



TAGEN FOREFRONT 06

多元研

NOGAMI, Hiroshi

KIMURA, Hiroyuki

YOKOYAMA, Chiaki

SATO, Shunichi

MITSUISHI, Masaya

WADA, Takehiko

KOMEDA, Tadahiro



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 先端の熱流体解析手法により
革新的な環境適合素材プロセスを開発

埜上 洋 教授

05

02 高精度の観測・解析技法を究め
構造物性研究の本質に迫る

木村 宏之 教授

11

03 超臨界流体、イオン液体を用いた
革新的なプロセスを提案

横山 千昭 教授

17

04 新しいレーザーの可能性を追求し
光科学と物質科学の最先端融合研究へ

佐藤 俊一 教授

23

05 表面・界面でのナノ構造制御を利用した
高分子ハイブリッドナノ材料の開発

三ツ石 方也 教授

29

06 しなやかなシステムを求めて
生命機能の外部刺激制御法の開発と構造

和田 健彦 教授

35

07 スピントロニクスへ向けた
単一分子のスピンの検出と操作

米田 忠弘 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。)が誕生して15年目を迎えます。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、おかげさまで、一般社会にも次第に認知されつつあります。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、今年で75年目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、研究所のあちらこちらで、時空を超えて融合していく姿を見ることができます。

東北大学の学内での部局間交流も非常に活発であり、昨年にはその象徴ともいえる、独立した産学連携先端材料研究開発センターが設置されました。従来の研究所連携に加えて、理学研究科、工学研究科、生命科学研究科、環境科学研究科などすべての学内部局との密接な連携から、新たな物質材料研究が日々誕生してきています。

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化して紹介する「TAGEN FOREFRONT」で、今回も最先端研究の一端に触れていただきます。

2011年3月の東日本大震災から4年が経過し、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、今後も積極的に担っていきます。

そして今年には多元研は在籍する教職員、学生、研究生、研究者らが一丸となって、多元研ブランドの浸透を目指して「TEAM TAGEN」を展開します。

今後とも、変わらぬご支援を賜りますよう宜しくお願いいたします。



FOREFRONT REVIEW



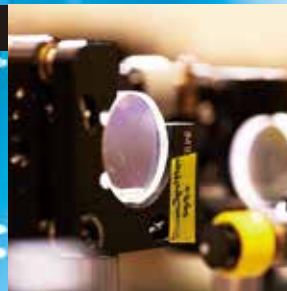
01



02



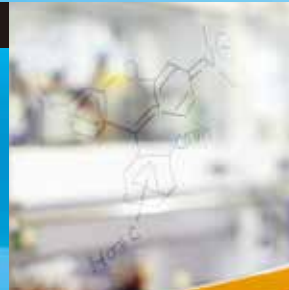
03



04



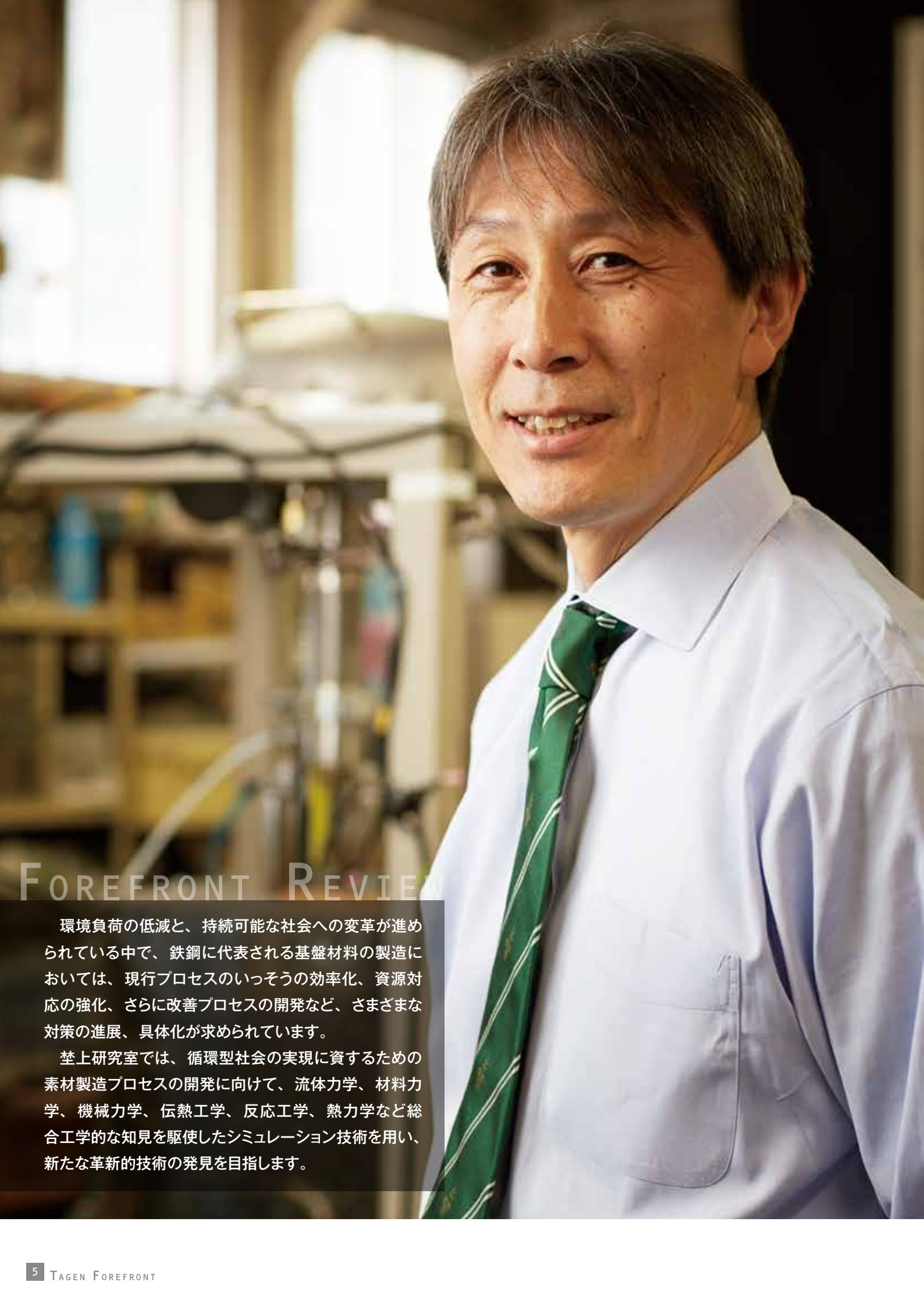
05



06



07



FOREFRONT REVIEW

環境負荷の低減と、持続可能な社会への変革が進められている中で、鉄鋼に代表される基盤材料の製造においては、現行プロセスのいっそうの効率化、資源対応の強化、さらに改善プロセスの開発など、さまざまな対策の進展、具体化が求められています。

埜上研究室では、循環型社会の実現に資するための素材製造プロセスの開発に向けて、流体力学、材料力学、機械力学、伝熱工学、反応工学、熱力学など総合工学的な知見を駆使したシミュレーション技術を用い、新たな革新的技術の発見を目指します。



先端の熱流体解析手法により 革新的な環境適合素材プロセスを開発

世界のCO₂排出量に占める日本の排出量は、約3.6パーセント。中国(24.0)、米国(18.1)、インド(5.6)、ロシア(5.1)に次いで、世界5位となっています(2009年資料)。さらに産業別の内訳を見てみると、日本の全量の中で約15パーセントを製鉄業が占め、最大のCO₂排出業種となっています。世界のCO₂排出量の約0.5パーセントが日本の製鉄分野から出ていることになります。

製鉄に代表される基盤材料の製造プロセスは、その製造量が膨大であるため、資源・エネルギーの消費量も膨大で、これらを抑制し、循環型社会の実現に資するための対策が求められています。もし製鉄業においてエネルギーのロスとCO₂排出量を抑えることができれば、世界のエネルギー環境の中でかなりインパクトを与えることができるとも言えます。しかし、日本の製鉄技術はすでに世界最先端のレベルにあり、優れたエネルギー効率を実現しています。これ以上さらにエネルギー効率を高め、CO₂を削減するためには、革新的な製鉄プロセス技術の開発が必要とされています。

製鉄における主要な設備のひとつが高炉(溶鉱炉)であり、高炉を中心とした鉄鉱石から鉄を製造するプロセスに約7割のエネルギーが投入されています。そのエネルギー効率を向上させるためには高炉の特性を理解し、制御・設計することが必要です。高炉の中で生じている現象を理論的に解明するための研究は日本では1960年代に始まっていますが、近年の鉄鋼業界の再編により、国内では高炉を持つ大規模な製鉄所を持つのは現在では4社(新日鐵住金、JFE、神戸製鋼、日新製鋼)となり、高炉を中心的課題として取り組む研究機関も限られています。環境適合素材プロセス研究分野に立ち向かう東北大学多元研埜上研究室は、流体力学、材料力学、熱力学、反応工学など総合工学の知見を駆使したシミュレーション技術をベースとして高炉研究における先導的な役割を果たすとともに、4社との共同研究や、NEDO国家プロジェクトへの参画により、精力的な取り組みを展開しており、今後の成果の進展に大きな期待が寄せられています。

多元物質科学研究所
サステナブル理工学研究センター
環境適合素材プロセス研究分野 教授

埜上 洋

NOGAMI, Hiroshi

1963年新潟県生まれ。1987年東北大学工学部化学工学科卒業。1992年同大学院工学研究科化学工学専攻博士課程修了。1992年東北大学選鉱製錬研究所(素材工学研究所)助手。1997年10月~1999年10月 McGill大学(カナダ)Research Associate 日本学術振興会海外特別研究員。2001年東北大学多元物質科学研究所助手。2006年同研究所講師。2006年一関工業高等専門学校助教授。2011年室蘭工業大学大学院工学研究科教授。2013年東北大学多元物質科学研究所教授。1996年原田研究奨励賞、1999年山岡賞、2014年徳論文賞。所属学会/化学工学会、日本鉄鋼協会、日本エネルギー学会。

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=94>

高炉の全景。鉄鉱石から鉄を取り出す製鉄所の主要設備。大規模な製鉄所においては高炉は高さ約100メートルに及ぶ。高炉メーカーは巨大な装置産業であり、現在日本では、新日鐵住金、神戸製鋼所、日新製鋼、JFEスチールの4社のみとなっている。
写真提供:(株)神戸製鋼所



高炉全景(神戸製鋼所加古川第3高炉)

高炉内の4形態の物体の動きをシミュレーションする技術

「高炉に限らず反応プロセスの内部で生じる現象を理解するためには、原料の反応性や溶解挙動を把握すれば十分と考えられがちですが、実際にはプロセス内の物質やエネルギーの流れを把握する必要があります」と埜上教授。高炉内では、酸化鉄やコークスといった固体が上から下に、高温の還元ガスが下から上に、溶鉄や溶解した不純物などの高温液体が上から下に、また高炉内で発生した粉体がガスに伴われて下から上に流れます。高炉内の物質やエネルギーの流れを知るためには、この固体・液体・気体と粉体、4形態の物質の動きを把握するのが基本となります。さらに、高炉は一般的な反応器とは異なり、様々な形態の物質が存在するのみならず、多数の化学反応や物理変化が逐次・並列的に互いに影響を及ぼしながら進行しています。しかし、内部に固体が詰め込まれ、温度が1500度以上になる炉内で実際の物質の動きを捕捉するのは不可能なため、先端のシミュレーション技術を駆使します。流体力学や粉体工学などにより、個々の物体の運動の解析方法は確立されていますが、実プロセス内でこれらの運動が組み合わせ

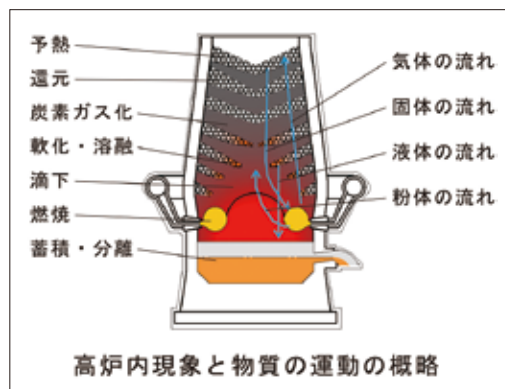
シミュレーション技術を駆使して高炉の熱効率向上策を研究

環境への影響度が高い製鉄プロセスを研究

「基幹テーマは、製鉄の高炉研究。鉄やその合金に関する材料研究は多くの人に取り組んでいますが、鉄鉱石から鉄を製造する段階の研究は非常に重要ですが、国内では取り組む研究者が少なくなってきました。現在では東北大と九州大が中心的な役割を担うようになってきています」と埜上教授は話します。

研究の方向性としては、エネルギー環境に与える影響度が高い製鉄など基盤材料の製造プロセスにおいて、プロセス内部で生じるさまざまな現象や原材料の反応特性などを探索することにより、現行プロセスの高効率化や新たなプロセスの設計など、循環型社会の実現に資する開発を目指しています。

日本の製鉄は、4社14か所の製鉄所、27基の高炉で行われています。高炉は製鉄所の主要設備であり、大型のものは高さ約100メートルに達します。その中で実際に製鉄が行われる高炉の本体は高さ約30メートルの樽型の反応器です。この高炉に上部から、塊状の鉄鉱石とコークスを投入し、下部から1000度以上に加熱した空気を吹き込むとコークスの燃焼によって一酸化炭素と熱が生成する。鉄鉱石中の酸化鉄は一酸化炭素による還元反応によって鉄となり、燃焼によって発生した熱により溶鉄となって高炉下部から取り出されるようになります。



高炉断面模式図。上部からは、鉄鉱石とコークス(還元材であり熱源でもある)が投入され、下部から1000度以上に加熱した空気を吹き込む。燃焼反応で発生した還元ガスと熱により鉄鉱石が還元・熔融し、液体状の鉄鉄となって底部に蓄積する。火が入られた高炉は常に稼働され、定期点検・修理の時でも原料の供給や送風は停止されるが内部は高温のまま保持される。

ラグビーのクラブチームでの活動を楽しむ

今は何かと時間がとれないのでしていませんが、40歳過ぎまではラグーマンでした。仙台二高OBが中心となって設立した「北陵ラグー」での活動をけっこう楽しんで続けていました。カナダのモントリオールに2年間留学した時も、モントリオールアイリッシュというクラブチームでプレーしていました。

今年夏に、大学のラグビー部の同期が集まって仙台で飲み会をやるかと予定しています。そういう集まりや、人のつながりは大切にしています。集まってバカ話をするのが好きですね。ふだんラグビーをしている時は、お互いにただのスポーツマンの顔しか見えていないけれども、話を聞くと仕事の場面ではすごいことをしていたり、いつもと違う面が垣間見えたりするのも、楽しいものです。





基本となる研究実践とともに、研究課題の検証や新たなモデル作成のために、さまざまな手法を駆使したシミュレーション技術の開発も重要となる。このため研究室のスタッフは、流体力学、材料力学、機械力学、伝熱工学、反応工学、熱力学など総合工学的な側面を学ぶ。

TERM INFORMATION

高炉

鉄鉱石を還元・溶解して溶けた鉄を製造する装置。反応器は樽型で上部から塊状の鉄鉱石とコークスを装入し、下部の羽口と呼ばれるノズルから高温に熱した空気を送風する。コークスと空気の燃焼により発生する一酸化炭素と熱により鉄鉱石中の酸化鉄を還元して鉄を生成し、溶解して溶鉄および溶滓(スラグ・不純物)を炉下部から取り出す。名称はドイツ語の“Hochofen”、オランダ語の“hoog oven”から。溶鉄炉とも呼ばれる。

コークス

石炭を300から500°C程度の温度に加熱すると可燃性の気体と炭素を主成分とする固体に分解する。この分解の際に一旦熔融し、再固化する石炭もある(原料炭)。この熔融する性質を利用して、粉状の石炭を箱形の炉の中に充填し、酸素を遮断して高温まで加熱することにより生成した塊状の多孔質の炭素質の物体がコークスである。元の石炭と比較して単位重量あたりの発熱量が高く高温が得られる。還元材、燃料や電極などに用いられる。

還元

一般に、酸素を含む化合物から酸素を取り除く反応のこと。他にも対象物質が電子を失う、酸化数の減少を伴う反応などの定義がある。製鉄においては鉄鉱石中の酸化鉄(Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O)から一酸化炭素(CO)や水素(H_2)を用いて酸素を取り除く反応($3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$ や $Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3FeO + H_2O$ など)が主な還元反応。

粉粒体

微細な固体粒子の集合体である粉体(ふんたい)と比較的粗い固体粒子の集合体である粒体(りゅうたい)の総称。粉粒体を構成する個々の粒子は固体であるが、集合体としては流体のように振る舞ったり、固体とも流体とも異なる挙動を示す場合もあり、その取り扱いには非常に複雑である。このため多くの工業分野の原料や製品が粉粒体であるが、粉粒体の扱いは経験的になされることが多い。

COURSE50

“CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50”の略称。2007年5月に発表された「美しい星50(Cool Earth50)」を達成するための革新的製鉄プロセス技術開発であり、水素還元やCO₂分離回収技術をはじめとする多くの課題が、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究開発プロジェクトとして実施されている。

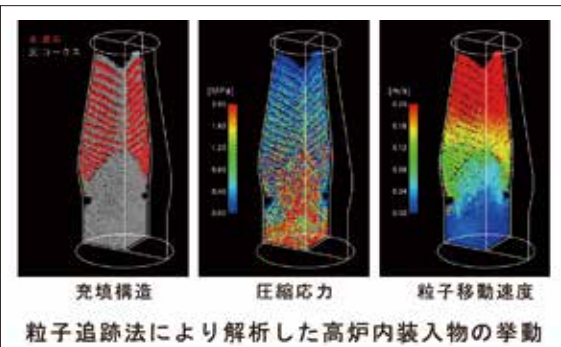
れると、とたんに解析は複雑となり、未だ現象自体も理論的に説明できないものもあるのだとか。高炉研究におけるシミュレーション技術は、塾上教授が研究を開始した選鉱製錬研究所時代には、固体と気体の垂直方向の変化のみ予測可能であり、どちらも筒の中のところてんを押し出すような運動のモデリングを行っていました。「今は流体力学や粉体工学のシミュレーション技術が進み、物体の三次元的な複雑な運動も計算できるようになったし、粒体の流れも、個々の独立した粒子を追跡するようなシミュレーションができるようになりました」。高炉の中の温度や反応率などの分布はこれら4体の運動と密接に関係しており、それらの関係を詳細に解析すると、高炉における消費エネルギー低減に対する物理的、化学的、熱的など様々な面での制約が明らかになり、その壁を打ち破ったり、ボトルネックを押し拡げたりするための解決策の糸口を発見することにつながります。「私たちはそうした発見を複数組み合わせることによって、よりエネルギー効率の高い高炉の操業方法や新たな還元プロセスの開発を目指しています」。

高炉研究やプロジェクト参画で循環型社会の実現を目指す

「低エネルギー条件で高炉の高効率・安定操業を阻害する要因は、炉内の還元ガス流路に固体や粉体がつかまるなど、数多くあります」と、塾上教授。

たとえば、還元された鉄鉱石が高温になると鉱石の粒子がやわらかくなり(軟化)、隣り合う鉄鉱石同士がくっつき合っ(融着)粒子間のすき間が小さくなって、下から吹き上がって来る高温の還元ガスの流れが悪くなってしまいます。また品質が良くない鉄鉱石が入ってきた場合、「還元がうまく進まず、軟化・融着後に粘ついた状態のまま完全な液体にならず、なかなか滴下しない」などの不具合があることがあります。「この鉄鉱石の軟化・融着が生じる領域をうまく制御してミニマム化し、通気を確保することができれば高炉全体にガスが回って効率が良くなることになる。しかしこの領域はこれまで研究のメスが入っておらず、原料の設計法や変形挙動など理論面で不十分な点が多く残っています。様々な視点からの研究が必要で、いま日本鉄鋼協会に研究会を立ち上げようと呼びかけているところです」。

塾上教授はこのような考察を重ねながら、新日鐵住金、JFE、神戸製鋼所、日新製鋼の4社との共同研究、またNEDO ナショナルプロジェクトのCOURSE50や循環型製鉄に関する研究会への参画、2015年5月米国クリーブランドで開催されたICSTI「世界製鉄会議」での研究発表など、高炉におけるエネルギー効率向上、循環型社会の実現に資する技術開発のテーマに取り組んでいます。



高炉内の物質の動きをさまざまな手法によりシミュレーションする。実際には数億個の粒体はコンピュータ上では数万個～百万個程度に簡略化し、粒子間の衝突や摩擦による粒子の回転運動まで追いかけるなど、高度なレベルまで再現できるようになった。

埜上研究室では、溶鉱炉50分の1モデルや各種電気炉などを用いて、反応特性や熱エネルギー利用などさまざまな研究を行っている。



新しい熱交換の仕組みなど エネルギーロスを減らす試み

木炭バイオマスを使った高炉で 低炭素化への取り組み

「高炉の仕組み、炉内の物質の流れに関わる効率化への模索について説明しましたが、もうひとつ還元材を別のものでも代用できないか、という考え方があります」と埜上教授。かつて教授は、石炭ではなく木炭を還元材として使うとどうなるのか、石炭と同様な還元作用が可能なのか、木炭高炉の効率性を計算して研究資料を作成したことがあります。

その研究資料などがベースとなって、いまブラジルで小規模な木炭高炉が動きつつあります。現地の植物から得られた木炭、つまり植物バイオマスを使えば、C

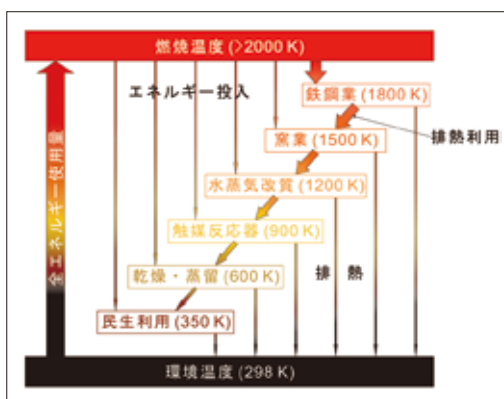
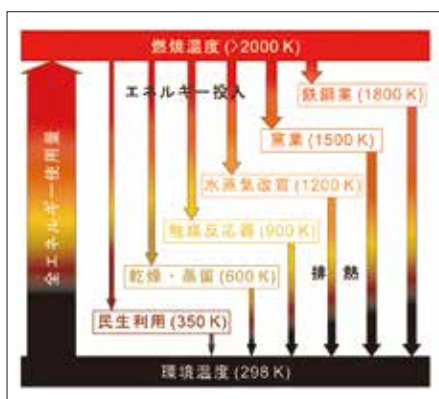
O₂は排出しますが、植物が成長過程でCO₂を吸収してきているので、いわゆるカーボンニュートラル(CO₂の排出をCO₂の吸収で相殺する)に近い結果を生み出すことができます。「日本の大規模な高炉では現実的ではありませんが、広大な森林資源がある地域で小規模な操業であれば実用化できるという方向性の1つの表れ」と話します。

排熱をカスケード利用し 工業全体でロスを減らす発想

さらにこうした材料の転換などによる高効率化・低炭素化という模索以外に、膨大な熱とエネルギーを使う製鉄所には「排

熱」という問題があります。製鉄のさまざまな段階で排熱が出ます。この製鉄所の排熱について、どれだけをそのまま環境に放出し、どれだけを回収できているか。その回収できていないエネルギーを有効に使える手法はないのか、という研究の視点があります。

鉄鋼業は溶けた鉄を扱うため1500～1600度の熱エネルギーを扱う工業と言えます。同様にセメント焼成のプロセスは1000度～1100度、セラミックス(窯業)は800～900度、炭化水素系を扱う化学工業は300～400度。それぞれの工業、材料プロセスごとに異なる温度域を扱っています。「仮に扱う温度が高い鉄鋼業から、セメント業、窯業、化学工業と、順番に排熱を使っていけば、新たに取り入れるエネルギーも放出するエネルギーも少なくできるのではないかと。これをエネル



図の最下部黒いところが常温環境、最上部が工業用に必要とされる高温エネルギー。そのエネルギーを得るには大量の化石燃料が必要となる。最も高温のエネルギーから鉄鋼業にエネルギーが投入されるが、使用後多くの熱エネルギーが排熱として出されている。下位の温度域の工業でも同様な排熱が生じている。右図は、高温エネルギーを徐々に下位の工業にカスケード利用し、排熱を少量に抑えた場合、非常に効率的なエネルギー利用が実現できる。

自然の中で、季節を感じながら、風を感じながら過ごすのが好き

一関高専に赴任した時は、空飛ぶだんごで有名な巖美溪の近くの、田んぼやリンゴ農園がある緑豊かなところに住んでいました。室蘭に赴任した時は、登別温泉の近くでした。そういう体験もあり、都会から離れたところで、季節を感じながらぶらぶら歩いたり、自然とふれあいながら生活するのが好きですね。

若い頃はバイクが好きでしたが、その後乗りやすいスクーターに変わりました。自然の中を、風を感じて走るのが大好きです。一関時代には、岩手県の三陸海岸沿いを南から北までスクーターで踏破しました。今でも、春に泉が岳のミズバショウを見に行ったり、自然の中によく出かけていきます。



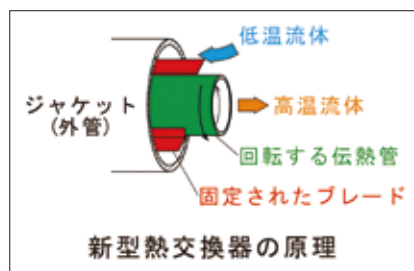


ギーのカスケード利用と言います。工業界全体としてエネルギーロスを少なく、という発想です」。

ただ現実問題として、下位の温度域の工業がいつも近接して立地するとは考えにくいので、「エネルギーを回収する、輸送する、貯蔵する技術、各段階でロスが出ないような高効率な技術の開発が求められるということになります。

熱交換器の高機能化と新しい蓄熱の研究を目指して

その1つとして、塾上教授が従来より取り組んでいるのが「熱交換器」の高機能化です。壁を挟んで流れる温度の異なる流体間で、中央の壁を通して高温の流体から低温の流体に熱を移動させるのが熱交換器の原理です。両方の流体の壁



熱交換器は、高温の流体と低温の流体を隔てる隔壁の表面に境膜を持ち、この境膜の厚さを低減し、境膜の熱抵抗を減らすことが性能を引き上げるキーとなる。この目的を果たすべく開発されたのが「境膜剥ぎ取り式熱交換器」。

2重管の内側の管（隔壁）の外側に接するようにブレード（羽根）を固定し、内側の管を回転させて境膜を剥ぎ取る方式となっている。

研究室における熱エネルギー関連の主要テーマの1つに熱交換器の研究がある。熱交換器の性能が仮に10倍になれば、大きかった交換器をその分ダウンサイジングすることができ、また温度差が少ない条件での熱交換や、低温域の熱回収も十分に可能になる。熱交換器は産業用のさまざまな機器に使われており、高機能化、効率化への期待が大きい分野となっている。

に近い部分には温度境界層と呼ばれる領域が形成され、これが熱交換に対する抵抗となります。この温度境界層の抵抗を減らすことが熱交換器の性能を向上させるためのキーの一つになります。「2重管式熱交換器の内側の管に接するように掻き取り羽根を設置して、内管を回転させることにより温度境界層を機械的にはぎ取るという手法で伝熱性能を10倍近く向上させました。総括伝熱係数は約12,000 W/m²K。高性能なプレート式熱交換器の係数が8,000程度でしたから、信じてもらえないようなデータでした」。

こうした熱交換器の開発により、さらに性能向上が期待されるものがあります。「産業用冷凍機は、水を吸収して反対側で蒸発させて温度を下げる吸収式の原理を使っていますが、その吸収剤再生のところにこの熱交換器を使えば非常に短時間で再生でき、冷凍機の能力を高めることができます。以前活動していたコンソーシアムを再開させ、機械的な部分は企業など得意なところにお任せし、研究室では原理設計の分野で貢献していきたい」と塾上教授は話します。

さらに塾上研究室では新しい熱回収手法を考えています。「工業的にエネルギーを回収するには蒸発潜熱という原理で回収しますが、高炉から出る不純物は1500度の高温で、蒸気の圧力が非常に高くなってしまい難しい。これを、ある化学反応で蓄熱することを考えています。分解して熱を吸収する反応を起こすような物質をふきつけてやる。化学的に安定した状態で輸送してそこで元に戻す反応を起こして熱を取り出す。これが実現できれば、非常に高効率なエネルギーのカスケード利用になります」と、塾上教授は新たな研究課題に挑戦し続けています。

TERM INFORMATION

木炭高炉

還元材としてコークスではなく、木炭を使用する高炉の総称。高炉が開発された15から16世紀頃から還元材として木炭が使用されてきたが、製鉄への利用による森林資源の枯渇問題から18世紀初頭に高炉での石炭利用技術が開発され、以来近代高炉は還元材としてコークスを使用している。近年、木炭のカーボンニュートラル性から資源管理の下での木炭高炉が注目されている。

バイオマス

バイオマスとは生物起源の産業資源（化石資源ではないもの）を指す。その生成起源や形態により様々な分類がある。たとえば林地残材や製材廃材などの木質系、農業残渣や家畜排泄物などの農業・畜産・水産系、下水汚泥や厨芥ゴミなどの生活系などさまざま。

熱交換器

温度の異なる二流体間で熱を移動させ、流体の加熱・冷却・温度調節や凝縮などを行う機器のこと。流体間の壁を通して熱交換を行う隔壁式、水と空気のように混じり合わない流体を直接接触させる接触式、一旦物体に熱を蓄えてから熱交換を行う蓄熱式などの形式がある。工業的な機器ばかりでなく、自動車のラジエータ、エアコンの室内機、ガス湯沸かし器など身の回りにも広く用いられている。

温度境界層

一定温度の流体の流れの中に温度の異なる物体を置くと、流体と物体の間の熱移動により流体の温度が変化する。温度が変化した流体は、流れに押し流されてしまうため、流体の温度変化が生じる領域は物体のごく近傍の薄層状の領域に限られる。温度境界層内部には急な温度勾配が形成され、流体と物体の熱の移動速度はその勾配に依存する。寒い日に風が吹くと寒く感じるのは、風により温度境界層が薄くなり、温度勾配が大きくなって体から逃げる熱が多くなるため。

総括伝熱係数

隔壁式の熱交換器では、高温の流体から低温の流体に熱が移動する際に、高温側の温度境界層、隔壁の熱伝導および低温側の温度境界層が熱交換の抵抗となる。これら三つの伝熱抵抗を一度に考慮した熱の伝わりやすさの指標が総括伝熱係数。数式上は、単位断面積・単位時間あたりに高温流体から低温流体に移動する熱量と両流体間の温度差の間の比例定数として表され、単位は[W/m²K]。熱通過率とも呼ばれる。

潜熱

物質に熱を加えると温度が上昇し、一定の温度に達すると状態変化（固体→液体、液体→気体）が生じる。状態変化が生じている間は熱を加え続けても温度変化は生じない。温度変化を伴って物体に吸収された熱を顕熱、状態変化中に温度一定の物体に吸収された熱を潜熱と呼ぶ。固体と液体の状態変化および液体と気体の状態変化が、それぞれ溶解潜熱および蒸発潜熱と呼ばれる。通常一定量の物質の状態変化が生じるのに必要な潜熱のことを指し、単位は[J/kg]。



FOREFRONT REVIEW

木村研究室は、多元物質科学研究所において、計測研究部門の構造材料物性研究分野を扱っています。物性物理学の最も基本的なテーマの1つと言える「物質とは何か」という課題を前に、さまざまな手法により「構造物性」を徹底的に調べ、明らかにしていくことによって、その本質に迫ります。

X線、放射光、中性子を用いた高精度の測定技術と解析手法により、物質の構造に立ち返って目に見える現象を説明していくことを目指しています。このため、併せて超高精度の構造解析手法の開発も重要な研究テーマとなっています。



高精度の観測・解析技法を究め 構造物性研究の本質に迫る

「物質とは何か」という問いに対して、「物性」から探っていくのが物性物理学です。それでは「物性」とは何でしょうか。物質内の電子・原子核・電子スピンのどのように分布、配列され、あるいは運動しているかによって物質の性質が定まってくるという考え方に立ち、目に見える性質を原子・電子レベルで解明していきます。

木村宏之教授の研究は「あまり応用に結びつくような方向に視野は向いていない」と自身が分析するように、物理学の非常に基礎的な分野を扱っていますが、その探求法が極めて高精度のレベルにあるため、先端的な研究につながる潜在力をつくり出しています。「今まで見えなかったものを見えるようにしたい、わからなかった物性を明らかにしたい」と目標への強い意志をもって展開される木村教授の研究は、何ものかが明らかになることによって画期的な発見が生まれる可能性があり、また実験から導き出された特徴的な結果からは、まったく新しい物性を予言することも可能になります。国内外さまざまな施設を駆使したX線、放射光、中性子による超精密な観測技術と独自の解析手法による構造物性の探求。それが木村教授の研究の根幹です。けれども「高性能な施設を使えば高精度の観測が実現できるわけではない」と木村教授が指摘するとおり、ほんとうに重要なのは、高性能な施設で得られた測定データを解析する「探求の眼」であり、その探求の眼を支える高度な解析技法の開発です。

「見えていなかったけれども今までちゃんとそこにあった物。正しく測定し、正しく解析すれば、正しく見えるようになる」と、木村教授は話します。構造物性の基本の基本をひとつずつ、ていねいに着実に推し進め、創意工夫を凝らして探求し続ける。そうしたたゆみない挑戦の先にだけ、新たな指標が見えてくるのかもしれませんが。

多元物質科学研究所
計測研究部門
構造材料物性研究分野 教授

木村 宏之

KIMURA, Hiroyuki

1972年大阪府生まれ。1994年東北大学理学部物理学科卒業、1996年東北大学大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程修了、1999年東北大学大学院理学研究科物理学専攻後期課程修了、博士(理学)。1999年東北大学科学計測研究所助手、2001年多元物質科学研究所助手、2007年助教、2008年准教授、2013年より現職。所属学会／日本物理学会、日本結晶学会、日本中性子科学会、日本放射光学会。受賞歴／2006年原田研究奨励賞、2006年日本物理学会誌注目論文賞、2008年日本物理学会若手奨励賞。

<http://db.tagen.tohoku.ac.jp/php/forweb/outline.php?lang=ja&no=4015>

さまざまな物質の物性を 原子・電子レベルで明らかにする

マクロな現象を起こすのは どんなミクロの構造か

木村教授の研究を端的に表現するならば、構造物性研究ということになります。物質の性質というものは、物質内の電子、原子核、電子スピンの分布、配列、運動の状態によって決まってくる、という考えのもとに、今日に見えている現象はなぜ起きているのかを内部の構造を探ることによって説明していこう、という研究アプローチです。マクロな現象としてよく知られた強磁性と言われる性質(磁石)。それは

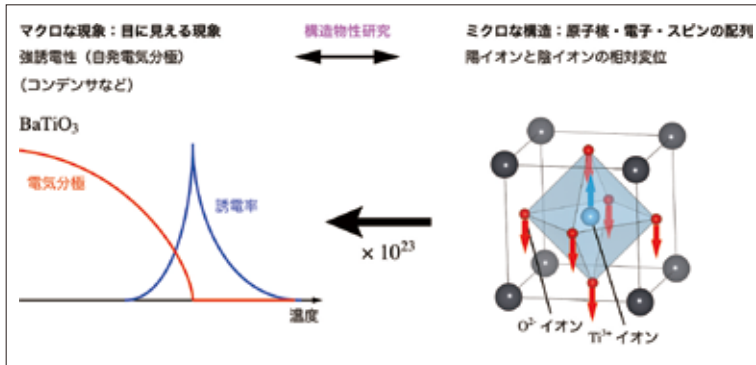
いったいどういうミクロの構造を持っているのかというと、磁気モーメント(電子スピン)の整列と説明できることがわかっています。同じようにコンデンサのような電気を蓄える強誘電性という現象は、ミクロな構造で見ると陰イオンと陽イオンの相対変位であると説明されています。

「強誘電性について少し詳しく説明すると、例えばコンデンサなどの材料として使われるBaTiO₃(チタン酸バリウム)というよく知られた物質があります。誘電分極装置にかけると、ある温度以下で電気分極

中心部にチタンの陽イオンがあり、その周りに酸素の陰イオンがある。ある温度以下から陽イオンは少しだけ上に動くのに対して、周りの陰イオンは少し下に動く。そうするとお互いに重心がずれて電場が発生する。それが10の23乗個の原子すべてで起きるので目に見える強誘電性として現れる。このように説明することができる」と木村教授。

X線、放射光、中性子 ミクロな構造を見る3つの眼

それでは、そのような原子レベルの状態をどうやって調べるのでしょうか。「固体のミクロな構造を見るために、つまり調べる手法として僕らは3つの眼を持っています」と木村教授は話します。1つは、電子を見る眼として適しているX線。2つ目は、X線よりも指向性と信号強度が強い放射光。そして3つ目に、原子核および電子スピンを見る眼として、中性子があります。これらの構造探査を目的として高度に制御された放射線を量子ビームと呼んでいます。

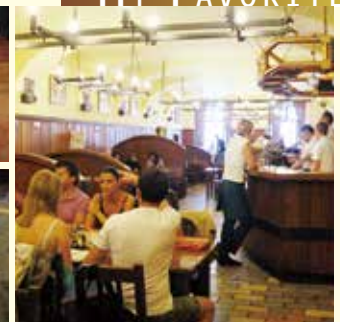


マクロな現象とミクロな構造。BaTiO₃はある温度になると強誘電性を発現するというマクロな現象を示す。これを原子レベルで見ると、チタンの陽イオンが上向きに移動し、それを取り巻く酸素の陰イオンが下向きに移動し、お互いの重心がずれる。10の23乗個すべての原子でこのずれが一斉に起きることで、電気分極という、目に見える現象が起こる。

が現れ、確かに物質が強誘電性になったという、目に見える現象になる。じゃあ、その時に原子の状態はどうなっているかという、

国内外、各地のクラフトビールを探して飲みに行くのが楽しみ

12年ほど前にドイツに行った時に飲んだビールの味が最高で、今ではビールひとすじ。海外出張の際は、各地の特徴的なビールを調べていって飲んでみます。近年ではチェコに行った時に飲んだビールがおいしくて、死ぬほど飲みました(笑)。チェコはビールの消費量が世界一なんです。国内でもやはり各地のクラフトビールが好きで、イベントがあればビールを目当てに出かけます。たとえば盛岡に有名なクラフトビールブルワリーがあり、年2回飲み放題のイベントがあります。その時は妻といっしょに高速バスで行って死ぬほど飲んで、最終バスで帰ってくるというパターンです。いつか、ドイツのミュンヘンで開催されるオクトーバーフェストに2人で行ってみたいというのが、目下の夢ですね。



MY FAVORITE

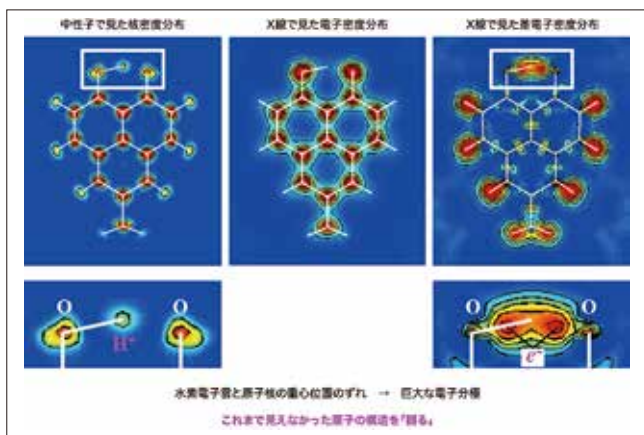


木村研究室の実験室には、単結晶4軸X線回折装置が完備されている。「世界的にもユニークな技術を導入した」と教授が話すように、さまざまな実験室の装置は独自の工夫や技術を取り入れて開発したものが多く、研究の一方の柱として測定技術の向上を目指しているため、高性能の装置の開発は重要なテーマとなっている。

これら量子ビームを発生させるには特別な装置・施設が必要です。X線については、木村研究室の実験室に高性能な単結晶4軸X線回折装置が完備されています。放射光については、高エネルギー加速器研究機構(KEK/茨城県つくば市)のフォトンファクトリーや、大型放射光施設SPring-8(兵庫県)。中性子については、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3Mや、J-PARCの大強度陽子加速器施設(茨城県東海村)など。さらには海外の大型研究施設も駆使して、木村研究室では物質の構造を探索しています。

見えなかった原子の構造を 見えるようにする

X線で見える眼、放射光で見える眼、そして中性子で見える眼。量子ビームの種類によって見える物が違ってきます。「ある水素結合型物質の観測図があります。炭素原子が六角形に並んでいるベンゼン環が3つ、その外側に水素の原子があるような分子を取り出している。これを違う眼で見るとどう見えるか。左図は中性子で原子核を見ている。中央と右はX線で電子を見ている」と木村教授。



水素結合型物質における電子分極の観測。注目したいのは白い枠の部分で、拡大図がそれぞれ下部に示されている。左拡大図には中性子で見た水素の原子核が中央部に見えている。右拡大図はX線で見た水素が持っている電子1個の分布を表していて、2カ所の赤い部分が電子が分布している存在確率が高いところである。水素の電子1個は1カ所にじっとしているのではなく、この2カ所の間を絶えず行き来している。原子核と電子の位置のずれが巨大な電子分極を生み、その分極がこの物質の目に見える性質を支配している。



日本原子力研究開発機構の研究用原子炉JRR-3M(茨城県東海村)に設置した単結晶4軸中性子回折装置を操作する木村教授。木村研究室のスタッフは、このほかフォトンファクトリー(茨城県つくば市)の大型放射光施設など、国内外の中性子施設、放射光施設におけるさまざまな実験のための出張の機会が多い。

中性子で見ている左図は、赤いところが炭素の原子核の存在確率分布。外側の黄色いところは水素の原子核。一方中央と右はX線で電子の存在確率分布を見えています。中央は炭素と酸素の電子が写っています。右図は同じデータをさらに高度に解析したもので、炭素の外側にある水素の電子をとらえています。水素は電子を1個しか持たないので、観測するのは極めて難しいのですが、木村教授は観測を実現させました。さらに図の白い枠の中に注目すると、両側の酸素原子に挟まれて水素の原子核があり、左図はまさしくその状態を表しています。さて右図の白い枠の中はというと、「水素が持っている電子1個がどういう状態なのかを示している。電子1個のはずなのに、存在確率が高いことを示す赤い部分が2カ所あるように見えている。つまりこれは電子にとっての安定な位置が2つあり、その間を絶えず行き来していることを示している」と、木村教授は解説します。

TERM INFORMATION

構造物性研究

物質が示すマクロな現象(=物性)の起源を、原子・電子の配列とそれらの運動というミクロな性質(=構造)を調べることで明らかにする研究。ミクロな性質を調べる有力な手段として電子線、X線、中性子などによる回折・散乱分光法がある。

電子スピン

電子が持っている内部状態のことであり、現在もスピニングが生じるメカニズムが完全に解明された訳ではない。上向き角運動量を持つスピン(アップスピン)と下向き角運動量を持つスピン(ダウンスピン)の2つの状態を持つが、電子が自転しているとすれば、その自転の回転方向(右向きか左向き)により、アップとダウンの向きが決まると考えることができる。電子はこのスピニングに対応した磁気モーメントを持つ事ができるが、これが、負の電荷という、電気的性質以外に磁石の性質を持つ起源となっている。

電気分極

絶縁体(電気を通さない物質)に外から電場をかけたとき、電気双極子という、物質内部の正負の電荷のペアが整列して、マクロに電位差が生じる現象。ミクロな原子レベルで見れば、正負の電荷が陽イオンと陰イオンに対応し、それらの位置が互いにずれることでペアが生じる。電場をかけなくても「自発的に」ペアを作り出して分極を生じる物質を強誘電体と呼ぶ。

電子分極

上述の電気分極はイオンの相対変位による電気双極子が源になっているため、イオン分極、あるいは原子分極とも呼ばれる。それに対して電子分極は、原子内の原子核とそれを取り巻く電子雲の重心位置がずれる事によって生じる電気双極子が源になっている。前者が原子と原子の間で生まれるのに対し、後者は1原子の内部で生まれる。

単結晶4軸回折装置

単結晶とは、物質が原子レベルで規則正しく配列し、目に見える大きさまで成長した結晶のことである。例えばサファイヤやルビー、ダイヤモンドなどの宝石は単結晶である。単結晶はあらゆる方向に無数の反射面を持ち、量子ビームに回折を起こす。これらの無数の面からの回折を捉えるための装置が単結晶4軸回折装置である。回折線を捉える検出部の回転で1軸(2θ軸)、そして単結晶を3次元のあらゆる方向に向けて回折の条件を作るための回転軸が3軸(ω、χ、φ軸)あるので、4軸回折装置という。

見えなかったものを見ることで 新しい物性を予言する

解析の精度が上がれば 物理が変わる

「(前ページ下段の)中央の図は、炭素や酸素、水素がここにいるよね、ということを示しているだけで、これは物理ではない。ここにいた結果、何が起きて物理的な性質を決めているのかを明らかにすることが、物理学者の基本的な姿勢」と木村教授。「白い枠の中の水素原子のミクロな構造が明らかになった。中性子とX

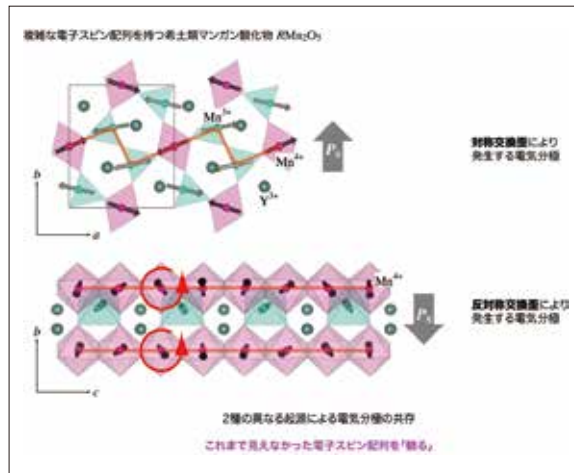
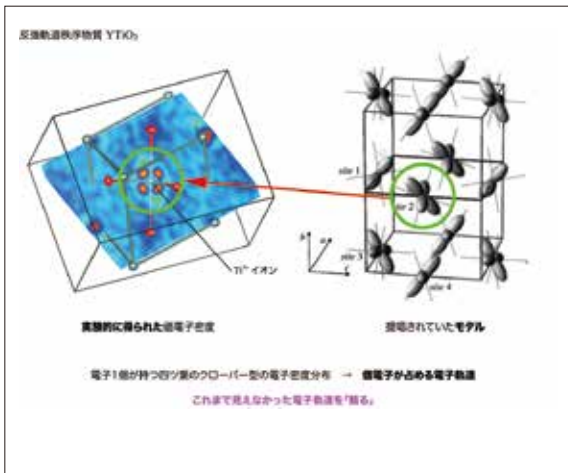
線の2つの目を組み合わせることで、観測技術を向上させ、構造を正確に見ることによって物理が新しいところに進んでいける」と話します。

「容易に想像できると思いますが、信号が弱いところを無理に強調すれば、うその情報も強調してしまうことになる。結局は、信号が強いところから弱いところまで、高精度で計測しないとイケない。観測データには実は全部の情報が入っている。ほ

んとうに見たい情報を、うその情報と区別してどうやってあぶり出すか。それが観測技術の精度向上という課題」と木村教授は指摘します。見えなかったものを見るようにしたいというのが、研究の本質。だからこそ、木村研究室では測定技術、解析技術の向上も研究の重要な柱になっているのです。

放射光により 電子軌道の観測を実現

次に、2番目の見る眼として挙げた放射光を用いた超精密構造解析によって、原子から一番外側にある価電子を観察しようという事例です。 YTiO_3 (酸化イットリウムチタン)の中のチタンイオンは19個の電子を持ち、そのうち1個だけが価電子。その価電子の存在確率を調べた結果です。「今まで価電子の電子軌道はどう考えられていたか」というと、1個の電子が4つ葉のクローバーのような形の電子軌道上に存在するというモデルで説明されていま



左 / 放射光による YTiO_3 という物質の価電子の観測。木村研究室では、価電子の電子密度を、実験的に可視化することに成功した。従来モデルでイメージされていた電子軌道を、先入観なしに、直接的に観測したことになる。
右 / 中性子を使って希土類マンガ氧化物の電子スピンの配列を見ることによって、強誘電性を生む2種類のメカニズムが1つの物質に共存していることを、世界で初めて実証した。

た。それにそってマクロな現象に対する物理的解釈が為されていたわけです。けれども僕らはそんなモデルの仮定を一切しないで、実験結果だけから解析して、電子軌道を直接的に観測した」。ここ2、3年ぐらいい研究していて、これまで見えなかった電子

フリークライミングで、ヨセミテの300メートルの絶壁に挑戦

フリークライミングにはまっています。ボルダリングとも言いますが、道具は使わないで手と足と体の力で岩に登るスポーツ。7~8年前から娘といっしょに始めました。よく出かけるのが山形の岩場。命綱をして自分で安全確保しながら登ります。ふだんはクライミングジムに行き練習します。クライミングの聖地と言われる米国カリフォルニアのヨセミテ渓谷にも行きました。花崗岩の絶壁がある有名なスポットがあり、高さ300メートルのクライミングに挑戦しました。ロープは60メートルなので、その範囲内で2人1組で何カ所か支点を作って登ります。どのルートをとるか考えながら、探しながら、ほぼ1日がかりのクライミングになります。挑戦して壁を乗り越える感覚を体で実感できるところが好きですね。



価電子

原子内の最外殻の電子軌道を占める電子のこと。文字通り原子の一番外側の電子であるので、隣り合う原子と化学結合や化学反応を起こしやすい。また無数に配列した結晶が示す物性に深く関わっている。一方で原子核に近い軌道を占める電子(内殻電子)は物性にはほとんど寄与しない。物質のミクロな構造から出発してマクロな現象を理解しようとする場合、最外殻を占める価電子の構造及び運動を理解することが最も重要となる。

多重散乱

量子ビームが物質中に入射して散乱・回折を起こすのは一回切りとは限らず、複数回の散乱・回折を起こして物質の外に出て行く場合がある。これが多重散乱である。多重散乱により、本当の散乱・回折強度に対して多重散乱による「ニセの」強度が重なる(あるいは逆に多重散乱により本当の強度が減じられる)場合があり、これが解析によって得られる原子核・電子密度分布に誤差(ノイズ)を与えてしまう。多重散乱を回避して本当の散乱強度の情報を引き出すのは極めて難しい測定技術であり、世界的にも実現できている研究グループは多くない。



木村研究室では、X線・放射光・中性子を用いた精密な電子・原子核密度分布の解析に基づく構造物性の研究を基本としている。このため低温・強磁場・高圧下などの多様な環境条件の下での観測技術の研究も重要なテーマとなっている。写真は実験室にある極低温電分極測定装置。微細な試料に端子を接続して測定する。



軌道が見えてきつつあると木村教授は話します。正しいものを測っていれば正しいものが見えてくる。木村研究室が測定や解析技術を向上させてきたから実現できたと言えます。測定技術の高精度化を妨げている最大のものは、多重散乱です。つまり、量子ビームを試料に入射させた時に、原子との衝突を多重的に繰り返すために進行方向が変わってしまい、回折信号にうその情報が含まれてしまうことです。「100のものが110に見えてくる要因を除いてやり、100を100として測れる技術の開発が、僕らの研究の鍵とも言えることです」と木村教授は話します。

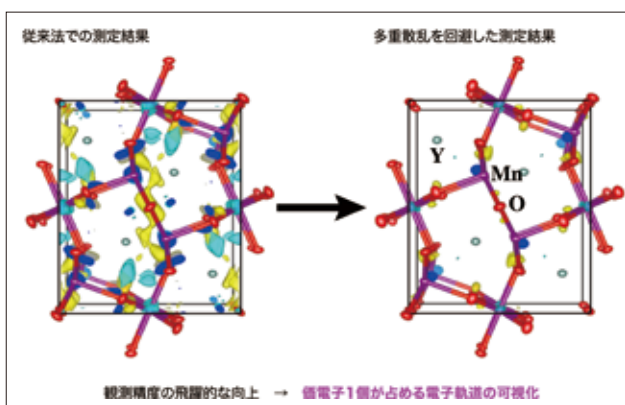
装置はあくまでも装置 解析する眼と解析力こそ重要

もう1つ、中性子を使って電子スピンの配列を見る眼について紹介します。希土類マンガ氧化物(RMn_2O_5)を取り上げ、木村研究室において磁気的な性質と電気的な性質を調べたものです。従来、磁気的な性質と電気的な性質がつながっているとわかってはいましたが、それがミクロにどのような構造に起因しているのかわか

りませんでした。木村研究室では、マンガンイオンが鎖型配列を為した状態によって磁性が発現し、イオンの持つ磁気モーメントの配列が電気的な性質を生むということ、原子レベルで観測することに成功しました。さらにこの物質は、2種類のメカニズムで強誘電性が現れる、他に例がない物質であるということ、中性子を使って世界で初めて観測しました。

「高性能な施設・装置を使えば観測できるかという、そんなことはない」と木村教授は話します。多重散乱回避技術の開発など、測定のアプローチをどうするか、観測するためにどんな眼を使い、得たデータをどんな技術で解析するか、常に考え、工夫しなければ、決して実現できない構造の可視化。「見えなかったものが見えるようになることで、ほかにもっと面白い現象があるかもしれないと推測したり、予言したり、次のステップや世界に行けるようになる。そういう橋渡しをしていくことが僕らの役割と考えている」と木村教授。新しい物性の予言、新しい物性観測手法の開発など、木村教授の探求はさらに続きます。

左図は従来の測定方法により得られた残渣電子密度分布である。右図は多重散乱回避技術という高度な測定手法により得られた残渣電子密度分布である。どちらも非常に密度レベルの低い所が強調されているが、従来法で黄色と水色のノイズ(うその情報)がY、Mn、Oの各原子周りの密度を覆い隠してしまっているのに対し、多重散乱回避法では、ノイズをほぼ消し去る事に成功している。価電子1個が占める電子軌道の可視化には必須の技術であり、このレベルで電子密度分布を可視化できるのは、世界でも木村研究室だけである。





FOREFRONT REVIEW

横山研究室では、豊富な経験を持つ高圧力下における反応と分離に関する研究などを基盤として、化学工学・反応工学の基本である溶媒に着目。さまざまな溶媒の熱物性を正確に知ることを出発点として、イオン液体の合成とその触媒活性に関する研究、超臨界流体を反応溶媒とする化学プロセスの研究、超臨界アンモニアを溶媒としたアモノサーマル法による GaN 結晶作成などの研究を続けています。

これらの研究により、低環境負荷、資源循環などを視野に入れた新しい反応プロセスの提案を目指しています。



超臨界流体、イオン液体を用いた 革新的なプロセスを提案

物質が溶けるとは、どういうことだろう。化学反応を起さずに目的物を溶かすことができる性質とは、どんなことだろう。例えば、半導体デバイスとして期待され、非常に安定した物質と言われる窒化カリウムは、塩酸にも硫酸にも溶けることはありません。「ところが、超臨界アンモニアにはよく溶けるんですよ、面白いでしょ」と横山千昭教授。化学プロセスにおいて最も基本的な構成要素技術である溶媒に着目し、さまざまな新奇な溶媒を創り出して、新しい反応プロセスの開発に取り組んでいます。

横山研究室は、溶媒や触媒の研究を行うにあたり、2つのキーワードを持っています。1つは、ある一定の温度・圧力の下で気体と液体の区別がつかないような物質の状態である超臨界流体。昭和50年代後半、多元研の前身である東北大学非水溶液化学研究所において日本の超臨界流体の研究がスタートしました。以降、数多くの研究が積み重ねられてきた系譜に、横山研究室はさらに新しい試みによる成果を書き加えています。

もう1つは、低い融点を持ち液体として存在する塩であるイオン液体。やはり早い段階から着目した横山研究室では、陽イオンと陰イオンの構成を自在に組み合わせ、多くの興味深いイオン液体を合成してきました。イオン液体そのものも近年大きく注目される中、新しい反応プロセスを目指した研究が進められています。

超臨界液体とイオン液体を組み合わせた新奇な溶媒・触媒の発見にも挑戦してきました。そこには、新しい切り口として酸性触媒や光触媒という、より革新的な材料開発への方向性が見えてきました。そしてその先には、低環境負荷、資源循環、低コストといった化学工学の大きな目標への展望が開けています。今もさらに新しい軌跡を記すべく、横山研究室は歩み続けています。

多元物質科学研究所
無機材料研究部門
超臨界流体・反応研究分野 教授

横山 千昭

YOKOYAMA, Chiaki

1953年生まれ。秋田県出身。1976年3月東北大学工学部卒、1978年東北大学大学院工学研究科修士修了(化学工学専攻)、1981年東北大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。工学博士。1991年東北大学反応化学研究所助教授、1996年同研究所教授、2002年東北大学多元物質科学研究所教授。所属学会／化学工学会、日本化学会、石油学会など。日本化学会東北支部庶務幹事、日本高圧力学会理事、日本熱物性学会編集委員長など歴任。1992年石油学会奨励賞。

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=63>

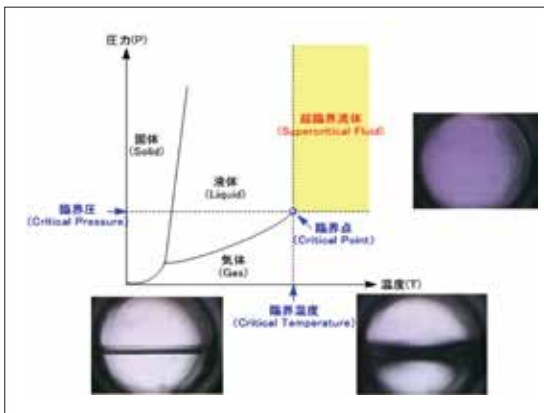
多様な組み合わせから 新しい溶媒と化合物を作成する

溶媒の開発などを基本に 非水研時代からの取り組み

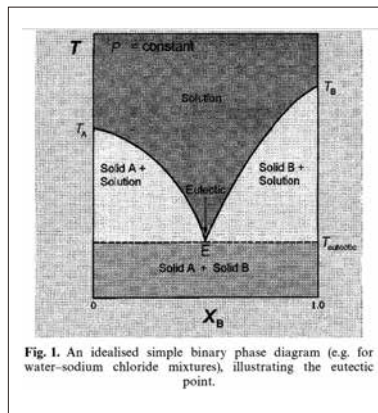
横山研究室の研究は、化学工学をベースとして溶媒や触媒、超臨界流体、イオン液体などを扱うのが基本となり、その技術的成果や反応プロセスの開発においては、石油化学工業への応用と密接な関係があると言うことができます。

そこで、研究テーマの背景について少し時代を遡って振り返ってみます。昭和30年代、石油化学工業の発展に伴い、

炭化水素混合系の研究の必要性が高まり、多元研の前身の1つである東北大学非水溶液化学研究所(略称:非水研/1949年発足)の高圧化学部門においてアンモニア溶媒や臨界点の研究など高圧流体の物性研究が開始されました。昭和50年代後半、ドイツを中心に超臨界流体の研究が動き始め、日本では東北大学によって超臨界流体の高度利用研究が開始されました。横山教授は、昭和58年4月、当時の非水研高圧化学部門の責任



左図は物質の臨界温度と臨界圧を超えた超臨界流体の状態を示したものです。左下の写真は、まだ温度も圧力も低く、下に液体、上に気体の状態。右下写真は臨界点にかなり近づいた状態で、液体と気体の境い目が揺れ動き、光も透らなくなりつつある。臨界点を超すと朝焼けのような色を帯びる。横山研究室では、この臨界点を超した超臨界流体の反応を研究する。右図は横山教授の研究の原点となった固体と液体の状態を示す相図。単体では融点が高い2つの物質を混合すると融点が下がり、室温でも液体になるという状態を示している。



者高橋信次研究室の助手となり、高圧流体物性計測の研究に携わりました。その後、改組した反応科学研究所(1991年発足)、多元研(2001年発足)時代に至り、溶媒および触媒の開発、超臨界流体・イオン液体の研究へと変遷していきます。

「非水研時代に相図というものに出会い、私の研究の原点となりました。例えば、それぞれ高い融点を持つ2つのある物質を混ぜると単体の時よりはるかに低い融点になることがある。そういう固体と液体の状態図のことです。これは融点降下と言いますが、物質の融点は物質の構造と密接な関係があります」と横山教授は話します。

超臨界流体の研究から 新奇な溶媒や触媒の開発へ

「私たちの研究室でいま注目しているのは、超臨界流体と言われるもの、それからイオン液体と言われるもの。さらにこの2つの組み合わせから、さまざまな新しい分野へのアプローチにも取り組んでいます」。まず1つ目の超臨界流体と言われるものの代表は、水、二酸化炭素、NH₃(アンモニア)の3つです。

超臨界流体とは、臨界点以上の高温高圧にあり、気体と液体の区別がつかない状態の物質のことです。例えば、水の臨界点は約380℃、約220気圧で、それ以上の高温・高圧下にある水を超臨界水と言います。超臨界水は極めて酸化力が高く、腐食しにくいとされている物質も容易に腐食させることができ、安定と言われる物質も分解することが可能という特徴を持っています。

グランドソフトボールに出会ってから、コーチ役として参加しています

私は野球が好きなのですが、知人を通じてグランドソフトボールという目が不自由な人たちの野球に出会いました。ハンドボールの大きさのボールが投手が下手で転がして、打者はバットで打つ。音や声を頼りにして、ソフトボールに近い、ルールでやるスポーツです。私はそのコーチとして参加しています。選手が走る時など、手をたたいたり、声を出したりして、誘導するんですね。

県内では、宮城県と仙台市の2チームあります。両チームとも宮城県立視覚支援学校のグランドで練習しています。私は仙台市の方のチームを手伝って、日曜日に時々やっています。歴史のあるスポーツで国体開催に合わせて全国大会もあります。昔、長野県大会に私たちのチームが北海道東北ブロック代表で出場したこともあります。

MY FAVORITE



岐阜の国体に参加した時の写真です。ピンクのジャケットの女子は地元の女子高生のボランティアです。ユニフォームの裾が赤は全盲選手、その他は弱視の選手と我々走塁コーチです。

TERM INFORMATION

溶媒

固体・液体・気体などを溶かす物質を溶媒と言います。溶ける方の物質を溶質と言います。砂糖水の場合、水が溶媒、砂糖が溶質となります。

触媒

触媒が共存すると、触媒自体は化学変化しないけれども反応速度は増大します。活性の高い触媒ほど、少量の使用で大きな効果が得られます(触媒活性が高いと言います)。

相図

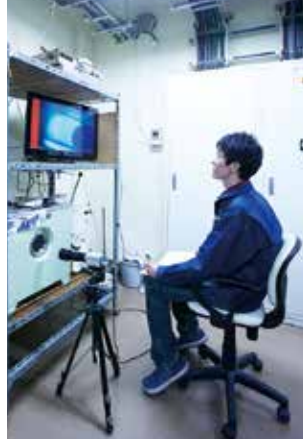
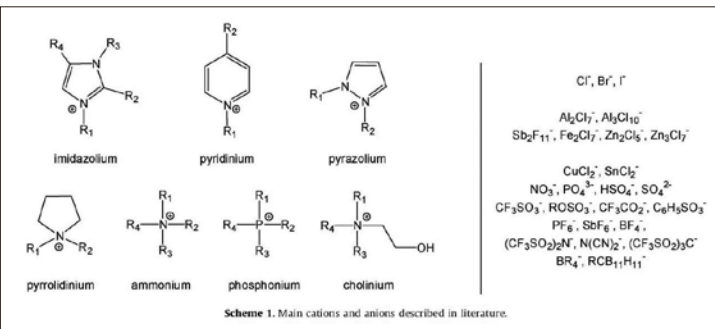
すべての物質は、温度、圧力(密度)の条件によって、固体、液体、気体のいずれかの状態、もしくは複数の状態が共存する平衡状態が得られます。二種類以上の物質を混ぜた混合物では、温度、圧力(密度)、組成の条件によって様々な平衡状態を取ります。相図とは温度、圧力、組成などの条件によって物質がどのような状態を示すかの関係を示した図です。

カチオンとアニオン

中性の原子や分子が電子を放出することで生じるものをカチオン(陽イオン、生イオン)という。金属元素から生じる金属イオンはカチオンの代表的なものである。一方、中性の原子や分子が電子を取り込むことで生じたものをアニオン(陰イオン、負イオン)という。例えば、食塩(NaCl)は水(溶媒)に溶けるとナトリウムカチオン(Na⁺)と塩素アニオン(Cl⁻)に分かれます。

電解質

水などの溶媒に溶けて、アニオンとカチオンに分離する(このような現象を電離という)ような物質を電解質と言います。食塩(NaCl)は代表的な電解質です。



図／イオン液体はイオンだけで構成されるが、構成要素である陽イオン(カチオン)と陰イオン(アニオン)の組み合わせを変化させることでさまざまなイオン液体を合成することができる。左側のグループが陽イオン(カチオン)、右側のグループが陰イオン(アニオン)の例。

写真／横山研究室では、イオン液体などの熱物性(粘性率や熱伝導率など)を高い精度で測定することをベースに、さまざまな化合物の合成および分析に取り組んでいる。



また超臨界流体の二酸化炭素は、さまざまな物質を溶解します。「このため今までは重金属や強酸などの触媒を使ったり、可燃性や毒性のある溶媒を使っていた、すなわち危険性があつたり環境負荷が大きかったものの代わりに超臨界流体を使えば、より安全で環境負荷の少ないプロセスにできるということ」と横山教授は説明します。超臨界流体を基盤とした研究は、その先に溶媒や触媒としての機能性の開発というテーマが開けているということになります。

ほとんど蒸発しない。不燃性である。液体として利用できる温度域が広く400℃ぐらいでも安定である。など化学的に興味深い特徴を持っています。

「構成要素の陽イオン(カチオン)と陰イオン(アニオン)の組み合わせが無数にあるため、目的に合った化合物を作ることができます。イオン液体の用途として期待が大きいのは、化学分野では環境負荷の低い触媒や溶媒として、また蓄熱材料として。高分子化合物の分野では電解質ですね。それからエネルギー分野では燃料電池など。さまざまな分野での応用が注目されています」と横山教授はイオン液体の可能性について話します。ちょうど2000年頃からイオン液体の化合物が増え始め、それとともに用途の間口も格段に広がってきたと言うことができます。

さまざまな分野への応用が期待されるイオン液体

次に2つ目のイオン液体についてです。イオン液体とは常温下では固体ですが、ある化学的な加工を施すと融点が低くなり、室温付近でも液体状態になる「塩」の1種、つまりイオンだけから成る物質です。「塩の代表であるNaClは約800℃まで加熱しないと溶けませんが、イオン液体は融点がだいたい100℃以下のものを指します」。電気を通す。



さまざまな分野での応用が期待されているイオン液体。ピンクの領域は化学。ブルーは高分子化合物、グリーンはエネルギー分野を表す。化学分野では環境負荷の低い触媒や溶媒、蓄熱材料として。高分子化合物の分野では電解質、エネルギー分野では燃料電池などへの期待が大きい。

窒化ガリウムの結晶は光触媒としても使えることがわかってきた。窒化ガリウムの結晶粉末は薄茶色味を帯びているが、溶液に光をあけると無色透明に変化する。



品質と育成速度の向上により 高機能な結晶作成を目指す

超臨界流体とイオン液体を 組み合わせる試み

横山研究室では、超臨界流体とイオン液体を組み合わせることによって、さらに新しいアプローチを試みています。1つは「酸性触媒」という切り口です。もともとイオン液体は酸性であり、そのものが酸触媒として使えるものですが、イオン液体は大量の工業的な需要がない限り非常に

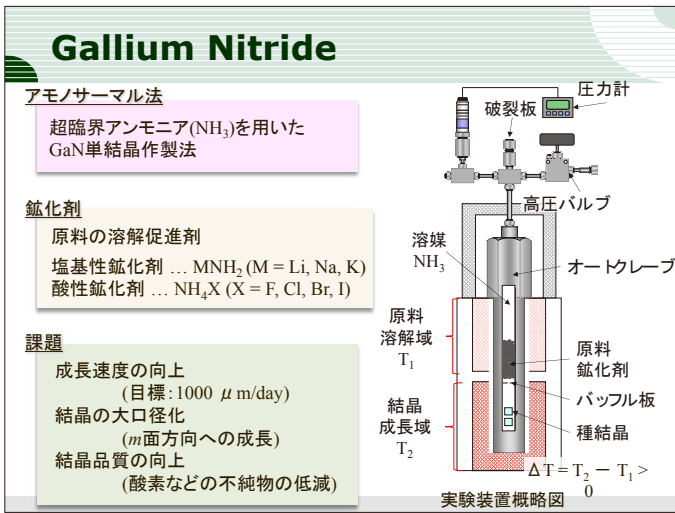
高価であるという難点があります。「高いから、もし使うのであれば再利用したい。再利用するには分離生成をしないといけないが、それが難しい。物をよく溶かすということは、そこから目的物質を取り出すための手段がない、という状況がある」と横山教授。こうした難点を突破することを意図して、イオン液体と相性のいい超臨界流体を組み合わせることで、新しい機

化成品製作の原料として注目されているものです。一連の流れから見ると、より安価に合成できる酸性触媒の開発によって、より安価な化成品作成プロセスや低環境負荷・資源循環に結びつけられるという道筋が現れてくるということになります。

窒化物の結晶を 光触媒として利用する

超臨界流体とイオン液体の組み合わせの2番目の方向性は、「光触媒」です。「どういうことかと言うと、まず東北大で超臨界流体の1つである超臨界アンモニアを溶媒として、窒化物半導体としても知られるGaN(窒化ガリウム)を結晶成長させることができるようになった、という背景があり、さらにGaNの結晶は光触媒としても使えるということがわかってきた」と横山教授は話します。

光触媒とは太陽などの光が当たると、その表面で強力な酸化力が生まれ、接触してくる有機化合物や細菌などの有害物質を除去することができる材料のことで、近年では光触媒物質を構造物の表面に塗布する応用が広がっています。そうした光触媒の材料を、GaN、AlN(窒



アモノサーマル法による窒化ガリウム単結晶作成を行う装置の概略図。アモノサーマル法は多量の生産にも対応できるため化学工学的に有利とされる。横山研究室では、溶媒として超臨界アンモニアを用い、原料溶解促進剤として酸性酸化剤を使って、高压容器内で反応させる。

能的でしかも安価な酸性触媒を合成できないか、という取り組みが進められています。

例えばグルコース(ブドウ糖)に、ある酸性触媒を用いることによってヒドロキシメチルフルフラール(HMF)という化学物質を合成できるということがわかっています。HMFとはプラスチックやさまざまな化成品の原料となる物質で、石油に依存しない

科学に限らず、歴史や漢詩も好き。知らなかったことを知る面白さが楽しい

基本的に本を読むのが好きです。小説ではロボットやコンピュータに関するもの、例えば2040年代には人工知能が人間を超えると言われるテーマなど面白いですね。科学技術も、歴史も好きです。

最近では詩吟や漢詩に凝っています。漢詩にふれていると、詩の内容とともに作者などいろんな人物のことも学べます。尊王攘夷思想に影響を与えたとされる頼山陽。それから米沢藩士から維新政府の議員になったものの反抗的と見做され処刑された雲井龍雄の漢詩は、自由民権運動の志士によく読まれたそうです。詩吟は、よく行く飲み屋で今の師匠と会ったのがきっかけですね。その師匠は仙台藩以来の伝統がある刀研ぎの職人です。すべからく、知らなかったことを知って刺激を受けるのが最高に面白い、ということでしょうか。

OFF TIME



詩吟の会と東北大邦楽部と三井化学邦楽同好会の交流会の写真。三井化学の同好会の主催は私の教え子であり、高校の後輩でもあります。東北大の邦楽部には津軽三味線の世界大会3位の名人もいます。



TERM INFORMATION

酸性触媒

酸っぱい味がしたり、金属の錆を溶かすなどの性質を持つ物質を酸と言い、酸の持つ性質を酸性と言います。触媒の中でも、酸性を示す触媒が酸性触媒で、硫酸や塩酸などは実際によく使われている酸性触媒です。硫酸などの酸性触媒は環境汚染の原因になることがあり、代替物質の探索が望まれています。

光触媒

酸化チタンや酸化亜鉛などの半導体の性質を持った物質を、反応系に共存させて、光を照射してやると、反応速度が増大することがある。これは酸化チタンや酸化亜鉛が光を吸収して得たエネルギーが反応促進に使われたと考えることができる。このように光エネルギーを利用して反応促進効果を示す物質を光触媒と言います。

非定常短線測定

流体の熱の伝わりやすさの尺度である熱伝導率を測定する方法の一つである。10mm程度の短い長さの白金細線(直径10 μ m程度)に電流を流し加熱し、発生した熱が流体中をどのように伝わるかの実験と数値解析の両方を行い、熱伝導率を決定します。単線を使うのが特徴であり、少量の試料でも測定が可能となります。新しい測定法で、世界では2つの研究所で測定に使われています。

バルク単結晶

不純物を含まない均一な組成を持ち、単一の均質な結晶構造が無限に繰り返されている結晶をバルク単結晶と言います。SiやGaNなどの半導体デバイスを低価格で作るためには直径が数cm程度の円柱状のバルク単結晶の作製が必要となる。

HMF

ヒドロメチルフルフラールという名称の化合物である。糖の脱水反応により得られる。木材などのバイオマスをいったんHMFに変換できれば、HMFを出発物質として様々な化学物質に変換できるため、HMFはバイオマス有効利用技術の開発においてカギとなる物質の一つである。

化アルミニウム)、InN(窒化インジウム)などの窒化物からつくろうという研究です。

「今はそのほかに、窒化ガリウムの結晶粉末の表面に酸性のイオン液体を化学結合させて触媒をつくる研究もしています。このようにさまざまな化学反应用の触媒や、光触媒への応用を目指し、結果的に新しい化学プロセスをつくっていきたい」と横山教授。

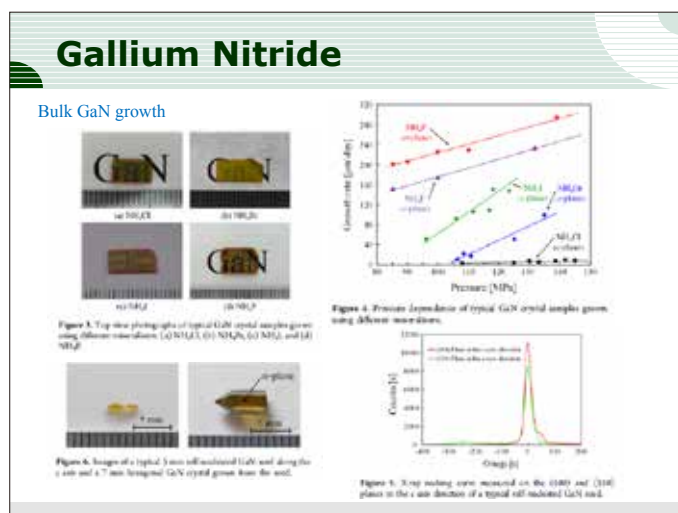
また、3番目の切り口としては、「物性測定」を研究の重要な柱としてとらえているということです。「イオン液体など新しい溶媒の熱物性の測定では、非定常短線測定装置など特殊な測定装置を自分たちで作って、密度、融点、粘度、熱伝導率などを測っています」。

高性能な窒化ガリウムの結晶作成を目指して

最後に、窒化ガリウムの結晶成長についてです。2014年に青色発光ダイオード

の研究で日本の研究者3人がノーベル物理学賞を受賞しました。この青色LEDの材料として用いられるのが窒化ガリウムです。高性能半導体デバイスが求められる中で、熱伝導率が高く、バンドギャップが大きいなど効率向上、省エネ、機器の小型化に貢献し得る窒化ガリウムへの期待は大きく、これを安価に製造することが化学工学界の課題となっていました。

横山教授は、超臨界アンモニアを溶媒として窒化ガリウムを結晶成長させる試みを続けてきていました。単結晶作製法として、横山教授はアモノサーマル法を選択しています。これは比較的温和な育成条件、量産性があるなどメリットがあり、有力視されている手法です。「原料の溶解促進剤として、われわれは酸性鉱化剤を使い、超臨界圧アンモニアに耐える耐圧容器内で結晶育成を行い、多元研チームとしてGaNバルク単結晶の高速育成に成功しています」。これからも、成長速度のいっそうの向上、結晶の大口径化、結晶品質の向上という課題に向かい、横山研究室の挑戦が続きます。



窒化ガリウムは従来の半導体よりも高速な動作、耐熱性など優れた特性を有しており、次世代半導体への応用が期待されている。この窒化ガリウムの高品質なバルク単結晶をアモノサーマル法によって育成することが、横山研究室の1つの研究の柱となっている。高速育成、品質の向上など、より完成度の高い結晶育成を目指した取り組みが行われている。



FOREFRONT REVIEW

佐藤俊一研究室では、現在レーザーを中心とする最先端のフォトニクス技術を駆使して、光と物質との相互作用の研究を進めています。レーザーから広がる新しい物質科学の世界。新しい材料の創成や機能の発現、プロセスの開発などを大きな目標としています。



新しいレーザーの可能性を追求し 光科学と物質科学の最先端融合研究へ

レーザーを中心としたフォトニクス技術から、新しい物質科学の創成へ。このコンセプトをもとに最先端のレーザー技術を軸として展開している佐藤研究室が、現在具体的に進めている主たる研究テーマは、大きく分けて2つの方向性があります。

一つ目の方向性は、ベクトルビームについての研究。光(電磁波)の本来の性質であるベクトル性を持ったベクトルビームについて、その物理的な性質を探るとともに、ビーム発生法の開発とビーム品質の改善に取り組みながら、レーザー加工や超解像顕微鏡などへの応用研究を総合的に進めています。

ベクトルビームといっても、ドーナツ型の強度分布を持つ径偏光と方位偏光といった低次元のものから、多重リングや花びら型の強度分布と方位方向に電場ベクトルが回転する複雑な偏光分布を持った高次元のものまで様々。佐藤研究室では強度、位相、偏光を精密に制御したベクトルビームの特性を実験および計算的手法の両面から明らかにするとともに、微小スポット形成能や強い軸方向電場を利用したナノイメージングの実現を目的としています。

偏光、強度だけでなく位相も制御することで、従来のスカラービームにはない新しい光ビームの特性を探り、その応用技術の開発に取り組んでいます。

二つ目の方向性は、高強度レーザーについての研究です。集光したフェムト秒レーザーパルスによって形成される強い光の場を新しい非平衡・非線形・超高速プロセスの場として利用しています。焦点付近に形成された超高光強度の励起反応場により、従来の手法・プロセスでは困難だった全率固溶合金ナノ粒子などを作製する研究を進めています。

多元物質科学研究所
光物質科学研究分野 教授

佐藤 俊一

SATO, Shunichi

1958年福島県生まれ。1981年東北大学理学部物理第二学科卒業。1983年東北大学大学院工学研究科博士課程前期2年の課程電子工学専攻修了。同年東北大学電気通信研究所助手に採用。選鉱製錬研究所講師、素材工学研究所講師および助教授を経て、2001年より現職。所属学会:応用物理学会、日本金属学会、OSA (The Optical Society)。2013年~2015年応用物理学会理事。2015年科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門受賞。

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

ベクトルビームの特性を探り 応用技術の開発に取り組む

偏光分布のあるベクトルビームから 「光科学」と「物質科学」の橋渡し

「もともと私は東北大学電気通信研究所に在籍しており、稲場文男先生のもとレーザーの応用研究に携わってきました。稲場先生はレーザーが世の中に出た1960年ぐらいから研究されていた方で、レーザー開発の草分け的な方です。私自身もレーザーの発展とともに研究を進めてきたと言えます」と感慨深く語る佐藤俊一教授。

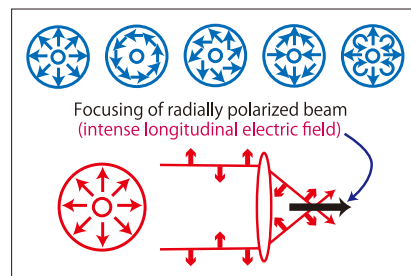


佐藤研究室の研究のひとつの方向性であるベクトルビームについての研究。その物理的な性質を探るとともに、ビーム発生法の開発とビーム品質の改善に取り組みながら、レーザー加工や超解像顕微鏡などへの応用研究を総合的に進めています。

佐藤教授が手がけるのは、特殊なレーザー。最先端のレーザー技術を使って「光科学」と「物質科学」の橋渡しを行う研究を行っています。

「光とは電場と磁場が振動して、それが伝わっていく電磁波の一種です。この電場の向きが偏っていると偏光と言います。通常のレーザーではビーム断面のどここの場所でも偏光状態が同じでした」。

ビーム内の偏光の向きが同じビームをスカラービームと言います。それに対し、偏光分布が不均一なレーザー光を発生させることも可能であり、これをベクトルビームと言います。レーザー光の偏光には直線や円偏光が知られていますが、特に軸対称な偏光分布を持ったビームがあり注目しています。「偏光、強度だけでなく位相も同時に制御することで、従来のスカラービームにはない新しい光ビームの特



ビーム断面において偏光分布が不均一なビームをベクトルビームと呼びます。その中でも径偏光ビームは、ビームを絞った時、電場が光の進行方向と平行になることが特長です。

性を探り、その応用技術の開発に取り組んでいます」。

スポットを小さくし分解能を高める 超解像顕微鏡の開発へ

佐藤研究室が取り組んでいるベクトルビーム。このベクトルビームにはどのような特性あるのでしょうか？

「軸対称偏光ビームの中でも、特に中心から放射状に偏光が分布する径偏光ビームは、ユニークな特性を持っています。ビームを絞った時、通常は光の進行方向と電場は垂直になります。しかし径偏光ビームでは電場が光の進行方向と平行になることにより、高い集光特性を発揮します」。

径偏光ビームの強い集光性により、小さなスポットを作りだすことができ、これにより超解像の顕微鏡の開発に活用できると佐藤研究室では注目しています。スポットが小さくなることにより分解能が高くなるというわけです。

「従来までは、光の波動性による回折限界のため、200nm程度が空間分解能の限界でした。しかし、高い集光特性を持つベクトルビームを用いることにより、光

威風堂々とした姿に魅了され、各地にある「現存天守閣」めぐり

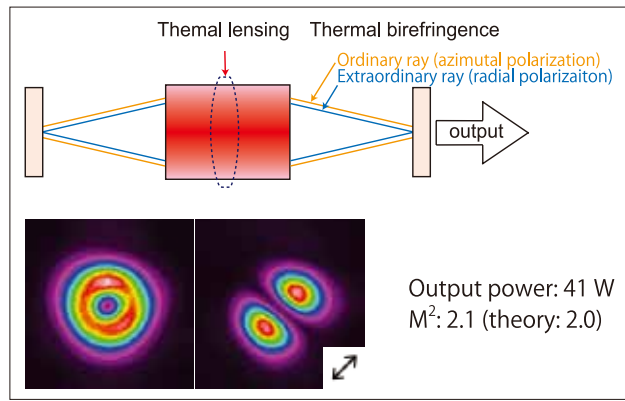
ある時、城を観に行こうと、姫路城に行ったのですが、その勇姿に圧倒されましたね。その時、天守閣が残っているお城が全国に12箇所あると聞いて全部行こうと思立ちました。

西日本に多いですね。ですから簡単には行けない。共同研究で松山に行った時に坂の上の雲の舞台になった松山城に行きました。夏目漱石の坊ちゃんや正岡子規に縁のある城ですね。東北だと弘前城です。お堀の石垣がくずれそうで改修するということだったので、去年の夏に観に行きました。

去年の冬に行った松本城を持ってすべてを制覇。今の住宅と違う太い柱に瓦。そして城主の力の象徴でもある天守閣は見る人を魅了しますね。

MY FAVORITE





佐藤研究室では、直接レーザー共振器から、径偏光ビームを発生させる方法の開発を進めています。ここでは熱効果を用いた、極めて簡便な方法を示しています。複屈折材料を用いたレーザーからの径偏光ビーム発生にも成功しています。

の回折限界を超える高い分解能を実現できます」。

佐藤研究室では、この特異な径偏光ビームを発生させる仕組みの開発も行っています。直接レーザー共振器から発生させる方法や複屈折材料を用いての発生方法などの開発。さらに周期的な凹凸形状をもつ光学多層膜という特異な構造からなるフォトニック結晶ミラーに反射率変調を施すことによって、多重リングを持つ径偏光ビームを発生させる研究も進めています。「リング状径偏光ビームはより小さなスポットを得ることができると同時に、ダークスポットが得られることが分かっています。これらの特性は、今後のナノイメージングにとって重要な役割を果たすと考えられています」。

ダークスポットとは、焦点での強度がゼロになる特殊なスポット。ベクトル回折理論の計算によって、いくつかのベクトルビームにおいて新しい特性を持つダークスポットが形成されることが分かっています。ダークスポットを活用することによって、光の回折限界を越えた、より微細な構造を観察できる超高解像の蛍光顕微鏡STED

という顕微鏡では、より分解能があがるだろうと期待されています。

ベクトルビームから その他の応用例

焦点付近に強い縦電場が発生することや、焦点した時にすべての光線がp偏光になることが特長の径偏光ビーム。超高解像の顕微鏡以外にどのような応用例が考えられるでしょうか？

「直線偏光ビームよりも小さなスポット径を得ることが可能ですので、光ディスクへの応用が期待されています。また、物体表面に垂直に集光すると全ての光線がp偏光となるため、光トラッピングやレーザー加工への応用も期待されています」。

さらには、焦点付近で発生する強い光軸方向電場(縦電場)を利用するレーザー加速器の検討もなされています。

「つくばのSPring-8には、電子を加速する加速器がありますが、何kmメートルという大きな施設が必要になっています。これに対して、ベクトルレーザーにより粒子を加速させることができると10cmくらいの距離

でできると言われています。それぐらいの加速能力があるということ」。

特異な電場を持つベクトルビームから、様々な応用分野が広がっていると云えます。

微小スポット形成能や強い軸方向電場を持つベクトルビームの特性を活かし、従来のスカラービームでは難しかった微細なナノイメージングの実現を目指しています。

TERM INFORMATION

ナノイメージング

ナノメートル程度の空間分解能を持つ顕微鏡画像を取得する方法。特に、光学顕微鏡においては、用いる光の波長が電子のそれよりもずっと大きいため、200nm程度以下の空間分解能を達成することが容易ではなかったが、最近、様々な方法によって、100nm以下の分解能を持つ光学顕微鏡によるナノイメージング法の開発(超解像顕微鏡)が活発である。

スカラービーム

光の振動の偏りを表す偏光の方向が、空間的に均一である光ビーム。通常のレーザービームは、スカラービームであることが多い。これに対して、偏光方向の分布が不均一である光ビームはベクトルビームと呼ばれる。

フォトニック結晶ミラー

光の波長よりも小さな周期構造を持った複数の誘電体物質から構成される物体(フォトニック結晶)をミラーとして利用したもの。特定の波長や偏光をもつ光の反射率または透過率をある程度制御することが可能である。ベクトルビームに対するミラーも作製されている。

ダークスポット

通常光ビームを集光すると、焦点付近では最も光の強度が高くなる。これは明るいスポット(Bright spot)とも呼ばれるが、入射光ビームの強度や位相、偏光分布などを適切に選択すると、焦点で強度がゼロでその周囲が明るいスポットを形成することが可能であり、このスポットはダークスポットと呼ばれる。

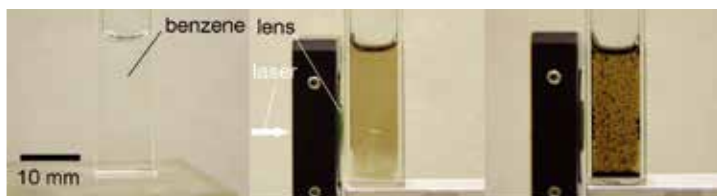
STED効果

Stimulated Emission Depletion(誘導放出枯渇)効果。励起状態の原子や分子に対して、その共鳴条件に近い波長の光を照射すると、誘導放出現象によってエネルギーの低い状態へ遷移する。この光のパターンがドーナツ状である場合、中心付近は光強度がほぼゼロであるため、誘導放出が起こりにくく、自然放光が顕著に観測される。光強度が大きいほど誘導放出が起こりやすく、自然放光できる中心付近の範囲は狭くなる。この自然放光だけを検出することによって、その空間分解能を実効的に高めることをSTED効果と呼び、超解像顕微鏡として利用されている。

光の回折限界

光などの波には回折現象があるため、集光した時に焦点面での光スポットの大きさは有限となる。これを光の回折限界と呼び、おおそ波長の半分程度となる。





液体ベンゼンにフェムト秒レーザー光を照射すると、透明だった液体が次第に濁ってきます。液中には黒色の固形物が生成されていることが、肉眼でも確認できます。ラマン散乱や高分解能透過電子顕微鏡観察結果から、固形物はナノオーダーのダイヤモンド様カーボンであると考えられます。

高強度レーザー場による シングルナノ粒子作製

高強度レーザーにより 分子が壊れ、新しい分子に

佐藤研究室のもうひとつのテーマは、高強度のレーザー場によって、新たなシングルナノ粒子の製作プロセスを生み出すことです。従来の熱・光分解・イオン化などの平衡反応とは異なり、超高強度場における新しい非平衡反応のプロセスを追求しています。

「再生増幅器によって得られるフェムト

秒レーザーパルスを強く集光すると、とても強い光の場が生まれます。これを原子に当たるとトンネルイオン化によって原子から離れてしまいます。さらに分子の場合には、原子間結合が切断されると考えられます。イオン化だけでなく分子が壊れてしまうわけです」。

「例えばベンゼンにこのフェムト秒レーザー光を当てます。すると、レーザー光の焦点においてはプラズマ光が発生し、

メタン・エタン・プロパン・ブタンなどの気体が発生します。透明だった液体が次第に濁ってきて、液中には黒色の固形物が生成されていることが、肉眼

でも確認できます。ラマン散乱や高分解能透過電子顕微鏡観察結果から、固形物はDLC(ダイヤモンドライクカーボン)であることがわかりました」。

ダイヤモンドと炭素(カーボン)の性質をあわせ持つDLC(ダイヤモンドライクカーボン)。通常は高真空中のプラズマプロセスで精製されるが、佐藤研究室が開発した手法では、高強度レーザーのみでつくることができるわけです。

普通のプロセスではできない 全率固溶体合金ができる

このフェムト秒レーザー光によって生まれる特異な励起反応場を、各種貴金属イオン水溶液中に作り出すことによって、貴金属ナノ粒子を作製することができます。

「塩化金酸水溶液にフェムト秒レーザー光を照射すると、次第に赤紫色を帯びてきます。これは金微粒子の局在表面プラズモン吸収に特徴的なものです。つまり、化学薬品を使わずに金粒子を作製できたわけです。同じように塩化白金酸からは白金ナノ粒子を作り出すことができます」。

このプロセスを活用すると、通常的手法では困難な全率固溶合金ナノ粒子を



再生増幅器によって得られるフェムト秒レーザーパルスを回折限界近くまで絞り込むと、10の16乗W/cm²あるいはそれ以上の強度を得ることができます。高強度のレーザー場によって、新たなシングルナノ微粒子の製作プロセスを生み出すことに佐藤研究室では取り組んでいます。

「からんきよ」を飼っていたことも。自然の中の暮らしを満喫しています

愛子駅の北側にある団地に住んでいるのですが、近くでは熊が出たり、イノシシが出たりと、まさに自然の中での暮らしをしています。気持ちもリフレッシュできて満足しています。

家の周りは緑が豊かな環境で、日常は草むしりや庭の手入れ、たまに庭で蟬の写真などを撮って楽しんでいます。

ある年の夏に、足洗い場から出られなくなっていた「かなへび」を見つけたので飼うことにしたんです。故郷の福島弁では、「からんきよ」とか「からんちよ」とか言う20cmくらい細いトカゲです。餌として毎日庭のコオロギを与えていました。少し大きくなってきたので、秋になって放してあげました。



OFF TIME

TERM INFORMATION

クーロン電場

正と負の電荷が作る電場。本文中では、原子内の電子と陽子が作る電場に対応。水素分子内では 5×10^{11} (V/m)と極めて大きい電場が生じているが、これに匹敵する電場を超短パルスレーザー光で作出すことができる。

トンネルイオン化

通常、原子や分子の中の電子はクーロン電場のつくるポテンシャル障壁内に閉じ込められているが、強い光の場においては、その電場によってポテンシャルが大きく歪む、実効的にポテンシャル障壁の高さが低くなり、量子力学的なトンネル効果によって通り抜け、外に飛び出す確率が高くなる。この現象がトンネルイオン化と呼ばれている。

相分離

複数の物質を混合するとき、均一に混ざり合わないで複数の相に分離すること。本文中では、複数の原子数比の異なる相が、混在している状態を意味している。

ラマン散乱

入射した光の波長に対して、分子の回転や振動のエネルギー分だけ異なる波長の光が散乱される現象。分子に特有の波長の光が散乱されるので、分子の同定に利用される。

DLC (ダイヤモンドライクカーボン)

グラファイト構造とダイヤモンド構造が混在した炭素ないし炭化水素からなるアモルファス状の物質。硬く、潤滑性や耐摩耗性に優れており、工業製品への応用が進んでいる。

局在表面プラズモン吸収

ナノメートルサイズの物質に光を照射した時、電子が集団的に共鳴振動することによって光のエネルギーが吸収される現象。物質の種類や大きさ、形状などによって、共鳴する吸収波長が異なる。



Au100Pt0 Au90Pt10 Au80Pt20 Au70Pt30 Au60Pt40 Au50Pt50 Au40Pt60 Au30Pt70 Au20Pt80 Au10Pt90 Au0Pt100
塩化金酸と塩化白金酸の混合溶液にレーザー光を照射すると、両者の合金微粒子が生成されます。混合溶液中の金と白金の割合に応じて、自由に合金の組成を変えることができます。全率固溶の合金が得られ、燃料電池用等の触媒への応用が期待されています。

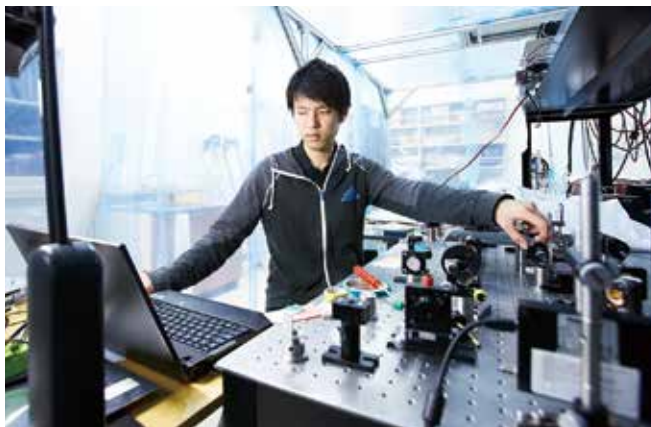
直接作製することができるようになります。「塩化金酸と塩化白金酸の混合溶液にレーザー光を照射すると、両者の合金微粒子、しかも全率固溶合金ナノ粒子が生成されます。混合溶液中の金と白金の割合に応じて、自由に合金の組成を変えることができます」。

通常、合金と言っても異種の金属がそれぞれ独立に存在している場合があります。マクロには混ざっているように見えても、詳しく見ると2相に分離しています。これに対し、フェムト秒レーザー光が作り出す固溶ナノ粒子は1種類の結晶の中に複数の金属原子が完全に溶け込んで存在するもので、しかも温度・圧力一定の下で金属原子の比率がどんなに変化しても固溶しているという特長を持ちます。

「通常のように熱平衡状態で金と白金の合金を作るプロセスだと、ミクロのレベルでは完全には混ざっていません。しかし、フェムト秒レーザー光で合成するこの手法を用いるとキレイに混ざり合います。このプロセスで生み出される全率固溶の合金は、燃料電池用等の触媒への応用にも期待されています」。

新しい現象の探索と新物質創成への応用

このように、佐藤研究室では、高強度のレーザーを使うことにより、焦点付近に形成された超高光強度の励起反応場によ



レーザーから広がる新しい物質科学の世界。新しい材料の創成や機能の発現、プロセスの開発などを大きな目標としています。最先端のフォトニクス技術を駆使して、光と物質との相互作用の研究を進めています。

り、従来の手法・プロセスでは困難だった反応を生み出しています。

従来は、真空中の気体原子や分子を対象とした、ごく少数の原子や分子の相互作用に関する基礎的な研究が中心であったが、佐藤研究室では、高強度レーザー場が非線形・非平衡・超高速という特徴を持ち、既存の技術では実現できなかった新しい反応場を生み出すことに注目しています。

レーザーを中心とした新しい光源開発。これらの協奏効果として、光と物質に関わる新しい学問領域の開拓を目指していると言います。

「光と物質との相互作用には、未知の現象や効果がたくさん眠っていると考えられます。一方、光技術の進歩は著しく、従来では不可能であった、パワー増大や波長領域の拡張、短パルス発生技術の革新などが行われています。これら最新のフォトニクスを物質科学研究に適用すれば、新しい学問領域の開拓に繋がること期待されます」。



FOREFRONT REVIEW

高分子が示すナノスケールの構造形成の多様性を利用して、種々のナノ物質を階層的に組織化、デバイス化する基盤技術の開拓、そして「ボトムアップ型ナノテクノロジー」の発展を追求する三ツ石研究室。高分子ナノシートを利用した種々の光電子機能団の精密集積および、ハイブリッドナノ材料が創り出すナノ空間を利用した光電子機能性ハイブリッド高分子ナノ集積体の構築などに挑んでいます。



表面・界面でのナノ構造制御を利用した 高分子ハイブリッドナノ材料の開発

生体系では有機分子が高次に配列した高秩序的組織体を中心に高度な生体機能が発現しています。この生体系にならい、高秩序的組織体を人工的に構成することができれば、高度な機能を持つ超微細な素子を創りあげることができるはずです。

超微細な素子を作る手法としては大きく分けて、半導体素子などの微細加工技術を駆使する「トップダウン型」のものと、ソフト素子のように、積み木細工のような自己組織化を行う「ボトムアップ型」で作りあげる2種類があります。

三ツ石研究室が目とするのが、ボトムアップ的に自在集積・組織化していくナノ材料の開発手法。表面・界面を利用することでナノメートルスケールでの高分子の配向・構造制御を可能とするボトムアップ的手法の確立をとおして、高分子ハイブリッドナノ材料による次世代ナノデバイス開発の基盤技術の構築や「ボトムアップ型ナノテクノロジー」の発展を目指した新素材の研究開発を行っています。

具体的にどのように、ボトムアップ的に構成していくのでしょうか。

三ツ石研究室が主に研究を進めている手法は、高分子単分子膜をテラーメイドに配列して高分子組織体を創製するLB(Langmuir-Blodgett、ラングミュアプロジェクト)法というものです。分子レベルで超薄膜である水面上単分子膜(特に高分子単分子膜)を規則的に配列することにより、高秩序な超分子組織体を作製するというものです。この「ボトムアップ型ナノテクノロジー」により、ソフト系高分子ナノシート材料の開発、光電子機能性ハイブリッド高分子ナノ集積体の構築など、様々な形で高度な高分子ハイブリッド材料の研究開発を展開します。

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
高分子ハイブリッドナノ材料研究分野

三ツ石 方也

MITSUISHI, Masaya

1968年大阪府生まれ。1997年京都大学大学院工学研究科博士課程修了・博士(工学)。同年東北大学反応化学研究所リサーチアソシエイト、2001年東北大学多元物質科学研究所助手、2003年講師、2004年助教授を経て2013年より現職。

<http://www.tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=90>

三ツ石研究室が進める「ボトムアップ型ナノテクノロジー」。表面・界面を利用することで積み木細工のようにナノメートルスケールで高分子の配向・構造制御。新しい高分子ハイブリッドナノ材料を生み出し、次世代ナノデバイスの開発につなげています。



新素材開発の可能性を拓く ボトムアップ型のナノテクノロジー

分子のシートを積み重ねる ボトムアップ型LB法

「私たちが着目しているのが、分子レベルから積み上げていくボトムアップ型の開発手法です。その具体的な手法として研究開発を進めているのが、LB(Langmuir-Blodgett、ラングミュア-プロジェクト)法です」と語る三ツ石教授。

石けん分子のように、一分子中に水(水相)になじむ「親水基」と油(有機相)になじむ「親油基」(疎水基)の両方を持つ分子を「両親媒性分子」といいます。この両

親媒性分子を水面上にばらまくと、分子は水に溶けずに水面上に浮遊します。面積を徐々に縮めていくと、分子間の間隔が狭くなり、親水性部分を水側に、疎水部分を空気側に向けて、分子が配向した状態で秩序正しく配列します。つまり、水面上に一分子の厚みしかない超薄膜(単分子膜)が常温・常圧という温和な条件で形成されます。

「面白いことに、このようにして形成された水面上の単分子膜を固体(凝縮)状態に保ったまま、ガラス等の基板を、水

面を通過して上下させることで、単分子膜をその基板の上に次々と転写することができます。この作業を繰り返すと累積膜ができるのですが、この方法により作製された薄膜をLB膜と呼びます」。

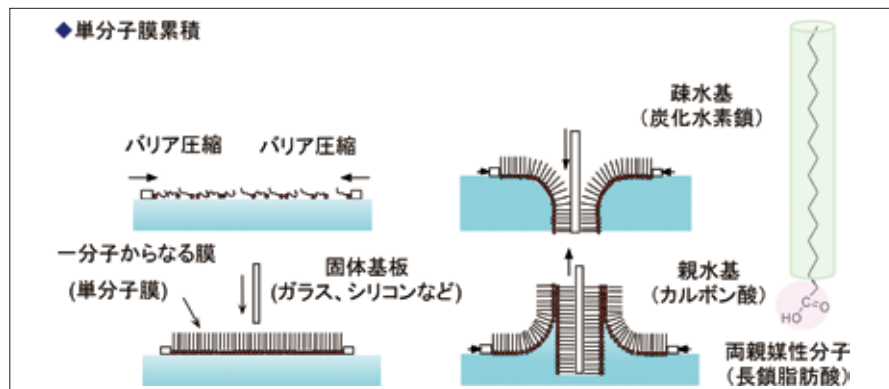
LB膜は常温・常圧で配向性を持った単分子膜を製膜することができ、分子層数の制御も簡単にできます。現在三ツ石研究室では全自動でLB膜を製膜する装置を使用しており、目的に応じて必要な積層数をセットして分子の積み木を作ることができます。

「LB法は発見されてから80年以上たっている技術ですが、本当に素晴らしい可能性のある技術だと感じています」。

両親媒性高分子化合物からなる 高分子ナノシートを中心に研究

「LB法は、研究初期にはステアリン酸など長鎖脂肪酸に代表される両親媒性低分子化合物が使用されていました。これに対し、私が博士研究員時代よりお世話になっている宮下徳治教授(現名誉教授)は、高分子で両親媒性化合物を設計し、高分子LB膜の開発をされていた方で、私もその高分子LB膜の研究開発を主に行ってきました」。

宮下教授は、高分子化学の分野において、1分子の厚さが1~2nmの極めて薄い高分子超薄膜フィルムの開発に成功。「高分子ナノシート」と命名しています。



単分子膜を作製するLB法の仕組み。一分子中に水(水相)になじむ「親水基」と油(有機相)になじむ「親油基」(疎水基)の両方を持つ両親媒性分子を水面上にそとばらまくと、分子は水に溶けずに水面上に浮遊します。そこで浮遊している分子の水面上での面積を徐々に縮めていくと、親水性部分を水側に、疎水部分を空気側に向けて、分子が配向した状態で並び、水面上に一分子の厚みしかない超薄膜(単分子膜)が形成されます。そして、ガラス等の固体基板を、水面を通過して上下させることで、単分子膜をその基板の上に次々と移し取ることができます。

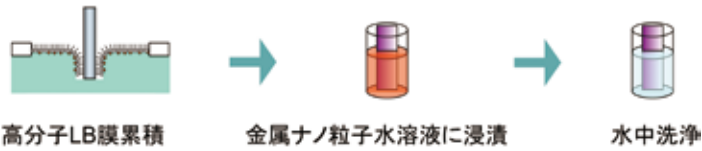
様々な出身地から集う学生たち。多様性を共有できる貴重な場です

研究室は、中国、韓国、バングラディッシュ、トルコから留学生を受け入れ、日本人の学生さんも西は岡山県、東は岩手県と出身は様々です。研究室パーティーの時に国自慢の料理がふるまわれたり、ちょっとしたことで様々な文化や習慣の違いが次々と明らかになっていきます。異文化融合の場として、お互いを認め、多様性を共有する機会が持てるのはとてもいいことだと思っています。



MY FAVORITE

■ ハイブリッド高分子ナノ集積体の作製方法



プラス(正)に帯電したカチオンサイト(陽イオン)を提供するピリジル基(VPy基)、あるいはアミノ基を持つ高分子ナノシートをシリコン基板に転写します。続いて金属ナノ粒子水溶液に浸漬し、金属ナノ粒子を吸着させます。高分子ナノシートと金属ナノ粒子によるハイブリッド高分子ナノ集積体を構築することができます。

「アミド構造を持つポリ(N-ドデシルアクリルアミド)はドデシル基とアミド基からなる両親媒性化合物であり、水面上でアミド基の水素結合形成により高分子鎖間で2次元ネットワークを形成し、高度に分子配向し、高分子鎖が密に充填した高分子単分子膜(高分子ナノシート)を形成します」。

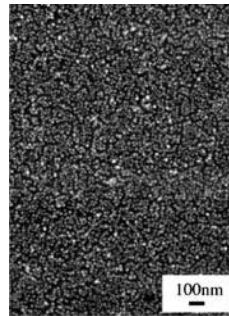
この高分子ナノシートはガラスなどの固体基板に自在に集積できます。特徴は、単層あたり1.7nmの均一な厚さで、二分子膜から数百層まで自在に積層制御下のjな高安定・秩序性を兼ね備えた自己支持膜(Free-standing Film)として機能することです。さらにナノメートルレベルでの膜厚の規則正しい集積により、積層数に応じて干渉色が生まれます。

「膜自身には色はありませんが、反射率の高い基板上に作製するときれいな色を発します。蝶々、玉虫、熱帯魚、シャボン玉のように、表面にできたナノメートルスケールで制御された構造体がもたらす干渉色によってカラフルな色を発しています」。

機能性高分子ハイブリッドナノ材料へナノフォトニクスへの応用

LB法により作製される高分子ナノシートは、いろいろな分野で活用できます。そのひとつがテンプレートとしての活用。三ツ石研究室では、両親媒性分子の特徴を活かし、金属ナノ粒子とテンプレートとしての光機能性高分子ナノシートを組み合わせたハイブリッド高分子ナノ集積体による光機能界面の構築を目指しています。

「両親媒性分子は、界面活性剤に見ら



VPy 56%

れるように油と水のような違う性質の材料を取り持つことができます。、両親媒性を示す高分子ナノシートが金属などの無機ナノ粒子と有機分子の間をとりもってくれるのでは?と考えました」。

塩化金をクエン酸還元して作製した金のナノ粒子はマイナスの電子イオンで表面が覆われています。プラスの高分子ナノシートを使えばプラス(正)とマイナス(負)の静電相互作用により自由に金のナノ粒子を積み上げることができます。つまり、高分子ナノシートと金属ナノ粒子によるハイブリッド高分子ナノ集積体を構築することができるわけです。

「正に帯電したカチオンサイト(陽イオン)を提供するピリジル基、あるいはアミノ基を有する高分子ナノシートを金属ナノ粒子水溶液に浸漬し、水中洗浄すると、高分子ナノシートがコーティングされている部分に金ナノ粒子が均一に吸着した集積体ができます。金ナノ粒子の吸着と高分子ナノシートの積層を繰り返すことでハイブリッド高分子ナノ集積体を構築でき、高分子ナノシートをナノルーラーとして金ナノ粒子層間の距離をナノメートルスケールで調節できます。室温・大気下で高度なハイブリッド高分子ナノ集積体を作製することができるのは、ボトムアップならではの感動でした」。

そして三ツ石研究室では、吸着した金ナノ粒子表面に発生する局在プラズモンにより、ディスプレイ用1ナノシートの光第二高調波を数百倍増強できることを明らかにしました。金属ナノ粒子の局在プラズモンと機能性分子を組み合わせた光・電子ナノデバイス作製に向けた基盤技術の一例を先駆的に示すことができました。

ハイブリッドナノ集積体による光機能界面の構築。三ツ石研究室では、光・電子ナノデバイス作製に向けた基盤技術の構築を目指した研究を展開しています。

TERM INFORMATION

自己支持膜(Free-standing Film)

支持基板の支えがなくても形状を保つことのできる膜のことをさす。膜厚がマイクロメートルより小さくなると、自己支持性を保持することが難しくなるが、ポリ(N-ドデシルアクリルアミド)からなる高分子ナノシートでは、ドデシル基間の相互作用とアミド基間の水素結合により、膜安定性が飛躍的に向上し、生体膜レベルの膜厚3.3nmから1.2nmまで1.7nmレベルで膜厚制御可能な自己支持膜が得られることが見出されている。



水面上を浮遊する自己支持性高分子ナノシート

干渉色

透明な薄膜でも可視光領域の波長の光が膜厚に応じて選択的に反射することで、色として認識できる。身近な例としてシャボン玉やがあげられる。色素などを使用しなくても色を発現することができるが、干渉色を制御するためにはナノメートルスケールでの構造制御技術が重要となる。

静電相互作用

電荷にはプラスとマイナスがあり、同じものどうしで斥力、異なるもの同士で引力が働く。これらの力はクーロンの法則により距離の逆二乗と電荷の量により決定づけられる。クエン酸アニオンで負に帯電した金属ナノ粒子は、正に帯電した高分子ナノシートに静電相互作用の引力により吸着する。金属ナノ粒子間では斥力により反発しあうため、単粒子状態での吸着が支配的となる。

局在プラズモン

金属バルク中の自由電子は一種のプラズマ状態を形成しており、この集団振動をプラズモンという。金属表面に微細な構造が形成された場合、あるいは極めて小さい金属ナノ粒子においては、可視光領域の光を入射することで、自由電子の集団振動を誘起することが可能であり、これを局在プラズモンと呼ぶ。局在プラズモンにより局所的に増強電磁場が発生する。増強電磁場は金属ナノ構造体の形や大きさ、さらにはその集合形態に大きく左右される。



ハイブリッド高分子ナノ集積体中の金ナノ粒子の局在プラズモンカップリングを利用した光第二高調波増強



ナノフォトニクスやナノエレクトロニクスなど、時代のニーズが高まるボトムアップ的アプローチによるハイブリッドナノ材料の開発を行っています。



高分子ナノシートにより 広がる可能性

ナノスケールの薄膜を 構造制御することで何ができるか？

ナノスケールの薄膜を高分子化することによって生まれてくる可能性。三ツ石研究室では現在、高分子が示すナノスケールの構造形成の多様性を利用して、種々のナノ物質を階層的に組織化してデバイス化する基盤技術の開拓を多角的に行っています。

例えば、ナノフォトニクスやナノエレクトロニクスに向けた光電子機能性ハイブリッド高分子ナノ集積体の構築、ネットワークポリマー薄膜などの新規ハイブリッドナノ材料などの成果が出ています。

三ツ石研究室の若き2人の研究者の研究を紹介します。

高分子超薄膜を利用したナノガラスの作製

山本俊介助教

二酸化ケイ素(SiO₂)は優れた絶縁性、透明性を持つ透明絶縁材料として広く用いられています。山本俊介助教は、かご型シルセソオキシサン(SQ)と、*N*-ドデシルアクリルアミド(DDA)の共重合体ナノシートに紫外光を照射することにより作製されるSiO₂超薄膜の形成機構を明らかにしました。

「SQが高密度かつ均一分散されている高分子ナノシートに室温大気下で紫外線照射すると有機部分がまず分解し、SQのかご構造からSiO₂のネットワーク構造へと変換する二段階の反応で進むことを明らかにしました。この手法を応用すると最小膜厚0.4nmからなるSiO₂超薄膜をPET基

板上にも作製することができます」。

山本俊介助教は現在、SiO₂超薄膜を絶縁層として使った電子デバイスの検討を進めています。この研究は、2015年4月、第14回船井研究奨励賞を受賞しました。

低電力電子機能デバイス創製に向けて 朱慧娥助教

低電力電子機能デバイス創製に向けて、強誘電性高分子ポリフッ化ビニリデン(PVDF)の高効率β相(斜方晶)の作製に取り組んでいます。

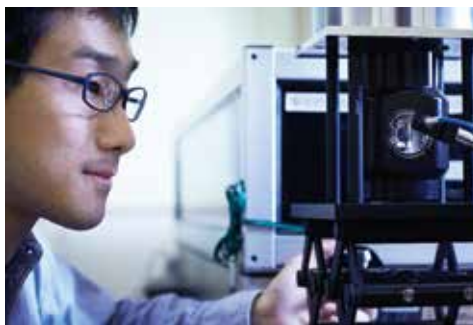
朱慧娥助教は、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)溶液とpDDA溶液を別々に調製し、それぞれを独立に水面上に展開することで、崩壊圧40mN/m以上のPVDFナノシートが形成できることを見出しました。

「得られるナノシートをフーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)で調べてみると、β相のピークのみが表れることがわかりました。従来のような延伸・熱処理を施すことなく、10nmでも強誘電性を示す超薄膜の作製が可能です」。

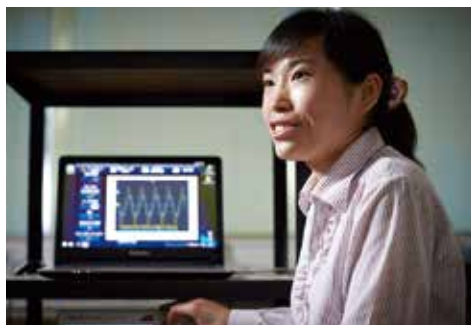
この研究は、2014年12月、第9回旗野奨学基金多元物質科学研究奨励賞に選ばれました。

フッ素系両親媒性高分子を利用した 溶存酸素センサーの開発

三ツ石研究室では、フッ素系両親媒性高分子を利用した発光型溶存酸素の開発も行っています。



山本俊介助教



朱慧娥助教

秋田県大館の曲げわっぱ。自然の恵みに感謝しつつホッとするひととき

お弁当の時間です。いつも妻に作ってもらっています。自分たちで栽培した野菜が入っている時は、何とも言えない新鮮さが味わえます。器は秋田県大館市を訪れた時に作った曲げわっぱ。秋田杉をもとに作られる曲げわっぱは、樹齢200年の年輪が描く見事な平行線からなり、自然の美しさ・素晴らしさを感じます。大事に使えば十年以上もつそうです。自然の恵みに感謝しつつホッとするひととき。気分を一新して午後からの仕事に取り組むための元気の源となっています。



OFF TIME

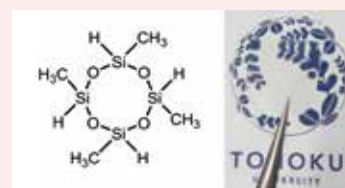
TERM INFORMATION

光電子機能性ハイブリッド高分子ナノ集積体

両親媒性高分子を利用した高分子ナノシートは、ナノメートルスケールで様々なナノ材料を合目的的に構造制御することができる。この空間は、光や電子の移動に大きな影響を及ぼすことができるため、光の離散的伝搬やベクトルの光エネルギー・電子移動、非線形応答など面白い光電子機能性を発現することが期待できる。

ネットワークポリマー薄膜

モノマーの結合可能数が2つ以上になると、網の目となりネットワークを形成することができる。環状シロキサンとよばれる多官能性モノマーを用いて、溶媒に可溶性ポリマーを合成し、未反応の反応基を利用してポリマーをネットワーク化することで、ネットワークポリマー薄膜を合成することができる。ネットワーク化することで、耐熱性や機械的強度などが大幅に向上する。



4つの手を持つ環状シロキサンを基本ユニットとしたネットワークポリマー薄膜

双極子モーメント

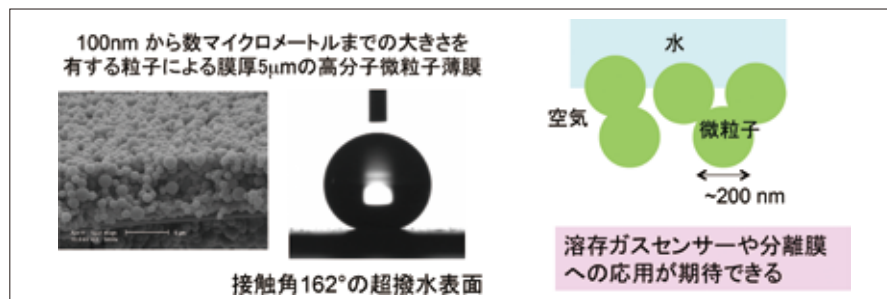
ポリフッ化ビニリデン(PVDF)は、主鎖の-CH₂-と-CF₂-間の電荷の偏りによる双極子モーメントが発生する。全トランス型のコンフォメーションをとる場合、双極子モーメントの総和は最大となり、印加電場の反転により双極子モーメントの配向変化を誘起できる。電場がなくても自発分極という形で双極子モーメントが配向している状態を維持することができる性質を強誘電性と呼び、PVDFは代表的な強誘電性高分子として知られている。

β相(斜方晶)

PVDFがとりうる結晶相の一つである。-(CH₂-CF₂)-の主鎖が全トランス型のコンフォメーションをとり、PVDFが強誘電性をしめす由縁となる結晶相である。この結晶相をいかに高効率に発現するかがナノエレクトロニクスの発展にとって重要な課題である。

酸素消光

りん光を示す発光性色素は、まわりに酸素が存在するとエネルギー移動により失活する。酸素濃度に依存した発光特性をもつ分子を用いることで、酸素濃度を発光強度としてモニターするセンサーの開発が可能となる。代表的な例としてポルフィリン金属錯体があり、風洞実験における感圧塗料などに用いられる。



フッ素系両親媒性高分子を利用してキャスト法により、水中における酸素濃度測定用センシングシステムを開発。得られた薄膜表面での水滴の接触角は150度以上に達し、超撥水性であることを確かめています。溶存ガスセンサーや分離膜への応用に期待できます。

「酸素センサーは主に航空機などの風洞実験において利用されたりしています。従来どのように酸素センサーを作製してきたかという、酸素によって消光される性質を持つ発光性物質を、ポリジメチルシロキサンやポリスチレン等の酸素透過性高分子材料に混合し被覆することによって実現していました」。

しかし、これらの酸素センサーは膜厚が数マイクロメートルであることや、発光性物質が高分子材料に均一に分散されにくいことなどから、気相さらには液相中で酸素消光性が十分に発揮せず、測定感度が悪いことや酸素に対する応答に時間がかかる等の問題がありました。

「そこで我々の研究室では、フッ素系両親媒性高分子を利用してキャスト法により形成される超撥水表面をセンサー表面として、水中における酸素濃度測定用センシングシステムを開発・検討しました。フッ化炭素鎖を側鎖に有する両親媒性高分子と酸素に敏感な発光応答を示すポルフィリン白金錯体を含む薄膜をキャスト法により作製しました」。

得られた薄膜表面での水滴の接触角は150度以上に達し、超撥水性であることを確認しました。水中において発光強度をモニターしたところ、水中の酸素濃度に対し、直線的に発光強度が変化することが明らかとなり、センサー薄膜として良好に機能することを実証しました。超撥水面で高い酸素消光性を持つことで、大気中・液体中での高精度測定ができる高感度酸素センサーの開発が可能となりました。

様々な地域から研究者・学生が集う三ツ石研究室。ソフト系高分子ナノシート材料の開発、光電子機能性ハイブリッド高分子ナノ集積体の構築など、様々な形で高度な高分子ハイブリッド材料の研究開発を展開します。



研究キーワード:

構造・機能・ダイナミクス

このように三ツ石研究室では、LB法を含むボトムアップ的手法を利用しながら、ナノエレクトロニクス(フォトダイオード、キャパシタ、不揮発性メモリ、強誘電体)、表面・界面修飾(超親水、超撥水、液体分離、接着など)、ハイブリッド材料(Siを含むポリマー、高耐熱・高透明フィルム、光学素子)、ナノフォトニクス(クラスター、プラズモニクス、センサーなど)、自在ナノデザイン(自己支持性、自在加工、ナノガラス)などの研究を進めています。

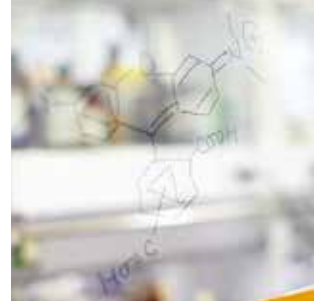
「今後の研究の展開は、①高分子の多様性を利用した材料のナノデザイン、②表面・界面を利用した異種ナノ材料のナノメートルスケールでの3次元的構造設計、③光・電子・励起子(光+電子)・分子の動きを利用したデバイスの開発をキーワードに研究を進めていきたいと考えています。これらを達成するためには、最高のお手本である自然を熟考し深く理解することで思考力を培うことが必要になってくると思います」。

材料の小型化・軽量化が進むにつれて、ボトムアップ的アプローチを可能とするハイブリッドナノ材料にかかる期待が大きくなっています。様々なナノ材料をナノメートルスケールで集積・構造制御するだけでなく、構造制御された空間での光や電荷、分子の輸送を深く理解し、表面・界面を含む構造・機能の関係を明らかにしていきたいと三ツ石教授は語ります。



FOREFRONT REVIEW

生体関連化合物・高分子材料に生化学と合成化学を融合した新手法を導入する和田研究室。生体高分子の機能材料への展開と動的機能制御を行いながら、外部刺激応答型人工核酸の創製・がん細胞／ハイポキシア細胞特異的核酸医薬創製を目指しています。



しなやかなシステムを求めて 生命機能の外部刺激制御法の開発と構造

和田研究室が研究開発のベースとするものが「生体高分子」です。生体の持つ「しなやかなシステム」を新しい機能材料の発現に活かしていきたいと考えています。

タンパク質などの生体で作っている高分子は、環境に順応して“しなやか”に形を変え、必要に応じ“しなやか”に機能を発現しています。しかし、天然のものそのものを使うことは難しい。そこで和田研究室が考える手法が、核酸化学・ペプチド化学・糖化学といった自然にも生体にも優しい生化学と高選択的・高効率・高収率・精緻な合成技術である合成化学との融合。この融合により、新しい材料を作っているというパラダイムシフトにもつながる新手法です。

和田研究室が現在進めている具体的な研究領域は、DNAやRNAなどの核酸、そしてタンパク質などの生体高分子をベースにしたもの。人工核酸などの生体高分子を核に、次世代インテリジェント型ナノバイオ機能材料への応用を目指し研究を行っています。

ナノバイオ分子において、その優れた機能のon-off制御は、実用化に向け重要な課題であり、和田研究室では外部刺激に応答して機能発現のon-off制御が可能な人工核酸の創製に取り組んでいます。

さらに、がん細胞特有の細胞内環境情報に応答し、正常細胞には副作用を発現しないがん細胞特異的核酸医薬の開発や、さまざまな生体機能分子の外部因子による自在な機能制御の実現に向け研究を行っています。

多元物質科学研究所
生命機能制御物質化学研究分野 教授

和田 健彦

WADA, Takehiko

1961年、大阪府生まれ。大阪大学工学部応用精密化学科卒業。大阪大学大学院工学研究科応用精密化学専攻後期課程修了。工学博士。大阪大学工学部助手、大阪大学大学院工学研究科助教授、ニューヨークコロンビア大学博士研究員。JST「さきがけ研究」研究員(兼任)。2007年東北大学多元物質科学研究所教授。光化学協会理事、日本化学会代議員、高分子学会東北支部理事、日本ケミカルバイオロジー学会世話役、日本核酸医薬学会世話役、日本化学会生体機能化学部会幹事、日本化学会生命化学研究会理事、高分子学会バイオ研究会 運営委員、Photobio.Photochem., C:Editorial Board。1994年高分子学会 平成5年度高分子研究奨励金(現 奨励賞)受賞。2001年日本化学会 生体機能関連化学シンポジウム講演賞受賞。2010年光化学協会 光化学協会賞受賞。

<http://tagen.tohoku.ac.jp/modules/laboratory/index.php?laboid=25>

<研究テーマ>

- 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
- プロテアーゼ活性検出蛍光タンパク開発
- 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

がんが再発したら自動的に薬効を発現できる核酸医薬がつくれたら。和田研究室では、正常細胞の細胞質はpH=7.2、がん細胞の細胞質pHはpH6.2~6.8とわずかに低い。このわずかな差をトリガーにして発現する新しい核酸医薬品の研究開発を進めています。



がん細胞だけに特異的に効く 外部刺激応答型人工核酸の創製

しなやかな発想で がんを直したい

和田健彦教授はがんに対する治療薬研究に進んだ経緯を語ります。「高校生の時に母親をがんでなくしました。この時、本気でがんを治したい、検診などで見落とされたがんも治せる新しい薬を創りたいと思ったのです」。

大腸がんは年齢があがると指数関数的に増えているといいます。現在の医療現場では、目に見える形にまでがんが進

行しないと手術や化学療法ができないという状況で、このことが転移や悪性化の進行につながっています。まだ小さく検診などで見落とされるがん細胞の増殖を止める「核酸医薬」の創製が現在切望されています。

「がんになることによって、体内でどんな変化が起きているかという、実はDNAの中の塩基GがTに変わるというほんの小さな変化が起きているだけなのです。この変異が起きたDNAからのタンパク質合成など機能発現を抑制できれば、がんの進行を止めることができるわけです」。

DNAの機能が発現する時、RNAがキーになります。このRNAの機能を抑制できれば特効薬として有用なものになるのではないかと

「ターゲットとなるRNAの塩基配列を認識して強く結合し、がんの発生を抑える核酸医薬という考え方が生まれました。RNAに結合して安定な複合体を形

成できる核酸医薬品が、世界中で研究開発されてきました。しかし、ほんの少し配列の異なる同じような塩基配列RNAがいっぱいあります。このRNAと結合し正常な細胞の中でも薬効を発現してしまい副作用になるわけです」。

ここから、和田教授は有効な化学合成核酸医薬を作り上げるために①がんに効く、がんだけをターゲットにする②がんになったらくっついて錯体をつくる、直ったら離れる、という観点を旗印に研究を進めてきました。

がんだけに効く選択性 何をトリガーにするか？

がんの怖さは再発にあります。手術しても再発するというケースが多くみられます。したがって、再発したらすぐに自動的に核酸医薬が発現することが理想となります。

「何をトリガー（きっかけ）にしてがん細胞を認識し発現するか？ 我々が注目したものが、pHです」。

がんが大きくなる時、血管の新生が追いつかず、酸素の供給が足らなくなり、細胞の代謝経路が変化し、pHが下がります。正常細胞の細胞質だとpHは7.2、



和田研究室が研究開発の哲学は、生体の持つ「しなやかなシステム」を新しい機能材料の発現に活かしていくこと。自然にも生体にも優しい生化学と精緻な合成技術である合成化学との融合するという新手法を採用しています。

一流のモノや人との出逢いを、楽しんでいきたいですね

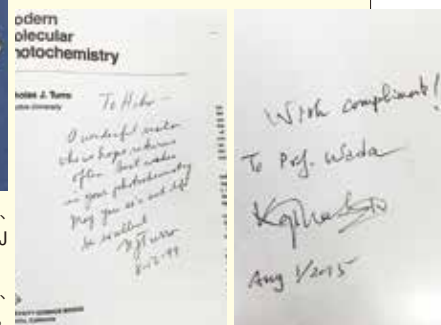
父親が亡くなった時、時計と万年筆もらったのですが、やはり一流のものが持つ質感はいいですね。それ以来自分も本物にこだわるようになりました。ニューヨークのジャズ、カーネギーホールでのミュージカル…。本場で本物を楽しむ時間を大切にしています。

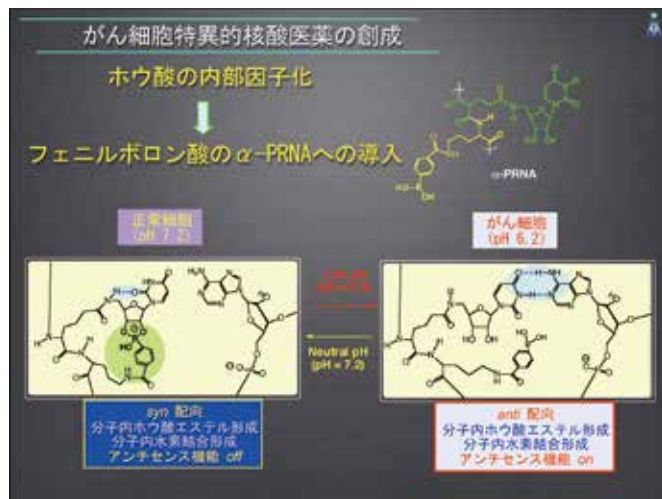
一流の人との出逢いも素晴らしいものです。海外でも、一流の学者は違います。トップレベルの人は腰が低い。ビールを片手にピザを食べながら、フランクにこちらの話に真剣に耳を傾けてくれる。その上で、相手の土俵に入っている確な質問や指摘してくれます。自分もこういう一流の立ち振る舞いができるようになりたいと思っています。



(左)有機化学の第一人者であり、和田教授の師であるNicholas J Turro先生からのメッセージは宝物。(右)天然有機化合物研究の重鎮、中西香爾先生にいただいたサイン。

MY FAVORITE





塩基部が背中を向けていれば (syn配向) 核酸を認識せずに、前を向いていれば (anti配向)、標的RNAを認識。塩基部の向きを変えることにより、標的の核酸を認識するという仕組みを発見しました。ホウ酸エステル形成を行うことにより、pHによって塩基部配向のanti→syn配向制御ができます。

がん細胞の細胞質 pH は pH 6.2~6.8 に下がります。このわずかな差をトリガーにすることができれば、目に見えるようになる前に分子レベルでがんを直すことができるようになります。

「pHによるon-off制御機能を持たせた核酸医薬。正常細胞内環境では、標的RNAだけでなくDNAとも全く相互作用しないというものが作ることができれば、副作用のないがん治療剤として使えるわけです」。

固定された機能を発現する核酸医薬ではなく、状況・環境に応じてフレキシブルに機能する核酸医薬づくりの発想。和田教授の哲学によって新しいがん治療薬づくりの道筋が生まれました。

on-offをリバーシブルに変化させるペプチドリボ核酸 (PRNA) の開発

pHによって制御する。それでは、具体的にどのようにこの制御の仕組みを実現するのでしょうか？

「まずどのように標的の核酸をどのように認識し、錯体を作るか？ ポイントとなるのが塩基部の向きです。塩基部が背中を向けていれば (syn配向) 核酸を認識せずに、前を向いていれば (anti配向)、標

的RNAを認識して、くっついて錯体を作り、がん細胞の活動を止めるわけです」。

つまり首 (塩基部分) の向きのスイッチング。ではどのように塩基部分の向きを変えるか。和田研究室では、この課題に対して、分子の中にホウ酸を入れることによって、ホウ酸エステル形成が行われて、塩基部配向のanti→syn配向制御にすることを発見しました。つまり、ホウ酸を入れることにアンチセンス機能のon-offが可能になるわけです。さらに電荷を持っていないので非常に安定な錯体ができます。

「しかも、ホウ酸は正常細胞であるpH 7.2の時は分子内ホウ酸エステル形成を形成し、塩基部は分子内水素結合によりsyn配向になりますが、がん細胞内のpH 6.2に下がったホウ酸エステルがはずれ、それにより塩基部分がanti配向になり、がん細胞と錯体を作るという仕組みを作り上げることができました。念願だったがん細胞であるかを自動的に判断し、制御する人工核酸医薬づくりへの道筋を見いだすことができました」。

ターゲット核酸との錯体形成と解離を、わずかなpHの変化により可逆的に制御することのできる人工核酸の開発に成功した瞬間でした。副作用のないがんの特効薬開発の可能性を切り拓いたこの画期的な人工核酸はペプチドリボ核酸 (PRNA) と名付けられました。

わずかなpHの変化により可逆的に制御可能な新しい人工核酸を作成した和田研究室。ペプチドリボ核酸 (PRNA) と名付けられた人工核酸をベースに新たながんの特効薬の設計・合成を進めています。



TERM INFORMATION

アンチセンス分子

疾患を遺伝子レベルで治療する核酸医薬法の一つ。標的RNAと錯体を形成することにより、標的RNAの情報/機能発現を阻害し、疾の治癒を目指す。疾患の原因タンパク質をコードするmRNAのみならず、最近ではより効果的な治療効果が期待されるsiRNAやmiRNA (マイクロRNA) を標的とした様々な戦略が提案され、実証実験が報告され、注目されている。

核酸医薬

最近その高い医療効果で注目されている抗体医薬と同じバイオ医薬のひとつで、抗体医薬に続く次世代医薬品として期待されている。従来の低分子医薬品と区別し高分子医薬とよばれることもある。疾患・疾病の原因タンパク質合成やDNA/RNAなど、遺伝子レベルでの治療を目的とした治療薬であり、筋ジストロフィー症など従来の低分子医薬品では対象にならなかった遺伝性疾患に対する適用も可能であり、注目を集めている。天然のDNAやRNAは生体内で直ぐに分解されるため、効果的な治療薬の開発を目指し、化学修飾核酸医薬の研究が世界中で精力的に推進されている。

錯体

ここでは標的RNAを核酸医薬が認識し、結合した複合体を意味する。錯体を形成することにより、標的RNAの情報/機能発現を阻害し、核酸医薬としての機能を発現する。錯体の安定性は、核酸医薬としての効果・機能の重要な因子であるが、安定すぎると後述の触媒的核酸医薬としての機能が阻害されるため、最適な安定性、「しなやか」な安定性の付与が求められる。

エステル形成

一般にはアルコールとカルボン酸からエステル結合が形成されることを意味する。ここでは、アルコール、特にペプチドリボ核酸がもつ2つのアルコール (cis-ジオール) とホウ酸類が結合し、形成するホウ酸エステルの形成を意味する。ホウ酸エステルが形成されることにより、ペプチドリボ核酸の糖部構造が変化し、塩基部の配向がantiからsynに変化する。

anti→syn配向制御

標的RNAと錯体を形成するためには、ペプチドリボ核酸の塩基部は前を向っている必要があり、この配向を「anti」と呼びます。一方、塩基部が標的RNAに対し背中を向けている「syn」配向では、RNAを認識することも錯体を形成することも出来ません。このため、ペプチドリボ核酸の核酸塩基がsyn配向からanti配向に変化すると、標的RNAとの錯体が形成されることになります。このanti→syn配向変化も「しなやか」に何度も繰り返すことが出来ますので、標的RNAとの錯体も形成されたり離れたり、必要に応じて「しなやか」に変化することが出来ます。

ペプチドリボ核酸 (PRNA)

がん細胞の中でだけ核酸医薬として機能し、正常細胞では副作用も毒性も発現しないことを目的に設計・合成された新規人工核酸。人体に存在するアミノ酸を主鎖骨格 (背骨) とし、RNAを構成するリボヌクレオイドを (手足として) 側鎖に組込んだ構造をもち、がん細胞やハイポキシア状態の細胞環境で核酸医薬としての機能を発現するためフェニルボロン酸を導入するなど、いくつもの機能素子を分子内に組み込み、進化し続けている。

三大疾病に対応できる 新医薬品の開発へ

多彩な機能を付加できる モジュール法による設計

和田研究室では、現在東京医科歯科大学の横田隆徳教授と共同研究で、多彩で有効な機能を付加できるモジュール法という手法を活用して本格的な人工核酸医薬づくりを行っています。

「横田先生との共同研究の中で、ひとつひとつ臨床に耐えうる核酸医薬設計を試行錯誤の中で行っています。例えば、がん細胞に発生するRNAとくっついて錯体を作るとなると、RNAの数だけPRNA

を入れないといけません。とてもいい発想だけど、臨床レベルでは厳しいと言われました」。

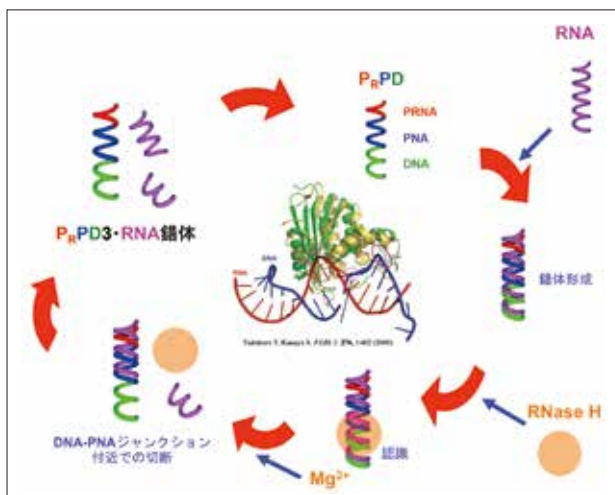
では、どうするか？

「先生に言わせると酵素の中にはRNAだけを切ってくれる酵素RNase Hがある。これをうまく活用すれば、PRNAを再利用できるのではないかというアイデアをいただきました」。

和田研究室では、キメラ人工核酸P_RPDと標的RNAとの錯体に対してRNase Hがどれくらい切断効果があるかを検証。

詳細に検討した結果、応するP_RPD/RNA錯体に比較して20倍程度の非常に高いRNA選択的切断活性を有することが明らかとなりました。核酸医薬の実用化に向け、一歩前進したわけです。

ターゲットとなるRNAをいかに効率的に切断していくか。RNase HによるRNA切断活性を検証した結果、非常に高いRNA選択的切断活性を実現することが分かりました。



実際の臨床で使える薬にするには、PRNAをつないでいく必要があります。和田研究室では、モジュール法というモジュールの特性を利用した合目的論理的かつ効果的な核酸医薬の分子設計を行っています。

「しかしこの問題以外に、細胞の中に入らうやっ入れてくれるんだと言う問題もありました」。

この問題を解決するきっかけとなったのがエイズ感染の原因であるHIVウイルス。感染性の分子は非常に細胞膜を通りやすい性質を持っていますが、そのポイントとなるのがアルギニンです。

「アルギニンを核酸医薬分子の中に組み入れるといいのではということで実験してみたのですが、びっくりするぐらい細胞の中に入るという結果を得ることができました」。

PRNAにアルギニンを導入することで、静電相互作用によるRNAとの錯体安定化と高い細胞膜透過能付与が達成されました。

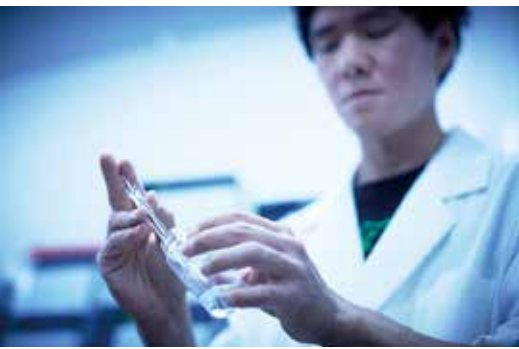
「自動的に細胞の状態を感じることができ、がんになるとむくむくと起き上がる人工核酸。我々はこれをPRNAロボットと呼んでいます。リスクのある年齢になったら投与すると自然に直してくれる薬。長年夢であった自然にがんを直してくれる薬の開発に、ひとつ前進できたような気がします」。

本物の前では時間をかける。大好きなゴッホは何時間でも見えています

最近あまり時間が取れずオフタイムらしいオフタイムの過ごし方をしていないですね。中でも海外に行った際、時間が空いた時には、メトロポリタン美術館などで大好きなゴッホを観に行ったりする時間を大切にしています。優れたものに出会うというのは、とても濃密な時間が過ごすことができます。

ゴッホの絵はとても立体的で、絵の具の躍動を感じます。見る角度によって全然違う印象が浮かんできます。警備員には最初「怪しいやつ」と思われたと思いますが、何日も何時間もずっと同じ絵を見ているので、最後には「あなたのような人はなかなかいない」と褒められました。





pHの違いを調整できるようにすることでターゲットだけに効く薬をつくることができます。がん・脳梗塞・心筋梗塞という三大疾患に有効な人工核酸の設計・合成を視野に入れて研究を進めています。

pHを調整することで 三大疾患が治せる可能性も

「がんに対して有効に働く人工核酸医薬の開発を行ってきましたが、横田先生は脳梗塞・心筋梗塞を含めた三大疾患に効くのではと書いてくれています」。

脳梗塞になると直後は大丈夫でも、次の日に亡くなってしまふことがあります。これは、脳梗塞により血管が詰まり、細胞がハイポキシアと言われる低酸素症になり、自分自身を殺すアポトーシスを起こしてしまうことが主な原因の一つです。

また、心筋梗塞でも血流がとまり、酸素が行き渡らなくなり、アポトーシスを起こしてしまうことでは同じ現象と言えます。

この酸素がとまり、pHが下がり、アポトーシスしていく細胞に有効な薬をPRNAにより生み出すことができるといいます。

「がん・脳梗塞・心筋梗塞では、それぞれハイポキシア細胞のpHが微妙に違うのです。この微細なpHの違いを調整できるようになれば、三大疾患それぞれに効く薬を設計できるようになるわけです」。

和田研究室では、三大疾患に効く人工核酸医薬の開発に向け、標的細胞に



応じたpHで薬効を発現できるようにPRNAに組込むポロン酸のエステル形成を制御する仕組みの研究を進めています。

環境調和型のプロセス 光不斉合成化学にもチャレンジ

「研究室では今、環境調和型のプロセスに注目し、いろいろな研究を進めています。その一つがキラル化合物を合成する光不斉合成です。従来の熱的反応によるキラル化合物合成は、遷移金属や有機溶媒を大量に使用するなど、環境負荷が非常に大きいという問題がありました。それに対して、光反応によるキラル化合物合成は、低温で反応できますし、エネルギーソースが光ですので、非常に環境にやさしいものです」。

和田研究室では、環境負荷の少ない光を反応の駆動力として、タンパク質など生体高分子を不斉反応場として活用する超分子不斉光反応という新規合成方法論を提案し、その有用性を実証してきました。

基底状態と励起状態両方の相互作用制御を行いながらの高効率超分子不斉光反応の実現は、一般性を有し、今後適用反応例の拡大、基質特異性の向上により不斉光化学反応の有効な方法論としての展開が期待されています。

「ファージディスプレイにより合成した抗体を利用する新しい方法論を打ち出しています。自分の欲しい化合物を自在に作ってくれる抗体を反応場として利用する。光と抗体を使い新しい人工酵素を構築し、欲しい化合物を作り出すという新しい方法論です。核酸医薬の動物実験では医学部の先生方と共同研究しながら病因タンパク質を撃退し、一方でそのタンパク質を利用した環境調和型のプロセスを開発しているわけです」。

生体のしなやかさを活用し、まったく新しいしなやかな合成技術を開発していく。和田研究室のしなやかな研究開発は未来を切り拓いています。

人工核酸医薬研究だけでなく、タンパク質など生体高分子を不斉反応場として活用する超分子不斉光反応という新規合成方法論を提案するなど、和田研究室では次代を見つめた環境調和型のプロセス開発にもチャレンジしています。

TERM INFORMATION

モジュール法

ペプチドリボ核酸を効果的な核酸医薬として実用化するには、標的のがん細胞やハイポキシア細胞に導入する必要があります。このためにアルギニンユニットを組み込みます。また、標的RNAとの錯体の安定性を高めるためペプチド核酸と呼ばれる人工核酸を組み込みました。さらに後述するRNaseH活性を利用した触媒的核酸医薬としての応用のために、DNAをペプチドリボ核酸に組み込みました。このように、必要となる目的を実現するため、問題を解決し得る分子化合物をモジュールと考え、論理的考察に基づきペプチドリボ核酸に必要なモジュールを必要な数だけ、必要な位置に組み込む方法を「モジュール法」と名付けました。モジュール法はペプチドリボ核酸の設計のみならず、多くの分子設計に適用でき、一般性を有すると考えています。

RNase活性

RNaseHは、主に細胞の核中に存在し、DNAとRNAから形成される錯体を認識し、RNAだけを選択的に切断する酵素。RNaseH活性があると、核酸医薬と錯体を形成した標的RNAだけが切断され、核酸医薬は次の標的RNAとまた錯体を形成することが出来、ひとつの核酸医薬で汎山の標的RNAの情報 / 機能発現を阻害することが可能となり、極少量の核酸医薬分子で高い治療効果の発現が期待されるため、RNaseH活性は実用的な核酸医薬開発にとって重要なファクターと考えられている。RNaseH活性を有する核酸医薬を、特に触媒的核酸医薬とよばれる事もあられる。

標的RNA

ここでは、核酸医薬が標的とする疾患細胞において重要な役割を果たしているRNAの総称。代表的な標的RNAとしては、疾患の病因となるタンパク質や酵素の合成を司るmRNAがあげられる。最近では、様々な疾患の発症や伝播に大きく関与することが明らかにされているmiRNAが標的とされることも多くなっている。さらにタンパク質合成や遺伝情報発現制御に大きく関与しているRNAI (RNAインターフェレンス)やsiRNA(短鎖インターフェレンスRNA)なども標的RNAとした研究が報告されている。

ハイポキシア

酸素欠乏症とよばれる、低酸素状態にある細胞状態の総称。増幅期のがん細胞などでは放射線治療や化学療法が効きにくいことが知られていたが、これはがん細胞周辺が低酸素状態になっていることに基づくことが解明されてきた。さらに脳梗塞や心筋梗塞を起こした細胞周辺も同様に低酸素環境になり、この低酸素ストレス応答が疾患の重篤化などに深く関与することも報告され、新しい創薬ターゲットとしてハイポキシアが注目されている。

光不斉合成化学

アミノ酸のD体、L体で知られる右手型、左手型の関係にあるキラル化合物を作り分ける不斉合成を、光化学的アプローチにより達成しようとする新しい方法論。キラル化合物は、化学的性質は全く同じなのに、L-グルタミン酸は旨味成分なのにD-グルタミン酸は苦いように、人体への効果が全く異なり、薬をはじめ多くの分野でその需要が高まり、不斉合成は最も重要な化学分野のひとつである。クリーンな光を用いる光不斉合成は地球環境に優しい合成法として注目されているが、中間体の短い寿命や弱い相互作用のため、実用的な合成法とは成り得ていなかった。和田研究室ではタンパク質などを利用した超分子不斉光反応を提案し、ほぼ100%の作り分けに成功するなど、世界のトップリーダーとして研究を推進している。

ファージディスプレイ

抗体は、生体における防御機構である免疫系の中心的役割を担う分子のひとつであり、生体に侵入した全ての抗原に対して結合できる10の10乗を超える耐用性を有していると考えられている。この多様性を利用して熱的化学反应の選択性の向上のための触媒として用いる研究が多数報告されている。標的抗体をマウスに注射し、マウスの免疫系を利用して抗体を合成し、回収・利用する方法が主流であったが、動物実験を避ける意味からも多様な抗体を発見するよう工夫したウイルスのひとつであるファージを利用し、標的抗体に結合する抗体を効率よく合成する方法。なお、光不斉反応に抗体を用いた例は報告されておらず、世界で初めての系である。



FOREFRONT REVIEW

単一分子を見る。単一分子を操作する。米田研究室は、単一分子から広がる新しいスピントロニクスの世界を追求しています。単一分子の構造設計図を作りだすとともに、それを組織化することにより、新たな機能を創出していくことを目指しています。



スピントロニクスへ向けた 単一分子のスピンの検出と操作

米田研究室がこだわるのは「分子一個」です。分子一個を計測・操作できることによって、新しい素子として打ち出すことができると考えます。

「分子一個」を計測する装置は走査型プローブ顕微鏡です。走査型プローブ顕微鏡を中心とした装置開発を通じて、ナノ領域科学の基本となる計測技術や原子分子制御技術を開拓し、分子の特徴を生かした素子開発を行おうとしています。

特に近年、量子コンピューターやスピントロニクスへの応用から単一スピン検出が求められており、米田研究室は単一スピンの検出手法の開発と、分子の特徴を生かした用いた分子スピントロニクス素子の開発を進めています。

単一スピン検出手法として、孤立スピンと伝導電子が形成する近藤状態を測定する方法を用いて、単一分子磁石のスピンを検知しました。

この近藤状態は金属イオンではなく、有機リガンドから生じていることを示し、それを利用して分子をSTM探針で回転させることでスピンのオン・オフが可能であることを示しました。

また局在したスピンの磁場中で歳差運動を行うことを利用し、その周期に同期したトンネル電流の変化を周波数分解することでスピンを検知する手法、ESR-STMを開発し、シリコン酸化膜中のスピンの検出に成功しています。

多元物質科学研究所
走査プローブ計測技術研究分野 教授

米田 忠弘

KOMEDA, Tadahiro

1960年奈良県生まれ。1984年京都大学理学部卒業、物理および化学専攻、1986年京都大学理学系修士課程化学専攻修了、1989年京都大学理学系博士課程化学専攻修了、理学博士。1989年4月～1991年3月アメリカ合衆国ミネソタ州立大学ポスドク研究員 Prof. John H Weaver、1991年4月～1998年4月テキサスインスツルメンツ筑波研究開発センター 研究員、1998年5月～2003年3月理化学研究所、表面化学研究室(主任 川合真紀)、2003年4月東北大学多元物質科学研究所教授、現在に至る。所属学会／日本表面科学会、日本物理学会、アメリカ化学会。

<http://cfd-rism-imram.tagen.tohoku.ac.jp/~sfcm/index-j.html>

<研究テーマ>

- 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

単一分子の電気特性を見て 新たな分子機能を創出する

分子の特長を生かせる 分子スケール材料開発へ

「たった1モル(0.06cc)の水に含まれる水分子の数はどれくらいだと思いますか。なんと、1000km四方の砂漠にある1mmの砂粒の数と同じなんです。少量の物質にも分子はいかに多く存在するか分かっていただけだと思います」。

この小さな一分子に対して米田研究室ではどのようにアプローチしようとしているのでしょうか。「分子を計測する際、従来までは、ある一定の量の分子を平均して計っていました。純粋に単一分子素子での化学分析は不可能でした。これに対し



て我々の研究室はドラスティックに分子一個で計測することを究極の目的にしています」。

米田研究室が追求する単一分子。従来までは分子と電気は関わりないものと考えられていましたが、現在では一分子は発光素子として新しい素子開発に結びつくと期待されています。

「ナノテクノロジー関連分野では、演算や記憶を行う基本単位である素子を分子単位で作製することを目指しています。また、有機分子や生体分子の電子材料への応用が重要な研究課題として位置づけられています。この両者の成果を組み合

わせた特徴的な素子として単一分子素子が注目されています」。

米田研究室では、ドラスティックに分子一個の構造や電導特性などを計測することを目指しています。この単一分子の構造解明・電導特性解明をもとに、分子の特徴を生かした新しい素子開発に結びつけたと考えています。



従来までは難しかった単一分子の電気伝導度の計測。分子同士を直接に橋架けた素子の作製が可能となったことにより、単一分子の特性測定が可能になりました。

このため、分子の特長を生かせる分子スケールの材料開発が不可欠になっています。新しい素子開発にする可能性を切り拓くために、米田研究室では、「分子ナノシステム」というものを追求しています。分子ナノシステムとは、電極に挟まれた単一分子のシステム。単一分子の電気特性を計ることを可能にし、それをもとに、単一分子の構造設計図を作成するとともに分子をネットワーク化し、新たな機能を創出していくことを目指しています。様々なグループとの共同研究により、ナノテクノロジー技術の進化を加速させています。

分子一個を見る顕微鏡 走査トンネル顕微鏡

米田研究室が研究を進める単一分子そのものの電気伝導度計測。これは、微細加工技術の進歩により小さい分子同士に橋架けすることができる1nm程度の隙間を持った電極が開発されたことによって実現しています。単一分子素子を用いたその特性測定では、従来の多数の分子で作られた分子素子とは全く異なる興味

うどんが好きだったのに一瞬で忘れさせた、東北のそばの素晴らしさ

生まれは奈良なんです。清水谷というところで、坂上田村麻呂が出た場所です。東北に来て「アテルイを良く連れていったな」と同僚の先生に言われたことがありますね。

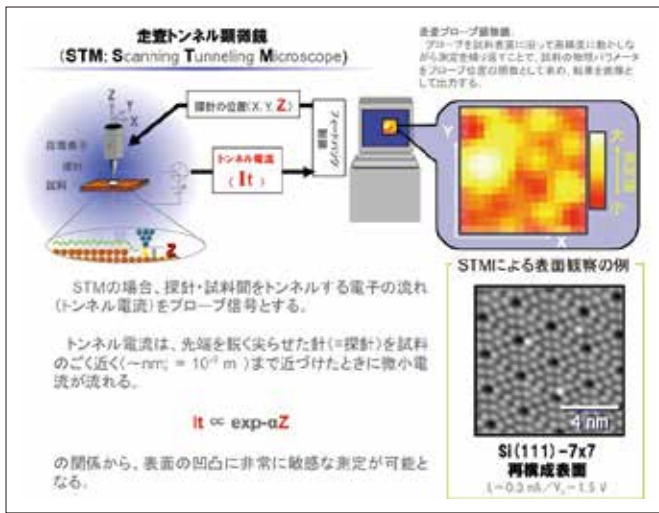
東北に来て感動したものという「そば」です。関西ではあんなにうどんが好きだったのに一瞬で忘れてしまいましたね。好きなのは田舎そばですね。東北の風土が感じられて、やみつきになります。

肉そばを冷たくして食べるという不思議な食べ物がありますが、関西にはなかったですね。味もそばのコシも、とても気に入っています。

お伊勢参りの定番、黒く濃厚なつゆを太い麺に絡めて食べる伊勢うどんも好きでしたが、今はすっかりそば派です。



MY FAVORITE



プローブを試料表面に沿って動かしながら測定を繰り返し、画像として出力するという走査トンネル顕微鏡の仕組み。分子の特定部位の伸縮、角度のはさみ振動などの分子振動の情報を得ることができるようになっています。

分析を実現するために注目したのが非弾性トンネル分光(IETS)です」。

分子振動の情報は既に光学スペクトルを

用いた優れたデータベースがありますが、IETSを用いた測定についても同様にデータベースが構築できれば、単一の分子についての IETS情報から、電極と分子の接合作製過程で分子が破壊されていないかなどの情報について適否判断・修正が可能であり、総合的な電極評価などに役立つと期待されています。

STMの空間分解能を原子・分子操作に用いる

STMのもつ高い空間分解能は、「観察する」だけでなく表面の原子・分子を選択して「動かす」ことも可能にしてくれます。

「STMの探針により、試料間での分子のやり取りをしたり、分子に働く力で押ししたり、引いたり、さらに分子自身の振動を励起させることによって、主に固体表面の"個々の原子や分子"を対象として、場所を移動させたり、加工したり、化学反応を制御することができます」。

STMによる原子・分子操作では、逆に高い電圧や、大きなトンネル電流によって、試料表面の状態を意識的に変化させることができます。ピエゾ素子(電圧を付加することにより伸び縮みする素子)を用いて、深針の位置を高精度で制御できるため、対象とする原子・分子を選択的に抜き取ったり、場所を移動させたり、極限レベルでの操作が実現できます。

STMは「観察する」だけでなく、探針により原子・分子を選択的に抜き取ったり、場所を移動させたり、極限レベルでの操作が可能です。この原子・分子操作により、さらに分子レベルの素子開発の可能性が広がります。

TERM INFORMATION

走査トンネル顕微鏡

先端が鋭い金属の探針を導電性のある試料に近づけ、両者に数V(ボルト)の電圧差を設ける場合、その間の距離が1nm(10億分の1m)以下になった時にトンネル電流が生じる。この電流は探針-試料間の距離に敏感であり、探針を走査することで原子分解能を持った顕微鏡像を得ることができる。トンネル電流は本質的に局所的で、その広がりには0.3nm程度しかない。

トンネル電流

2つの金属が1nmまで接近すると、量子効果によってあたかも壁をすり抜けるように電子が、1つの塊から別の塊へ流れていく。この効果をトンネル効果と呼び、電子の波動性を示す、量子的な現象であるとともに、江崎ダイオードなどによって実用にも役立てられている。その現象を顕微鏡に応用したものがトンネル顕微鏡であり、非常に接近した探針が表面の凹凸を原子レベルで検知することから、原子分解能を持った数少ない顕微鏡として広く用いられている。

分子振動

分子の特定の部位の結合距離が伸縮したり、結合のはさみ角度が振動したりする現象。振動分光法は分子の同定には欠かせない手法。赤外光の吸収や可視光のラマン散乱を利用する光を用いた手法のほかに、電子を照射し振動励起で損失するエネルギーを検知する電子エネルギー損失分光(EELS)などが一般的。しかし、いずれの手法も少なくとも数億個の分子の集合で測定しない限り、強度が不十分で有意義な信号が得られ無い。

素子

演算や記憶を行う基本単位。次の世代の素子ではボトムアップ方式で自己組織化的に構造が形成されることに注目が集まり、有機分子を電子材料として用いることが考えられています。単一の分子をもちいることで分子固有の性質が明瞭に現れ、多くの新規の機能を持った動作が報告されています。

非弾性トンネル分光

トンネル現象の最中に他の現象が引き起こされることも可能。たとえば2つの電極の間に分子が挟まれていて、2つの電極の間を電子がトンネルする場合、分子の振動が励起されることなどが考えられる。その場合、トンネルしてくる電子のエネルギーは引き起こされた振動モードのエネルギー分だけ小さくなる。これを非弾性トンネル過程とよび、そこから引き起こされた振動モードを同定し分子の化学分析に使用する試みがなされている。

ピエゾ素子

電界がかかると伸び縮みする素子。多くはペロブスカイト酸化物を用いている。STM装置の中心素子。



分子の単一スピンを最小の磁石として活用するという発想。より大容量で熱を発生しない新しいカタチの情報処理を実現する上で可能性豊かな技術であると期待されています。



単分子磁石でオン・オフ成功 分子を用いた脳型情報処理へ

単分子を操作できることによって 生まれる新しい世界

単分子を操作できることによってどんな活用が考えられるのでしょうか？ ひとつには分子を磁石にすることです。

「磁石は日常的になじみの深い材料で、身近なところというと磁気ディスクなどの情報記録媒体として用いられています。この磁気記憶媒体などは技術の進歩に伴って縮小化の方向に進んでいます。その磁気ディスクの集積化が進行にともない、従来のFeやCoなどの古典磁石（バルク磁石）

に代わり、1つの分子が磁石として働く単一分子磁石が注目されているわけです」。

従来までのバルク磁石と、分子による磁石の違いは何でしょうか。バルク磁石は、スピンの3次元・強磁性的に相互作用することで磁石の性質が現れます。それに対して、単一分子磁石は機構がまったく異なり、1個のクラスタ分子や1本の鎖が磁石のように振る舞うことで磁石の性質を生み出します。

「単分子単位でのスピンによる磁石は、次世代技術として開発が進められている

分子エレクトロニクスに取り入れられ、分子スピントロニクスとして発展していくことが期待されています。しかし、これらの研究は始まったばかりで、単分子単位でのスピンの操作の

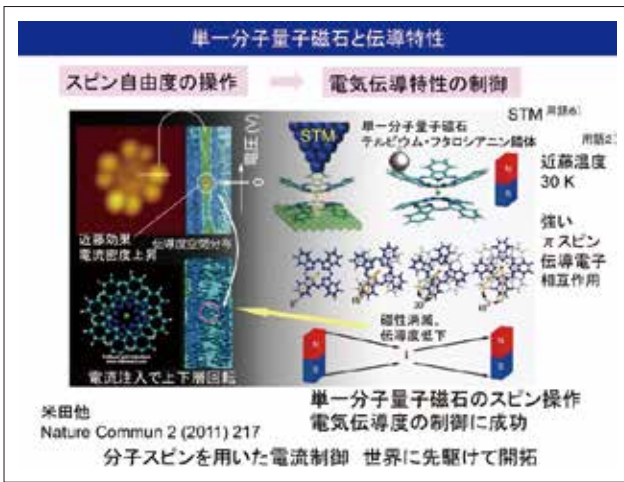
米田研究室では、従来の磁石の制御方法とは異なる分子を配位子の相対角度を回転させることで、磁石がオンの状態からオフの状態へ操作可能であることを突き止めています。

可能性の実証がなされていなかったほか、単一スピンの操作には高い空間分解能が求められているにもかかわらず、従来の手法では必要な空間分解能は得られていませんでした。そこで、新たな磁石の制御方法の開発が求められていました」。

単分子磁石を用いて、単分子の単位で 磁石をオン・オフすることに成功

単分子単位のスピンを制御することにより、単一分子磁石を実現する。この理想を目指し、米田研究室が注目し研究を進めているのが、テルビウム・フタロシアニン錯体分子です。中央のテルビウム金属原子とフタロシアニン配位子から構成されていて、この構造を活かし磁石としての働きを発現することを目指しています。

「フタロシアニン配位子にはπ軌道に電子が1つだけ入っている不対電子があり、この安定なラジカル状態から磁石の性質が生じています。磁石最小単位である単一のスピンの検出は、現在でも開発競争が続けられている難しい計測の1つですが、この実験では分子にスピンの存在すること、すなわち磁石の状態となっていることを『近藤状態』があるかどうかで検知



東北の温泉にすっかりはまりました。毎週のように温泉旅をしています

関西から来たのですが、東北の温泉の素晴らしさに感動しましたね。関西の方だと温泉は気合いが入った一日旅になってしまいますが、こちらだと気軽に近場の温泉に日帰りで行けるのでいいです。時間があれば毎週のように、蔵王のあたりの日帰り入浴に出かけています。

東北の温泉は泉質がいいという印象です。例えば、鳴子温泉のうなぎ湯なんて、ぬるぬるとろりとした肌触りがいいですね。また、いろいろな種類があるので毎週行っても飽きないですね。数えてみると年間50回ほど回っている計算になります。



単一分子のスピンを自由に操作することにより、電気伝導度の制御に成功。量子コンピューターへの可能性を拓くべく、日夜研究を進めています。



します。近藤状態とは、孤立した上向きスピンの対し下向きスピンの電子が集まって

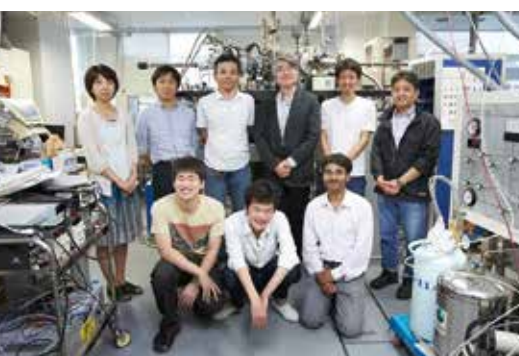
いる状態で、高い電子状態密度を示します。この近藤状態を検出して、分子に存在する孤立スピンを計測することが可能になります。

この近藤状態は金属イオンではなく、有機リガンドから生じていることを示し、それを利用して分子をSTM探針で回転させることでスピンのオン・オフが可能であることを示しました。

「この分子は平面型のフタロシアニン配位子(Pc)2枚が互に向き合うように重なった構造を示していますが、今回、これに電流を流して向かい合う2枚のPcをくると回転させるという手法を開発し、2枚のPcの相対角度を制御することで分子磁石をオン・オフさせることに成功しています」。

配位子を回転させる前($\theta=45^\circ$)では明瞭な近藤状態が観測されましたが、配位子を回転させた後($\theta=30^\circ$)では近藤状態は出現しませんでした。これは電流で分子の配位子の相対角度を回転させることで、磁石がオンの状態からオフの状態へ操作可能であることを示しています。

この研究では単分子単位で分子磁石をオン・オフさせることが可能なことを示し、究極の高密度磁気記録への応用が期待されます。分子スピンをを用いた電流制御。世界に先駆けて開拓していることになり



分子を用いた脳型情報処理を目指して

現在のコンピューター以上の処理速度が発揮されるように研究・開発が進められている量子コンピューティング。米田研究室では、この量子力学の原理を応用した量子コンピューターは、最終的には分子に行くだろうという予想しています。

「私たちの脳は実に低い電圧で計算しています。速くてものごく発熱の少ないのが特徴です。この脳のシステムに少しでも近づけないものかと思っています。そのためには分子が必要と考えて研究を進めています」。

米田研究室では、科学技術庁の「戦略的基礎研究」CRESTの一つである山下プロジェクトの「分子技術による単分子量子磁石を用いた量子分子スピントロニクスの創成」にも参加しています。このプロジェクトでは、分子技術を最大限に活用し、SMMの磁気特性・量子トンネル効果を利用したスピンドバイスを作成することを目指しています。従来のシリコンテクノロジーの限界を超えた究極のグリーンITデバイスの根幹となる可能性を秘めた独創的かつ挑戦的な研究です。

「今後、分子研究の将来は様々に展開することが可能であると考えています。有機トランジスタや有機発光素子、薬、バイオマテリアル・バイオセンサー、有機太陽電池、センサー・素子・触媒など多彩な可能性を秘めています。そのためにも、単一分子の組織化と新機能創成を目指す新しい分子アーキテクニクスを早く確立していきたいと考えています」。

量子力学の原理を応用した量子コンピューターなど、今後、分子研究は様々に展開することが可能であると考えられます。米田研究室では、単一分子の組織化と新機能創成を目指す新しい分子アーキテクニクスを確立していきたいと考えています。

TERM INFORMATION

バルク磁石

金属強磁性体である鉄やニッケル。磁石の基本単位のスピンの協調して同じ方向を向くことでエネルギー的に安定な構造を作り、スピンの揃った状態、すなわち強磁性状態を作る。これとは異なり、単分子磁石の場合、基本単位のスピンの、いったん有る方向を向いた場合に、逆の方向にスピンが向くようになるまでの時間(緩和時間と呼ばれる)が他の分子に比べて非常に長いことが特徴である。協調現象ではなく単一分子の性質である。

クラスタ分子

分子の集合体。最近分子設計を行うことで、ボトムアップ型の意味のある構造を形成することに注目が集まる。

分子スピントロニクス

現在、情報処理に用いられるエレクトロニクスは電荷のあるなしを情報の「0/1」に置き換えて処理していたが、スピンエレクトロニクスはその処理に電子の持つスピン情報を積極的に取り込んでいくとするものである。その材料として分子を用いた場合、従来の半導体や金属といった無機物にはない優れた性質が議論されている。

近藤状態

孤立した上向きスピンがあるとその周辺に下向きスピンの電子が集まって、上向きスピンを打ち消そうと集合している状態で、この状態が形成されると狭いエネルギー領域に高い電子状態密度が作られる。

フタロシアニン配位子

錯体は、金属と非金属の原子集合が結合した構造を持つ化合物。ここで非金属原子集合を配位子と呼ぶ。配位子は、ごく小さい原子の集合の場合と、複雑な構造を持つ有機分子の場合の両方が考えられる。本研究では化学では良く知られる炭素32個、水素16個、窒素8個の計56個の原子からなるフタロシアニン分子が配位子となっている。

分子アーキテクニクス

新しい分子素子構築に向けた研究領域。「分子アーキテクト」(分子建築士)として、「設計」と「ものづくり」、柱(分子)を土台(表面)のどの位置に、どのような様式で接続し、柱と梁をどのように組み合わせるかを緻密に設計し、組織体を作り上げようとする。

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	
ナカツギ フミ 永次 史 生命機能分子合成化学研究分野	効率的遺伝子発現制御を目指した新規架橋反応の開発 遺伝子選択的的化学修飾を目指した低分子プローブの開発 遺伝子高次構造の制御を目指した方法論の開発 新規核酸医薬開発に向けた方法論の開発
ワダ タケヒコ 和田 健彦 生命機能制御物質化学研究分野	がん細胞特異的核酸医薬の開発 生体高分子を不斉反応場とする環境調和型光不斉光化学反応反応系の創製 高感度・高時間分解能を有する円二色(CD)スペクトル測定装置の開発 酵素活性などの細胞内in situ&in vivo検出系構築に向けた分割型蛍光タンパク質システムの開発
イナバ ケンジ 稲葉 謙次 生体分子構造研究分野	細胞におけるタンパク質品質管理機構の分子基盤の解明 タンパク質の高次構造形成に関わるジスルフィド結合形成酵素群のX線結晶構造解析 小胞体に張り巡らされたレドックスネットワークの網羅的解析 細胞内カルシウム恒常性維持機構の構造基盤の確立
タカハシ サトシ 高橋 聡 生命分子ダイナミクス研究分野	タンパク質フォールディング機構の解明 人工タンパク質の新デザイン戦略の開発 がん抑制タンパク質p53のDNA認識機構の解明
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	クラスター法を用いたFe基侵入型合金における原子間相互作用の理論的研究 Fe基磁性材料の電子論的探索法の開発と試作 金属固溶体や液体、粒界、積層欠陥などの熱力学物性の電子論計算 不純物を効率的に除去できるプロセスを用いた高純度金属の作製
スズキ シゲル 鈴木 茂 機能材料微細制御研究分野	多様な水酸化鉄と酸化鉄の構造解析と制御 酸化物や金属・合金のナノ粒子の合成と評価 形状記憶効果などの特異な変形挙動を示す各種合金の構造評価 放射光を用いた機能性化合物中の金属の酸化還元挙動の解析
サトウ タツ 佐藤 卓 スピン量子物性研究分野	遍歴電子系、特に鉄系超伝導体における反強磁性と超伝導の研究 低次元フラストレート量子スピン系における巨視的量子現象の研究 トポロジカルスピンテクスチャーのスローダイナミクス研究 中性子非弾性散乱分光法および解析法の開発
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	単一磁性ナノ粒子の物性・スピンダイナミクス 巨大磁気異方性材料の設計・開発 新規超高密度磁性メモリー技術の提案・開発 永久磁石の保磁力決定機構
ヨコヤマ チアキ 横山 千昭 超臨界流体・反応研究分野	アモナーナル法による窒化物半導体結晶の作製 超臨界アンモニア中への窒化物半導体の溶解度 イオン液体と超臨界二酸化炭素を用いた化学プロセスの開発 糖類からの有用化学原料製造プロセスの開発
フクヤマ ヒロユキ 福山 博之 高温材料物理化学研究分野	高温化学反応場における機能材料プロセスの創製 窒化物半導体結晶成長の物理化学とプロセス創製 高温融体の高精度熱物性計測システムの開発と高温融体の科学 強磁場形状記憶合金の薄膜化とマイクロアクチュエータの開発
プロセスシステム工学研究部門	
キタムラ シンヤ 北村 信也 基盤素材プロセス研究分野	製鋼スラグを利用した津波で被災した田園地帯の復興 反応界面積の極大化による超高速精錬プロセスの追求 鉄鋼副産物からの有価金属元素の高純度分離回収
カノウ ジュンヤ 加納 純也 機能性粉体プロセス研究分野	コンピュータシミュレーションによる粉体プロセスの最適化 メカノケミカル法による機能性粉体の創成と希少金属の回収 バイオマスおよび樹脂廃棄物からの水素製造プロセスの創成
アヅリ タダフミ 阿尻 雅文 超臨界ナノ工学研究分野	超臨界ナノ粒子連続合成プロセスの開発 超ハイブリッドナノ粒子系の科学 超臨界法による結晶面制御・メソポーラスナノ触媒の創製 数学との連携による構造化・機能性ナノ材料の設計基盤の確立
サトウ シュンイチ 佐藤 俊一 光物質科学研究分野	高強度光の場における物質変換・ナノ合金粒子合成プロセス 新奇レーザーナノプロセス開発 ベクトルビームの開発と新分野への応用技術開発 ベクトルレーザービームを用いたナノイメージング
ムラマツ アツシ 村松 淳司 ハイブリッドナノ粒子研究分野	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

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(つづき)	
サトウ ノブアキ 佐藤 修彰 エネルギーシステム研究分野	アクチノイド化合物の固体および溶液化学の研究 核燃料サイクルにおけるフロントおよびバックエンド化学の研究 原発事故に関わる環境修復および放射性廃棄物の処理・処分に関する研究 放射性物質を含むレアメタル資源のグリーンプロセス開発

計測部門	
ウエダ キヨシ 上田 潔 電子分子動力学研究分野	光電子回折を用いた分子の自己ダイナミックイメージング 分子集合体における分子間電子緩和ダイナミクス FELパルスと物質との相互作用 X線FELパルスを用いたダイナミックイメージング
タカハシ マサヒコ 高橋 正彦 量子電子科学研究分野	時間分解電子運動量分光の開発による化学反応の電子レベルでの可視化 分子座標系電子運動量分光による分子軌道の運動量空間イメージング 多次元同時計測分光の開発による電子・分子衝突の立体ダイナミクスの研究
モモセ アツシ 百生 敦 量子ビーム計測研究分野	X線干渉光学に基づく高感度計測技術研究 X線・中性子位相イメージング技術の開拓 実用化高度X線位相撮像装置の開発
キムラ ヒロユキ 木村 宏之 構造材料物性研究分野	多重極限下(高圧・極低温・強磁場・高電場)におけるX線・中性子回折手法の開発 強誘電体・磁性体・有機伝導体・高温超伝導体などの新奇機能性物質の構造物性研究 超精密X線単結晶構造解析による遷移金属酸化物の価電子の可視化 中性子回折装置とその応用法の開発(JAEA東海研究用原子炉にあるFONDERと2D-PSD)
クリハラ カズエ 栗原 和枝 ナノ界面化学研究分野	表面力測定による分子間・表面間の相互作用の研究 固-液界面、閉じ込め空間の液体の研究 ナノトライボロジー 電気化学表面力装置による電気化学反応の研究
タカクワ ユウジ 高桑 雄二 表面物理プロセス研究分野	リアルタイム光電子分光による表面反応キネティクスの研究 ストロークカメラ反射高速電子回折による表面構造ダイナミクスの研究 光電子制御プラズマによるナノ炭素材料合成プロセスの開発 CMOSゲートスタックの極薄誘電体膜形成機構の解明
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	(Al,In,Ga)Nおよび(Mg,Zn)O系ワイドバンドギャップ半導体を用い新規なコヒーレント光源の研究 フェムト秒レーザおよびフェムト秒電子線を用いた半導体量子ナノ構造の時間空間分解スペクトロスコーピー 有機金属化学気相エピタキシーおよび分子線エピタキシーによる量子 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ピタキシーと機能性酸化物薄膜形成

サステナブル理工学研究センター	
ホンマ イタル 本間 格 エネルギーデバイス化学研究分野	次世代リチウムイオン電池・高容量キャパシタ グラフェン量産化技術 太陽電池化合物半導体薄膜の安価大面積プロセス開発 ナノテクノロジーの資源エネルギー技術への応用技術開発
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	固体酸化物燃料電池/リチウムイオン二次電池の高性能化・高信頼性化 電気化学エネルギー変換デバイス・材料評価のための高度その場分析技術の開発 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
カワムラ ジュンイチ 河村 純一 固体イオン物理研究部門	核磁気共鳴法による革新電池の高度解析技術開発 リチウムイオン電池のin situ劣化診断技術の開発 固体電解質を用いた全固体薄膜電池の研究 超イオン伝導体・ガラス・過冷却液体のイオンダイナミクス
ノガミ ヒロシ 埜上 洋 環境適合素材プロセス研究分野	素材製造プロセスの多相反応シミュレーション技術 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膜制御技術開発 高温混相流動系内の物質の変形と相変化
シバタ ヒロユキ 柴田 浩幸 材料分離プロセス研究分野	溶融ケイ酸塩の熱物性と構造 Fe基合金における包晶反応・変態の速度論 レアメタルのリサイクルに関わる溶融塩の構造と物性 難燃性マグネシウム合金空気電池を用いた非常用電源開発
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	鉱物資源、二次原料ならびに製錬副産物の資源化処理・製錬技術の開発 砒素の安定固定化に向けたスロコライト結晶の生成機構の解明と合成プロセスの構築 銅スラグからのマグネタイト析出と分離による鉄源化プロセス 高貴金属・不純物含有銅アノードの電解精製技術の開発

研究室(教授)/研究分野	主な研究テーマ
先端計測開発センター	
テノウチ マサミ 寺内 正己 電子回折・分光計測研究分野	高分解能EELSによるナノマテリアルの光学物性評価法の開発と応用 分光収束電子回折法によるナノ領域の精密結晶構造解析法の開発と応用 ナノスケール軟X線発光分析システムの開発と材料研究への応用
シンドウ ダイスケ 進藤 大輔 電子線干渉計測研究分野	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・電子放出機構の解明 先端磁性材料、高温超伝導体、強相関電子系新物質の磁束イメージング
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	走査プローブ顕微鏡の高度化により、原子レベルで物質を化学分析できる顕微鏡の開発 電子が持つスピンをより明確に可視化し、操作する技術の開発 省エネルギーと量子コンピューター等の高度情報処理の両方から期待される、分子を材料とし、スピンを利用するエレクトロニクス=分子スピントロニクスの開発
タカタ マサキ 高田 昌樹 放射光ナノ構造可視化研究分野	物質機能を可視化する放射光構造科学の構築 X線回折データによる物質中の精密電子密度解析法の開発 マキシマムエントロピー法による静電ポテンシャル解析法の開発
高分子ハイブリッド材料研究開発センター	
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	高分子ハイブリッドナノ材料の開発 高分子ナノ材料の配向・配列構造制御技術の開発 高分子ハイブリッドナノ構造を利用した光電子機能発現 高分子ハイブリッドナノ材料からなるソフト系表面・界面の特性解明
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	新規有機ナノ結晶(フォトクロミックナノ結晶、錯体ナノ結晶、 dendroliマーナノ粒子など)の創出と物性評価 次世代フォトニック材料を目指した有機ハイブリッドナノ結晶の集積・階層化プロセスの構築と光機能発現 多孔質および逆オパール周期構造を有する高分子薄膜の作製と光・電子(誘電)特性 生理活性物質のナノ結晶粒子化とナノ純薬の創製
キョウタニ タカシ 京谷 隆 ハイブリッド炭素ナノ材料研究分野	均一なナノ空間を反応場としたハイブリッドナノカーボンの合成 ナノカーボン材料および複合材料を用いたエネルギー貯蔵デバイスの開発 炭素被覆メソポーラス構造体を用いたバイオ燃料電池の開発 実用炭素材料の超精密分析とそれによる性能向上
アキタガワ トモユキ 芥川 智行 ハイブリッド材料創製研究分野	多重機能を有する分子性材料の創成 有機強誘電体薄膜メモリーの開発 n型有機半導体材料の開発 有機-無機ハイブリッド型ポリオキサメタレート材料の材料化
ナカガワ マサル 中川 勝 光機能材料化学研究分野	ナノインプリントリソグラフィに資する光硬化性樹脂とレジスト材料の開発 孔版印刷塗布、エッチング、気相化学逐次堆積、アライメント、積層等のリソグラフィプロセスの開発 極限ナノ造形・構造物性の研究
ジンナイ ヒロシ 陣内 浩司 自己組織化高分子材料研究分野	相分離構造を有する高分子微粒子の自己組織化的作製と構造制御 結露した水滴を鑄型として形成されるハニカム状多孔質膜の作製技術開発 電子線トモグラフィによる高分子ハイブリッド材料の3次元観察と解析 ソフトマテリアルに対する電子顕微鏡観察技術の開発
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	多元系酸化物や窒化物の新規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 ナトリウムを用いた金属間化合物の低温合成と構造解析および特性評価
サイ アンボウ 蔡 安邦 金属機能設計研究分野	準結晶の創製と高比強度Mg材料への応用 準結晶の構造解析と数値モデル 金属組織制御による触媒の調製 価電子構造制御による新触媒の探索
サトウ ツギオ 佐藤 次雄 環境無機材料化学研究分野	ソルボサーマル反応によるセラミックスのバノスコピック形態制御と環境調和機能 可視光応答性光触媒の合成と環境浄化機能 無機紫外線・赤外線遮蔽剤の開発 革新的自動車排ガス浄化触媒の開発
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	白色LEDへの応用を目指した高機能な新規蛍光体の開発 太陽光エネルギー変換を目指した新規光触媒の構築 金属錯体をビルディングブロックとして利用した特異構造の金属酸化物および無機-有機ハイブリッドの創製

編集
後記

「TEAM TAGEN」。今年は10月10日(土)11日(日)の2日間、2年に一回の『片平まつり』(東北大学附置研究所センター一般公開)があり、多元研が世話部局となって、2年前より多くの東北大学附置研究所・センターが参加して行われます。その『片平まつり』をはじめ、産学連携イベントなど、多くのイベントで、多元研ブランド浸透を目指して「TEAM TAGEN」をスローガンに広報活動していきます。そんな中の第6弾で、これで42人の教授たちの素顔をお届けしました。1~5までの既刊のFOREFRONTを読み直しつつ、是非お目通しの上、ご意見、ご質問をお寄せください。

広報委員会

委員長 加納 純也
高橋 聡
米田 忠弘
雨澤 浩史
蟹江 澄志
篠田 弘造
矢代 航
丸岡 伸洋



■編集・発行

国立大学法人東北大学
多元物質科学研究所 広報委員会
〒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
2015年8月28日発行

取材を終えて

現在、どのように取材を進めているかご存知でしょうか？ まずは1時間くらい研究内容を取材。それが終わると先生方の人となりをお伝えする「OFF TIME」「MY FAVORITE」のコラムの取材となります。難しい専門用語がいっぱい出てくる研究の取材が終わって、ほっとした雰囲気の中で先生方の趣味などをお聞きしています。研究内容からとても想像もつかない(?)趣味やオフタイムをお持ちになっていて、ますます先生方の研究にも興味を持つことができます。先生方の表情も緩んで、違う一面を見せていただけるので、とても楽しい時間です。

聞くところでは、読者の皆さんからも、とても評判が良いらしいコラムコーナー。やはり、最先端の研究を支えているのも人。今後も先生方の人となり伝えていきたいと思っています。



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。

