活性な有機π電子系化合物および金属錯体の開発 ●電荷移動型分子集合体デバイスの開発 ●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
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 ●ナノ点眼薬の創製とその薬理効果 ●ナノ粒子化による生物由来色素の高機能化 ●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 ●バイオプロセスを巧みに活かした薬効化合物の合成

編集
後記

TAGEN FOREFRONTの最新号ができあがりました。2013年発行の1号から数えて9号目になります。本号も多元研の教授陣から選ばれた、新進気鋭の7人の侍を、それぞれの研究とそれに至る歴史、溢れる情熱とともに紹介させていただきました。7つの研究は、素材の製造プロセス、反応の設計、材料の物性、計測技術など、多元研らしく幅広い領域をカバーしています。一見それらは別々の興味に駆られた研究のようですが、「人々に、より良い未来を提供したい」という熱い思いで結ばれており、日本の技術や社会の明るい将来を予感させてくれます。読者の皆さんもきっとそのように感じてくださったに違いありません。

大学教授という生き物の、研究とは離れた日常を垣間見ることができる「MY FAVORITE」と「OFF TIME」。私自身も毎号楽しく読んでいます。今号でも、鎧をおろした侍の個性豊かな姿が映し出されると同時に、最先端で戦う大学教授も普通の人なのだという、あたりまえのことを思い出させてくれる内容で、なんだかほっとしました。

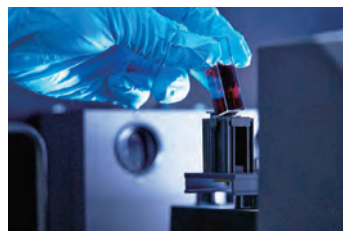
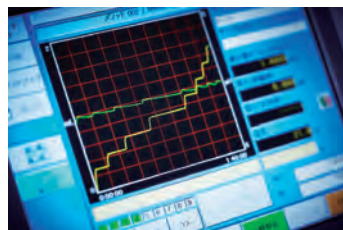
「十年一昔」という言い回しは、江戸時代中期的那波魯堂(なばろどう)なる儒学者に始まったそうです。250年が過ぎた21世紀の現代では、5年も過ぎると一昔前と言われ、途轍もないスピードで時計の針は進んでいます。今年は多元研の創立20周年にあたります。この20年の間に、たくさんの侍が様々な分野で世界を舞台に活躍してきました。2016年に発行した7号までに登場した49人のうち、24人は既に多元研を離れており、「五年一昔」をほんとうに実感します。今号に登場した侍たちはどのような次の10年、いえ、5年を造ってくれるのでしょうか。未来の想像って、とってもワクワクしますよね。(T.O)

■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
2021年12月15日発行

広報情報室

室長 小俣 孝久
副室長 雨澤 浩史
蟹江 澄志
米田 忠弘
高橋 幸生
飯塚 淳
小島 一信
助永 壮平
安達 正芳
鬼塚 侑樹
鈴木 一誓
菊地 隼哉
小玉 航史
高橋 慶
渡辺 直子
小関 祥子
伊藤 智恵
江崎 聡子



取材を終えて

今回は一部オンライン取材となりましたが、対面と変わらず、あるいはそれ以上に熱心に教えていただき、問題なく原稿制作を進行することができました。それぞれの分野で卓越したリーダーでありながら、真剣に、そして誠実に目標や課題に立ち向かっている姿がありました。そうでありながら、決して目の前の事象に没入しているわけではなく、必ず広く社会と世界への視界を探り続けていることを感じました。少しずつ次なる時代への移行を感じつつ、この先の未来への可能性が力強く開けていくような幾つもの研究に立ち合わせていただき、感謝申し上げます。



東北大学 多元物質科学研究所

IMRAM

INSTITUTE OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH
FOR ADVANCED MATERIALS TOHOKU UNIVERSITY